UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC

CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

CAMILA ALVES CORRÊA

INFLUÊNCIA DA RAZÃO MOLAR E DE RESÍDUOS DE REVESTIMENTO MELAMÍNICO NA EMISSÃO DE FORMALDEÍDO E EFEITO NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS RECONSTITUÍDOS DE *Pinus* spp.

LAGES
2024

CAMILA ALVES CORRÊA

INFLUÊNCIA DA RAZÃO MOLAR E DE RESÍDUOS DE REVESTIMENTO MELAMÍNICO NA EMISSÃO DE FORMALDEÍDO E EFEITO NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS RECONSTITUÍDOS DE *Pinus* spp.

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Alexsandro Bayestorff da Cunha
Coorientadora: Profª. Dra. Polliana D'Angelo Rios

LAGES
2024

Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração

automática da Biblioteca Universitária Udesc,

com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Corrêa, Camila Alves
Influência da razão molar e de resíduos de revestimento melamínico na emissão de formaldeído e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis reconstituídos de Pinus spp. / Camila Alves Corrêa. -- 2024.
104 p.

Orientador: Alexsandro Bayestorff da Cunha
Coorientadora: Polliana D'Ângelo Rios
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2024.

1. MDF. 2. MDP. 3. composição dos adesivos. 4. melamina BP. I. Cunha, Alexsandro Bayestorff da. II. Rios, Polliana D'Ângelo . III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Titulo.

CAMILA ALVES CORRÊA

INFLUÊNCIA DA RAZÃO MOLAR E DE RESÍDUOS DE REVESTIMENTO MELAMÍNICO NA EMISSÃO DE FORMALDEÍDO E EFEITO NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PAINÉIS RECONSTITUÍDOS DE *Pinus* spp.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Banca examinadora:

Orientador: _____

Prof. Dr. Alexsandro Bayestorff, da Cunha

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro externo _____

Prof.ª Dra. Karina Soares Modes

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Membro externo: _____

Profª. Dra. Helena Cristina Vieira

Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Membro externo (suplente): _____

Profª. Dra. Rosilani Trianoski

Universidade Federal do Paraná - UFPR

Lages, 22 de fevereiro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe, Giseli da Silva Alves, pelo tempo dedicado a mim, pelo apoio constante, amor incondicional e incentivo. Ao meu namorado, Raphael Luigi Queiroz, expresso minha eterna gratidão por ter me acompanhado durante todo o processo de realização deste trabalho, demonstrando paciência, atenção e companheirismo inabalável.

Aos meus amigos, Ângela Silva dos Santos, Huga Jéssica Bento de Oliveira, Maísa Beatriz Koch Mattos e Samuel da Silva Santos, agradeço o apoio e pelos momentos de descontração dentro e fora do laboratório. Vocês foram fundamentais para me fazer acreditar em mim nos momentos difíceis. Um agradecimento especial, ao meu amigo Matheus Zanghelini Teixeira, pela parceria construída ao longo do mestrado, relação que levarei para vida toda.

Ao meu orientador, professor Alexsandro Bayestorff da Cunha, agradeço imensamente por sua disponibilidade constante em me ajudar e por sua contribuição significativa para o meu desenvolvimento profissional e pessoal. A minha coorientadora, professora Polliana D'Ângelo Rios, agradeço profundamente à disposição, incentivo e pelas palavras carinhosas e encorajadoras.

A banca examinadora, compostas pelas professoras Karina Soares Modes e Helena Cristina Vieira, agradeço a disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas valiosas contribuições fornecidas.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos que possibilitou a realização deste trabalho.

Agradeço a todos que contribuíram para este período importante da minha vida. Todos desempenharam papéis fundamentais, tornando essa jornada mais especial. Muito obrigada!

RESUMO

No âmbito da indústria de produtos de base florestal, o setor de painéis de madeira reconstituída, especialmente o de partículas e de fibras de média densidade (MDP e MDF) tem grande importância para a economia no Brasil, visto que o país está entre os 10 maiores produtores com tendência de crescimento nos últimos anos. Entretanto, este setor enfrenta desafios específicos, como a emissão de formaldeído em painéis e a produção de resíduos sólidos durante a etapa de revestimento. Portanto, existe a necessidade de abordar e superar estes desafios para tornar a indústria mais alinhada com os princípios sustentáveis. O estudo objetivou determinar a influência da razão molar do adesivo a base de resina ureia formaldeído (UF) e da incorporação de resíduos de revestimento melamínico na emissão de formaldeído e nas propriedades dos painéis de madeira de média densidade de *Pinu*s spp. Desta forma, a dissertação foi dividida em três capítulos: (i) compilação de informações acerca do tema estudado, tendo como referência, publicações consagradas nas pesquisas e artigos científicos publicados em periódicos; (ii) determinação da melhor razão molar do adesivo a base de resina UF para produção de painéis MDF, para tanto, foram utilizados 5 tratamentos caracterizados por cinco razões molares (0,9F:1U; 1F:1U; 1,1F:1U; 1,2F:1U e 1,3F:1U) e; (iii) determinação da viabilidade técnica da incorporação de resíduos de revestimento melamínico do processo de acabamento de painéis, como material de enchimento em painéis de fibras *oversize*, visando uma destinação correta para este resíduo. Nesta etapa foram utilizados quatro tratamentos com diferentes proporções de resíduo (0%, 3%, 6% e 9%). Os ensaios para determinação das propriedades físico-mecânicas, e da emissão de formaldeído, foram realizados conforme procedimentos descritos na NBR 15316 (ABNT, 2019). A norma NBR 14810 (ABNT, 2018) também foi utilizada para avaliação dos resultados no terceiro capítulo. Os resultados do segundo capítulo indicaram a resina UF de razão molar 1,1:1 como a mais adequada para a produção de painéis MDF, visto que proporcionou menor emissão de formaldeído sem prejuízo as propriedades físicas e mecânicas, sendo enquadrada na classe E1 pela NBR 15316 (ABNT, 2019). No terceiro capítulo, os resultados indicaram a viabilidade da incorporação de 9% de resíduo de revestimento melamínico na produção de painéis de fibras *oversize*. Esses painéis atenderam aos requisitos da NBR 14810 (ABNT, 2018) para todas as propriedades, com exceção do módulo de elasticidade (MOE) e da resistência à flexão estática (MOR).

Palavras-chave: MDF; MDP; composição dos adesivos; melamina BP.

ABSTRACT

Within the scope of the forest-based products industry, the sector of reconstituted wood panels, especially that of particles and medium-density fibers (MDP and MDF) is of great importance for the economy in Brazil, since the country is among the 10 largest producers with a growth trend in recent years. However, this sector faces specific challenges, such as the emission of formaldehyde in panels and the production of solid waste during the coating stage. Therefore, there is a need to address and overcome these challenges to make the industry more aligned with sustainable principles. The objective of this study was to determine the influence of the molar ratio of the urea formaldehyde (UF) resin-based adhesive and the incorporation of melamine coating residues on the formaldehyde emission and on the properties of the medium-density wood panels of Pinus spp. Thus, the dissertation was divided into three chapters: (i) compilation of information about the topic studied, having as reference, consecrated publications in research and scientific articles published in periodicals; (ii) determination of the best molar ratio of the UF resin-based adhesive for the production of MDF panels, for this purpose, 5 treatments characterized by five molar ratios (0.9F:1U; 1F:1U; 1,1F:1U; 1,2F:1U and 1,3F:1U) were used; (iii) determination of the technical feasibility of incorporating melamine coating residues from the panel finishing process, as filler material in oversize fiberboards, aiming at a correct destination for this waste. In this stage, four treatments were used with different proportions of residue (0%, 3%, 6% and 9%). The tests to determine the physical-mechanical properties, and the formaldehyde emission, were carried out according to the procedures described in NBR 15316 (ABNT, 2019). The NBR 14810 (ABNT, 2018) standard was also used to evaluate the results in the third chapter. The results of the second chapter indicated the UF resin with a molar ratio of 1.1:1 as the most suitable for the production of MDF panels, since it provided lower formaldehyde emission without harming the physical and mechanical properties, being classified in class E1 by NBR 15316 (ABNT, 2019). In the third chapter, the results indicated the feasibility of incorporating 9% of melamine coating residue in the production of oversize fiberboards. These panels met the requirements of NBR 14810 (ABNT, 2018) for all properties, with the exception of modulus of elasticity (MOE) and static flexural strength (MOR).

Keywords: MDF; MDP; composition of adhesives; melamine BP.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Normas internacionais para emissão de formaldeído em painéis reconstituídos. 20
Tabela 2- Dimensões e número de corpos de prova para cada ensaio. 45
Tabela 3- Valores médios das propriedades das resinas de diferentes razões molares. 47
Tabela 4- Valores médios das propriedades físicas dos painéis. 51
Tabela 5- Valores médios do perfil de densidade dos painéis. 53
Tabela 6- Valores médios de MOE e MOR à flexão estática e tração perpendicular. 54
Tabela 7- Valores médios de arrancamento de parafuso dos painéis. 56
Tabela 8 - Dimensões e número de corpos de prova para cada ensaio. 72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Primeira etapa da formação da Resina UF: Metilação. 16
Figura 2- Segunda etapa da formação da resina UF: Condensação 17
Figura 3- Determinação das propriedades das resinas..... 43
Figura 4- Produção dos painéis. 44
Figura 5- Perfil de densidade..... 45
Figura 6- Valores de emissão de formaldeído dos painéis. 49
Figura 7 – Produção dos painéis..... 71
Figura 8 – Ensaios tecnológicos. 72
Figura 9 - Perda de massa e DTG das fibras oversize de Pinus spp..... 74
Figura 10 - Perda de massa e DTG dos resíduos de revestimento melamínico BP..... 74
Figura 11- Valores de emissão de formaldeído dos painéis. 78
Figura 12 - Valores médios de densidade e razão de compactação dos painéis..... 79
Figura 13 – Valores médios de teor de umidade dos painéis. 81
Figura 14 - Valores médios de inchamento e absorção 24h dos painéis. 83
Figura 15 - Valores médios de MOR e MOE à flexão estática dos painéis. 85
Figura 16 – Valores médios de resistência à tração perpendicular..... 87

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA. 11
1.1 INTRODUÇÃO 11
1.2 OBJETIVOS 13
1.2.1 Objetivo geral 13
1.2.2 Objetivos específicos 13
1.3 REVISÃO DA LITERATURA 14
1.3.1 Painéis de madeira reconstituída 14
1.3.2 Necessidade de controle da emissão de formaldeído 15
1.3.3 Atuais alternativas para redução da emissão de formaldeído e problemáticas 21
1.3.4 Iniciativas inovadoras para redução da emissão de formaldeído 25
1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 29
2 CAPÍTULO II: EFEITO DA ALTERAÇÃO DA RAZÃO MOLAR NA EMISSÃO DE FORMALDEÍDO E NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS MDF 37
2.1 INTRODUÇÃO 39
2.2 MATERIAL E MÉTODOS 42
2.2.1 Matéria prima 42
2.2.2 Plano experimental 42
2.2.3 Caracterização do adesivo 42
2.2.4 Produção de painéis 43
2.2.5 Avaliação das propriedades tecnológicas 44
2.2.6 Análise estatística 45
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 47
2.3.1 Caracterização das resinas 47
2.3.2 Emissão de formaldeído dos painéis 49
2.3.3 Propriedades físicas dos painéis 50
2.3.4 Propriedades mecânicas dos painéis 54
2.4 CONCLUSÃO 58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 59

3 CAPÍTULO III: VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE REVESTIMENTO MELAMÍNICO EM PAINÉIS DE FIBRAS *OVERSIZE* 64
3.1 INTRODUÇÃO 66
3.2 MATERIAL E MÉTODOS 69
3.2.1 Matéria prima 69
3.2.2 Plano experimental 69
3.2.3 Caracterização térmica da matéria prima 70
3.2.4 Produção dos painéis 70
3.2.5 Avaliação das propriedades tecnológicas 71
3.2.6 Análise estatística 72
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 74
3.3.1 Caracterização térmica da matéria prima 74
3.3.2 Emissão de formaldeído dos painéis 77
3.3.3 Propriedades físicas e mecânicas dos painéis 79
3.4 CONCLUSÃO 89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 90

1 CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA.

1.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a economia nacional e mundial tem visto um avanço crescente na indústria de base florestal, especialmente no setor de painéis de madeira. No ano de 2022, o Brasil se destacou entre os 10 maiores produtores mundiais de painéis de madeira, ocupando a oitava posição, com uma produção de 8,2 milhões de metros cúbicos em 2021 (IBÁ, 2022). O crescimento de 15,7% e 13,1% nas indústrias de MDF e MDP, respectivamente, foi impulsionado pelo início da pandemia e o novo formato de trabalho, o *home office*, onde as pessoas buscaram itens que proporcionassem um ambiente de trabalho adequado dentro das suas casas (IBÁ, 2022).

O aumento na procura por painéis de madeira tem levado os clientes a buscar produtos com maior resistência mecânica, com menor inchamento em espessura quando exposto a umidade, e melhor qualidade de acabamento, à qual é obtida pela incorporação de filmes melamínicos com cores e texturas diversificadas. Além destas características, tem-se outras crescentes demandas, principalmente em nível de processo, como a redução das taxas de formaldeído nos adesivos e a reutilização de produtos sintéticos utilizados na fase final de produção.

O adesivo mais utilizado na indústria de painéis de madeira é a base de resina ureia formaldeído (UF), por apresentar várias vantagens como menor custo e cura rápida, além de proporcionar aos painéis, propriedades físicas e mecânicas satisfatórias em ambiente seco (Ayrilmis; Nemli, 2017). Entretanto, esta resina emite formaldeído ao longo da produção dos painéis e da vida útil, o qual é considerado cancerígeno pelos órgãos de saúde (IARC, 2006; INCA, 2022).

Visando ajustar a resina UF para atender os limites de emissão de formaldeído impostos pelas entidades reguladoras (NBR 15316, 2019; EN 13986, 2004; ANSI A208.1, 2002; CARB, 2009; e JIS A5908, 2003), estudos vêm sendo desenvolvidos trazendo a possibilidade de alterar a razão molar da resina, adicionar compostos naturais e sintéticos como sequestrantes de formaldeído e aplicar revestimentos.

Em nível industrial, o método mais utilizado para reduzir a emissão de formaldeído é a alteração da razão molar na formulação da resina UF. Resultados promissores foram obtidos em estudos que avaliaram a influência da razão molar na resina em diferentes amplitudes (Myers, 1984; Park; Kang; Park, 2006; Que *et al.*, 2007; Frackowiak *et al.*, 2011;

Zhang; Liu; Li, 2013; Keinert, 2021; Ayrilmis; Nemli, 2017). Estes estudos demonstraram que as razões molares que fornecem baixa emissão de formaldeído, reduzem a resistência à tração perpendicular e aumentam o inchamento em espessura, entretanto, estes problemas já foram superados com o emprego de catalisadores mais reativos, maior quantidade de resina e mudanças nos processos de fabricação de painéis, o que possibilitou a utilização de resinas com relação molar abaixo de 1,0:1 (Frackowiak *et al*., 2011).

Entretanto, no Brasil, além das resinas de baixa emissão, ainda é comum a comercialização e o uso de resinas de alta emissão de formaldeído, ou seja, com razão molar acima de 1,0:1. Assim, uma atualização da influência das formulações adesivas comerciais de resina UF na emissão de formaldeído e as consequências nas propriedades tecnológicas dos painéis torna-se importante.

Além desta questão, outra problemática para a indústria de painéis trata-se da produção de resíduos proveniente da etapa de revestimento, uma vez que a destinação correta dos resíduos é uma exigência da Política nacional de resíduos sólidos (Brasil, 2010), bem como de certificações internacionais baseadas na ISO 14001 (2015). Dentre os revestimentos, os papéis laminados impregnados com resina melamínica se destacam pela maior utilização e qualidade. Todavia, os excedentes são queimados em caldeira, o que não é o destino mais adequado devido a liberação de gases poluentes e a necessidade de limpeza periódica da caldeira; assim, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que busquem alternativas para correta destinação.

Cabe ressaltar que a aplicação de revestimentos reduz a liberação de formaldeído em painéis (Park *et al*., 2013), assim, a hipótese de que os resíduos de revestimento melaminico podem reduzir a emissão de formaldeído se incorporados no painel, deve ser testada. Alguns trabalhos mostram ser possível aplicar diferentes tipos de resíduo como material de enchimento em painéis (Milagres *et al.*, 2006; Santos *et al*., 2011; Weber; Iwakiri, 2015). À vista disso, e tendo em conta que os resíduos sólidos são uma das principais fontes de poluição e também um sinônimo de grande desperdício/gasto de recurso nas indústrias, pode ser uma alternativa a utilização dos resíduos de revestimento melamínico em outras aplicações, como incorporados juntamente com fibras e/ou partículas de madeira para produção de painéis reconstituídos.

Diante destas diferentes demandas do setor industrial de painéis de madeira reconstituída, o trabalho será desenvolvido em duas etapas, (i) identificação da razão molar da resina UF que proporcione aos painéis emissão de formaldeído dentro do limite para tipo E1 e propriedades tecnológicas de acordo com a NBR 15316 (ABNT, 2019), (ii) determinação da viabilidade de incorporação de resíduos de revestimento melamínico de baixa pressão em painéis reconstituídos, a partir do seu efeito sobre as propriedades dos painéis, visando uma

alternativa de destinação correta para este poluente bem como a redução da emissão de formaldeído dos painéis.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do presente estudo foi determinar a influência da razão molar e de resíduos de revestimento melamínico na emissão de formaldeído e avaliar os efeitos nas propriedades tecnológicas de painéis reconstituídos de *Pinus* spp.

1.2.2 Objetivos específicos

- Compilar informações acerca do tema estudado, principalmente em relação as abordagens para redução da emissão de formaldeído em painéis de madeira.
- Avaliar o efeito da alteração da razão molar na emissão de formaldeído e as consequências nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis.
- Avaliar a viabilidade da incorporação de resíduo de revestimento melamínico em painéis reconstituídos a partir do seu efeito na emissão de formaldeído e nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura está dividida em quatro sub tópicos, os quais abordam: (i) conceitos e considerações sobre os painéis reconstituídos, bem como um breve panorama do setor; (ii) ponderações a respeito da resina UF, sobre a necessidade de controle da emissão de formaldeído e as normas pertinentes; (iii) alternativas atuais para redução da emissão em painéis e suas problemáticas e; (iv) iniciativas inovadoras e potenciais.

1.3.1 Painéis de madeira reconstituída

Os painéis de madeira reconstituída são produzidos a partir da aglutinação de partículas ou fibras de madeira com adesivos sintéticos, os quais são consolidados sob a ação de pressão e calor. Os painéis particulados são formados por partículas de madeira obtidas através da picagem da madeira em cavacos e, subsequente passagem em moinhos, enquanto os painéis fibrosos são constituídos por fibras obtidas por meio de um processo maior de desagregação, que envolve o cozimento dos cavacos e posterior ação mecânica (Iwakiri, 2005).

Os principais tipos de painéis de madeira particulados são o MDP (*Medium Density Particleboard*) e o OSB (*Oriented Strand Board*), já nos fibrosos, têm-se o MDF (*Medium Density Fiberboard*) e o HDF (*Hard Density Fiberboard*), além dos correlatos como o SDF (*Super Density Fiberboard*). Dentre eles destacam-se economicamente no mercado nacional e internacional o MDP e MDF, pois são os mais utilizados pela indústria de móveis e pela construção civil (Freire *et al*., 2015).

Os painéis de madeira reconstituída quando comparados aos painéis compensados ou à madeira sólida, apresentam diversas vantagens, como a eliminação dos efeitos da anisotropia, a eliminação dos fatores redutores de resistência como nós, madeira juvenil, a inclinação de grã, a menor exigência quanto à matéria prima, o menor custo de produção devido à qualidade da matéria prima e mão de obra e a possibilidade de adequação e controle das propriedades físicas e mecânicas do produto através do acompanhamento dos parâmetros do processo (Trianoski, 2010).

De acordo com Biazus, Hora e Leite (2013), os painéis de madeira reconstituída passaram a ter seu consumo amplamente difundido no Brasil a partir da década de 1990. Desde então, os investimentos em modernização das linhas de produção trouxeram diversos ganhos em termos de qualidade final do produto e financeiros. Um dos principais avanços tecnológicos foi a substituição das prensas de pratos pelas prensas contínuas, que permitiram a obtenção de

menores custos de produção, pois consomem menos matéria-prima, apresentam menor índice de perdas no processo de lixamento e menor número de colaboradores, além de consumirem menos energia (Biazus; Hora; Leite, 2013). Um maior controle do processo produtivo também foi obtido através da evolução da tecnologia utilizada, como por exemplo no emprego de controladores de umidade, detectores de metais, medidores de espessura, entre outros. Atualmente, o Brasil possui um número significativo de empresas produtoras de painéis reconstituídos, todas reconhecidas pela construção de modernos parques industriais (IBÁ, 2022).

De acordo com Vieira, Brito e Gonçalves (2012), o consumo de madeira serrada vem diminuindo progressivamente, ao passo que o consumo de painéis possui uma tendência crescente. Os principais motivos para esta redução estão relacionados a escassez de madeira de grandes diâmetros economicamente viáveis para exploração, o acelerado desenvolvimento tecnológico na produção de painéis à base de madeira, tornando-os mais baratos e competitivos, e a aceitação do mercado consumidor na substituição (Vieira; Brito; Gonçalves, 2012).

Um dos principais fatores que impulsionou o avanço das indústrias de painéis de madeira reconstituída, foi o crescimento da indústria moveleira, em função dos investimentos dos consumidores na adequação dos itens domésticos para possibilitar um ambiente de trabalho em *home office* mais apropriado, confortável e agradável (IBA, 2022). Em 2020, as vendas totais de painéis MDF e MDP atingiram 7,1 milhões de metros cúbicos, com 4,3 milhões de metros cúbicos referentes ao primeiro produto e 2,9 milhões de metros cúbicos referentes ao segundo (IBA, 2021). Em 2021, registrou-se um crescimento de 14,6%, onde o setor de painéis MDF vendeu 4,9 milhões de metros cúbicos e o de MDP 3,2 milhões de metros cúbicos (IBA, 2022).

Conforme o descrito por Vieira, Brito e Gonçalves (2012), a indústria de painéis de madeira é de suma importância para a economia brasileira, sobretudo pelo desenvolvimento de novas tecnologias associado à geração de renda e emprego nos setores moveleiro e da construção civil, uma vez que estes produtos são amplamente empregados em móveis no geral, além de revestimento de portas, batentes e paredes, e até como itens de decoração.

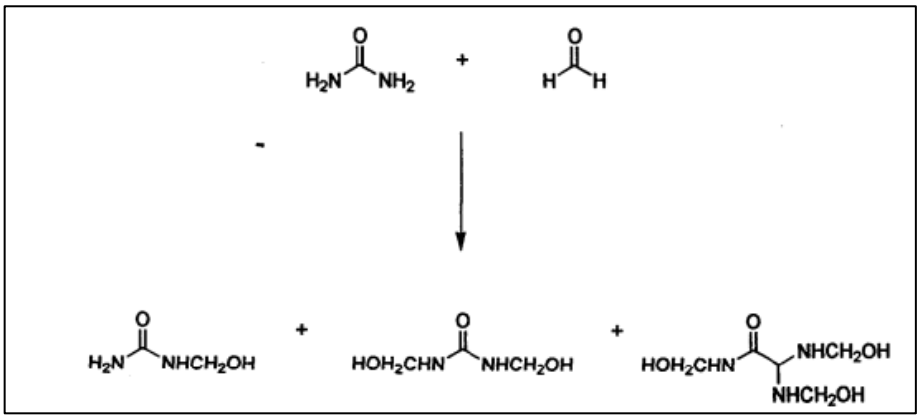
1.3.2 Necessidade de controle da emissão de formaldeído

A resina ureia formaldeído é a mais aplicada atualmente para produção de painéis reconstituídos no mundo. De acordo com Katsukake (2009) e Silva (2008), a preferência da indústria pela resina UF se dá por uma série de características como o baixo custo, a facilidade

de uso sob vários tipos de condições de cura, as baixas temperaturas de cura, a solubilidade em água, a resistência aos microrganismos, as excelentes propriedades térmicas e a ausência de cor na resina após a cura e alta reatividade em meio ácido.

A reação simplificada da ureia e do formaldeído é composta basicamente por três etapas: (i) adição ou metilação, (ii) condensação e, (iii) adição de ureia final. As diferentes etapas são descritas pelos autores Conner (1996), Dunky (1998) e Silva (2008). Na primeira etapa, a ureia é adicionada em uma solução de formaldeído, em alta temperatura e pH alcalino (F/U alto em torno de 2,10:1), sendo formadas as mono-, di- e trimetilolureias, e produtos secundários de reação contendo pontes metileno e metileno-éter (Silva, 2008) (Figura 1).

Figura 1- Primeira etapa da formação da Resina UF: Metilação.

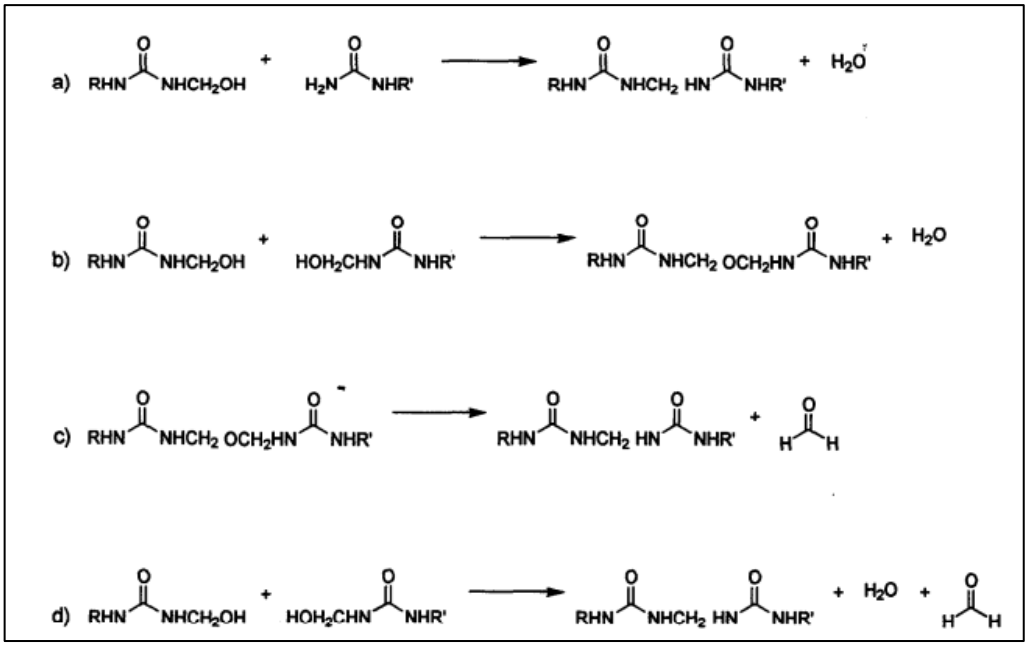


Fonte: Conner (1996).

De acordo com Paiva (2010), a reação de metilação pode ocorrer também de maneira reversa, se configurando como um aspecto crucial, pois explica a baixa resistência à água e a emissão de formaldeído que ocorre nesta resina.

Na segunda etapa, em pH ácido e alta temperatura, ocorre a formação de ligações de metileno e metileno-éter entre as moléculas de ureia, resultando na formação de polímeros de resina UF e na liberação de formaldeído e água (Figura 2). Na última etapa, a solução é neutralizada a um pH fracamente alcalino e resfriada, simultaneamente adiciona-se uma quantidade de ureia final, para ajustar a razão molar até o ponto desejado. A ureia adicionada nesta última etapa reage com o formaldeído livre ainda existente, formando várias metil-ureias (Conner, 1996; Dunky, 2004; Silva, 2008).

Figura 2- Segunda etapa da formação da resina UF: Condensação



Legenda: (a) pontes de metileno entre os azotos dos grupos amino, por reação do grupo hidroximetil e com o grupo amino das moléculas representadas; (b) pontes de metileno-éter por reação dos grupos hidroximetil de duas moléculas; (c) pontes de metileno formadas a partir de pontes metileno-éter, por libertação de formaldeído; (d) pontes de metileno por reação de grupos hidroximetil, liberando-se água e formaldeído. Fonte: Conner (1996).

Segundo Dunky (1998) na resina pronta estão presentes diferentes compostos químicos: formaldeído livre, que está em estado estacionário com os restantes grupos metil e a ureia pós-adicionada; metil-ureias monoméricas, que foram formadas principalmente pela reação da ureia pós-adicionada com o alto teor de formaldeído livre na etapa de condensação ácida; metil-ureias oligoméricas, que não reagiram posteriormente na reação de condensação ácida ou que foram acumuladas pela reação acima mencionada por ureia pós adicionada; e moléculas com massas molares maiores, que são as moléculas de resina propriamente ditas.

Conforme Lessmann (2008), o processo de cura da resina UF envolve a formação de pontes metileno, redução de ureia monomérica, redução de grupos hidroximetila e redução de pontes metileno-éter. Além disso, durante a cura, formam-se novas ramificações, mas a maior ocorrência é o aumento da extensão das ramificações já formadas na fase de síntese da resina. Dunky (1998) ressalta que durante o processo de cura, uma rede mais ou menos tridimensional é construída, produzindo uma resina insolúvel de caráter termofixo.

De acordo com Silva (2008), o uso da resina UF é limitada para ambientes internos devido à pouca resistência à água, quando exposta a umidade e calor ocorre à quebra de ligações e à liberação de formaldeído no ambiente. No entanto, o autor ressalta que, mesmo quando aplicadas apenas no interior, o formaldeído vai sendo liberado lentamente, trazendo algumas

preocupações para a saúde das pessoas. O autor explica que na produção da UF podem ocorrer inúmeras reações entre a ureia e o formaldeído, podendo, ao final, existir moléculas de ureia que não reagiram, bem como de formaldeído. A presença de ureia que não reagiu é positiva para se obter melhor estabilidade durante o armazenamento, e a presença de formaldeído livre favorece a reação de cura, porém, é liberado durante o processo de prensagem dos painéis e ao longo do seu tempo de vida (Silva, 2008).

De acordo com Ayrilmis e Nemli (2017), a baixa resistência da resina UF pode ser atribuída à reversibilidade da ligação amino-metileno, o que também explica a consequente emissão de formaldeído, especialmente em altas temperaturas. Conforme Amazio *et al.* (2011) o formaldeído é liberado pela degradação dos grupos metil das resinas UF durante a prensagem a quente, bem como durante a vida útil do painel, em que o formaldeído livre aprisionado no interior do painel difunde-se lentamente para o ambiente. Além disso, fatores externos como temperatura, umidade e a taxa de renovação do ar, contribuem para a emissão de formaldeído, bem como a própria madeira, uma vez que é produto de processos de metabolismo e decomposição (Carvalho; Magalhães; Ferra, 2012)

Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA (EPA, 2022), o formaldeído é um gás incolor e inflamável à temperatura ambiente e possui um odor forte, e a exposição ao formaldeído pode causar efeitos adversos à saúde. Dependendo da concentração, o formaldeído pode causar irritação nos olhos, nariz e garganta, mesmo quando a exposição é de duração relativamente curta. No ambiente interno, reações sensoriais e vários sintomas como resultado da irritação da membrana mucosa podem ocorrer, incluindo sintomas respiratórios (EPA, 2022). A exposição prolongada e repetida a concentrações superiores a 0,1 ppm de formaldeído pode provocar alterações neurocomportamentais, náuseas, vómitos, vertigens, fadiga, dores de cabeça, irritação das mucosas oculares e das vias respiratórias, dificuldade em respirar (pieira e tosse), reações asmáticas, problemas de memória e de concentração (Pina, 2010).

Nos últimos anos, diversos estudos foram conduzidos no intuito de averiguar o real efeito do formaldeído e os perigos para saúde humana associados a exposição; a partir destes estudos, no ano de 2006, o formaldeído foi classificado como agente cancerígeno pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer – IARC devido à fortes evidências de que o formaldeído causa câncer de nasofaringe e leucemia (IARC, 2006; IARC, 2012; Carvalho, Magalhães, Ferra, 2012). Segundo o Instituto Nacional de Câncer – INCA, o formaldeído evapora em condições normais de temperatura e o contato direto com grandes concentrações se torna altamente

perigosa à saúde humana podendo resultar em diversos agravos, sendo classificado como Grupo 1, ou seja, é um agente comprovadamente cancerígeno a seres humanos (INCA, 2022).

Em função disso, buscando a redução da emissão de formaldeído em painéis de madeira, políticas mais restritivas vêm sendo adotadas pela União europeia, os Estados Unidos e o Japão, por meio de normas regulamentadoras que impõe limites para emissão de formaldeído nos painéis de madeira, além de métodos de teste padrão. Segundo Carvalho, Magalhães e Ferra (2012), dois grupos de métodos principais são considerados, o de câmara e o de pequena escala utilizado para o controle da qualidade industrial. O segundo grupo inclui métodos comumente usados, mencionados em diferentes normas, como o *Perforator*, o balão, o dessecador e o de análise de gases.

O método derivado mais importante na Europa é o método *Perforator* (EN 120) (Keinert, 2021). O *Perforator* é um método dinâmico para medir o teor de formaldeído extraível dos painéis, e sua precisão depende, principalmente, do teor de umidade dos corpos de prova (Roffael; Johnsson, 2012). O método do *Perforator* é rápido e de baixo custo, mas tem o inconveniente de utilizar grandes quantidades de tolueno e por isso ser um método pouco sustentável (Martins, 2020).

Este é método é adotado pelas normas brasileiras, NBR 15316 (ABNT, 2019) e NBR 14810 (ABNT, 2018), para painéis MDF e MDP, respectivamente; neste processo o formaldeído é extraído dos corpos de prova pelo tolueno em fervura e, então, transferido para água destilada ou deionizada; na sequência, o conteúdo de formaldeído na solução aquosa é determinado espectrometricamente pelo método da acetilacetona.

Em relação aos requisitos internacionais para emissões em painéis, destaca-se a norma EN 13986 (2004) adotada como padrão na Europa, que estabelece as classes E1 com limite de emissão de até 8 mg de formaldeído para cada 100 g de painel seco e, a classe E2 com limite entre 8 e 20 mg. No Japão, a norma JIS A5908 (2003) adota valores de emissão máxima de formaldeído para cada nível, sendo F**, F*** e F****. O F** é próximo da classe E1 europeia, enquanto o nível F**** é mais restrito e permite emissão máxima de 0,3 mg/L. Nos Estados Unidos, os limites para as emissões de formaldeído são estabelecidos pela norma ANSI A208.1 & 2 (2002) e pelo CARB (*California Air Resources Board*) (2009). Os limites da fase 1 do CARB (2009) são equivalentes à classe E1 (e F^{**}), enquanto os limites da Fase 2 são semelhantes ao F^{***}(Carvalho; Magalhães; Ferra, 2012; Athanassiadou; Tsiantzi; Markessini, 2007).

De acordo com Gonçalves *et al*. (2017), os membros da *European Panel Federation* (EPF), concordaram em produzir apenas painéis da classe E1, abandonando a produção de painéis da classe E2.

No Brasil, as normas NBR 15316 (ABNT, 2019) e NBR 14810 (ABNT, 2018) também trazem os limites máximos de emissão de formaldeído em painéis MDF e MDP, com duas classes baseadas no padrão europeu. A classe E1, com limite de 8 mg de formaldeído para cada 100 g de painel seco, e a classe E2 entre 8 e 20 mg.

Tabela 1- Normas internacionais para emissão de formaldeído em painéis reconstituídos.

Origem	Norma	Método de análise	Classe	Limite de emissão
Europa e Brasil	EN 13986	Câmara EN 717-1	E1	≤0,1 ppm
		Perforator EN 120		≤8 mg/100g
		Câmara EN 717-1	E2	>0,1 ppm
		Perforator EN 120		>8- 20 mg/100g
Estados Unidos	ANSI A208. 1 e 2	Câmara grande ASTM E1333		≤0,3 ppm
		CARB	Fase 1	0,21 ppm
			Fase 2	0,11 ppm
Japão	JIS A 5908 e 5905	Dessecador JIS A 1460	F**	≤1,5 mg/L
			F***	≤0,5 mg/L
			F****	≤0,3 mg/L

Fonte: Adaptado de Athanassiadou; Tsiantzi; Markessini (2007).

Em relação aos limites de exposição ocupacional para o formaldeído, a norma regulamentadora número 15 (NR15) traz o anexo 11 com valores máximos de exposição, considerando jornada diária de 8 horas, em 1,6 ppm ou 2,3 $mg.m^{-3}$. Neste caso, quando os trabalhadores estiverem expostos até este nível, não receberão adicional de insalubridade (Brasil, 1978).

Os limites de exposição sugeridos por órgãos internacionais são bem inferiores ao estabelecido na NR15. Os valores impostos pelo anexo III da diretriz 37/2004 do parlamento Europeu foram descritos com apoio científico da Agência de produtos químicos da União Europeia- ECHA. Para um tempo de exposição de 8 horas o limite é de 0,3 ppm (0,37 $mg.m^{-3}$) e para exposição de curto prazo o limite é de 0,6 ppm (0,74 $mg.m^{-3}$) (ECHA, 2004).

Nos Estados Unidos, o Departamento de Segurança Ocupacional e Administração de Saúde – OSHA, estabeleceu limite máximo permitido para o formol nos locais de trabalho de 0,75 ppm ou 0,108 $mg.m^{-3}$, em 8 horas de exposição diária, e 2 ppm ou 2,87 $mg.m^{-3}$ para exposições curtas de 15 minutos (OSHA, 2017).

1.3.3 Atuais alternativas para redução da emissão de formaldeído e problemáticas

A alternativa mais amplamente investigada no Brasil para a diminuição da liberação de formaldeído em painéis é fundamentada na diminuição da razão molar das resinas UF e na utilização de sequestrantes, como a solução de ureia ou condensado de ureia formaldeído de baixa proporção molar (Mauricio, 2015).

Segundo Dunky (1998) a razão molar da resina UF (mols de formol/mols de ureia) foi completamente alterada durante as últimas décadas com o intuito de diminuir a emissão de formaldeído dos painéis, permitindo a obtenção de resinas de menor emissão quando comparadas as utilizadas anteriormente e que proporcionam boas propriedades para os painéis. De acordo com Carvalho, Magalhães e Ferra (2012), nas últimas décadas, os valores de F:U em resinas para produção de painéis reconstituidos, diminuíram de cerca de 1,6:1 para uma faixa entre 0,9:1 e 1,1:1.

De acordo com Dunky (1998) podem ser citadas duas diferenças principais entre as resinas de alto e baixo teor de formaldeído, a reatividade da resina e o grau de reticulação na rede curada. As resinas de baixa razão molar, tem menor reatividade devido ao menor conteúdo de formaldeído livre e menor grau de reticulação (Dunky, 1998).

A reatividade está relacionada com a ocorrência ou não de uma reação quimica entre duas ou mais substâncias, e o formaldeido é altamente reativo devido a sua estrutura química. De acordo com Moreira (2015), a carbonila do formaldeído é polarizada, fazendo com que o oxigênio (eletronegativo) atraia para si os elétrons da ligação (C=O) gerando um dipolo permanente de modo que o carbono apresente carga parcial positiva, reagindo facilmente frente a nucleófilos (mólecula ou íon que doa um par de elétrons para formar uma ligação química).

Em relação ao grau de reticulação da resina curada, Dunky e Niemz (2002) citam que uma razão molar menor F:U também deve resultar em maior cristalinidade da UF curada provocando um menor grau de reticulação. Wibowo e Park (2022) realizaram uma análise bidimensional por ressonância magnética nuclear em resinas de UF com razões molares de 1,0:1 e 1,6:1; e observaram que resinas de alta razão molar exibiram interconexões mais extensas entre suas unidades estruturais do que as resinas de baixa razão molar F:U. Como

resultado, as resinas de baixa razão molar contêm moléculas mais lineares, o que permite a formação de domínios cristalinos suportados por pontes de hidrogênio. Estes domínios cristalinos reduzem a coesão inibindo a formação de reticulação tridimensional, sendo os responsáveis pela baixa adesão em produtos à base de madeira. Segundo os autores, isto ocorre devido a adição da segunda ureia, que cliva várias ligações, incluindo éter de metileno ramificado, oximetileno (acetal) e hidroximetil ureia ramificada, resultando em uma estrutura mais linear.

Park e Jeong (2011) avaliaram resinas UF de diferentes razões molares quanto sua resistência a hidrólise, e verificaram que as resinas de baixa razão molar são mais resistentes a hidrólise do que aquelas de maior proporção molar. Segundo os autores, este resultado está relacionado a estrutura molecular da resina UF curada, uma vez que a resina UF de maior proporção molar é mais ramificada, apresentando maior probabilidade de expor os grupos metil à hidrólise, o que consequentemente aumenta a perda de massa e a concentração de formaldeído liberado. Já a resina de menor razão molar, por apresentar estrutura mais linear, tem menor número de grupos metil expostos a hidrólise, consequentemente, esta terá melhor resistência hidrolítica e menor emissão de formaldeído.

Conforme Amazio *et al.* (2011), quanto maior a razão molar do adesivo UF maior será a quantidade de formaldeído livre disponível para liberação no ambiente. Myers (1984) cita que o teor de formaldeído livre da resina UF cai rapidamente com a redução da razão molar de 2:1 para 1,5:1, tendo reduções mais acentuadas abaixo de 1,2:1, mas a redução da razão molar abaixo desse ponto pode afetar as propriedades tecnológicas dos painéis.

Kim (1999) observou que adesivos de UF sintetizados com razão molar F:U final de 1,15:1 e 0,75:1 tiveram menor emissão de formaldeído em relação ao sintetizado com razão molar final de 2,10:1, mas também constatou que a baixa razão molar reduziu a resistência à água, quando comparado com um adesivo de maior razão molar.

Keinert (2021) avaliou resinas melamina ureia formaldeído variando a razão molar em 1,05; 1,22 e 1,30. Com relação a emissão de formaldeído, a única resina que atingiu a classe E1 foi a de razão molar 1,05:1. Os painéis apresentaram aumento da resistência à tração perpendicular, menores inchamentos em água e maior resistência a umidade com a utilização de resinas com maior razão molar.

Ayrilmis e Nemli (2017), estudando a influência de adesivos UF de duas diferentes razões molares na qualidade de painéis de partículas, verificaram que a razão molar da resina UF afeta significativamente a emissão de formaldeído, bem como o desempenho da ligação entre as partículas de madeira. Os autores verificaram um aumento nas propriedades mecânicas,

uma diminuição da absorção em água e inchamento, melhora na rugosidade da superfície e maior emissão em adesivos de maior razão molar F:U.

Apesar da efetiva redução da emissão de formaldeído a partir da redução da razão molar da resina UF, vários experimentos realizados em plantas industriais pelo país demonstraram que esta ação traz consequências, sendo as principais: redução das capacidades de produção, aumento de custos e redução das propriedades tecnológicas do produto (Mauricio, 2015; Dunky, 1998). Quanto aos efeitos da redução da razão molar nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis, como visto nos trabalhos mencionados, principalmente a resistência à tração e a estabilidade dimensional são prejudicadas.

Quanto aos efeitos negativos no processo de produção, destaca-se a necessidade de altos tempos de prensagem, maior consumo de resina e altos controles principalmente de umidade. Segundo Dunky e Niemz (2002) a velocidade de cura do adesivo é geralmente diminuída para razões molares menores, exigindo maior tempo de prensagem, o que reduz o rendimento de produção, aumentando os custos do produto, junto com o custo do adesivo. A cura do adesivo é dificultada devido a menor quantidade de formaldeído livre presente nas resinas de baixa razão molar, uma vez que a reação com o sulfato de amônio, principal catalisador utilizado na indústria, e a subsequente formação do ácido forte que reduz o pH para obtenção da cura da resina, depende da quantidade de formaldeído livre.

Em relação a utilização de sequestrantes de formaldeído, a ureia é o composto mais utilizado na indústria de painéis de madeira por apresentar menor custo e eficiência, entretanto, apresenta a desvantagem de reemitir o formaldeído que foi captado, através de reações de hidrólise com a variação de temperatura ou presença de umidade (Fujji *et al*., 2013; Park; Kang; Park, 2008). Além disso, a aplicação de ureia como sequestrante apresenta menor eficiência na redução da emissão de formaldeído quando comparado com outros compostos amina, tais como propilamina (PAS), metilamina (MAS), etilamina (EAS) e ciclopentilamina (CPAS) como relatado por Boran *et al*. (2011).

Ghani *et al.* (2017) verificaram que a adição de propilamina reduziu de 33 a 65% a emissão de formaldeído de painéis de partículas feitos com diferentes dosagens de resina UF. Contudo, as propriedades foram influenciadas negativamente pela adição de propilamina, exigindo maior dosagem de resina (≥14%) para contrabalancear a perda de resistência e estabilidade dimensional, que por sua vez acarreta o aumento da emissão de formaldeído.

Outros compostos como o metabissulfito, bissulfito de sódio e o bissulfito de amónia podem atuar como sequestrantes de formaldeído em resinas. Costa *et al.* (2013) testou os três sequestrantes de formaldeído em painéis de partículas colados com resina UF, comprovando a

superioridade do metabissulfito, que reduziu a emissão de formaldeído a taxas próximas da madeira sólida. No entanto, este composto apresenta maior eficiência para reduzir a emissão de formaldeído quando aplicado na forma sólida, que por sua vez promove a liberação de partículas causadoras de irritação das vias respiratórias. Já o bissulfito de sódio, pode causar a pré cura do adesivo pela redução do pH, degradando as propriedades de resistência a tração e estabilidade dimensional dos painéis, enquanto o bissulfito de amónia prejudica as propriedades físicas e mecânicas dos painéis além de reemitir o formaldeído quando exposto a condições de umidade (Costa *et al.*, 2013).

A utilização de sequestrantes de formaldeído naturais ou de base biológica também foram estudados. A proteína de soja (Pereira, 2016) e o tanino em pó (Boran, 2012) incorporados na resina foram eficientes para reduzir a emissão de formaldeído, no entanto, as demais propriedades dos painéis foram prejudicadas.

Catalisadores alternativos ao sulfato de amônio que é o catalisador mais utilizado atualmente para cura da resina UF, também podem reduzir a emissão de formaldeído, como relatado por Costa *et al*. (2012), que demonstraram que os painéis produzidos com UF e ácido ortofosfórico apresentaram propriedades semelhantes e menor emissão de formaldeído, em relação aos painéis produzidos com UF e sulfato de amônio.

Além das alternativas citadas, para reduzir a emissão de formaldeído também pode-se utilizar revestimentos, a fim de selar a superfície, usando "sealers" herméticos tais como vernizes a base de poliuretano e de nitrocelulose, tintas alquídicas, laminados vinílico e AP, papel BP etc. A efetividade do selante varia de acordo com a formulação do produto, espessura e número de camadas aplicadas (Mauricio, 2015).

Park *et al*. (2013) avaliaram a emissão de formaldeído e compostos orgânicos voláteis (VOCs) de painéis MDP e MDF revestidos com laminado BP, filme de PVC e de Uretano. Foi verificado que todos os revestimentos reduziram o nível de emissão de formaldeído e de VOCs em relação aos painéis crus. Em painéis com alta concentração de formaldeído (classificados como E2) a aplicação de revestimento resultou em menor emissão, mas não alcançou os baixos níveis apresentados pelos painéis classificados como E1, após aplicação do mesmo revestimento. Em relação ao método, quando o revestimento é aplicado somente nas faces, impede a difusão imediata pela superfície, entretanto, após um período, o formaldeído começa a ser emitido pelas bordas do painel (Park *et al*., 2013).

Kim (2010) avaliou a emissão de formaldeído em pisos de HDF revestidos com laminado melamínico de baixa pressão, e observou redução significativa das emissões nos painéis revestidos quando comparados com os sem revestimento. O autor atribuiu este resultado

ao efeito de vedação promovido pelo revestimento, que aumenta, com a selagem das bordas. Nemli e Çolacoglu (2005) verificaram que o revestimento melamínico é mais eficaz na redução da emissão de formaldeído em painéis de partículas, quando comparado com o revestimento de lâminas de madeira envernizadas.

Em síntese, a eficiência do revestimento como barreira para difusão do formaldeído, depende da concentração de formaldeído inicial disponível para liberação e do método de aplicação. Desta forma, o revestimento terá mais eficácia quando utilizado em conjunto com outras técnicas, como a redução da razão molar do adesivo e/ou utilização de sequestrantes (Park *et al*., 2013; Kim, 2010).

1.3.4 Iniciativas inovadoras para redução da emissão de formaldeído

Os estudos mais recentes que visam a redução da emissão de formaldeído em painéis de madeira abordam a adição de nanopartículas inorgânicas ou de origem natural nos adesivos, aplicação de resíduos que atuam como sequestrantes de formaldeído, ou a total substituição dos adesivos a base de formaldeído por adesivos naturais.

Em painéis MDF, a aplicação de nanoargila de bentonita promoveu uma redução de até 37,1% na emissão de formaldeído, e melhorou as propriedades de ligação interna e inchamento (Wibowo; Lubis; Park, 2021). Cademartori *et al.* (2019) relataram a incorporação de nanopartículas de Al2O3 em resina UF e a subsequente redução na emissão de formaldeído em painéis MDF. Kawalerczyk *et al.* (2020a) adicionaram celulose nanofibrilada ao adesivo, com redução da emissão em torno de 2,25 - 2,04 mg/kg, atendendo as normas para painéis compensados. Dukarska e Czarnecki (2016) incorporaram à resina melamina ureia formaldeído (MUF) nanopartículas de sílica e observaram menor emissão de formaldeído em painéis compensados, sem prejudicar suas propriedades.

Lopes (2022) avaliou a adição de nanoligninas Kraft na resina UF para colagem de produtos à base de madeira, e observou resultados promissores com a incorporação de 4% de nanolignina de eucalipto e 6% de nanolignina de pinus, com redução de até 75% das emissões de formaldeído em juntas coladas. No entanto, vale destacar que a nanotecnologia tem um custo alto no Brasil, e a sua aplicação em resinas necessita de uma tecnologia mais eficiente que a simples adição.

Diferentes tipos de resíduos, como por exemplo cascas de espécies florestais, podem ser aplicados aos adesivos ou às fibras/partículas para reduzir a emissão de formaldeído. Aydin *et al*. (2017) e Ružiak *et al*. (2017) verificaram que a farinha de casca de espécies de árvores com

alto teor de polifenóis (nogueira, castanha e abeto) exibiram propriedades de eliminação de formaldeído quando adicionadas às misturas adesivas para colagem de painéis. Réh *et al*. (2019) observaram que a casca de faia em pó reduz a emissão de formaldeído do compensado em até 74%, mantendo as boas propriedades mecânicas dos painéis. Kawalerczyk *et al*. (2020b) comprovaram que a farinha de cânhamo adicionada na resina MUF também atua como um eliminador de formaldeído, devido seu alto teor de proteína, reduzindo até 34% da emissão em painéis compensados.

Medved *et al.* (2019) estudaram a substituição parcial das partículas de madeira por casca de *Pinus* spp. em painéis MDP, em proporções de 20 a 65%, havendo redução da emissão de formaldeído conforme aumento da proporção de casca, chegando a 43%. As propriedades de tração e inchamento foram melhores para o tratamento com 20% de casca.

Resíduos provenientes de diferentes processos industriais também vêm sendo testados como sequestrantes potenciais. Bekhta *et al.* (2019) avaliaram o efeito da modificação do adesivo com resíduos de fibras lignocelulósicas provenientes da indústria de celulose e papel, na emissão de formaldeído de painéis compensados colados com UF. Foi observado redução da emissão em até 27,8%, em comparação com os painéis controle, sem comprometer a resistência ao cisalhamento. Hong *et al.* (2018) produziram painéis MDF com diferentes tipos e proporções de fibras recicladas, colados com UF. As fibras recicladas foram obtidas a partir de três diferentes painéis MDF, cada um revestido com um material (laminado BP, tereftalato de polietileno e revestimento de poliéster). Os autores verificaram menor emissão de formaldeído conforme o aumento da proporção de fibras recicladas, independentemente do tipo, porém, os painéis com fibras recicladas BP em proporção de 20% apresentaram os melhores resultados em termos de propriedades físico-mecânicas. Estes resultados foram atribuídos a liberação de melamina presente no resíduo de revestimento da fibra reciclada, que sob condições ácidas pode reagir com resinas UF durante a prensagem a quente, aumentando a ligação interna do painel e eliminando o formaldeído (Hong *et al.*, 2018).

Um revestimento natural foi produzido com filme de nanofibras de celulose obtidas de fibras de cânhamo de Manila (*Musa textilis*) para revestir a superfície de painéis de partículas, proporcionando uma redução de 26% na emissão de formaldeído (Gumowska *et al*., 2019).

Outra abordagem relatada é a total substituição dos adesivos a base de formaldeído por adesivos naturais. Os adesivos a base de tanino têm grande potencial para o emprego em produtos à base de madeira. Liu *et al*. (2022) testaram adesivos a base de tanino, álcool furfurílico e resina epóxi, com alta resistência ao cisalhamento em painéis compensados. Outros adesivos com diferentes formulações a base de tanino também são relatados na literatura com

resultados promissores, como o tanino-paraformaldeído, tanino-glioxal, tanino-hexamin e poliuretano não isocianato de tanino (Arias *et al*., 2022); tanino e ácido cítrico (Li *et al*., 2023); e adesivos de tanino com reforço de nanofibrilas de celulose (Zidanes *et al*., 2023).

Adesivos produzidos a partir da lignina também foram estudados, como relatado por Antov, Mantanis e Savov (2020) avaliando adesivos a base de lignossulfonato de magnésio para colagem de painéis MDF, que apresentaram propriedades mecânicas de acordo com as normas, mas baixa resistência a água. Silva *et al*. (2019) relatam a possibilidade de substituir parcialmente os adesivos de ureia formaldeído por lignossulfonato de magnésio obtido do processo sulfito, em painéis MDF e MDP. Além disso, nanofibrilas de lignocelulose também podem atuar como ligante em painéis de fibras (Diop *et al*., 2017).

Novos adesivos alternativos livres de formaldeído, também foram relatados com resultados promissores em painéis de fibras, partículas ou compensados, entre eles destacam-se as resinas inorgânicas a base de óxido de magnésio e cloreto de magnésio (Jin *et al*., 2017), adesivos a base de látex (Hidayat *et al*., 2022), proteína de soja modificada com poliamida ramificada (Liu *et al*., 2023), farinha de soja modificada com óxido de magnésio e proteínas hidrolisadas de culturas agrícolas (Balducci *et al*., 2020), farinha de canola (Tayo; Bettelhäuser; Euring, 2022), extratos de amêndoas (Alawode *et al.*, 2019), amido dialdeído (Neitzel; Hosseinpourpia; Adamopoulos, 2023), amido termoplástico, ácido polilático e policaprolactona (Gumowska; Kowaluk, 2023).

Apesar dos esforços dos pesquisadores para minimizar a emissão de formaldeído, tem se verificado na prática que essas alternativas não foram implementadas pelas unidades fabris, seja por viabilidade econômica ou por questões técnicas quanto ao desempenho das demais propriedades dos adesivos e consequentemente dos painéis (Lopes, 2022).

1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir desta revisão da literatura pode-se constatar a importância do setor de painéis de madeira dentro do setor de base florestal, tendo em vista que está em crescimento. Além disso, destaca-se a necessidade do desenvolvimento de estudos nesta área, com o intuito de auxiliar as empresas a aprimorarem alguns aspectos de seu processo produtivo, principalmente no que diz respeito aos gargalos que impedem o alinhamento da indústria com os princípios sustentáveis. Um exemplo é a utilização de resinas à base de formaldeído, as quais estão associadas à emissão dessa substância cancerígena em painéis de madeira, contribuindo para a poluição do ar em ambientes internos.

A resina UF tem grande importância no processo de produção dos painéis reconstituídos, compensados e produtos à base de madeira, assim, muitas pesquisas foram e ainda estão sendo desenvolvidas para melhorar este adesivo. Entretanto, os principais métodos empregados atualmente para reduzir a emissão de formaldeído são a utilização de resina UF de baixa razão molar, a adição de sequestrantes a base de ureia e a aplicação de revestimentos comerciais. Havendo ainda a possibilidade de empregar as três técnicas juntas, para alcançar níveis mais baixos de emissão.

Pesquisas recentes trazem diversas alternativas para redução da emissão de formaldeído nestes produtos, dentre elas destaca-se o uso da nanotecnologia, de resíduos ou subprodutos de processos industriais e adesivos naturais. Cabe destacar que os adesivos naturais ainda possuem valores pouco competitivos quando comparados a UF, além do seu uso exigir mudanças mais drásticas no processo industrial para manter a qualidade do painel. Assim, a resina UF segue como a mais utilizada para colagem de painéis reconstituídos e produtos à base de madeira, realçando a importância do desenvolvimento de estudos que visem melhorar esta resina, para alcançar níveis mínimos de emissão, e atender as normas regulamentadoras que tendem a ser cada vez mais rígidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAWODE, A. O.; BUNGU, P. E.; AMIANDAMHEN, S. O.; MEINCKEN, M.; TYHODA, L. Propriedades e características de novos adesivos para madeira sem formaldeído preparados a partir de extratos de sementes de *Irvingia gabonensis* e *Irvingia wombolu*. **Revista Internacional de Adesão e Adesivos**, v. 95, p. 102423, 2019.

AMAZIO, P.; AVELLA, M.; ERRICO, M. E.; GENTILE, G.; BALDUCCI, F.; GNACCARINI, A.; MORATALLA, J.; BELANCHE, M. Painéis de aglomerado de partículas de baixa emissão de formaldeído realizados através de um novo aglutinante acrílico. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 122, n. 4, p. 2779-2788, 2011.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A (208) 1 - 2:** Particleboard and Fiberboard. Gaithersburg: ANSI, 2002.

ANTOV, P.; MANTANIS, G. I.; SAVOV, V. Development of wood composites from recycled fibers bonded with magnesium lignosulfonate. **Forests**, v. 11, n. 6, p. 613, 2020.

ARIAS, A. GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; FEIJOO, G.; MOREIRA, M. T. Bioadesivos à base de taninos para a indústria de painéis de madeira como alternativas sustentáveis às resinas petroquímicas. **Revista de Ecologia Industrial** , v. 2, p. 627-642, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15316** - Painéis de fibras de média densidade. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 14810** - Painéis de partículas de média densidade. Rio de Janeiro, 2018.

ATHANASSIADOU E. T. S.; MARKESSINI, C. **Rumo a compósitos com emissão de formaldeído em níveis de madeira natural.** *In*: COST Action E49 Medição e controle de emissões de VOC de painéis derivados de madeira, Braunschweig, Alemanha, 2007.

AYDIN, I.; DEMIRKIR, C.; COLAK, S.; COLAKOGLU, G. Utilization of bark flours as additive in plywood manufacturing. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, p. 63-69, 2017.

AYRILMIS, N.; NEMLI, G. Efeito do tipo de adesivo nas propriedades de qualidade do aglomerado. **Máquinas, Tecnologias, Materiais**, Bulgária, v. 11, n. 7, p. 364-365, 2017.

BALDUCCI, F.; ADAMOPOULOS, S.; PETTINARI, C.; CANTI, E.; DI NICOLA, C.; TOMBESI, A.; GABBANI, C. A formaldehyde-free adhesive for particleboards based on soy flour, magnesium oxide, and a plant-derived enzymatic hydrolysate. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 3087-3102, 2020.

BEKHTA, P.; SEDLIAČIK, J.; KAČÍK, F.; NOSHCHENKO, G.; KLEINOVÁ, A. Lignocellulosic waste fibers and their application as a component of urea-formaldehyde adhesive composition in the manufacture of plywood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 77, p. 495-508, 2019.

BIAZUS, A.; HORA, A. B. da; LEITE, B. G. P. Painéis de madeira MDP e MDF: Mercado e Competitividade. **Revista da Madeira**, n. 136, 2013. Disponível em:<http://www.remade .com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1683&> Acesso em: 03 abr. 2023.

BORAN, S.; USTA, M.; GÜMÜSKAYA, E. Decreasing formaldehyde emission from medium density fiberboard panels produced by adding different amine compounds to urea formaldehyde resin. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 31, p. 674- 678, 2011.

BORAN, S.; USTA, M.; ONDARAL, S.; GÜMÜŞKAYA, E. A eficiência do tanino como produto químico eliminador de formaldeído em painéis de fibra de média densidade. **Compósitos Parte B: Engenharia**, v. 43, n. 5, p. 2487-2491, 2012.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.

BRASIL. **Ministério do Trabalho e Emprego.** Norma Regulamentadora nº 15 (NR15), de 08 de junho de 1978. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-15-nr-15> Acesso em: 10 ago. 2023.

CADEMARTORI, P. H. G.; ARTNER, M. A.; DE FREITAS, R. A; MAGALHAES, W. L. E. Nanopartículas de alumina como removedor de formaldeído para resina de ureia-formaldeído: desempenho reológico e de cura in-situ. **Compósitos,** Parte B, v. 176, 107281, 2019.

CARB. **Airborne toxic control measure to reduce formaldehyde emissions from composite wood products**. In Health and Safety Code: Title 17, California Code of Regulations; California Air Resources Board: Sacramento, CA, USA, 2009.

CARVALHO, L. H.; MAGALHÃES, F. D.; FERRA, J. M. **Emissões de formaldeído de painéis derivados de madeira - métodos de teste e perspectivas industriais**. *In:* CHENG, C. B.; LN, F. H. Formaldeído: química, aplicações e papel na polimerização, Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, Inc., 2012. p. 207.

CONNER, A. H. **Resinas adesivas ureia-formaldeído**. *In*: SALAMONE, J. C. Polymeric Materials Encyclopedia. Boca Raton, Florida: CRC Press, v. 11, p. 8496- 8501, 1996.

COSTA, N. A.; PEREIRA, J.; FERRA, J.; CRUZ, P.; MARTINS, J.; MAGALHÃES, F. D.; MENDES, A.; CARVALHO, L. H. Sequestrantes para alcançar emissão zero de formaldeído de painéis derivados de madeira. **Ciência e tecnologia da madeira**, v. 47 , p. 1261-1272, 2013.

COSTA, N.; PEREIRA, J.; MARTINS, J.; FERRA, J.; CRUZ, P.; MAGALHÃES, F.; CARVALHO, L. Alternativa aos catalisadores latentes para cura de resinas UF utilizadas na produção de painéis derivados de madeira com baixa emissão de formaldeído. **Revista Internacional de Adesão e Adesivos**, v. 33, p. 56-60, 2012.

DIOP, C. I. K.; TAJVIDI, M.; BILODEAU, M. A.; BOUSFIELD, D. W.; HUNT, J. F. Isolamento de nanofibrilas de lignocelulose (LCNF) e aplicação como substituto adesivo em compósitos de madeira: exemplo de painel de fibra. **Celulose**, v. 24, p. 3037-3050, 2017.

DUNKY, M. Resinas adesivas de ureia-formaldeído (UF) para madeira. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Holanda, v. 18, n. 2, p. 95–107, 1998.

DUNKY, M. Adhesives based on formaldehyde condensation resins. **Macromol. Symp**., Alemanha, v. 217, p. 417-429. 2004.

DUNKY, M.; NIEMZ, P. **Holzwerkstoffe und Leime: technologie und Einflussfaktoren**. Berlim, Alemanha: Springer, 2002.

DUKARSKA, D.; CZARNECKI, R. Sílica pirogênica como carga da resina MUPF no processo de fabricação de compensado resistente à água. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 1, p. 5-14, 2016.

ECHA, EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. **OELs for Certain Carcinogens, Mutagens, Reprotoxins: Annex III, Directive 37/2004**. Disponível em: <https://echa.europa.eu/pt /substance-information/-/substanceinfo/100.000.002> Acesso em: 10 ago. 2023.

EPA. **Eviromental protection agency.** Disponível em: <https://www.epa.gov/formald ehyde/facts-about-formaldehyde#whatisformaldehyde>. Acessado em mar. de 2022.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION**. EN 13986:** Wood-based panels for use in construction - Characteristics, evaluation of conformity and marking; German version. EN, Brussels, Belgium, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. **EN 310:** Wood-based panels; determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength; German version. EN, Brussels, Belgium, 1993.

FRACKOWIAK, I.; WARCOK, F.; FUCZEK, D.; ANDRZEJAK, C. The influence of UF molar ration selected particleboard properties. **Drewno Prace Naukowe, Doniesienia Komunikaty**, v. 54, n. 186, 2011.

FREIRE, A. L. F.; FIGUEIRÊDO, M. B.; ROSA, M. D. F.; JÚNIOR, C. A. Impactos ambientais de painéis de madeira e derivados-Uma revisão de literatura. Revista Espacios. v. 36, n. 10, 2015.

FUJII, I.; MURATA, Y.; UEDA, S.; NEGISHI, S.; TAGUCHI, T. **Formaldehyde scavenger and wood material using same.** United States Patet Patente US 8,389,125 B2. 2013. Disponível em : <https://patents.google.com/patent/US8389125B2/en> Acesso em: 02 ago. 2023.

GHANI, A.; BAWON, P.; ASHAARI, Z.; WAHAB, M. W.; HUA, L. S. Addition of propylamine as formaldehyde scavenger for urea formaldehyde-bonded particleboard. **Wood research**, v. 62, n. 2, p. 329-334, 2017.

GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; ANDRADE, W. S. P. **Engenharia madeireira: pesquisa e produção.** Seropédica, RJ: Edur UFRRJ, 2017. p. 261-306.

GUMOWSKA, A.; KOWALUK, G. Propriedades físicas e mecânicas de placas de fibra de alta densidade coladas com adesivos de base biológica. **Florestas**, v. 14, n. 1, p. 84, 2023.

GUMOWSKA, A.; KOWALUK, G.; LABIDI, J.; ROBLES, E. Barrier properties of cellulose nanofiber film as an external layer of particleboard. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, p. 2073-2079, 2019.

HIDAYAT, W.; APRILLIANA, N.; ASMARA, S.; BAKRI, S.; HIDAYATI, S.; BANUWA, I.S.; ISWANTO, A. H. Desempenho de painéis aglomerados ecológicos provenientes de resíduos agroindustriais colados com adesivo látex de borracha natural sem formaldeído para aplicações em interiores. **Compósitos Poliméricos**, v. 43, n. 4, p. 2222-2233, 2022.

HONG, M. K.; LUBIS, M. A. R.; PARK, B. D.; SOHN, C. H.; ROH, J. Effects of surface laminate type and recycled fiber content on properties of threelayer medium density fiberboard. **Wood Material Science & Engineering**, v. 15, n. 3, p. 163-171, 2018.

IARC. Monographs on the Evaluation of Cancinogenic Risck to Humans**: Formaldeído, 2-Butoxietanol e 1-** ***terc*** **-Butoxipropan-2-ol.** World Health Organization, International Agency For Research On Cancer, Lyon, França, v. 88, 2006.

IBÁ. **Relatório anual.** Indústria Brasileira de Árvores, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf> Acesso em 23 mar.2023.

IBÁ. **Relatório anual.** Indústria Brasileira de Árvores, 2021. Disponível em: < https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf> Acesso em 23 mar.2023.

INCA. **Causas e prevenção Formol.** Instituto Nacional do Câncer. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/solventes/formol>. Acesso em: mar. de 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO: 14001:2015**. Sistema de Gestão Ambiental: Requisitos com Orientação de Uso; ISO: Genebra, Suíça, 2015.

IWAKIRI, S. Painéis de Madeira Reconstituída. Fundação de Pesquisas Florestais – FUPEF, 247p. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. **JIS A 1460**: Building boards Determination of formaldehyde emission - Desiccator method. Particleboard: Japanese Standards Association, Tokyo; 2001.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. **JIS A 5908**: Particleboard. Japanese Standards Association, Tokyo; 2003.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS A 5905**: Fiberboards. Japanese Standard Association, Tokyo; 2003.

JIN, S.; LI, K.; LI, J.; CHEN, H. Um adesivo para madeira de baixo custo, sem formaldeído e com alto retardamento de chama a partir de adesivos inorgânicos: Propriedades e desempenho. **Polymers**, Basel, Suíça, v. 9, n. 10, p. 513, 2017.

KATSUKAKE, A. **Uma revisão sobre a resina ureia formaldeído empregada na produção de painéis de madeira reconstituída.** 2009. Projeto de conclusão de curso (Licenciatura em Química) – Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, SP, 2009.

KAWALERCZYK, J.; SIUDA, J.; MIRSKI, R.; DZIURKA, D. Hemp flour as a formaldehyde scavenger for melamine-urea-formaldehyde adhesive in plywood production. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 4052-4064, 2020b.

KAWALERCZYK, J.; DZIURKA, D.; MIRSKI, R.; SZENTNER, K. Properties of plywood produced with urea-formaldehyde adhesive modified with nanocellulose and microcellulose. **Drvna industrija: Znanstveni časopis za pitanja drvne tehnologije**, v. 71, n. 1, p. 61-67, 2020a.

KEINERT, A. C. **Resistência à umidade e emissão de formaldeído em painéis de partículas de média densidade fabricados com diferentes resinas melamina ureia formaldeído.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

KIM, M. G. Examination of selected synthesis parameters for typical wood adhesivetype urea–formaldehyde resins by C NMR spectroscopy. **Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry**, Estados Unidos, v. 37, p. 995-1007, 1999.

KIM, S. Control of formaldehyde and TVOC emission from wood-based flooring composites at various manufacturing processes by surface finishing. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, p. 14-19, 2010.

LESSMANN, V. E. **Estudo da reação de cura de resinas Ureia-formol por Espectrometria de Ressonância Magnética Nuclear.** 2008. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LI, J.; LEI, H.; XI, X.; LI, C.; HOU, D.; SONG, J.; DU, G. Um adesivo para madeira sustentável com ácido cítrico e tanino, com propriedades de adesão favoráveis e resistência à água. **Culturas e Produtos Industriais**, v. 201, p. 116933, 2023.

LIU, B.; ZHOU, Y.; ESSAWY, H.; CHEN, Q.; LIANG, J.; ZHOU, X.; DU, G. Adesivo à base de tanino isento de formaldeído e com epóxi como endurecedor para compensados. **Madeiras. Ciência e tecnologia** , v. 24, 2022.

LIU, Z.; LIU, T.; ZHANG, J.; LI, Y.; LUO, J.; LI, J.; MAO, A. Preparação de um adesivo de proteína de soja forte, de alta intensidade de pré-prensagem e multifuncional usando polímero funcional hiper-ramificado. **Teste de Polímero**, v. 119, p. 107931, 2023.

LOPES, T. A. **Nanopartículas de lignina kraft para modificação do adesivo ureia-formaldeído para colagem de madeira.** 2022. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2022.

MARTINS, D. A. L. **A importância das emissões de formaldeído e compostos orgânicos voláteis de placas de derivados de madeira na qualidade do ar interior.** 2020. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2020.

MAURICIO, S. **Como reduzir a emissão de formaldeído em chapas de madeira?** Artigo Linkedin. 2015. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/como-reduzir emiss%C3%A3o-de-formalde%C3%ADdo-em-chapas-madeira-sedeur mauricio/?originalSubdomain=pt> Acesso em: 03 ago. 2023.

MEDVED, S.; GAJŠEK, U.; TUDOR, E. M.; BARBU, M. C.; ANTONOVIĆ, A. Efficiency of bark for reduction of formaldehyde emission from particleboards. **Wood research**, v. 64, n. 2, p. 307-316, 2019.

MILAGRES, E. G.; VITAL, B. R.; LÚCIA, R. M. D.; PIMENTA, A. S. Compósitos de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, polipropileno e polietileno de alta e baixa densidades. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, p. 463-470, 2006.

MOREIRA, C. S. Métodos de preparação industrial de solventes e reagentes químicos. **Revista Virtual de Química**, v.7, n. 4, 2015.

MYERS, G. E. How mole ratio of UF resin affects formaldehyde emission and other properties: a literature critique. **Forest Products Journal**, Estados Unidos, v. 34, n. 5, p. 35 - 41, 1984.

NEMLI, G.; ÇOLAKOGLU, G. The influence of lamination technique on the properties of particleboard. **Building and Environment**, v. 40, p. 83-87, 2005.

NEITZEL, N.; HOSSEINPOURPIA, R.; ADAMOPOULOS, S. A dialdehyde starch-based adhesive for Medium-Density Fiberboards**. BioResources**, v. 18, n. 1, 2023.

OSHA, Occupational Safety and Health Administration. **OSHA Instruction CPL 02-02-052** October 7, 1991, Revised 2017. Disponível em: < https://www.osha.gov/enforcement/ directives/cpl-02-02-052> Acesso em: 10 ago. 2023.

PAIVA, N. T. N. **Desenvolvimento de uma resina ureia formaldeído de baixa emissão de formaldeído fortificada com melamina.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade do Porto, Portugal, 2010.

PARK, J. Y.; LEE, S. M.; PARK, B. D.; LIM, J. Y.; JANG, S. G.; KIM, S. Effect of surface laminate type on the emission of volatile organic compounds from wood-based composite panels. **Journal of adhesion Science and Technology**, v. 27, n. 5-6, p. 620–631, 2013.

PARK, B. D.; JEONG, H. W. Hydrolytic stability and crystallinity of cured urea – formaldehyde resin adhesives with different formaldehyde/urea mole ratios. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Holanda, v. 31, p. 524-529, 2011.

PARK, B. D.; KANG, E. C.; PARK, J. Y. Efeitos da proporção molar de formaldeído para uréia no comportamento de cura térmica da resina de uréia-formaldeído e nas propriedades do painel de partículas. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 101, n. 3, p. 1787–1792, 2006.

PARK, B. D.; KANG, E. C.; PARK, J.Y. Comportamento de cura térmica de adesivos de resina de ureia-formaldeído modificados com dois sequestrantes de formaldeído e sua influência no desempenho de adesão. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 3, p. 1573-1580, 2008.

PARK, B. D.; KIM, J. W. Effects of formaldehyde to urea mole ratio on thermomechanical curing of urea-formaldehyde resin adhesives. **Mokchae Konghak Journal of the Korean Wood Science and Technology**, Seoul, República da Coréia, v. 35, n. 5, p.76-86, 2007.

PEREIRA, F.; PEREIRA, J.; PAIVA, N.; FERRA, J.; MARTINS, J. M.; MAGALHÃES, F. N.; CARVALHO, L. Natural additive for reducing formaldehyde emissions in urea-formaldehyde resins. **J. Renew. Mater**., v. 4, n. 1, 2016

PINA, C. D. S. **Avaliação da exposição profissional ao formaldeído: efeito genotóxico**. 2010. Dissertação (Mestrado em Contaminação e Toxicologia Ambientais) – Universidade do Porto, Portugal, 2010.

QUE, Z. L.; FURUNO, T.; KATOH, S.; NISHINO, Y. Evaluation of three test methods in determination of formaldehyde emission from particleboard bonded with different mole ratio in the urea-formaldehyde resin. **Building and Environment,** Reino Unido, v. 42, n. 3, p. 1242-1249, 2007.

QUE, Z.; FURUNO, T.; KATOH, S.; NISHINO, Y. Effects of the molar ratio of urea-formaldehyde resin on the properties of agglomerated panels. **Building and Environment**, Reino Unido, v. 42, n. 3, p. 1257–1263, 2007.

RÉH, R.; IGAZ, R.; KRIŠT'ÁK, L'.; RUŽIAK, I.; GAJTANSKA, M.; BOŽÍKOVÁ, M.; KUČERKA, M. Functionality of beech bark in adhesive mixtures used in plywood and its effect on the stability associated with material systems. **Materials**, v. 12, n. 1298, 2019.

ROFFAEL, E.; JOHNSSON, B. Perforator method in balance. **International Wood Products Journal**, Reino Unido, v. 3, p. 43-50, 2012.

RUŽIAK, I.; IGAZ, R.; KRIŠT'ÁK, L.; RÉH, R.; MITTERPACH, J.; OČKAJOVÁ, A.; KUČERKA, M. Influence of UreaFormaldehyde adhesive modification with beech bark on chosen properties of plywood. **Bioresources**, v. 12, p. 3250–3264, 2017.

SANTOS, R. C. dos; MENDES, L. M.; CARNEIRO, A. D. C. O.; MORI, F. A.; CASTRO, R. V. O.; MENDES, R. F. Utilização de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish) na produção de painéis aglomerados com adição de pet. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, p. 149-158, 2011.

SILVA, F. J. C. **Caracterização de resinas de ureia formaldeído.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade do Porto, Portugal, 2008.

SILVA, G. C.; LELIS, R. C. C.; OLIVEIRA, G. D. L.; SILVA, B. C. D.; LOSSANO, W. C. D. S.; ABREU, H. D. S. Propriedades de adesivo aplicado em painéis a partir da substituição por lignossulfonato do processo sulfito. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 322-335, 2019.

TAYO, J. L.T.; BETTELHÄUSER, R. J.; EURING, M. Canola meal as raw material for the development of bio-adhesive for medium density fiberboards (MDFs) and particleboards production. **Polymers**, Basel, Suíça, v. 14, n. 17, p. 3554, 2022.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VIEIRA, M. C.; BRITO, E. O.; GONÇALVES, F. G. Evolução econômica do painel compensado no Brasil e no mundo. **Floresta e ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 3, p. 277–285, 2012.

WEBER, C.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, p. 405-413, 2015.

WIBOWO, E. S.; PARK, B. D. Análise bidimensional por ressonância magnética nuclear da formação de pontes de hidrogênio em resinas termoendurecíveis cristalinas de ureia-formaldeído em baixa razão molar. **ACS Applied Polymer Materials**, Washington, v. 4, n. 2, p. 1084-1094, 2022.

WIBOWO, E. S.; LUBIS, M. A. R.; PARK, B. D. Simultaneous improvement of formaldehyde emission and adhesion of medium-density fiberboard bonded with low-molar ratio urea-formaldehyde resins modified with nanoclay. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 49, n. 5, p. 453-461, 2021.

ZHANG, H.; LIU, J.; LU, X. Reducing the formaldehyde emission of composite wood products by cold plasma treatment. **Wood Research**, Japão, v. 58, n. 4, p. 607-616, 2013.

ZIDANES, U. L; LORENÇO, M. S.; DA SILVA, A. E.; DIAS, M. C.; RODRIGUES, L. L. A.; DORES, B. A. B.; MORI, F. A. Substitution of petrochemical compounds for polyphenols of natural origin reinforced with cellulose nanofibrils to formulate adhesives for wood bonding. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 29, p. 74426-74440, 2023.

2 CAPÍTULO II: EFEITO DA ALTERAÇÃO DA RAZÃO MOLAR NA EMISSÃO DE FORMALDEÍDO E NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS MDF

RESUMO

A emissão de formaldeído em painéis de madeira reconstituída é limitada por normas regulamentadoras nacionais e internacionais, em função do caráter cancerígeno deste componente. O objetivo do presente estudo foi avaliar a influência da razão molar da resina ureia formaldeído (UF) na emissão de formaldeído e nas propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF, visando determinar a melhor composição, isto é, aquela que apresentar menor emissão de formaldeído sem prejudicar as propriedades. Para isso, foram utilizados 5 tratamentos caracterizados por cinco razões molares (0,9F:1U; 1F:1U; 1,1F:1U; 1,2F:1U e 1,3F:1U), sendo considerada testemunha a razão 1,1:1. Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 750 $kg.m^{-3}$, dimensões de 40 x 40 x 1,5 cm, 12% de resina, 1% de parafina e ciclo de prensagem com temperatura de 170 °C, pressão de 37 $kgf.cm^{-2}$ por um tempo de 10 minutos. As propriedades físico-mecânicas dos painéis, bem como a emissão de formaldeído, foram determinadas e avaliadas de acordo com a norma NBR 15316 (ABNT, 2019). Como resultados, observou-se que a emissão de formaldeído foi menor para os painéis produzidos com resina de razões molares 0,9:1; 1:1 e 1,1:1; que foram classificados como painéis E1. O valor obtido para painéis com resina de razão molar 1,2:1 foram enquadrados como E2, e o valor obtido para a razão molar 1,3:1 ultrapassou os limites da referida norma. Os painéis produzidos com resina UF com razões molares 1,1:1; 1,2:1 e 1,3:1 atenderam aos requisitos determinados pela norma para todas as propriedades físico-mecânicas de painéis MDF não estruturais para uso em condições secas. Estes resultados indicaram que a razão molar da resina UF mais adequada para produção de painéis MDF é 1,1:1; visto que proporcionou baixa emissão de formaldeído e propriedades tecnológicas compatíveis com a norma de referência.

Palavras-chave: Painéis de madeira reconstituída; razão ureia formaldeído; propriedades tecnológicas.

ABSTRACT

The emission of formaldehyde in reconstituted wood panels is limited by national and international regulatory standards, due to the carcinogenic character of this component. The objective of the present study was to evaluate the influence of the molar ratio of urea formaldehyde (UF) resin on formaldehyde emission and on the physical and mechanical properties of MDF panels, in order to determine the best composition, that is, the one that presents lower formaldehyde emission without harming the properties. For this, 5 treatments characterized by five molar ratios (0.9F:1U; 1F:1U; 1.1F:1U; 1.2F:1U and 1.3F:1U) were used, and the 1.1:1 ratio was considered a control. The panels were produced with a nominal density of 750 $kg.m^{-3}$, dimensions of 40 x 40 x 1.5 cm, 12% resin, 1% paraffin and pressing cycle with a temperature of 170 °C, pressure of 37 $kgf.cm^{-2}$ for a time of 10 minutes. The physical-mechanical properties of the panels, as well as the formaldehyde emission, were determined and evaluated according to NBR 15316 (ABNT, 2019). As a result, it was observed that the formaldehyde emission was lower for the panels produced with 0.9:1 molar ratio resin; 1:1 and 1,1:1; which were classified as E1 panels. The value obtained for panels with resin of molar ratio 1.2:1 were classified as E2, and the value obtained for the molar ratio 1.3:1 exceeded the limits of the referred standard. The panels produced with UF resin with molar ratios 1.1:1; 1.2:1 and 1.3:1 met the requirements determined by the standard for all physical-mechanical properties of non-structural MDF panels for use in dry conditions. These results indicated that the molar ratio of UF resin most suitable for the production of MDF panels is 1.1:1; since it provided low formaldehyde emission and technological properties compatible with the reference standard.

Keywords: Reconstituted wood panels; formaldehyde urea ratio; formaldehyde emission; quality standards.

2.1 INTRODUÇÃO

A resina mais utilizada na produção de painéis de madeira reconstituída é a ureia formaldeído (UF), por apresentar vantagens como menor custo, “cura” rápida, baixa influência na coloração e boa adesão com as fibras da madeira, o que proporciona propriedades físicas e mecânicas que atendem as normas de qualidade para painéis em ambiente seco (Ayrilmis; Nemli, 2017). Entretanto, a aplicação desta resina tem como consequência a emissão de formaldeído, que ocorre desde a produção dos painéis até o fim da sua vida útil (Katsukake, 2009).

Mesmo havendo opções de resinas com menor emissão de formaldeído, como a melamina formaldeído (MF), a tanino formaldeído (TF) e outras totalmente livres de formaldeído como a poliuretana ou MDI, estas têm seu uso limitado por fatores econômicos e/ou de aplicabilidade. O adesivo MF tem um alto valor agregado e alta resistência à umidade, fazendo com que seu uso seja restrito a painéis de uso exterior e revestimentos de baixa pressão (Pizzi; Mittal, 2003). Da mesma forma, em função do elevado custo quando comparado com adesivos provenientes do formaldeído, o adesivo poliuretano ou MDI, é utilizado somente quando são requeridos painéis com maior resistência à água e resistência à tração (Carneiro, 2017). Os adesivos a base de tanino apresentam limitações como elevada viscosidade, presença de substâncias não tânicas no extrato (açúcares e gomas), alta reatividade com o formaldeído, menor resistência à linha de cola e maior suscetibilidade à umidade (Carneiro *et al*., 2009). Em função destas considerações, a resina a base de UF segue se destacando como o mais importante adesivo utilizado em painéis reconstituídos, principalmente pelo fator custo, além da facilidade de aplicação.

O formaldeído, além da ampla aplicação na área industrial principalmente para produção de resinas utilizadas em materiais de construção (materiais de isolamento, colas e produtos de madeira prensada e compensada e painéis de fibras), também é utilizado sob diferentes formas, em revestimentos para papel, tecidos, roupas e fibras sintéticas. Além disso, o formaldeído é importante na produção de fertilizantes utilizados na agricultura e jardinagem, bem como na área biomédica, na forma de formalina, como agente antimicrobiano, antisséptico, conservante, fixador histológico e desinfetante (IARC, 2012).

Nos últimos anos, diversos estudos foram conduzidos no intuito de averiguar o real efeito do formaldeído e os perigos para saúde humana associados a exposição; a partir destes, no ano de 2006, o formaldeído foi classificado como agente cancerígeno pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC) (IARC, 2006; Carvalho; Magalhães; Ferra, 2012).

Segundo o Instituto Nacional de Câncer – INCA, o formaldeído evapora em condições normais de temperatura e o contato direto com grandes concentrações se torna altamente perigoso à saúde humana, podendo resultar em diversos agravos à saúde (INCA, 2022).

Buscando a redução da emissão de formaldeído em painéis de madeira, políticas mais restritivas foram adotadas pela União europeia (EN 13986 2004), Estados Unidos (ANSI A208.1 & 2 2002 e CARB 2009) e Japão (JIS A5908 2003), por meio de normas regulamentadoras que impõe limites para emissão de formaldeído (Carvalho; Magalhães; Ferra, 2012). No Brasil, com o objetivo de adequar os painéis de madeira reconstituída aos requisitos internacionais, a norma brasileira NBR 15316 (ABNT, 2019) foi atualizada com os limites de emissão de formaldeído para painéis MDF, equivalentes a norma europeia, a partir do método *Perforator*.

Segundo Que *et al*. (2007a), a poluição do ar interno por formaldeído proveniente de produtos de madeira colados com resina UF tem sido uma grande preocupação na indústria de produtos florestais nos últimos anos. O autor destaca que as principais variáveis para determinar o potencial de formaldeído liberado dos painéis são a formulação da resina (razão molar F:U), a umidade das partículas de madeira encoladas antes da prensagem, o tipo e a quantidade de catalisador, o tipo e a quantidade de aditivos (sequestrante de formaldeído), as condições de prensagem (tempo, temperatura e pressão) e o condicionamento.

Visando ajustar a resina UF para atender os limites de emissão de formaldeído impostos pelas entidades reguladoras de diferentes países, estudos vêm sendo desenvolvidos por meio de parcerias entre empresas e instituições de pesquisa. Investigando os efeitos da alteração da razão molar da resina utilizada, adição de compostos ou sequestrantes de formaldeído ou ainda aplicação de revestimentos.

No entanto, a nível industrial, o método mais utilizado para reduzir as emissões de formaldeído foi baseado nas alterações na formulação da resina UF, principalmente na razão molar. A razão molar consiste na proporção entre o número de mols de formol e o número de mols de ureia, no momento da produção da resina.

Sabe-se que as resinas de maior proporção molar F:U emitem maior quantidade de formaldeído em relação as de menor proporção molar. Isso ocorre por dois motivos, primeiro em função do maior conteúdo de formaldeído livre presentes nestas resinas devido a maior quantidade de formaldeído adicionado em relação a ureia, e segundo, em razão da sua estrutura ramificada que proporciona menor resistência à hidrólise dos grupos metil (Que *et al.* 2007a; Amazio *et al.*, 2011; Park; Jeong, 2011).

De acordo com Carvalho, Magalhães e Ferra (2012) a diminuição das emissões de formaldeído livre pode ser obtida pela diminuição da razão molar F:U, ao mesmo passo que leva a uma diminuição da reatividade e do grau de cura, prejudicando a formação das ligações adesivas. Estudos anteriores mostraram que a principal razão para a baixa adesão em resinas de menor razão molar é a presença de regiões cristalinas (Wibowo; Park, 2021; Nuryawan; Singh; Zanetti, 2017; Li; Zhang, 2021). As regiões cristalinas nas resinas de menor proporção molar conferem maior resistência a hidrólise dos grupos metil, e consequentemente menor emissão de formaldeído, mas por outro lado, inibem a reticulação durante a cura, reduzindo a adesão em painéis ou outros produtos à base de madeira (Park; Jeong, 2011; Wibowo; Park, 2021).

Alguns estudos mostraram a influência da razão molar da resina UF sobre as propriedades de painéis de madeira. Park, Kang e Park (2006) avaliando painéis de partículas verificaram menor emissão de formaldeído com a utilização de menores razões molares, no entanto, as propriedades dos painéis foram prejudicadas, apresentando maior inchamento em espessura e baixa resistência a tração perpendicular. Que *et al.* (2007b) constataram que as propriedades dos painéis de partículas foram alteradas conforme a redução da razão molar entre 1,27:1 e 1,01:1, em que o MOR e a resistência a tração diminuíram 10% e 30%, e o inchamento em espessura aumentou cerca de 19%. Ayrilmis e Nemli (2017) também avaliando painéis de partículas, encontraram maior resistência à tração perpendicular bem como maior resistência e rigidez à flexão estática com a utilização da razão molar 1,2:1, quando comparada com a 1,09:1. Keinert (2021) trabalhando com diferentes razões molares de resinas melamina ureia formaldeído, também observou correlação entre as propriedades físicas e mecânicas do painel de partículas e a razão molar da resina utilizada.

Entretanto, no Brasil, ainda é comum a comercialização e o uso de resinas UF com diferentes proporções de F:U. Assim, uma atualização da influência das formulações adesivas comerciais de resina UF na emissão de formaldeído e as consequências nas propriedades tecnológicas dos painéis torna-se importante.

Embora o teor de formaldeído livre nas resinas UF tenha diminuído nas últimas décadas, ainda são necessários esforços em nível de pesquisa para atender as normas técnicas de qualidade, que exigem níveis cada vez menores de emissão sem comprometer a estabilidade dimensional e resistência. Diante disso, o objetivo do presente capítulo foi determinar a melhor razão molar do adesivo a base de resina ureia formaldeído para a produção de painéis de fibras de média densidade, com intuito de atender as normas de qualidade em termos de emissão de formaldeído e propriedades tecnológicas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Matéria prima

Para a manufatura dos painéis foram utilizadas resina ureia formaldeído, emulsão de parafina e fibras de *Pinus* spp. oriundas do processo de desfibramento termomecânico para produção de MDF pela empresa Sudati (Otacílio Costa, SC). As fibras, tiveram como único pré-tratamento antes de serem encoladas, a secagem em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 80 °C até atingirem 4% de umidade. O estudo foi desenvolvido nos laboratórios de adesivos, painéis de madeira e ensaios tecnológicos da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC e no laboratório da Empresa Sudati.

2.2.2 Plano experimental

Os cinco tratamentos foram caracterizados pelas diferentes razões molares das resinas ureia formaldeído, sendo 1,3 partes de formaldeído para 1 parte de ureia, 1,2:1, 1,1:1, 1,0:1 e, 0,9:1. Foram produzidos três painéis por tratamento, com densidade de 750 $kg.m^{-3}$, dimensões de 40 x 40 x 1,5 cm, 12% de resina ureia formaldeído, 1% de emulsão de parafina, pré prensagem a frio com pressão de 5 $kgf.cm^{-2}$ durante 5 minutos e o ciclo de prensagem a quente com temperatura de 170 °C, pressão de 37 $kgf.cm^{-2}$ por um tempo de 10 minutos.

2.2.3 Caracterização do adesivo

A caracterização das resinas nas diferentes razões molares utilizadas no estudo foi realizada por meio da determinação da viscosidade (ASTM D1084, 1998), do *gel time* (ASTM D2471, 1999), do teor de sólidos (ASTM D 1490, 2013) e do pH, com três repetições para cada resina.

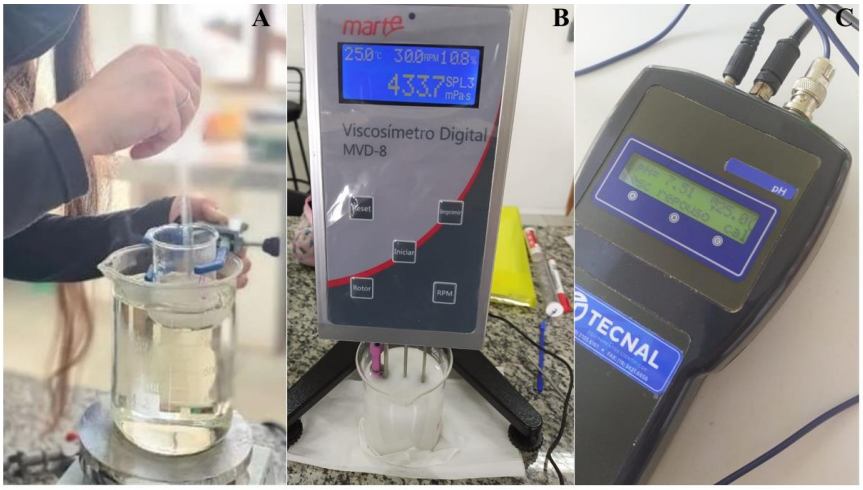
Para a determinação da viscosidade, a temperatura do laboratório e da amostra da resina UF foram mantidas em 25 °C por meio do ar-condicionado e do banho maria, respectivamente. A viscosidade de cada amostra foi determinada em um viscosímetro digital rotacional MDV-5, com haste (*spindler*) número LV3, em amostras de 400 ml (Figura 3B).

O pH das amostras de aproximadamente 50 ml foi aferido em temperatura de 25 °C diretamente em pHmetro digital portátil, calibrado a pH 4 e 7, utilizando-se soluções tampão padronizadas (Figura 3C).

O tempo de gelatinização ou *gel time* foi determinado utilizando-se um béquer de 500 ml contendo glicerina sobre um agitador magnético aquecido, no qual um béquer de 50 ml contendo aproximadamente 5 g de adesivo, foi mergulhado com o auxílio de um aparato e mantido sob agitação manual utilizando um bastão de vidro. Durante todo o ensaio a temperatura da glicerina foi controlada a 130 °C. O *gel time* foi definido pela cronometragem do tempo transcorrido desde o momento da imersão do béquer na glicerina até o momento de endurecimento do adesivo (Figura 3A).

O teor de sólidos foi determinado com a pesagem de 2 g de resina em uma placa de petri com o peso seco conhecido. Na sequência a placa foi colocada na estufa com circulação forçada de ar a temperatura de 105 °C durante 24 horas, sendo posteriormente retirada e resfriada em dessecador por 1 hora. A placa de petri com a amostra foi pesada, obtendo-se o peso seco da amostra pelo desconto do peso da placa de petri. O teor de sólidos (TS%) foi determinado pela relação do peso seco com o peso inicial, expresso em porcentagem.

Figura 3- Determinação das propriedades das resinas.



Legenda: *gel time* (A); viscosidade (B); e pH (C). Fonte: Elaborado pela autora (2024).

2.2.4 Produção de painéis

A quantidade pré-calculada de fibras foi colocada na encoladeira tipo tambor rotativo. O adesivo foi aplicado por meio de uma pistola posicionada no centro do tambor, a qual foi acionada por um compressor de ar à medida que o tambor girava a velocidade de 20 rpm. A massa produzida de fibras, adesivo e parafina foi colocada em uma caixa formadora com dimensões internas de 40 x 40 cm, sendo pré-prensada à frio e posteriormente a quente em prensa hidráulica Marconi MA 098 (Figura 4).

Figura 4- Produção dos painéis.

Legenda: Tambor rotativo para incorporação da resina (A); caixa formadora (B); prensa hidráulica (C); disposição do colchão na prensa (D); painéis após saída da prensa (E). Fonte: Elaborado pela autora (2024).

2.2.5 Avaliação das propriedades tecnológicas

Após a prensagem, os painéis foram acondicionados em câmara climática a temperatura de 20 °C ± 3 ºC e umidade relativa de 65% até atingirem massa constante. Na sequência, os painéis foram esquadrejados em serra circular para as dimensões de 38 x 38 cm, visando a redução dos efeitos de borda.

O dimensionamento dos corpos de prova, bem como os procedimentos para determinação das propriedades físicas e mecânicas (densidade, teor de umidade, inchamento em espessura, rigidez e resistência à flexão estática, resistência à tração perpendicular e arrancamento de parafuso superficial e de topo), foram determinados de acordo com a NBR 15316-2 (ABNT, 2019).

A razão de compactação foi determinada considerando a relação entre as densidades aparente (umidade de condicionamento) obtidas para os corpos de prova dos painéis e a densidade básica da madeira de *Pinus* spp., a qual foi fornecida pela empresa Sudati (399 kg m^{-3}).

As dimensões e o número de corpos de prova por ensaio estão apresentados na Tabela 2. Os corpos de prova para os ensaios de densidade e teor de umidade foram retirados dos corpos de prova de flexão estática, após o ensaio.

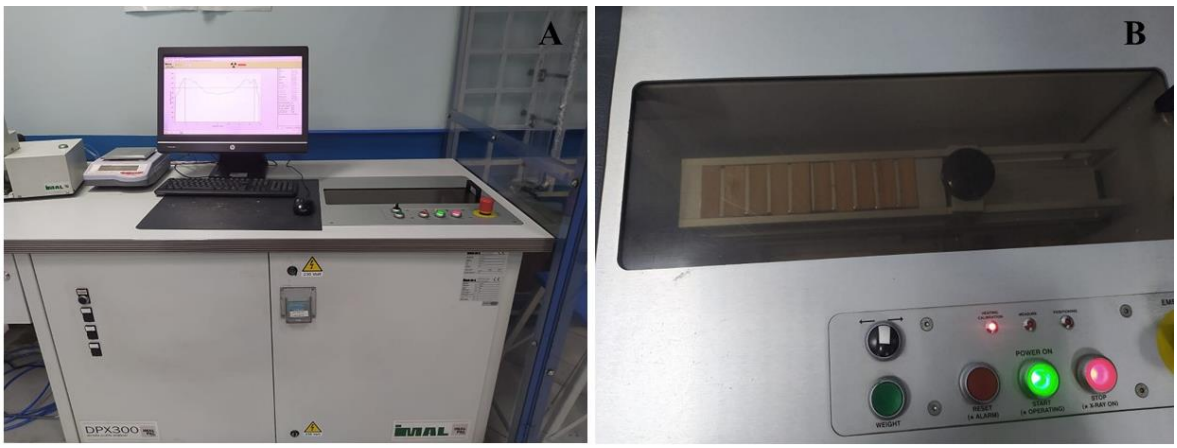
Tabela 2- Dimensões e número de corpos de prova para cada ensaio.

Ensaio	Dimensões (mm)	N° corpos de prova por tratamento
Densidade	50 x 50 x 15	15
Teor de umidade	50 x 50 x 15	15
Inchamento em espessura	50 x 50 x 15	21
Perfil de densidade	50 x 50 x 15	21
Flexão estática	350 x 50 x 15	12
Tração perpendicular	50 x 50 x 15	21
Arrancamento de parafuso	50 x 50 x 15	15
Emissão de formaldeído	25 x 25 x 15	100 g

Legenda: Trat.: tratamentos. Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A determinação da emissão de formaldeído foi baseada no procedimento descrito na NBR 15316-2 (ABNT, 2019), por meio do método *Perforator*, e o perfil de densidade foi realizado em um densitômetro de raio – X IMAL DPX300 (Figura 5).

Figura 5- Perfil de densidade.



Legenda: Densitômetro de raio X (A); corpos de prova no momento do ensaio (B). Fonte: Elaborado pela autora (2024).

2.2.6 Análise estatística

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos, sendo eles as razões molares da resina UF (1,3:1; 1,2:1; 1,1:1; 1,0:1 e 0,9:1).

Os valores obtidos para as propriedades das resinas e nos ensaios tecnológicos foram submetidos a verificação dos pressupostos para uso da estatística paramétrica, sendo, normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Atendido os pressupostos, empregou-se a análise de variância e, quando detectado

diferença significativa, os tratamentos foram comparados entre si pelo teste de médias de Scott Knott ao nível de 5% de significância.

Os resultados da emissão de formaldeído não foram avaliados estatisticamente em função da quantidade de amostras analisadas, que se limitaram a 100 g de painel por tratamento.

Os resultados para as propriedades tecnológicas e emissão de formaldeído dos painéis foram avaliados quanto ao atendimento aos parâmetros estabelecidos pela norma NBR 15316 (ABNT, 2019) para painéis MDF não estruturais para uso em condições secas com espessura de 12 a 19 mm.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Caracterização das resinas

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios das propriedades das resinas com seus respectivos coeficientes de variação, onde pode ser observado que houve diferença significativa entre as razões molares para todas as propriedades analisadas.

Tabela 3- Valores médios das propriedades das resinas de diferentes razões molares.

Razão molar F:U	**Viscosidade (cP)**	**Teor de sólidos (%)**	***Gel time* (s)**	**pH**
0,9:1	$1721{,}5_{(1{,}20)}$ a	$70{,}1_{(0{,}80)}$ a	$318{,}3_{(4{,}81)}$ d	$7{,}26_{(0{,}83)}$ b
1,0:1	$444{,}7_{(1{,}98)}$ d	$69{,}8_{(0{,}09)}$ a	$413{,}1_{(4{,}28)}$ b	$7{,}00_{(1{,}43)}$ c
1,1:1	$433{,}7_{(3{,}67)}$ d	$69{,}9_{(0{,}27)}$ a	$412{,}8_{(4{,}80)}$ b	$7{,}28_{(0{,}27)}$ b
1,2:1	$611{,}5_{(0{,}34)}$ c	$68{,}9_{(0{,}41)}$ b	$375{,}0_{(0{,}96)}$ c	$7{,}40_{(0{,}81)}$ a
1,3:1	$637{,}1_{(0{,}30)}$ b	$68{,}4_{(0{,}21)}$ b	$471{,}3_{(8{,}08)}$ a	$7{,}51_{(0{,}80)}$ a

Legenda: F:U: relação formaldeído ureia; valores subscritos: coeficiente de variação; médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem entre si pelo teste de Scott Knott ao nível de 5% de significância.

De acordo com Iwakiri *et al*. (2002) as resinas UF são produzidas em solução aquosa, com conteúdo de sólidos entre 60 e 70%, pH em torno de 7,4 a 7,8 e viscosidade na faixa de 400 a 1000 cP (25 °C). Portanto, os valores obtidos estão em conformidade com os autores, com exceção da viscosidade para a resina de menor razão molar (0,9:1).

Os resultados para viscosidade demonstram superioridade da razão 0,9:1 com 1721,5 cP em relação as demais, que se mostraram intermediárias em 1,2:1 e 1,3:1 e inferiores e equivalentes em 1,0:1 e 1,1:1. Observou-se que a resina de menor razão molar (0,9:1) apresentou textura grosseira com presença de grumos, o que pode justificar o valor de viscosidade encontrado. A variação da viscosidade das resinas pode ser atribuída ao longo tempo de armazenamento, conforme indicado por Gonçalves *et al*. (2020). Da mesma forma, Marutzky e Ranta (1979), verificaram que as resinas UF de baixa razão molar possuem menor estabilidade de armazenamento mesmo que refrigerado, gelificando em poucas semanas. Cabe destacar que as resinas ficaram armazenadas em torno de duas semanas antes das análises.

Os valores de viscosidade encontrados para as demais razões molares (1,0:1; 1,1:1; 1,2:1 e 1,3:1) apresentaram comportamento condizente com os estudos de Marutzky e Ranta (1979); Park e Kim (2007); Park e Jeong (2011); Zhang, Liu e Lu (2013) e Gonçalves *et al.* (2020), que encontraram maiores valores de viscosidade para resinas com maior razão molar. Conforme Marutzky e Ranta (1979), a viscosidade é dependente das interações intermoleculares dos

grupos metil, onde a quantidade de grupos metil aumenta com o teor de formaldeído, por isso as resinas mais ricas em formaldeído apresentam maior viscosidade quando comparadas com as resinas de menor razão molar. Além disso, segundo Gonçalves *et al*. (2020), quando se deseja uma resina de menor razão molar, utiliza-se maiores quantidades de ureia na última etapa de produção, logo, uma menor quantidade de formaldeído vai estar disponível para ligação com a ureia, portanto, a polimerização é mais lenta, resultando em uma viscosidade menor para o mesmo tempo de condensação. Sendo assim, a viscosidade também é influenciada pelo grau de condensação, ou seja, pelo peso molecular dos produtos da condensação.

Para o teor de sólidos, observa-se uma tendência de aumento com a redução da razão molar, como relatado por Park e Jeong (2011). De acordo com os autores, a maior quantidade de ureia adicionada na última etapa da produção das resinas de menor razão molar, causa aumento do teor de sólidos. De acordo com Wibowo, Park e Causin (2020), o teor de sólidos aumenta à medida que os estágios da síntese da resina avançam, em função da formação de um polímero maior, resultando na redução dos compostos voláteis remanescentes de formaldeído, no entanto, o maior incremento do teor de sólidos ocorre com a adição de ureia na etapa final.

Em relação ao *gel time*, houve diferença significativa entre as resinas, com o menor valor obtido para a resina de menor razão molar e o maior para resina de maior razão molar. No entanto, o comportamento esperado seria a redução do *gel time* com aumento da razão molar devido a maior reatividade, como observado por Keinert (2021), Park e Jeong (2011) e Park, Kang e Park (2006). Em síntese, estes resultados não condizem com a realidade da reatividade das resinas no momento da produção dos painéis, que foi realizada antes da análise de *gel time*. Assim, pode-se atribuir novamente os resultados ao longo tempo de armazenamento em refrigeração.

Os valores de pH apresentaram diferença entre as resinas, com os maiores valores para as resinas de maiores razões molares (1,2:1 e 1,3:1) em relação as demais. Dentre as resinas de menor razão molar (0,9:1; 1,0:1 e 1,1:1) não foi possível detectar uma tendencia específica nos valores de pH com a redução da razão molar, visto que os valores foram iguais para as resinas 0,9:1 e 1,1:1; que por sua vez foram superiores ao pH da resina 1,0:1. De acordo com Wibowo, Park e Causin (2020), no último estágio de produção das resinas UF, o pH é ajustado para valores próximos de 8, para retardar a reação de condensação, e ureia é adicionada para capturar o formaldeído não reagido restante. Assim, os valores de pH final das resinas dependem dos ajustes feitos em função das diferentes etapas de produção.

Gonçalves *et al*. (2020) observou valores de pH iguais a 8,02; 8,06 e 7,96 para resinas UF de razões molares iguais a 1,10:1; 1,18:1 e 1,25:1, respectivamente. Keinert (2021) obteve

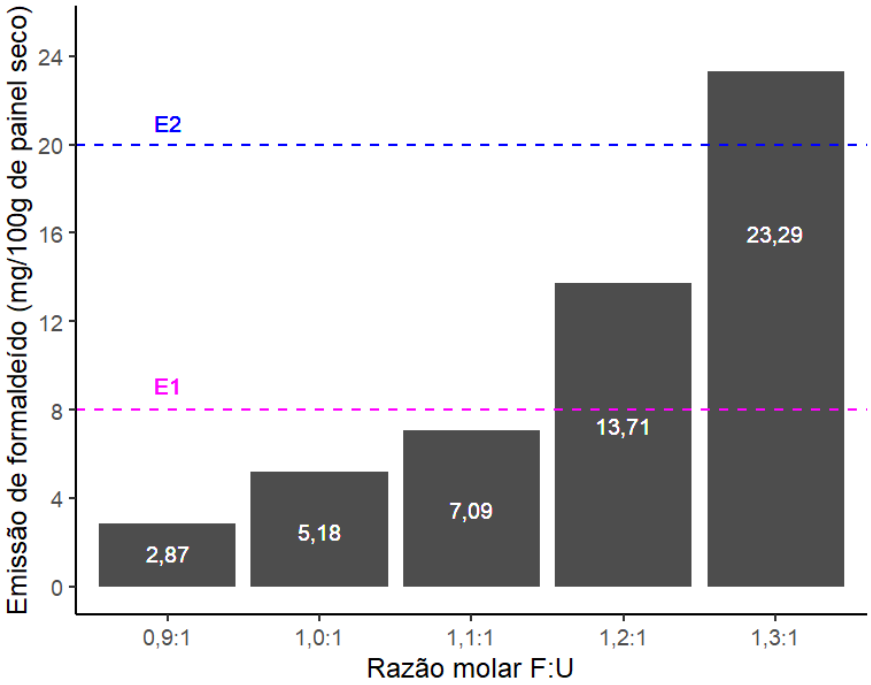
valores de pH para resinas melamina ureia formaldeído de 9,5 para ambas as razões molares testadas (1,22:1 e 1,05:1). Que *et al*. (2007) obteve valor de pH igual a 8,3 para resinas UF com razões molares de 1,27:1 e 1,19:1.

Apesar da diferença observada entre as razões molares no presente estudo, todas as resinas apresentaram pH levemente alcalino, característico e ideal para adesivos a base de resina UF conforme descrito por Iwakiri *et al*. (2002).

2.3.2 Emissão de formaldeído dos painéis

Os valores de emissão de formaldeído dos painéis produzidos com as resinas de diferentes razões molares estão apresentados na Figura 6, na qual observa-se um aumento gradativo da emissão dos painéis com o aumento da razão molar da resina UF.

Figura 6- Valores de emissão de formaldeído dos painéis.



Legenda: Linhas tracejadas indicam os limites máximos das classes E1 (emissão baixa) e E2 (emissão intermediária) da NBR 15316 (ABNT, 2019). Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os painéis produzidos com resinas UF de menor razão molar apresentaram menor emissão de formaldeído. Essa tendência também foi relatada nos estudos de Keinert (2021), Zhang, Liu e Lu (2013), Que *et al*. (2007b), Park, Kang e Park (2006) e Marutzky, Roffael e Ranta (1979). Isso é explicado pelo fato das resinas de baixa razão molar terem menos formaldeído livre disponível, uma vez que, com a maior adição de ureia mais formaldeído é

consumido nas reações. Park, Kang e Park (2006) explicam que a emissão de formaldeído em painéis é fortemente dependente da quantidade de formaldeído livre presente na resina UF antes da cura.

Para Pizzi (2015) a emissão de formaldeído dos produtos colados se deve a dois fatores principais, o primeiro fator, como já mencionado, é o formaldeído residual ou livre presente na sua forma volátil nas cavidades dos aglomerados colados, adsorvidos nas fibras de celulose ou dissolvido no teor de umidade residual dentro da resina. O segundo fator é a hidrólise do formaldeído fracamente ligado em grupos metil, acetais e hemiacetais, e em casos mais graves a hidrólise (alta umidade e alta temperatura) de pontes metileno-éter, que aumenta ainda mais o teor de formaldeído emissível. A ligação química entre o nitrogênio da ureia e o carbono dos grupos metil pode ser facilmente quebrada, desta forma, segundo o autor, uma corrente permanente de formaldeído emissível é gerada a partir destas estruturas fracamente ligadas e quanto maior a taxa de hidrólise maior é a proporção de formaldeído que contribui para a subsequente emissão de formaldeído em painéis de madeira.

Conforme Park e Jeong (2011), as resinas de maior razão molar apresentam menor resistência a hidrólise devido a sua estrutura ramificada, que aumenta a probabilidade de expor os grupos metil à hidrólise, aumentando a emissão de formaldeído.

Como pode ser observado na Figura 6, os painéis produzidos com as razões molares 0,9:1; 1,0:1 e 1,1:1 foram classificados de acordo com a NBR 15316 (ABNT, 2019) como de baixa emissão (E1), que impõe limite de 8 mg de formaldeído para cada 100 g de painel seco, esta é a principal classe adotada nos países Europeus. Já os painéis produzidos com a razão molar 1,2:1 foram classificados como E2, que permite emissão entre 8 e 20 mg de formaldeído para cada 100 g de painel seco. A classe E2 é utilizada pela grande maioria das empresas brasileiras na produção e comercialização de painéis reconstituídos em território nacional (Keinert, 2021).

Os painéis produzidos com a razão molar 1,3:1 ultrapassaram os limites de emissão estabelecidos pela referida norma, portanto, a utilização desta formulação não é indicada (Figura 6).

Estes resultados demonstram que a redução na emissão de formaldeído é mais acentuada em razões molares abaixo de 1,2:1; assim como relatado por Park, Kang e Park (2006) para painéis de partículas. Desta forma, a utilização de resinas UF com razões molares abaixo de 1,2:1 é mais eficaz na redução da emissão de formaldeído em painéis MDF.

2.3.3 Propriedades físicas dos painéis

Na Tabela 4, os valores médios para as propriedades físicas dos painéis demonstraram uma homogeneidade da densidade entre as razões molares e, consequentemente, da razão de compactação, o que é positivo em função da influência destas variáveis nas demais propriedades tecnológicas dos painéis. Para teor de umidade e inchamento em espessura, observou-se diferença significativa entre os tratamentos, onde as maiores razões molares apresentaram teor de umidade superior e os melhores resultados em termos de inchamento em espessura.

Tabela 4- Valores médios das propriedades físicas dos painéis.

Razão molar F:U	**Densidade ($kg.m^{-3}$)**	**Razão de Compactação**	**TU (%)**	**Inchamento (%)**
0,9:1	752 $_{(3,69)}$ a	1,88 $_{(3,69)}$ a	6,94 $_{(3,59)}$ b	13,27 $_{(6,56)}$ a
1,0:1	774 $_{(4,27)}$ a	1,94 $_{(4,27)}$ a	6,85 $_{(4,64)}$ b	12,66 $_{(9,19)}$ a
1,1:1	749 $_{(6,81)}$ a	1,87 $_{(6,81)}$ a	7,17 $_{(8,69)}$ a	10,27 $_{(10,94)}$ b
1,2:1	761 $_{(3,23)}$ a	1,90 $_{(3,23)}$ a	7,19 $_{(3,19)}$ a	9,99 $_{(9,39)}$ b
1,3:1	749 $_{(3,68)}$ a	1,87 $_{(3,68)}$ a	7,48 $_{(10,78)}$ a	10,23 $_{(7,87)}$ b
Média geral	757	1,89	7,14	11,16
cv	4,61%	4,60%	7,37%	8,91%

Legenda: F:U: relação formaldeído ureia; TU: teor de umidade; valores subscritos: coeficiente de variação; médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott ao nível de 5% de significância.

Os valores médios de densidade, que variaram entre 749 e 774 $kg.m^{-3}$, ficaram próximos da densidade nominal de 750 $kg.m^{-3}$, bem como o coeficiente de variação que foi de 4,61%, sendo considerado adequado pela norma NBR 15316 (ABNT, 2019) que estabelece 7% como limite de tolerância para a propriedade.

Para razão de compactação, a homogeneidade dos resultados acompanhou os de densidade, tendo em vista que a variável é determinada em função da densidade do painel e da densidade da madeira utilizada na produção. Todos os painéis produzidos com as diferentes razões molares apresentaram razão de compactação superior a 1,3, que é o mínimo estabelecido por Moslemi (1974) e Maloney (1993) para que se obtenha uma densificação necessária para a formação do painel, o que reflete nas propriedades tecnológicas. De acordo com os autores, razões de compactação mais altas promovem maior resistência mecânica pela maior compressão do material, e maior inchamento em espessura, em função da maior liberação das tensões de compressão imposta durante a prensagem.

Nos teores de umidade dos painéis, observa-se valores médios entre 6,85% e 7,48%, os quais ficaram abaixo da umidade de equilíbrio da câmara climática que era de 12%. Este resultado corrobora com o trabalho de Silva *et al*. (2006), onde afirmam que os produtos reconstituídos de madeira apresentam menor umidade de equilíbrio em relação à madeira

maciça, mesmo quando expostos a condições de temperatura e umidade semelhantes. Segundo os autores, isto ocorre devido à redução da madeira em fibras, o baixo teor de umidade requerido em função do adesivo, e principalmente pela incorporação de resinas e parafinas. Além disso, segundo Melo *et al.* (2015), outro aspecto que reduz a higroscopicidade é a utilização de alta temperatura e pressão na consolidação final do painel, que são responsáveis pela degradação parcial das polioses, em particular dos grupos hidroxílicos, que atribuem caráter hidrofílico à madeira.

Ao mesmo tempo, evidenciou-se diferença significativa entre os tratamentos para a variável teor de umidade, com superioridade das maiores razões molares (1,1:1; 1,2:1 e 1,3:1). Da mesma forma, Marutzky e Ranta (1979) encontram maiores teores de umidade para os painéis produzidos com resinas de maior razão molar, e associaram esse fato a clivagem dos grupos metil livres, que aumenta com a proporção de formaldeído. Mesmo assim, todos os valores obtidos ficaram dentro do intervalo (4 a 11%) estabelecido pela NBR 15316 (ABNT, 2019) para painéis MDF.

Em relação ao inchamento em espessura, observa-se que os painéis produzidos com resinas de menor razão molar (0,9:1 e 1,0:1), apresentaram valores médios maiores do que aqueles produzidos com as de maior razão molar. A NBR 15316 (ABNT, 2019) limita como máximo inchamento para os painéis MDF, 12%, portanto, somente as razões molares 1,1:1; 1,2:1 e 1,3:1 ficaram dentro do estabelecido.

Menores valores de inchamento em espessura associados às resinas de maior razão molar, também foram relatados por outros pesquisadores. Park, Kang e Park (2006) avaliaram painéis de partículas produzidos com resinas UF utilizando razões molares de 1,0:1; 1,2:1; 1,4:1 e 1,6:1; e obteve valores de inchamento iguais a 25%, 23%, 14% e 12%, respectivamente. Keinert (2021) obteve para painéis de partículas produzidos com resina melamina ureia formaldeído com razões molares iguais a 1,05:1; 1,2:1 e 1,3:1; valores de inchamento de 13,5%, 10,2% e 9,3% respectivamente. Ayrilmis e Nemli (2017) produziram painéis de partículas com duas razões molares da resina UF (1,09:1 e 1,2:1) e encontraram valores de inchamento em espessura iguais a 27,3% para a menor razão molar e 25,1% para a maior.

De acordo com Ayrilmis e Nemli (2017), nas resinas de maior razão molar, o aumento da reatividade das resinas promovido pelo maior teor de formaldeído livre, pelo maior grau de reticulação da rede curada e pela maior taxa de endurecimento, proporcionam um painel mais compacto, e por esta razão, se observa uma diminuição do inchamento em espessura. Da mesma forma, Park, Kang e Park (2006) explicam que à medida que a razão molar F:U é reduzida,

ocorre a redução da reatividade de cura da resina UF, e consequentemente, resulta em uma menor ligação interna, permitindo que mais moléculas de água penetrem no painel.

O grau de reticulação diz respeito ao número de ligações covalentes entre as moléculas lineares e ramificadas, que produzem os polímeros tridimensionais de UF com alta massa molar. Desta forma, o formaldeído livre presente nas resinas de maior razão molar é responsável por promover essas ligações, garantindo um maior grau de reticulação. Segundo Kim *et al*. (2006) tratando de reticulação da resina UF, as amostras com alta densidade de reticulação apresentam taxas de absorção de umidade mais baixas do que aquelas com baixa densidade de reticulação, principalmente devido às ligações extras dentro de uma determinada área que precisariam ser hidrolisadas para permitir que a umidade penetrasse na amostra.

O perfil de densidade dos painéis nas diferentes razões molares está apresentado no Apêndice 1 e os valores médios na Tabela 5, onde pode ser observado que entre os tratamentos não houve diferença significativa dentro das camadas (superfícies e centro). A inexistência de diferença entre os valores de densidade e perfis de densidade dos painéis MDF indica similaridade dos colchões de fibras e das condições de prensagem, conforme observado por Tomazello Filho *et al*. (2010). No entanto, verifica-se diferenças de densidade expressivas entre as camadas e a média, e entre as superfícies e centro, que é típico de painéis reconstituídos de madeira.

Tabela 5- Valores médios do perfil de densidade dos painéis.

Razão molar F:U	**Perfil de densidade (kg.m^{-3})**			
	Média	**Superfície 1**	**Central**	**Superfície 2**
0,9:1	745,2 a	$^{(+33\%)}$989,30$_{(+76\%)}$ a	$^{(-24\%)}$563,4 a	$^{(+29\%)}$963,70$_{(+71\%)}$ a
1,0:1	749,3 a	$^{(+28\%)}$962,70$_{(+64\%)}$ a	$^{(-22\%)}$588,1 a	$^{(+27\%)}$954,40$_{(+62\%)}$ a
1,1:1	759,8 a	$^{(+34\%)}$1014,7$_{(+73\%)}$ a	$^{(-23\%)}$585,5 a	$^{(+31\%)}$998,50$_{(+71\%)}$ a
1,2:1	762,1 a	$^{(+32\%)}$1004,5$_{(+70\%)}$ a	$^{(-23\%)}$589,4 a	$^{(+32\%)}$1008,3$_{(+71\%)}$ a
1,3:1	753,1 a	$^{(+27\%)}$955,90$_{(+52\%)}$ a	$^{(-16\%)}$630,1 a	$^{(+29\%)}$972,80$_{(+54\%)}$ a

Legenda: F:U: relação formaldeído ureia; sobrescrito: diferença percentual das densidades das camadas superficiais e central em relação a densidade média. subscrito: diferença percentual das densidades das camadas superficiais em relação a densidade da camada central.; médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott ao nível de 5% de significância.

A densidade das camadas superficiais é superior à densidade da camada central, formando um perfil característico em forma de letra “M”, também encontrado por outros pesquisadores para painéis MDF produzidos com diferentes espécies (Wilczyn; Kociszewski, 2007; Tomazello Filho *et al*., 2010; Eugênio, 2016; Belini, 2012). Este comportamento é comum porque os pratos aquecidos da prensa transmitem calor para as superfícies do colchão de fibra e a umidade do colchão transforma-se em vapor, que plasticiza a lignina da madeira e

facilita a sua compressão, diferente do centro, que será mais resistente a compressão por estar menos aquecido, desta forma, as superfícies serão mais comprimidas e consequentemente mais densas que o centro (Maloney, 1989).

A razão molar não mostrou influência na diferença de densidade entre as superfícies e o centro, onde todos os tratamentos ultrapassaram a faixa recomendada por Trianoski (2010) para processos industriais (20 a 35%), apresentando valor médio de 66,4%. Este resultado é um pouco superior ao relatado por Ferreira (2020) que obteve variação média de 50,4% analisando painéis MDF de *Pinus* sp.; e por Torquato *et al.* (2010) que observou diferença média de 50% para painéis MDF de *Eucalyptus* sp. e, 57% para painéis de *Pinus* sp.

Em relação a diferença entre a densidade das camadas e a densidade média, observa-se que os valores variaram de 16% a 34%, com média de 27,3%, sendo próximo ao percentual obtido por Ferreira (2020) (24,6%) e pouco superior ao relatado por Torquato *et al*. (2010) para painéis MDF de *Pinus* sp. (19%).

2.3.4 Propriedades mecânicas dos painéis

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) à flexão estática, e de resistência à tração perpendicular, onde pode ser observado que os painéis produzidos com as resinas de maior razão molar (1,1:1; 1,2:1; 1,3:1) apresentaram os melhores resultados. A NBR 15316 (ABNT, 2019) estabelece valores mínimos de 2200 MPa para MOE, 20 MPa para MOR, e 0,55 MPa para resistência à tração, portanto, somente os painéis produzidos com razões molares 1,1:1; 1,2:1 e 1,3:1 atenderam aos requisitos exigidos para MDF.

Tabela 6- Valores médios de MOE e MOR à flexão estática e tração perpendicular.

Razão molar F:U	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Tração Perpendicular (MPa)
0,9:1	$1833{,}62_{(08{,}21)}$ b	$17{,}65_{(07{,}68)}$ b	$0{,}46_{(8{,}77)}$ c
1,0:1	$2044{,}82_{(11{,}52)}$ b	$19{,}35_{(13{,}51)}$ b	$0{,}51_{(7{,}62)}$ c
1,1:1	$2361{,}53_{(14{,}72)}$ a	$23{,}11_{(07{,}20)}$ a	$0{,}61_{(8{,}15)}$ b
1,2:1	$2376{,}85_{(08{,}85)}$ a	$23{,}48_{(04{,}08)}$ a	$0{,}63_{(6{,}21)}$ b
1,3:1	$2398{,}12_{(10{,}38)}$ a	$24{,}00_{(10{,}05)}$ a	$0{,}75_{(5{,}31)}$ a

Legenda: F:U: relação formaldeído ureia; valores subscritos: coeficiente de variação; médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott ao nível de 5% de significância.

Os resultados obtidos estão de acordo com os estudos de Ayrilmis e Nemli (2017), que obtiveram para painéis de partículas produzidos com resina UF de menor razão molar (1,09:1), menores valores médios para as propriedades de MOE, MOR e tração perpendicular, em relação

aos obtidos para a maior razão molar (1,2:1). De acordo com os autores, a reatividade da resina UF é reduzida em resinas de menor razão molar, em função do menor teor de formaldeído livre, resultando em menor ligação interna do painel. Além disso, os autores ressaltam que o maior grau de reticulação das resinas de maior razão molar, proporcionam uma estrutura mais firme e compacta ao painel, proporcionando melhores propriedades mecânicas.

Da mesma forma, Que *et al.* (2007b) avaliando painéis de partículas, constataram que a razão molar da resina UF influencia principalmente na propriedade de tração perpendicular e em menor grau no MOR, em que a redução da razão molar de 1,27:1 para 1,01:1, promoveu uma diminuição de 10% para o MOR e 30% para resistência a tração. Keinert (2021) avaliou painéis de partículas produzidos com resina melamina ureia formaldeído com razões molares de 1,05:1; 1,22:1 e 1,30:1 e obteve nesta ordem valores crescentes de resistência à tração perpendicular, também atribuindo este resultado a maior reatividade e reticulação das resinas de maior razão molar.

Já Park, Kang e Park (2006), analisando painéis de partículas e quatro razões molares (1,0:1; 1,2:1; 1,4:1 e 1,6:1), encontraram maior valor de MOE para a razão molar 1,2:1; seguida da 1,6:1; 1,0:1 e 1,4:1. E para os valores de MOR, os autores verificaram também maior valor para a razão molar 1,2:1 e na sequência 1,4:1; 1,6:1; e 1,0:1. Quanto a resistência à tração, os autores obtiveram um desempenho superior para a maior razão molar (1,6:1), enquanto o menor valor médio foi observado na razão molar mais baixa (1,0:1). Segundo os autores, a razão molar das resinas não impactou de forma significativa as propriedades de MOR e MOE, que não diferiram tanto entre as razões, no entanto, à medida que a relação molar F:U diminuiu, a reatividade de cura da resina UF diminuiu e, consequentemente, resultou em uma menor resistência à tração.

De acordo com Wibowo e Park (2022) as resinas UF de menor razão molar proporcionam menor adesão em produtos à base de madeira devido a formação de domínios cristalinos suportados por pontes de hidrogênio, que reduzem a coesão inibindo a formação de reticulação tridimensional. Segundo os autores, isso ocorre devido a adição da segunda ureia, que cliva várias ligações, incluindo éter de metileno ramificado, oximetileno (acetal) e hidroximetil ureia ramificada, resultando em uma estrutura mais linear nas resinas de baixa razão molar, o que permite a formação de domínios cristalinos, por outro lado as resinas de alta razão molar formam interconexões mais extensas entre suas unidades estruturais formando uma estrutura ramificada. Wibowo, Park e Causin (2020) explicam que a cristalização das resinas UF de baixa razão molar é causada pela ligação de hidrogênio entre os grupos C═O e N-H das moléculas lineares de resinas.

Da mesma forma, Li e Zhang (2021) e Wibowo e Park (2021), explicam que as resinas UF de alta e baixa razão molar apresentam diferenças significativas no peso molecular, estrutura química, cristalinidade e morfologia da superfície; onde as resinas UF de maior razão molar possuem maior peso molecular, mais ramificação e reticulação e exibem uma estrutura amorfa. Por outro lado, de acordo com os autores, as resinas UF de menor razão molar possuem menor peso molecular e são compostas principalmente por moléculas lineares que favorecem o desenvolvimento de domínios cristalinos por pontes de hidrogênio.

Na Tabela 7 consta os valores médios de arrancamento de parafuso de superfície e de topo dos painéis, em que se verifica superioridade para os painéis produzidos com resinas de maior proporção molar F:U.

Tabela 7- Valores médios de arrancamento de parafuso dos painéis.

Razão molar F:U	**Superfície (N)**	**Topo (N)**
0,9:1	843,37 $_{(8,96)}$ c	535,67 $_{(15,07)}$ d
1,0:1	994,25 $_{(8,97)}$ b	653,42 $_{(8,81)}$ c
1,1:1	1245,09 $_{(11,85)}$ a	959,50 $_{(13,18)}$ b
1,2:1	1229,27 $_{(10,13)}$ a	1023,83 $_{(8,88)}$ b
1,3:1	1237,00 $_{(12,15)}$ a	1097,91 $_{(12,55)}$ a

Legenda: F:U: relação formaldeído ureia; valores subscritos: coeficiente de variação; médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott ao nível de 5% de significância.

A maior reatividade da resina de maior razão molar e o consequente incremento na ligação interna do painel influenciou na força necessária para o arrancamento do parafuso, o que explica a maior força exigida para o arrancamento de parafuso em painéis produzidos com maior razão molar. Segundo Carneiro *et al*. (2009) a resistência ao arranque do parafuso está associada com o grau de adesão entre as fibras, pois, quanto maior for a resistência à ligação interna, melhor é a adesão entre as fibras, o que dificulta a saída do parafuso no interior da chapa, necessitando de uma força maior para retirá-lo. Este comportamento foi observado no presente estudo, onde os tratamentos com maior resistência à tração (1,1:1; 1,2:1 e 1,3:1) apresentaram também maior resistência ao arrancamento.

De maneira geral, para o arrancamento de superfície e de topo, os painéis apresentaram média de 1109,8 e 854,1 N, respectivamente. Estes resultados médios são próximos aos obtidos por Ferreira (2020) para painéis MDF de *Pinus* sp., iguais a 1246 N para arrancamento de superfície e 1001 N para arrancamento de topo; e por Luckman (2019) que observaram para painéis de partículas de *Pinus* sp. valores médios de 1052,2 e 815,69 N para arrancamento de superfície e topo, respectivamente.

A norma NBR 15316 (ABNT, 2019) não traz um valor de referência para esta propriedade, mas a norma ANSI A 208.2 (2002) estabelece requisitos mínimos para arrancamento de superfície entre 780 N para o menor nível e 1555 N para o maior nível; e para o arrancamento de topo entre 670 e 1335 N. Desta forma, todos os painéis atingiram os requisitos para o arrancamento de superfície, enquanto para o arrancamento de topo, somente as razões molares 1,1:1; 1,2:1; e 1,3:1 atenderam a referida norma.

Para todos os tratamentos, observa-se uma superioridade para os valores de arrancamento de superfície em relação aos de topo, isso ocorre, pois, a propriedade de resistência ao arrancamento de parafuso está atrelada ao perfil de densidade dos painéis, em que a densidade da camada central afetará o arrancamento de topo e as densidades das camadas externas o arrancamento de superfície (Maloney, 1989). Como visto nos resultados de perfil de densidade, o miolo do painel apresenta as menores densidades, promovendo uma baixa resistência ao arrancamento do parafuso fixado nesta região.

2.4 CONCLUSÃO

Os painéis produzidos com resina UF de razões molares 0,9:1; 1,0:1 e 1,1:1 atenderam aos limites de emissão de formaldeído para classificação como painéis E1, no entanto, os painéis produzidos com razões molares 0,9:1 e 1,0:1 não atingiram os valores mínimos para as propriedades mecânicas e ultrapassaram o valor máximo para o inchamento em espessura 24h.

Sendo assim, dentre as resinas comerciais testadas, a indicada para produção de painéis MDF é a de razão molar 1,1:1; visto que esta proporcionou aos painéis baixa emissão de formaldeído (E1) sem prejudicar de forma significativa as propriedades tecnológicas, que foram compatíveis com a norma para o enquadramento como painéis MDF não estruturais para uso em condições secas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMAZIO, P.; AVELLA, M.; ERRICO, M. E.; GENTILE, G.; BALDUCCI, F.; GNACCARINI, A.; MORATALLA, J.; BELANCHE, M. Painéis de aglomerado de partículas de baixa emissão de formaldeído realizados através de um novo aglutinante acrílico. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 122, n. 4, p. 2779-2788, 2011.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS. **ASTM D 1084-97**. Standard Test Methods for Viscosity of Adhesives. West Conshohocken, PA, 1998.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS. **ASTM D 2471**. Standard Test Method for *Gel Time* and Peak Exothermic Temperature of Reacting Thermosetting Resins, West Conshohocken, PA, 1999.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS. **ASTM D 1490**. Standard Test Method for Nonvolatile Content of Urea-Formaldehyde Resin Solutions. West Conshohocken, PA, 2013.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A (208) 1 - 2:** Particleboard and Fiberboard. Gaithersburg: ANSI, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15316** - Painéis de fibra de média densidade. Rio de Janeiro, 2019.

AYRILMIS, N.; NEMLI, G. Efeito do tipo de adesivo nas propriedades de qualidade do aglomerado. **Máquinas, Tecnologias, Materiais**, Bulgária, v. 11, n. 7, p. 364-365, 2017.

BELINI, U. L. **Caracterização tecnológica de painéis de fibras da madeira de** *Eucalyptus grandis* **e de partículas do bagaço do colco de cana-de-açúcar**, *Saccharum*. 2012. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CARB. **Airborne toxic control measure to reduce formaldehyde emissions from composite wood products**. In Health and Safety Code: Title 17, California Code of Regulations; California Air Resources Board: Sacramento, CA, USA, 2009.

CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; CARVALHO, A. M. M. L.; VIDAURRE, G. B. Propriedades de chapas de aglomerado fabricadas com adesivo tânico de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina*) e ureia-formaldeído. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 521-531, 2009.

CARNEIRO, T. de L. A. **Influência da mescla de resinas ureia formaldeído e difenilmetano 4,4'- diisocianato (MDI) nas propriedades mecânicas e emissão de formaldeído de painéis de madeira aglomerada.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2017.

CARVALHO, L. H.; MAGALHÃES, F. D.; FERRA, J. M. Emissões de formaldeído de painéis derivados de madeira - métodos de teste e perspectivas industriais. *In:* CHENG, C. B.; LN, F. H. **Formaldeído: química, aplicações e papel na polimerização**, Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, Inc., 2012. p. 207.

DUNKY, M. Resinas adesivas de ureia-formaldeído (UF) para madeira. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Holanda, v. 18, n. 2, p. 95–107, 1998.

EUGÊNIO, R. A. P. **Painéis de medium density fiberboard produzidos com adesivo alternativo.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, SP, 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION**. EN 13986:** Wood-based panels for use in construction - Characteristics, evaluation of conformity and marking; German version. EN, Brussels, Belgium, 2004.

FERREIRA, J. L. **Influência das variáveis de processo nas propriedades tecnológicas de painéis de fibras de média densidade (MDF).** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) –Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2020.

GONÇALVES, C.; PEREIRA, J.; PAIVA, N.; FERRA, J.; MARTINS, J.; MAGALHÃES, F.; BARROS-TIMMONS, A.; CARVALHO, L. Estudo dos parâmetros de síntese de uma resina de uréia-formaldeído sintetizada pelo processo alcalino-ácido. **Jornal Internacional de Adesão e Adesivos**, Oxford, UK, v. 102, p. 102646, 2020.

IARC. Monographs on the Evaluation of Cancinogenic Risck to Humans. **Formaldeído, 2-Butoxietanol e 1-** ***terc*** **-Butoxipropan-2-ol.** Lyon, França: International Agency For Research On Cancer IARC, v. 88, 2006.

IARC. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. **Chemical agentes and related occupations: a review of human carcinigens.** Lyon, França: International Agency For Research On Cancer IARC, 2012. v. 100F, p. 401-435, 2012.

INCA. **Causas e prevenção Formol.** Instituto Nacional do Câncer. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/solventes/formol>. Acesso em: mar. de 2022.

IWAKIRI, S.; KEINERT JR., S.; MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. **Painéis de madeira.** 1.ed. Curitiba: Universidade Federal Do Paraná, 2002, 196p.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. **JIS A 5908**: Particleboard. Japanese Standards Association, Tokyo; 2003.

KATSUKAKE, A. **Uma revisão sobre a resina ureia formaldeído empregada na produção de painéis de madeira reconstituída.** 2009. Projeto de conclusão de curso (Licenciatura em Química) – Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, SP, 2009.

KEINERT, A. C. **Resistência à umidade e emissão de formaldeído em painéis de partículas de média densidade fabricados com diferentes resinas melamina ureia formaldeído.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

KIM, J.W.; CARLBORN, K.; MATUANA, L. M.; HEIDEN, P.A. Modificação termoplástica de adesivos de madeira de ureia formaldeído para melhorar a resistência à umidade. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 101, n. 6, p. 4222–4229, 2006.

LI, J.; ZHANG, Y. Morfologia e cristalinidade de adesivos de resina de ureia formaldeído com diferentes razões molares. **Polímeros**, v. 13, n. 5, p. 673, 2021.

LUCKMAN, S. S. **Influência da incorporação de lignina kraft à resina ureia formaldeído nas propriedades tecnológicas de painéis aglomerados convencionais.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) –Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry process fiberboard manufacturing.** San Francisco: Miller Freeman, 1989. 672 p.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing.** San Francisco: Miller Freeman, 1993. 689 p.

MARUTZKY, R.; RANTA, L. Die Eigenschaften formaldehydarmer HF-Leimharze und daraus hergestellter Holzspanplatten. **Holz als Roh und Werkstoff**, Alemanha, v.37, p. 389-393, 1979.

MARUTZKY, R.; ROFFAEL, E.; RANTA, L. Untersuchungen fiber den zusammenhang zwischen dem molverhiiltnis und der formaldehydabgabe bei harnstoff-formaldehyd-leimharzen. **Holz als Roh- und Werksloff**, Alemanha v. 37, p. 303 307, 1979.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; SOUSA, A. P.; CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados madeira-bambu. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n.1, p.35-42, 2015.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard: materials**. London: Southern Illinois University, 1974. v. 1, 244 p.

MYERS, G. E. How mole ratio of UF resin affects formaldehyde emission and other properties: a literature critique. **Forest Products Journal**, Estados Unidos, v. 34, n. 5, p. 35 - 41, 1984.

NURYAWAN, A.; SINGH, A. P; ZANETTI, M. Insights sobre o desenvolvimento de cristalinidade em resinas líquidas de ureia-formaldeído. **Jornal Internacional de Adesão e Adesivos**, Oxford, UK**.** v. 72, p.62–69, 2017.

PARK, B. D.; KANG, E. C.; PARK, J. Y. Efeitos da proporção molar de formaldeído para uréia no comportamento de cura térmica da resina de uréia-formaldeído e nas propriedades do painel de partículas. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 101, n. 3, p. 1787–1792, 2006.

PARK, B. D.; KIM, J.W. Effects of formaldehyde to urea mole ratio on thermomechanical curing of urea-formaldehyde resin adhesives. **Mokchae Konghak Journal of the Korean Wood Science and Technology**, Seoul, República da Coréia, v. 35, n. 5, p.76-86, 2007.

PARK, B. D.; JEONG, H. W. Estabilidade hidrolítica e cristalinidade de adesivos de resina de uréia-formaldeído curados com diferentes proporções molares de formaldeído/uréia. **Jornal Internacional de Adesão e Adesivos**, Oxford, UK**.**, v. 31, n. 6, p. 524–529, 2011.

PIZZI, A. **Synthetic adhesives for wood panels: Chemistry and technology**. *In:* MITAL, K. L. Progress in adhesion and adhesives. Estados Unidos: Scrivener Publishing, 2015.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. 2nd ed. New York: Dekker. 2003.

QUE, Z. L.; FURUNO, T.; KATOH, S.; NISHINO, Y. Evaluation of three test methods in determination of formaldehyde emission from particleboard bonded with different mole ratio in the urea-formaldehyde resin. **Building and Environment,** Reino Unido, v. 42, n. 3, p. 1242-1249, 2007a.

QUE, Z.; FURUNO, T.; KATOH, S.; NISHINO, Y. Effects of the molar ratio of urea-formaldehyde resin on the properties of agglomerated panels. **Building and Environment**, Reino Unido, v. 42, n. 3, p. 1257–1263, 2007b.

SILVA, G. A.; MENDES, L. M.; CALEGÁRIO, N.; MORI, F. A.; SILVA, J. R. M.; SANTOS, I. F. Estimativa da umidade de equilíbrio de painéis de madeira. **Scientia Forestalis,** Piracicaba, n. 70, p. 23-29, 2006.

TOMAZELLO FILHO, M.; BELINI, U. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; GONÇALVES, F. G. Avaliação tecnológica da madeira e de painéis MDF de eucalipto por densitometria de raios X. **Madeira arquitetura e engenharia**, São Carlos, v. 11, n. 27, 2010.

TORQUATO, L. P.; IWAKIRI, S.; BONDUELLE, G. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; MATOS, J. L. M. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de painéis de fibras de média densidade (MDF) produzidos pelas indústrias brasileiras. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 40, n. 2, p. 275-280, 2010.

TRIANOSK, R. Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) –Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

WIBOWO, E. S.; PARK, B. D.; CAUSIN, V. Cristalização induzida por ligação de hidrogênio em resinas de ureia formaldeído de baixa razão molar durante a síntese. **Industrial Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 59 , n. 29, 2020.

WIBOWO, E. S.; PARK, B. D. Estrutura lamelar cristalina de resinas de ureia-formaldeído termoendurecíveis em uma razão molar baixa. **Macromoléculas**, Washington, v. 54, n. 5, p. 2366–2375, 2021.

WIBOWO, E. S.; PARK, B. D. Análise bidimensional por ressonância magnética nuclear da formação de pontes de hidrogênio em resinas termoendurecíveis cristalinas de ureia-formaldeído em baixa razão molar. **ACS Applied Polymer Materials**, Washington, v. 4, n. 2, p. 1084-1094, 2022.

WILCZYŃSKI, A.; KOCISZEWSKI, M. Propriedades de flexão de camadas de aglomerado e MDF. **Holzforschung**, Alemanha, v. 61, n. 6, 2007.

ZHANG, H.; LIU, J.; LU, X. Reducing the formaldehyde emission of composite wood products by cold plasma treatment. **Wood Research**, Japão, v. 58, n. 4, p. 607-616, 2013.

3 CAPÍTULO III: VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE REVESTIMENTO MELAMÍNICO EM PAINÉIS DE FIBRAS *OVERSIZE*

RESUMO

O crescimento na produção e consumo de painéis de madeira reconstituída acarreta um aumento na geração de resíduos vinculados tanto ao processo produtivo quanto ao acabamento. Dentre os resíduos destaca-se o resíduo de revestimento melamínico de baixa pressão, gerado em grande quantidade, em função da maior comercialização de painéis revestidos para produção de móveis. Estes resíduos são queimados em caldeira, o que pode promover a liberação de gases potencialmente tóxicos para saúde humana e meio ambiente. Assim, o presente estudo objetivou avaliar, por meio das propriedades tecnológicas e da emissão de formaldeído, a viabilidade técnica da incorporação de resíduos de revestimento melamínico de baixa pressão, em painéis reconstituídos de fibras *oversize*, com o intuito de promover uma destinação ambientalmente correta para este resíduo. Para isso, foram delineados quatro tratamentos com diferentes porcentagens de resíduo incorporados na camada central dos painéis (0, 3, 6 e 9%). Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 750 $kg.m^{-3}$, 12% de resina ureia formaldeído, 1% de parafina e, ciclo de prensagem com temperatura de 170 °C, 37 $kgf.cm^{-2}$ de pressão e tempo de 10 minutos. A avaliação se deu por meio da determinação das propriedades físicas, mecânicas e da emissão de formaldeído, de acordo com as normas NBR 14810 (ABNT, 2018) e NBR 15316 (ABNT, 2019), tendo em vista que os painéis formados por fibras *oversize* ficam em uma classificação intermediária entre os painéis de fibras e de partículas. De acordo com os resultados, todos os tratamentos apresentaram baixa emissão de formaldeído (E1), contudo, não foi verificada a influência do resíduo. Nenhum tratamento atendeu aos requisitos estabelecidos pela NBR 15316 (ABNT, 2019) para enquadramento como painéis de fibras. No entanto, os resultados indicaram a viabilidade técnica da incorporação de 9% de resíduo de revestimento melamínico na produção de painéis de fibras *oversize*. Esses painéis atenderam aos requisitos da NBR 14810 (ABNT, 2018) para todas as propriedades, com exceção do módulo de elasticidade (MOE) e da resistência à flexão estática (MOR).

Palavras- chave: laminado de baixa pressão; reutilização; acabamento.

ABSTRACT

The growth in the production and consumption of reconstituted wood panels leads to an increase in the generation of waste linked to both the production process and the finishing. Among the wastes, the residue of low-pressure melamine coating stands out, generated in large quantities, due to the greater commercialization of coated panels for the production of furniture. This waste is burned in a boiler, which can promote the release of gases that are potentially toxic to human health and the environment. Thus, the present study aimed to evaluate, through the technological properties and formaldehyde emission, the technical feasibility of incorporating low-pressure melamine coating residues into oversized fiberboards, in order to promote an environmentally correct disposal of this waste. For this, four treatments were designed with different percentages of residue incorporated in the central layer of the panels (0, 3, 6 and 9%). The panels were produced with a nominal density of 750 $kg.m^{-3,}$ 12% urea formaldehyde resin, 1% paraffin and a pressing cycle with a temperature of 170 °C, 37 $kgf.cm-^{2}$ of pressure and a time of 10 minutes. The evaluation was carried out through the determination of the physical, mechanical and formaldehyde emission properties, according to the NBR 14810 (ABNT, 2018) and NBR 15316 (ABNT, 2019) standards, considering that panels formed by *oversize* fibers are in an intermediate classification between fiber and particle boards. According to the results, all treatments showed low formaldehyde (E1) emission, however, the influence of the residue was not verified. None of the treatments met the requirements established by NBR 15316 (ABNT, 2019) for classification as fiberboards. However, the results indicated the technical feasibility of incorporating 9% of melamine coating residue in the production of *oversize* fiberboards. These panels met the requirements of NBR 14810 (ABNT, 2018) for all properties, with the exception of modulus of elasticity (MOE) and static flexural strength (MOR).

Keywords: low-pressure laminate; reuse; finishing.

3.1 INTRODUÇÃO

Os painéis de madeira reconstituída, recebem na maioria das vezes, revestimentos após sua produção, por terem seu maior uso na indústria moveleira. Os revestimentos foram criados para elevar a estética e valor agregado dos painéis e pisos de madeira, imitando a própria madeira entre outras várias opções de texturas e cores. Entre os revestimentos mais empregados, destaca-se o laminado de baixa pressão (BP) ou revestimento melamínico BP, produzido através da sobreposição de uma folha de papel especial, impregnada com resina melamínica, que é fundida através de pressão e temperatura ao painel. Este tipo de revestimento específico traz como vantagens alta resistência à abrasão, alta resistência ao desgaste, alta estabilidade da cor e facilidade de limpeza (Soylon, 2009).

Segundo Cesário (2019), após a aplicação dos revestimentos, os excedentes são cortados para o acabamento das peças, produzindo por consequência o resíduo de revestimento melamínico, que se assemelha a uma folha quebradiça quando seco. O mesmo autor cita que uma única empresa de painéis de madeira para móveis no Paraná, destina por mês em torno de 80 toneladas de resíduo de revestimento melamínico a queima em caldeira, a fim de eliminar o material residual.

Uma das práticas mais utilizadas para destinação de resíduos pelo setor moveleiro é a queima, que não é recomendada, pois gera dioxinas e furanos, nocivos à saúde humana. Além disso, mesmo utilizando a incineração (processo mais controlado), poderá gerar emissões tóxicas, sendo necessário equipamentos e filtros de custo elevado (Araújo, 2012).

Os móveis de madeira constituem o principal segmento da indústria de móveis, representando cerca de 72% da produção total (Kozak, 2008). A maioria dos móveis são produzidos a partir de painéis reconstituídos revestidos, e com o aumento na produção e consumo destes produtos, ocorre simultaneamente aumento na quantidade de resíduos gerados. Assim, é importante que as empresas juntamente com os órgãos públicos e instituições de pesquisa, busquem a elaboração de soluções para o reaproveitamento destes resíduos. Além disso, devido ao elevado custo das matérias-primas utilizadas, otimizar o uso desses resíduos traria uma redução de custos no processo produtivo, e ainda, a destinação correta resultaria em maior competitividade no mercado, pelo aspecto ambiental positivo.

A Norma Brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004) traz as classificações para os resíduos no estado sólido que resultam de atividades de origem industrial, estas classes são determinadas segundo as características do resíduo, bem como quanto aos possíveis danos ao meio ambiente e à saúde pública. De acordo com a norma o resíduo de revestimento melamínico é classificado

como Classe II A – Resíduo não inerte. Esta classe refere-se a resíduos não perigosos/tóxicos e a não inercia trata de resíduos que podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

A Agenda 21 (2002), destaca a necessidade de mudança nos padrões não sustentáveis de produção e consumo, contemplando o gerenciamento de resíduos sólidos concentrados em quatro áreas: (i) estímulo a uma maior eficiência no uso da energia e dos recursos; (ii) reduzir ao mínimo a geração; (iii) aumentar ao máximo a reutilização e a reciclagem; (iv) providenciar depósitos e tratamentos ambientalmente corretos; e (v) ampliar os serviços que se ocupem dos resíduos.

A Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos dispondo sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento dos resíduos sólidos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. O Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, de acordo com essa Lei (12.305), prevê: a) a descrição do empreendimento ou atividade; b) diagnóstico dos resíduos sólidos gerados, contendo a origem, o volume e a caracterização dos resíduos; c) explicitação dos responsáveis por cada etapa do gerenciamento dos resíduos; e, d) definição dos procedimentos operacionais relativos às etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos sob responsabilidade do gerador (Brasil, 2010).

O desenvolvimento sustentável é de suma importância para as empresas, tanto para atender a legislação citada anteriormente (Política Nacional de Resíduos Sólidos), como para a obtenção de certificações internacionais, como a ISO 14001 (2015), que especifica os requisitos para o desenvolvimento de uma gestão ambiental sustentável.

Muitos estudos focaram em trazer alternativas para a reutilização de resíduos de painéis de madeira no desenvolvimento de novos produtos, como nos trabalhos de Silva e Figueiredo (2010) que desenvolveram um protótipo de base de mesa com resíduos de MDF; de Abreu, Mendes e Silva (2009) em que resíduos de MDF, OSB e compensados foram utilizados na fabricação de pequenos objetos, e de Gomes *et al.* (2017) que aplicaram resíduos de painéis MDF como reforço em materiais compósitos poliméricos. Outros trabalhos demonstraram a aplicação de resíduos de MDF, MDP, compensados e resíduos de móveis na produção de painéis reconstituídos (Weber; Iwakiri, 2015; Zamarian *et al.*, 2017). Resíduos provenientes de diversos processos industriais também já foram incorporados em painéis de madeira reconstituída afim de agregar valor e solucionar problemas ambientais relacionados a destinação inadequada, como por exemplo os resíduos de papel cartonado e plásticos (Caraschi;

Leão; Chamma, 2009), de polpa kraft desbranquiada (Andrade *et al*., 2018; Andrade *et al*., 2019), resíduos de madeira e PET (Santos *et al*., 2011) e aparas de papel (Rezende *et al.*, 2017).

Em contrapartida, o reaproveitamento de resíduos oriundos do processo de acabamento de painéis, como de revestimentos melamínicos, é um tema pouco explorado, destacando-se o trabalho de Cesário (2019), que desenvolveu compósitos com resíduo de revestimento melamínico moído, através da diluição em água e secagem em forno. O material apresentou alta resistência à compressão, mas baixa resistência à flexão estática, e não apresentou inchamento, apesar de absorver água. Pires, Maia e Paiva (2019), desenvolveram compósitos utilizando o polipropileno reciclado como matriz polimérica termoplástica e o resíduo de laminado de alta pressão em pó, como carga. Os autores observaram que a adição do resíduo ocasionou aumento do módulo de elasticidade em flexão, no entanto, reduziu o módulo de ruptura e a resistência à tração dos compósitos. Assim, a abordagem de reaproveitamento de resíduos de revestimento melamínico na produção de painéis reconstituídos juntamente com fibras e/ou partículas de madeira ainda é incomum.

Cabe ressaltar que o resíduo de revestimento melamínico incorporado no painel pode reduzir a emissão de formaldeído, pelo efeito do adesivo de melamina presente no revestimento. Já é bem conhecido o fato de que os revestimentos são uma opção para redução das emissões quando aplicados superficialmente, portanto, sua aplicação no interior do painel também pode ser positiva neste aspecto.

Outro resíduo produzido na indústria de painéis reconstituídos, são as fibras *oversize*, que são fibras superdimensionadas retiradas do processo de produção de painéis MDF (*Medium Density Fiberboard*). Esse material é descartado e encaminhado para queima na caldeira após a classificação, por não se enquadrar na granulometria padrão utilizada pelas empresas (França *et al*., 2016).

Tendo em conta que os resíduos sólidos são uma das principais fontes de poluição e um sinônimo de grande desperdício/gasto de recurso nas indústrias, a utilização destes resíduos na produção de painéis pode trazer benefícios econômicos e ambientais. Assim, o objetivo do presente estudo é determinar a viabilidade de incorporação de resíduos de revestimento melamínico de baixa pressão em painéis de fibras *oversize*, a partir do seu efeito sobre as propriedades dos painéis e na emissão de formaldeído, a fim de destinar este resíduo para um produto de maior valor agregado, ao invés de ser queimado nas caldeiras das empresas.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Matéria prima

Para produção dos painéis foram utilizadas fibras *oversize* de *Pinus* spp., resíduos de revestimento melamínico de baixa pressão, resina UF e parafina fornecidos pela Sudati (Otacílio Costa, SC). A pesquisa foi conduzida nos laboratórios de adesivos, painéis de madeira e ensaios tecnológicos da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, bem como no laboratório da Empresa Sudati.

As fibras *oversize* foram coletadas mecanicamente após a etapa inicial de classificação, sendo separado o material com maior granulometria, que é descartado do processo e encaminhado para queima na caldeira. No laboratório, este material foi submetido ao processo de secagem em estufa com circulação de ar forçada até atingir teor de umidade de 4%, em temperatura de 80 °C.

Os resíduos de revestimento melamínico de baixa pressão foram obtidos após a etapa industrial de revestimento dos painéis, sendo compostos pelos excedentes do processo. No laboratório, os resíduos tiveram seu tamanho reduzido com o auxílio de um processador manual, e na sequência, peneirados em malha de 6 mesh para homogeneização. O material estava com teor de umidade médio de 4%.

A resina UF de razão molar 1,08:1 e a parafina foram caracterizadas e apresentaram as seguintes propriedades: teor de sólidos de 59 e 51%, pH de 7,8 e 9,0 e viscosidade de 321 e 200 Cp, respectivamente. Determinou-se também o *gel time*, em uma quantidade de 5g de resina UF, sendo igual a 8 minutos.

3.2.2 Plano experimental

Os tratamentos foram definidos pela substituição parcial das fibras *oversize* de madeira por resíduos de revestimento melamínico de baixa pressão, nas porcentagens de 3, 6 e 9%. Também foi utilizado um tratamento testemunha, sem resíduo na composição, totalizando 4 tratamentos. Foram produzidos dois painéis por tratamento, com densidade de 750 $kg.m^{-3}$, dimensões de 40 x 40 x 1,5 cm, 12% de resina ureia formaldeído, 1% de emulsão de parafina, pré prensagem a frio com pressão de 5 $kgf.cm^{-2}$ durante 5 minutos e o ciclo de prensagem a quente com temperatura de 170 °C, pressão de 37 $kgf.cm^{-2}$ por um tempo de 10 minutos.

3.2.3 Caracterização térmica da matéria prima

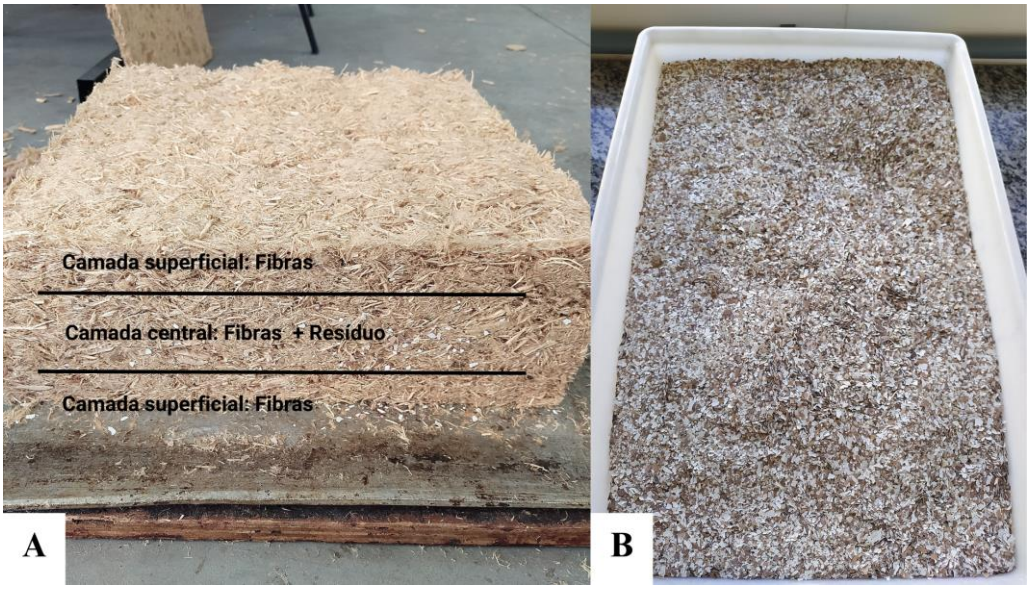
Análises termogravimétricas foram realizadas em balança Navas TGA 2000, instalada no Laboratório de Materiais da Universidade do Planalto Catarinense - UNIPLAC (Lages, SC). Foram utilizadas amostras de fibras *oversize* e resíduo de revestimento melamínico, em triplicata, com taxa de aquecimento de 10 ºC/min, em atmosfera de ar, na faixa de 25 a 800 ºC. Essa análise foi realizada no intuito de entender e comparar a estabilidade térmica das matérias primas utilizadas na produção dos painéis. As curvas TGA trazem a representação da perda de massa, em percentual, em diferentes faixas de temperatura, enquanto as curvas DTG correspondem à primeira derivada das curvas termogravimétricas.

3.2.4 Produção dos painéis

Para produção dos painéis, inicialmente determinou-se a quantidade em gramas de fibras *oversize* e resíduos, equivalente aos percentuais definidos para cada tratamento. Em uma encoladeira do tipo tambor rotativo foram adicionadas as fibras *oversize* na quantidade previamente calculada. O adesivo (UF + parafina) foi aplicado por meio de uma pistola posicionada no centro do tambor, a qual foi acionada por um compressor de ar à medida que o tambor girava a velocidade de 20 rpm. Cabe destacar que somente as fibras *oversize* foram misturadas ao adesivo na encoladeira, e os resíduos de revestimento foram adicionados posteriormente, no momento da formação do colchão, em caixa formadora com dimensões internas de 40 x 40 cm.

Os painéis testemunhas foram produzidos com uma camada homogênea, formada somente por fibras *oversize*. Os demais tratamentos foram produzidos em três camadas, em que somente a camada central recebeu resíduo em sua composição. As camadas superficiais foram compostas somente por fibras *oversize*, assim, o total de fibras encoladas foi dividido em três partes, 25% de fibras para cada camada superficial, e 50% restante para composição da camada central. A camada central foi composta por uma mistura homogênea de fibras *oversize* encoladas e resíduos de revestimento (Figura 7). Os colchões foram pré-prensados à frio e posteriormente a quente em prensa hidráulica Marconi MA 098.

Figura 7 – Produção dos painéis.



Legenda: colchão formado (A); resíduos de revestimento melamínico BP (B). Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.2.5 Avaliação das propriedades tecnológicas

Os painéis foram acondicionados em câmara climática a temperatura de 20 °C e 65% de umidade relativa, até massa constante. Na sequência, foi realizado o esquadrejamento e retirada dos corpos de prova para os ensaios físicos, mecânicos e de emissão de formaldeído. O dimensionamento dos corpos de prova, bem como as condições de ensaio seguiram as recomendações das normas NBR 15316-2 (ABNT, 2019) e NBR 14810-2 (ABNT, 2018). E os resultados foram comparados com os valores de referência estabelecidos pelas normas para as seguintes classes: painéis MDF não estruturais para uso em condições secas com espessura de 12 a 19 mm; painéis MDP não estruturais para uso em condições secas com espessura de 13 a 20 mm (P2).

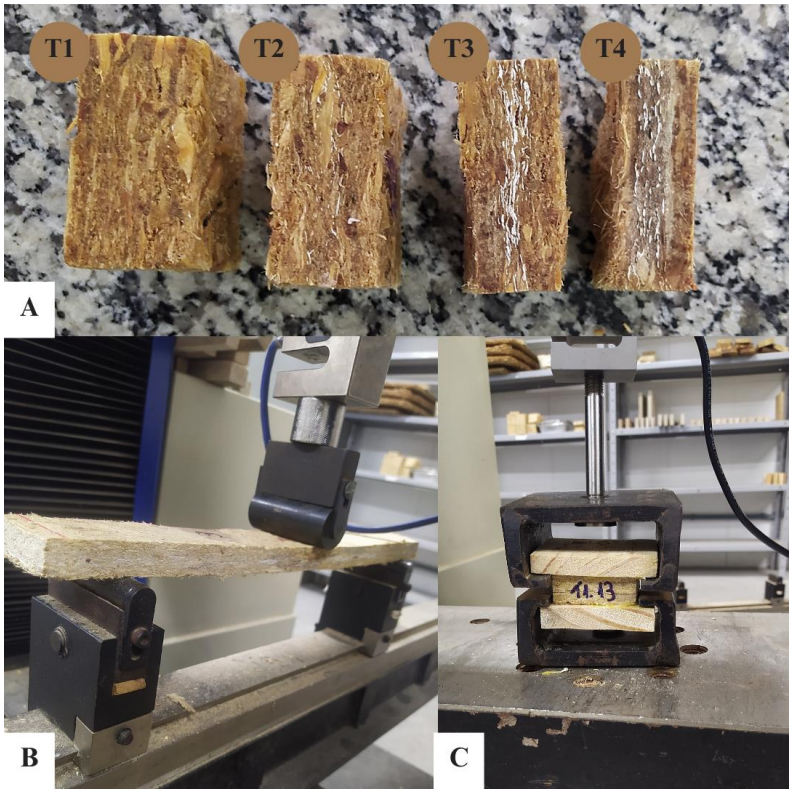
Foram avaliadas as propriedades de densidade aparente, razão de compactação que é determinada pela relação entre a densidade aparente do painel e a densidade básica da madeira, teor de umidade, inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água, resistência e rigidez à flexão estática, resistência à tração perpendicular e emissão de formaldeído pelo método *Perforator*. As dimensões e a quantidade de corpos de prova utilizados por ensaio constam na tabela 8.

Tabela 8 - Dimensões e número de corpos de prova para cada ensaio.

Ensaios	Dimensões (mm)	N° corpos de prova por tratamento
Densidade e teor de umidade	50 x 50 x 15	14
Inchamento e absorção 24h	50 x 50 x 15	14
Tração perpendicular	50 x 50 x 15	14
Flexão estática	350 x 50 x 15	8
Emissão de formaldeído	2,5 x 2,5 x 15	100 g

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 8 – Ensaios tecnológicos.



Legenda: corpos de prova após 24h de imersão em água (A); ensaio de flexão estática (B); ensaio de tração perpendicular (C).
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3.2.6 Análise estatística

Os resultados obtidos para as propriedades tecnológicas dos painéis foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e de Bartlett, para averiguar a normalidade e homogeneidade das variâncias, respectivamente, ao nível de 5% de significância. A transformação BoxCox foi aplicada aos dados que não atendiam aos pressupostos citados. Posteriormente, empregou-se a

análise de variância e quando significativa ($p<0,05$), o teste de comparação de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância.

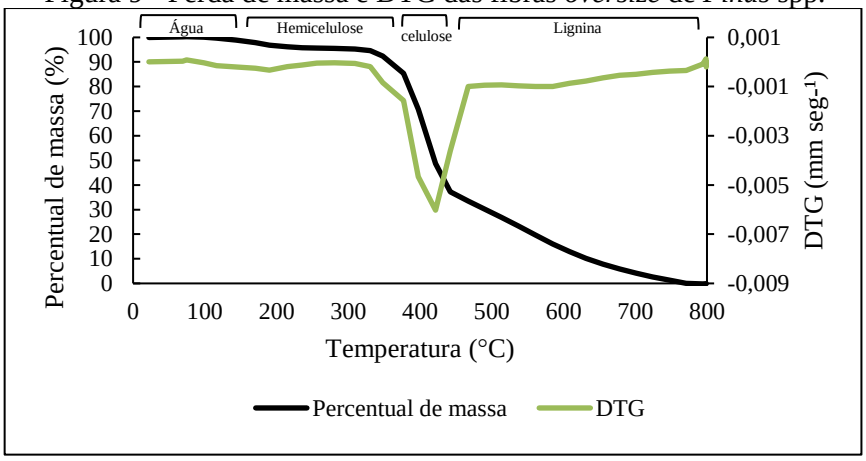
Os resultados da emissão de formaldeído não foram avaliados estatisticamente em função da quantidade de amostras analisadas, que se limitaram a 100 g de painel por tratamento.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Caracterização térmica da matéria prima

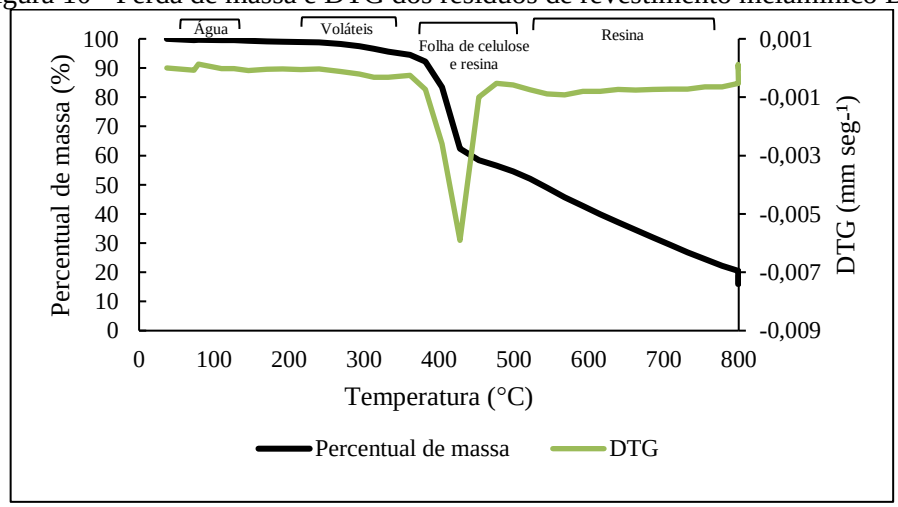
Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas as curvas termogravimétricas (TGA/DTG) em função da temperatura, para as fibras *oversize* de *Pinus* spp. e para o resíduo de revestimento melamínico, respectivamente. Observa-se na curva TGA que houve diferença entre a degradação dos materiais em função da temperatura. O resíduo de revestimento apresentou estabilidade térmica até temperatura próxima a 361 °C, enquanto as fibras *oversize* se mostraram estáveis até temperaturas próximas a 330 °C; a partir destas temperaturas, as perdas de massa relativas às fibras de madeira e do adesivo curado é considerável, indicando degradação térmica dos constituintes.

Figura 9 - Perda de massa e DTG das fibras *oversize* de *Pinus* spp.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 10 - Perda de massa e DTG dos resíduos de revestimento melamínico BP.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para as fibras *oversize* é possível observar dois eventos de degradação através da curva DTG, sendo o primeiro caracterizado pelo início da perda de massa na temperatura de 116 °C, com pico em 190 °C e término em 256 °C, com perda total de massa de 4,4%. O segundo evento inicia na temperatura de 330 °C, atingi o pico máximo em 421 °C, e termina em 467 °C, com perda de massa de 62,1%.

De acordo com Schulz *et al*. (2021), o percentual de perda de massa pode ser dividido em regiões de degradações dos componentes químicos majoritários presentes na madeira, sendo: 40 °C – 150 °C para remoção da água intra e intercelular, 150 °C - 380 °C manipulação das hemiceluloses, 380 °C - 420 °C manipulação das celuloses e 420 °C em diante, manipulação das ligninas. Assim, pode ser inferido que no primeiro evento, a perda de massa das fibras *oversize* se deu em função da retirada da água intracelular e início da degradação das hemiceluloses. Já no segundo evento, a perda de massa ocorreu em função da decomposição da celulose e início da degradação da lignina.

O revestimento melamínico de baixa pressão é composto por uma folha de celulose impregnada com resina melamínica, assim, outros compostos fazem parte das fases de degradação. Para o resíduo de revestimento, de acordo com a DTG, são observados três eventos principais. A perda de massa inicia em temperatura igual a 73,3 °C, e ocorre lentamente até a temperatura de 294 °C, onde inicia-se o primeiro evento, com pico na temperatura de 313 °C e término em 332 °C. O segundo evento ocorre em temperatura de 361 °C, atingi o pico em 428 °C e se encerra em 476 °C. No primeiro e segundo evento as perdas de massa foram de 2,6% e 39%, respectivamente. O terceiro evento ocorreu lentamente, iniciando em 521 °C, atingindo o pico máximo em 567 °C e o término em temperatura de 592 °C. Nesta última etapa a perda de massa foi de 13,9%.

A perda de massa inicial em baixas temperaturas (73,3 °C) é atribuída à liberação de umidade em forma de vapor (Yorulmaz; Atimtay, 2009). No primeiro evento, a perda de massa ocorreu devido a saída de parte dos compostos voláteis não reagidos, como o formaldeído, metanol e amina. No segundo evento ocorreu a maior perda de massa, sendo atribuída à decomposição térmica do adesivo melamínico, por meio de uma série de reações independentes envolvendo a degradação da cadeia lateral e do anel, e liberação de formaldeído, metanol, amina e NH_3. Além disso, no segundo evento também ocorre a decomposição da folha de celulose, contribuindo para a maior taxa de degradação desta região. Após a degradação estrutural da resina melamínica, em temperaturas mais elevadas (terceiro evento) ocorre a liberação de gases como o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e grupos HCN, por meio da oxidação do material residual da resina (Ullah *et al*., 2014).

Merline, Vukusic e Abdala (2012) relataram para a resina melamina formaldeído uma perda de massa de 12,8% na faixa de temperatura de 180-350 °C, correspondendo à eliminação do formaldeído; e perda de peso de 22,8% na faixa de temperatura de 350 a 390 °C, que foi atribuída à quebra das pontes de metileno, e além de 390 °C à degradação térmica do anel de triazina; na sequência a resina segue desaminando progressivamente para formar HCN. Assim, de acordo com os autores, as pontes de metileno são estáveis até 350 °C, e a degradação térmica do anel de triazina começa a 400 °C. Essas observações confirmam que a maior perda de massa dos resíduos melamínicos observada neste estudo, na faixa de 361-476 °C, se deve a degradação térmica da resina melamínica.

Da mesma forma, Freire (2019) observou três estágios para degradação da resina melamina ureia formaldeído, o primeiro correspondente à evaporação do solvente retido durante a síntese e de algumas moléculas de água remanescentes; o segundo se apresentou como principal estágio de degradação da resina (36% entre 80 e 350°C) e o terceiro sendo o estágio final de degradação dos polímeros. Mothé e Amaral (2003) também verificaram maior decomposição térmica em temperaturas próximas a 400 °C para resina composta por fenol formaldeído, líquido da casca de castanha e poliéster. Freitas e Lenz (2019) observaram a decomposição térmica dos adesivos em temperaturas de 425 °C para painéis de resíduos de madeira com resina a base de tanino, e 500 °C para painéis de madeira comercial e resina fenol-formaldeído.

Como pode ser visto nas Figuras 9 e 10, a maior perda de massa foi observada no segundo evento para os dois materiais, estando de acordo com a curva DTG que apresentou as maiores velocidades de perda de massa na região da degradação da celulose para as fibras *oversize* e, na região da degradação dos componentes do revestimento (folha de celulose e resina melamínica), para o resíduo de revestimento. Para atingir a taxa máxima, os resíduos de revestimento necessitam de temperatura pouco superior (428 °C), em relação as fibras *oversize* (421 °C).

As perdas de massa para as amostras de resíduo de revestimento melamínico foram menores em comparação com as amostras de fibras *oversize*, indicando maior resistência térmica do resíduo em função da sua composição química, e resultando em maior massa residual. Em 771 °C, as fibras *oversize* haviam perdido 99,92% da sua massa, com percentual remanescente de 0,08%; já para o resíduo de revestimento, em 778 °C, a massa remanescente era de 22%, e na temperatura final (800 °C) ainda havia 15% de massa. Os polímeros de melamina formaldeído curados são suficientemente duros e apresentam alta resistência contra temperatura, o que explica sua maior resistência à degradação em relação às fibras *oversize*

(Merline; Vukusic; Abdala, 2012). Ullah *et al*. (2014) também constataram massa residual em torno de 15% em temperatura de 800 °C, para a resina melamina formaldeído após análise termogravimétrica.

Yorulmaz e Atimtay (2009) obtiveram resultados semelhantes analisando amostras de madeira e resíduos de painéis, em que as perdas de massa para as amostras de painéis foram menores (cerca de 50-55%) na região de maior degradação, em comparação com amostras de madeira de pinus (média de 63%). Os autores associaram esse comportamento ao tratamento químico, que proporcionou menores porcentagens de matérias voláteis para liberação durante a região de oxidação principal, aumentando a quantidade de massa remanescente nas amostras de resíduos de painéis.

A quantidade significativa de massa residual observada para o resíduo de revestimento melamínico BP após a análise, demonstra que a prática comum de eliminação deste através da queima em caldeira nas indústrias, implica na geração de grande quantidade de massa residual e consequentemente na necessidade de limpeza periódica dos equipamentos.

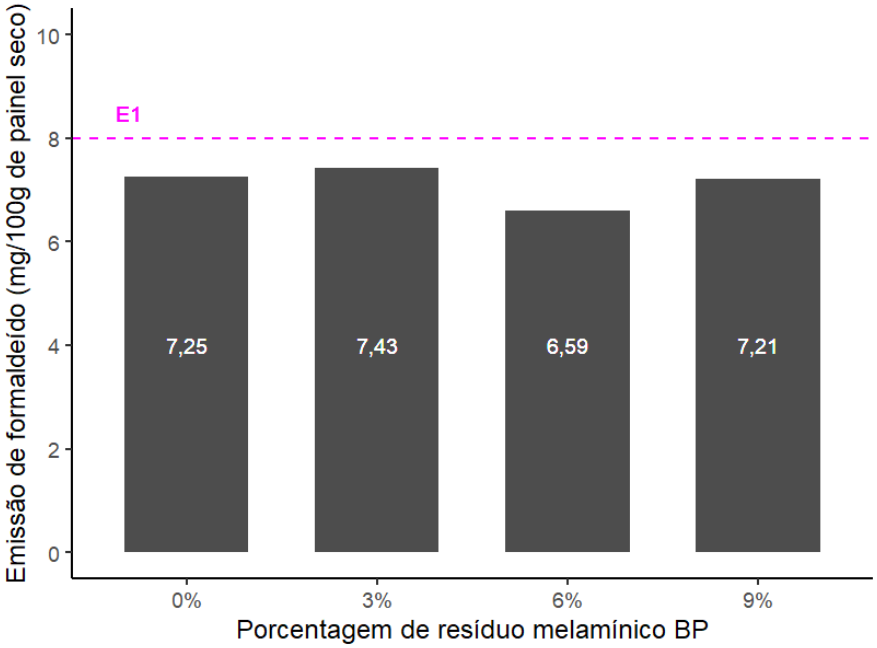
Em síntese, com a caracterização térmica do resíduo de revestimento melamínico através da TGA/DTG, foi possível determinar que o seu comportamento térmico é semelhante ao da resina melamínica curada. O resíduo se manterá na sua conformação integral durante o processo de prensagem a quente dos painéis, uma vez que não há decomposição significativa do material na temperatura utilizada na prensagem (170 °C), e o mesmo pode ser concluído para as fibras *oversize*.

3.3.2 Emissão de formaldeído dos painéis

Os valores de emissão de formaldeído para os painéis produzidos com diferentes porcentagens de resíduo de revestimento melamínico foram muito semelhantes, não apresentando uma tendência específica à medida que aumenta a proporção de resíduo, como pode ser observado na Figura 11.

Os painéis apresentaram valores de emissão entre 6,59 e 7,43 mg de formaldeído para cada 100 g de painel seco. A porcentagem de resíduo de revestimento melamínico adicionado não influenciou a emissão de formaldeído, uma vez que, o maior valor foi verificado para os painéis com 3% de resíduo e o menor para os painéis com 6%, enquanto a testemunha e o tratamento com maior teor de resíduo (9%) foram equivalentes.

Figura 11- Valores de emissão de formaldeído dos painéis.



Legenda: Linha tracejada indica o limite máximo da classe E1 (emissão baixa) da NBR 15316 (ABNT, 2019) e NBR 14810 (ABNT, 2018). Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A uniformidade nos resultados de emissão em painéis com diferentes proporções de resíduo pode estar associada a fatores que foram mantidos constantes em todos os tratamentos. Estes fatores, como razão molar da resina UF, quantidade de adesivo, tempo e temperatura de prensagem, influenciam de forma significativa na emissão, e foram iguais em todos os tratamentos, contribuindo para a similaridade observada nos valores.

As normas brasileiras NBR 15316 (ABNT, 2019) e NBR 14810 (ABNT, 2018) trazem os limites de 8 mg de formaldeído para cada 100 g de painel seco para classe E1, e de 8 a 20 mg de formaldeído para cada 100 g de painel seco para classe E2. Assim, todos os tratamentos, independente da quantidade de resíduo adicionado, obtiveram valores de emissão abaixo do especificado pelas normas, sendo classificados como E1, de baixa emissão. Estes resultados indicam que a emissão de formaldeído dos painéis está dentro dos limites aceitáveis de acordo com os padrões europeus, além de estar bem abaixo do limite para painéis E2, que atualmente é a principal classe comercializada no Brasil.

Em comparação com a literatura, os resultados estão condizentes com o estudo de Hong *et al*. (2018), que verificaram para painéis produzidos com fibras recicladas oriundas de MDF com diferentes tipos de revestimentos, valores de emissão enquadrados na classe E1. Além disso, os autores observaram valores muito semelhantes de emissão entre os painéis com 10% de fibras recicladas oriundas de MDF revestido com melamina BP e os painéis testemunha de fibras virgens. Entretanto, com aplicação de 30% destas fibras recicladas, os autores

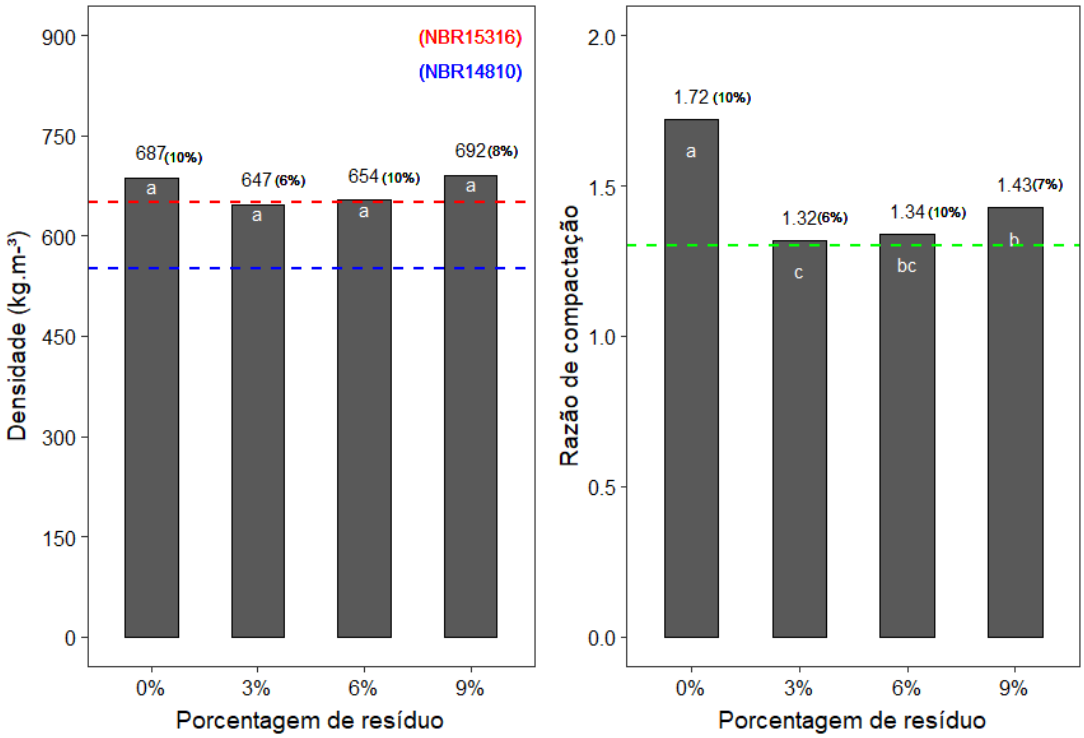
observaram redução significativa da emissão de formaldeído, e atribuíram o resultado a liberação de melamina durante a prensagem a quente, que pode ter atuado como um sequestrante de formaldeído.

Assim, infere-se que a quantidade de resíduo de revestimento melamínico adicionado aos painéis no presente estudo foi insuficiente para proporcionar a redução nos valores de emissão de formaldeído, mas a sua aplicação é viável, tendo em vista a obtenção de painéis reconstituídos na classe E1.

3.3.3 Propriedades físicas e mecânicas dos painéis

Os resultados para densidade e razão de compactação dos painéis são apresentados na Figura 12. Observa-se valores entre 647 e 692 kg.m^{-3} para densidade, sem diferença estatística entre os tratamentos, enquanto para razão de compactação, foram observados valores entre 1,32 para o tratamento com 3% de resíduo a 1,72 para a testemunha, havendo redução significativa da razão de compactação com a incorporação do resíduo, independente da porcentagem, em relação à testemunha.

Figura 12 - Valores médios de densidade e razão de compactação dos painéis.



Legenda: Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam os valores mínimos de densidade para enquadramento como MDF (NBR 15316, 2019) e MDP (NBR 14810, 2018), respectivamente; linha tracejada em verde indica o valor mínimo para razão de compactação. Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em todos os tratamentos, observou-se densidade abaixo da nominal que era de 750 $kg.m^{-3}$. Esse resultado pode ser explicado pelo mal entrelaçamento das fibras e resíduos no colchão, causando espalhamento e consequente perda de material durante o processo de prensagem a quente. Essas variações em relação a densidade nominal são comuns no processo manual de produção dos painéis em laboratório, principalmente nas fases de montagem manual do colchão (Dacosta *et al*., 2005).

Melo *et al.* (2015), encontraram resultados semelhantes para painéis de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis* e bambu, em que os autores obtiveram valores de densidade abaixo da pré-estabelecida. Da mesma forma, na produção de painéis de partículas de *Eucalyptus* spp. e resíduos de polpação de celulose, Andrade *et al.* (2018) também observaram valores de densidade menores que as calculadas. Carashi, Leão e Chama (2009) determinaram densidade nominal de 900 $kg.m^{-3}$ para produção de painéis com resíduos plásticos e agroindustriais, e obtiveram valores médios de densidade entre 660 e 790 $kg.m^{-3}$. De acordo com os autores, essa situação pode ser explicada pela particularidade das condições laboratoriais em comparação com o processo industrial, que envolve perdas de materiais durante a manipulação das partículas durante as fases de aplicação de adesivo, formação do colchão e prensagem dos painéis.

De acordo com as normas brasileiras, para o painel ser classificado como de média densidade, deve estar entre 551 e 750 $kg.m^{-3}$ para particulados (NBR 14810, 2018) e entre 651 e 800 $kg.m^{-3}$ para fibrosos (NBR 15316, 2019). Todos os tratamentos se enquadraram em ambas as normativas, com exceção do tratamento com 3% de resíduo incorporado, que atende apenas a norma para classificação de painéis de partículas.

Em relação à razão de compactação, houve um decréscimo dos valores médios com a incorporação do resíduo em função da sua maior densidade (493 $kg.m^{-3}$) quando comparada a densidade da madeira de *Pinus* spp. utilizada (399 $kg.m^{-3}$). Todos os tratamentos com resíduo se diferenciaram da testemunha, que apresentou a maior razão de compactação. Os tratamentos com 3 e 6% de resíduo apresentaram os menores valores, e foram considerados iguais entre si, e o tratamento com 9% apresentou valor intermediário e igual estatisticamente ao tratamento com 6%.

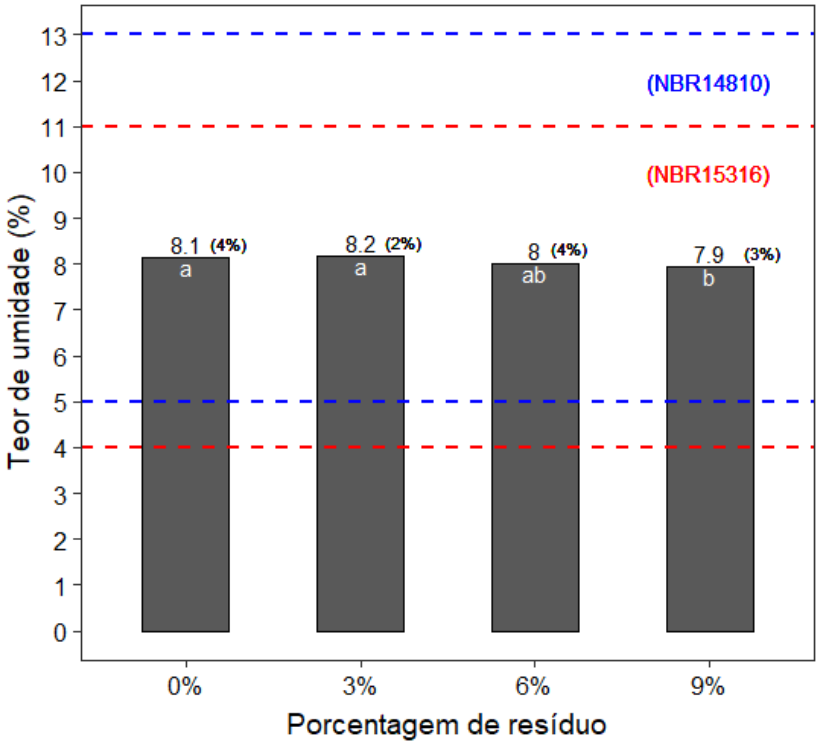
Apesar da redução expressiva da razão de compactação com a inclusão do resíduo, todos os painéis apresentaram valores superiores a 1,3, que é o mínimo estabelecido por Moslemi (1974) e Maloney (1993) para garantir uma densificação adequada na formação do painel. E consequente propriedades tecnológicas satisfatórias. Conforme apontado pelos autores, razões de compactação mais elevadas proporcionam maior resistência mecânica devido à compressão

mais intensa do material, resultando em maior inchamento em espessura devido à liberação ampliada das tensões de compressão durante o processo de prensagem.

Andrade *et al*. (2019) obteve valores médios de razão de compactação de 1,30 a 1,59 para painéis produzidos com fibras de *Pinus* spp. e resíduos de celulose. Rios *et al*. (2016) encontraram para painéis de partículas de *Pinus patula* valor médio de razão de compactação de 1,74.

O teor de umidade dos painéis variou de 7,9% para o tratamento com 9% de resíduo a 8,2% para o tratamento com 3%, apresentando diferença significativa entre os valores do tratamento com maior percentual de resíduo (9%) e os valores dos tratamentos com menor percentual (3%) e testemunha. O tratamento com 6% de resíduo apresentou valor intermediário e igual estatisticamente aos demais tratamentos (Figura 13).

Figura 13 – Valores médios de teor de umidade dos painéis.



Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam os intervalos para o teor de umidade estabelecidos pela NBR 15316 (ABNT, 2019) e NBR 14810 (ABNT, 2018), respectivamente. Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Essa variação observada entre os tratamentos está associada a menor quantidade de fibras *oversize*, material hidrofílico, e maior quantidade de resíduo de revestimento melamínico, que apresenta certa resistência a umidade, no tratamento com 9%. Além disso, em função da menor quantidade de fibras *oversize* que foram encoladas com a mesma quantidade de adesivo

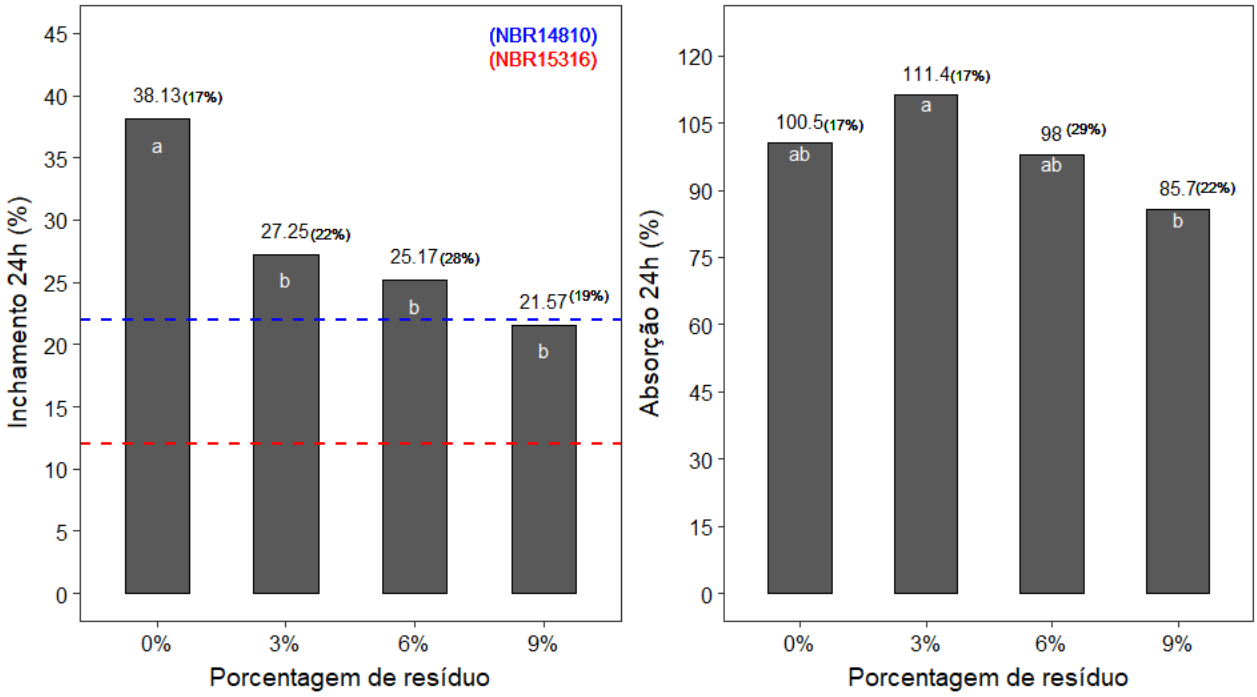
(12% em todos os tratamentos), esse tratamento, possuía maior disponibilidade de adesivo, reduzindo dessa forma a susceptibilidade a absorção de umidade.

Os valores de teor de umidade ficaram abaixo de 12%, umidade de equilíbrio da câmara de climatização. Os painéis de madeira reconstituída geralmente não atingem o teor de umidade de equilíbrio durante o condicionamento, diferente da madeira maciça; isso ocorre devido a uma série de particularidades do processo que alteram a composição química e a quantidade de sítios hidrofílicos presentes na madeira, entre elas destaca-se a redução da madeira em partículas ou fibras, a adição de adesivos sintéticos e aditivos, o processo de secagem drástico que retira a água de constituição química e a prensagem a quente dos painéis. Outras pesquisas também evidenciaram esse fato, como no estudo de França *et al.* (2016), onde obtiveram para painéis de fibras *oversize* teores de umidade variando entre 8,29 e 9,66%, e de Andrade *et al*. **(**2018), em que produziram painéis de partículas de *Eucalyptus* e resíduos de polpa celulósica com teores de umidade entre 7,37 e 8,21%.

Para o teor de umidade, a NBR 14810 (ABNT, 2018) determina que os painéis de partículas devem apresentar valores entre 5 e 13% e, a NBR 15316 (ABNT, 2019) defini intervalo entre 4 e 11% para painéis de fibras. Assim, todos os tratamentos atenderam aos limites especificados pelas normas citadas.

Os valores de inchamento em espessura após 24h de imersão em água variaram de 21,57% para o tratamento com 9% de resíduo à 38,13% para a testemunha. Os tratamentos com 3 e 6% de resíduo apresentaram valores intermediários de 27,25% e 25,17%, respectivamente. Todos os tratamentos com incorporação de resíduo melamínico, apresentaram valores significativamente menores em relação à testemunha, e iguais entre si. A absorção de água nos painéis variou de 85,7% a 111,4%, sendo significativamente menor a absorção verificada para o tratamento com 9% de resíduo incorporado, em relação a maior absorção, observada para o tratamento com 3%. Os tratamentos com 6% e testemunha, apresentaram valores intermediários e iguais estatisticamente entre si e aos demais tratamentos, portanto, não foi observada uma tendência específica para a absorção de água dos painéis (Figura 14).

Figura 14 - Valores médios de inchamento e absorção 24h dos painéis.



Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam os limites máximos para o inchamento estabelecidos pela NBR 15316 (ABNT, 2019) e NBR 14810 (ABNT, 2018), respectivamente. Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os resultados indicam que a incorporação de resíduo melamínico reduziu o inchamento em espessura dos painéis. Alguns fatores podem ter contribuído para o menor inchamento em espessura dos painéis com incorporação de resíduo melamínico, como a menor razão de compactação observada para estes em relação ao obtido para a testemunha. Usualmente painéis com maiores razões de compactação resultam em valores maiores de inchamento em espessura, prejudicando a estabilidade dimensional dos painéis (Iwakiri *et al*., 2004). O aumento da razão de compactação com materiais de menor densidade resulta em mais partículas compactadas. Quando essas partículas entram em contato com a água, liberam tensões da prensagem, gerando mais sítios hidroxílicos, causando um aumento significativo no inchamento em espessura (Guimarães Jr., 2016; Scatolino *et al*., 2017; Sulaiman *et al*., 2018).

A presença de resina melamínica curada em maior proporção nos painéis influenciou de forma positiva a estabilidade dimensional. Segundo Bauer (1986), revestimentos que passam por um processo eficaz de cura geralmente não enfrentam problemas de umidade e, apesar da ocorrência de hidrólise química quando expostos à umidade de condensação, a aparência física do revestimento geralmente permanece relativamente inalterada; isso pode ser atribuído ao fato de que a quebra das ligações cruzadas entre polímero e melamina é compensada pela formação de ligações cruzadas entre moléculas de melamina. Assim, a relativa resistência a água,

característica das resinas melamínicas, pode ter influenciado no menor inchamento observado nos painéis com resíduos de revestimento.

Em relação a absorção de água 24h, o maior percentual observado para os painéis com proporção de 3% de resíduo em relação aos painéis com 9%, pode estar relacionada às características de elevada porosidade, indicando que houve variação da estrutura interna entre estes painéis com diferentes porcentagens de resíduo. Esse comportamento pode ser atribuído a menor quantidade de adesivo disponível em função da quantidade de fibras *oversize*, proporcionando uma menor ligação entre elas no tratamento com 3%, e consequentemente um aumento dos espaços vazios, o que facilita a entrada de água.

De maneira similar, Hong *et al.* (2018) produziram painéis com fibras recicladas obtidas a partir de resíduos de painéis revestidos com diferentes tipos de filmes laminados. Os autores observaram menores valores de absorção de água e inchamento para os painéis de fibras recicladas com laminado melamínico de baixa pressão, e associaram este resultado a maior adesão promovida pela resina curada presente no revestimento. Em outra pesquisa, realizada por Iwakiri *et al*. (2005) em painéis de partículas de *Pinus* spp. e resina UF, os valores obtidos para absorção de água e inchamento em espessura foram de 126,58% e 29,99%, respectivamente, após 24 horas de imersão em água.

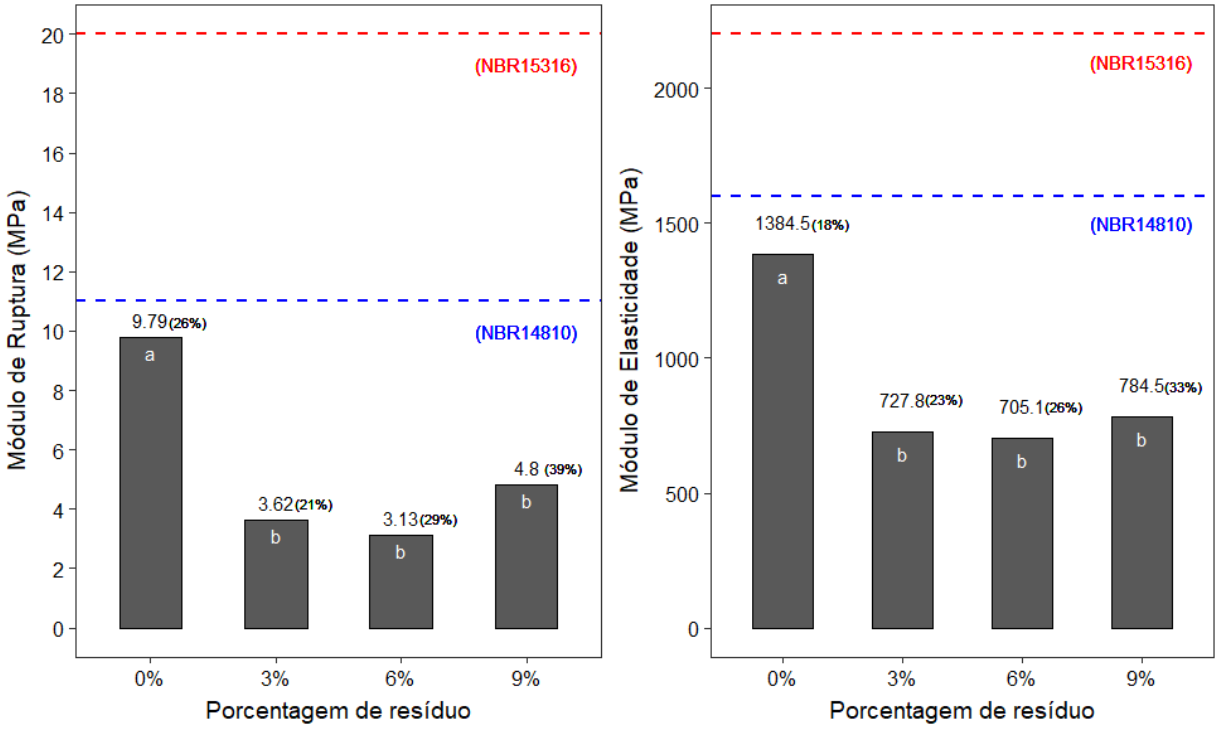
A absorção de água é um parâmetro não normalizado, mas de acordo com a literatura, os valores estão próximos aos descritos por Sozin *et al*. (2019), que observaram valor médio de absorção 24h em torno de 90% para painéis de partículas de *Pinus taeda* produzidos com resina UF, bem como por Carashi, Leão e Chamma (2009) que obtiveram média de 114% para absorção de painéis produzidos a partir de resíduos de papel cartonado e casca de amendoim. Os valores médios de absorção foram inferiores ao relatado por Antov, Mantanis e Savov (2020) para painéis de fibras recicladas e lignossulfonato de magnésio, que apresentaram média de 168%.

As normas NBR 14810 (ABNT, 2018) e NBR 15316 (ABNT, 2019), estabelecem para painéis MDP e MDF, valores máximos de 22 e 12%, para o inchamento em espessura, respectivamente. O tratamento com maior teor de resíduo (9%) incorporado foi o único que atendeu ao limite da norma para painéis de partículas, e nenhum tratamento atendeu a norma para enquadramento como painéis de fibras.

Os resultados médios de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática, são apresentados na Figura 15. Os valores de MOR para os painéis variaram de 3,13 MPa para o tratamento com 6% de resíduo à 9,79 MPa para a testemunha. O MOE variou de 705,1 Mpa para o tratamento com 6% de resíduo à 1384,5 Mpa para a testemunha. Ambas

as propriedades foram inferiores estatisticamente para os tratamentos com a incorporação de resíduo de revestimento melamínico, em relação à testemunha, independente da porcentagem incorporada aos painéis. Os tratamentos com 3, 6 e 9% de resíduo apresentaram valores médios que não se diferiram entre si, não havendo uma tendência específica.

Figura 15 - Valores médios de MOR e MOE à flexão estática dos painéis.



Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam os valores mínimos para as propriedades de flexão estabelecidos pela NBR 15316 (ABNT, 2019) e NBR 14810 (ABNT, 2018), respectivamente. Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A redução da resistência e rigidez à flexão estática com a incorporação do resíduo pode estar associada a redução da razão de compactação em função da maior densidade do resíduo melamínico. Menores razões de compactação sugerem que os painéis não foram compactados de maneira adequada para gerar um bom contato entre as fibras e os resíduos, o que pode ter ocasionado a formação de imperfeições e descontinuidade na estrutura interna do painel, afetando negativamente a resistência à flexão estática. Os resultados indicam que os resíduos, nas dimensões utilizadas no presente estudo, prejudicam o entrelaçamento entre as fibras, reduzindo os valores de MOR e MOE. Assim, a diminuição da granulometria do resíduo pode facilitar e melhorar a sua homogeneização com as fibras *oversize*, que por sua vez pode melhorar tais propriedades.

Além disso, o MOR e MOE dos painéis foram prejudicados pela variação das dimensões das fibras *oversize*, que por ser um material considerado como descarte, é composto tanto por

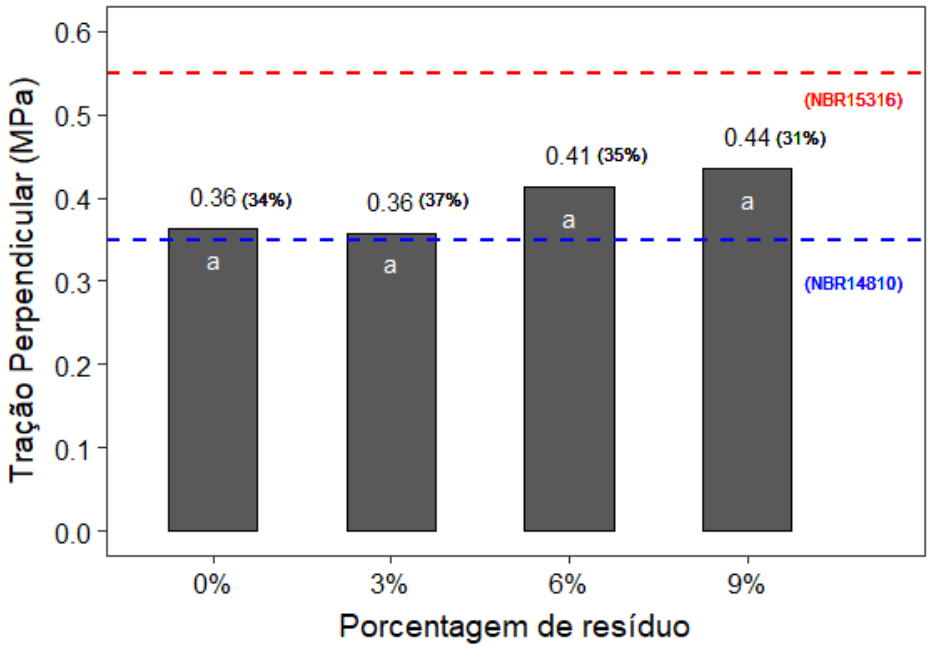
fibras quanto por partículas. Esta variação das dimensões não foi controlada, o que pode ter dificultado a dispersão do adesivo e a colagem em certos pontos, o que promoveu a formação de grumos, explicando o baixo desempenho também dos painéis testemunhas (sem resíduo). Desta forma, a classificação das fibras *oversize*, e posterior seleção dos materiais de menores e maiores dimensões para compor diferentes camadas, pode resultar na melhoria da dispersão do adesivo e do entrelaçamento entre os materiais, influenciando de forma positiva nas propriedades de flexão.

Os resultados obtidos são compatíveis com os apresentados na literatura, como no estudo de Bednarczuk *et al*. (2019), que obtiveram valores de 818 e 4,1 MPa para MOE e MOR, respectivamente, com a adição de 12% de borracha de pneu em painéis de partículas de *Pinus* spp., e associaram esse comportamento a alta densidade do resíduo, que levou a menor razão de compactação. Melo *et al*. (2015) também relataram redução das propriedades de flexão com a substituição parcial de partículas de *Pinus* spp. por partículas de bambu. Os autores atribuíram isso ao maior percentual de celulose presente em painéis produzidos exclusivamente por partículas de madeira, que contribuiu para maior polimerização. Dacosta *et al.* (2005) encontraram para painéis de partículas produzidos com resíduos de processamento mecânico de *Pinus elliottii* e resina UF, valores médios de MOR na faixa de 5,1 a 9,7 MPa, e MOE de 522 a 1183 MPa. Weber e Iwakiri (2015) observaram para painéis produzidos com resíduos de painéis MDF, MDP e compensados, valores entre 4,9 e 9,7 MPa para MOR e 882 a 1522 MPa para MOE.

A noma NBR 14810 (ABNT, 2018) e NBR 15316 (ABNT, 2019) estabelecem valores mínimos para as propriedades de MOR de 11 e 20 MPa respectivamente, e para MOE de 1600 e 2200 MPa, respectivamente; desta forma, nenhum tratamento atingiu ao mínimo estabelecido. Os painéis testemunha apresentaram valores mais próximos dos mínimos exigidos para painéis MDP. Dessa forma, os painéis produzidos podem ser utilizados para finalidades que não exijam resistência mecânica, como no caso de painéis de revestimento (Bednarczuk *et al.*, 2019).

Para a propriedade de resistência à tração perpendicular, observou-se valores médios entre 0,36 MPa para os painéis testemunha a 0,44 MPa para o tratamento com 9% de resíduo melamínico, não havendo diferença estatística entre os tratamentos, como consta na Figura 16.

Figura 16 – Valores médios de resistência à tração perpendicular.



Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam os valores mínimos para a propriedade de tração perpendicular estabelecidos pela NBR 15316 (ABNT, 2019) e NBR 14810 (ABNT, 2018), respectivamente. Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Observa-se numericamente uma melhora na propriedade de adesão interna com a incorporação do resíduo de revestimento melamínico, no entanto, esse efeito não foi estatisticamente significativo. Portanto, os resultados indicam que a incorporação de 9% de resíduo pode ser realizada para composição de painéis com adesão interna adequada.

Bednarczuk *et al.* (2019), da mesma forma, encontraram valores de resistência à tração iguais a 0,43 e 0,53 MPa com a incorporação de 6% e 12% de borracha de pneu, respectivamente, no entanto, não houve diferença estatística. Weber e Iwakiri (2015) relataram valores de resistência à tração entre 0,26 e 0,56 MPa, para painéis produzidos com resíduos de painéis MDF, MDP e compensados. França *et al.* (2016) obtiveram para painéis produzidos a partir de fibras *oversize* encoladas e partículas de *Pinus* spp. valores entre 0,39 e 0,59 MPa.

Em contrapartida, Hong *et al*. (2018) testando painéis produzidos com fibras recicladas provenientes de resíduos de painéis com diferentes revestimentos, relataram maior resistência à tração para os painéis com 20% de fibras recicladas com revestimento laminado de baixa pressão. Os autores associaram esse resultado ao filme melamínico que provavelmente liberou melamina e formaldeído em altas temperaturas, e reagiu com a resina UF durante a prensagem a quente, resultando num aumento na resistência da ligação interna. No presente estudo, essa influência não foi detectada estatisticamente provavelmente em função do baixo percentual de resíduo adicionado aos painéis, bem como devido ao alto coeficiente de variação. O alto

coeficiente de variação observado está associado a heterogeneidade da estrutura interna dos painéis, em detrimento da dificuldade de homogeneização dos resíduos com as fibras *oversize*, conforme comentado anteriormente.

As normas NBR 14810 (ABNT, 2018) e NBR 15316 (ABNT, 2019) estabelecem valores mínimos para as propriedades de tração perpendicular de 0,35 e 0,55 MPa respectivamente, portanto, todos os tratamentos atenderam a norma somente para painéis de partículas para uso não estrutural em ambientes secos (P2).

3.4 CONCLUSÃO

Dos painéis produzidos, o que alcançou melhor resultado foi aquele composto por 91% de fibras *oversize* e 9% de resíduo de revestimento melamínico BP. Esse painel apresentou resultados que atenderam à norma NBR 14810 (ABNT, 2018) para enquadramento como painel do tipo P2 (uso interno) para todas as propriedades com exceção dos módulos de ruptura e de elasticidade à flexão estática. Todos os tratamentos apresentaram valores de emissão dentro do requerido pelas normas para classificação E1, contudo, não foi constatado uma tendência consistente nos valores de emissão com o aumento do percentual do resíduo.

Assim, a reutilização de resíduos de revestimento melamínico de baixa pressão a partir da sua incorporação em painéis de fibras *oversize* é viável tecnicamente, desde que haja a melhoria das propriedades de flexão estática a partir de ajustes no processo. Essa abordagem pode ser uma alternativa para gestão sustentável desses resíduos que causam impacto ambiental e gastos para indústria.

Sugere-se para trabalhos futuros a classificação das fibras *oversize* e maior refinação dos resíduos, a fim de facilitar a homogeneização dos materiais e obter painéis que atendam todas as normativas do setor. Além disso, para investigar a influência dos resíduos de revestimento melamínico na emissão de formaldeído em painéis reconstituídos, é recomendável a realização de estudos que envolvam maiores porcentagens de resíduos, bem como a aplicação destes em painéis convencionais, como MDF e MDP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. B. de; MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M. da. Aproveitamento de resíduos de painéis de madeira gerados pela indústria moveleira na produção de pequenos objetos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, p. 171-177, 2009.

ALAWODE, A. O.; BUNGU, P.E.; AMIANDAMHEN, S. O.; MEINCKEN, M.; TYHODA, L. Propriedades e características de novos adesivos para madeira sem formaldeído preparados a partir de extratos de sementes de *Irvingia gabonensis* e *Irvingia wombolu*. **Revista Internacional de Adesão e Adesivos**, v. 95, p. 102423, 2019.

AMAZIO, P.; AVELLA, M.; ERRICO, M. E.; GENTILE, G.; BALDUCCI, F.; GNACCARINI, A.; MORATALLA, J.; BELANCHE, M. Painéis de aglomerado de partículas de baixa emissão de formaldeído realizados através de um novo aglutinante acrílico. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 122, n. 4, p. 2779-2788, 2011.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A (208) 1 - 2:** Particleboard and Fiberboard. Gaithersburg: ANSI, 2002.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS. **ASTM D 1084-97**. Standard test methods for viscosity of adhesives. West Conshohocken, PA, 1998.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS. **ASTM D 2471**. Standard test method for *gel time* and peak exothermic temperature of reacting thermosetting resins, West Conshohocken, PA, 1999.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS. **ASTM D 1490**. Standard test method for nonvolatile content of urea-formaldehyde resin solutions. West Conshohocken, PA, 2013.

ANDRADE, L. M. F.; SCATOLINO, M. V.; FARIA, D. L.; CÉSAR, A. A.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B. Inclusão do resíduo de polpação da celulose na produção de painéis aglomerados de média densidade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 120, p. 626-637, 2018.

ANDRADE, N. C.; SABINO, T. P. F.; TERRA, I. C. 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, 2019.

ANTOV, P.; MANTANIS, G. I.; SAVOV, V. Development of wood composites from recycled fibres bonded with magnesium lignosulfonate. **Forests**, v. 11, n. 6, p. 613, 2020.

ARAÚJO, G. M. G. de. **Desafios para aplicação da metodologia do berço-ao-berço ao ciclo de vida de móveis de MDF e MDP.** 2012. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana e ambiental) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

ARIAS, A.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; FEIJOO, G.; MOREIRA, M. T. Bioadesivos à base de taninos para a indústria de painéis de madeira como alternativas sustentáveis às resinas petroquímicas. **Revista de Ecologia Industrial** , v. 2, p. 627-642, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos-Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15316** - Painéis de fibra de média densidade. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 14810** - Painéis de partículas de média densidade. Rio de Janeiro, 2018.

ATHANASSIADOU E. T. S.; MARKESSINI, C. **Rumo a compósitos com emissão de formaldeído em níveis de madeira natural.** In: COST Action E49 Medição e controle de emissões de voc de painéis derivados de madeira, Braunschweig, Alemanha, 2007.

AYDIN, I.; DEMIRKIR, C.; COLAK, S.; COLAKOGLU, G. Utilization of bark flours as additive in plywood manufacturing. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, p. 63-69, 2017.

AYRILMIS, N.; NEMLI, G. Efeito do tipo de adesivo nas propriedades de qualidade do aglomerado. **Máquinas, Tecnologias, Materiais**, Bulgária, v. 11, n. 7, p. 364-365, 2017.

BAUER, D. R. Melamine/formaldehyde crosslinkers: characterization, network formation and crosslink degradation. **Progress in organic coatings**, v. 14, n. 3, p. 193-218, 1986.

BALDUCCI, F.; ADAMOPOULOS, S.; PETTINARI, C.; CANTI, E.; DI NICOLA, C.; TOMBESI, A.; GABBANI, C. A formaldehyde-free adhesive for particleboards based on soy flour, magnesium oxide, and a plant-derived enzymatic hydrolysate. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 3087-3102, 2020.

BELINI, U. L. **Caracterização tecnológica de painéis de fibras da madeira de eucalipto,** *Eucalyptus grandis***, e de partículas do bagaço do colco de cana-de-açúcar**, *Saccharum*. 2012. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

BEDNARCZUK, E.; DOURADO, D. C.; HILLIG, É.; TAVARES, E. L. Influência da adição de borracha de pneu nas propriedades de painéis MDP. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 10, n. 2, 2019.

BESSADOK, A.; LANGEVIN, D.; GOUANVÉ, F.; CHAPPEY, C.; ROUDESLI, S.; MARAIS, S. Estudo da sorção de água em fibras de Agave modificadas. **Polímeros de carboidratos**, Reino Unido, v. 76, p. 74-85, 2009.

BEKHTA, P.; SEDLIAČIK, J.; KAČÍK, F.; NOSHCHENKO, G.; KLEINOVÁ, A. Lignocellulosic waste fibers and their application as a component of urea-formaldehyde adhesive composition in the manufacture of plywood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 77, p. 495-508, 2019.

BIAZUS, A.; HORA, A. B. da; LEITE, B. G. P. Painéis de madeira MDP e MDF: mercado e competitividade. **Revista da Madeira**, n. 136, 2013. Disponível em:<http://www.remade .com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1683&> Acesso em: 03 abr. 2023.

BORAN, S.; USTA, M.; GÜMÜSKAYA, E. Decreasing formaldehyde emission from medium density fiberboard panels produced by adding different amine compounds to urea formaldehyde resin. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 31, pp. 674- 678, 2011.

BORAN, S.; USTA, M.; ONDARAL, S.; GÜMÜŞKAYA, E. A eficiência do tanino como produto químico eliminador de formaldeído em painéis de fibra de média densidade. **Compósitos Parte B: Engenharia**, v. 43, n. 5, p. 2487-2491, 2012.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.

BRASIL. **Ministério do Trabalho e Emprego.** Norma Regulamentadora nº 15 (NR15), de 08 de junho de 1978. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-15-nr-15> Acesso em: 10 ago. 2023.

CARB. **Airborne toxic control measure to reduce formaldehyde emissions from composite wood products**. In Health and Safety Code: Title 17, California Code of Regulations; California Air Resources Board: Sacramento, CA, USA, 2009.

CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; CARVALHO, A. M. M. L.; VIDAURRE, G. B. Propriedades de chapas de aglomerado fabricadas com adesivo tânico de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina*) e ureia-formaldeído. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 521-531, 2009.

CARNEIRO, T. de L. A. **Influência da mescla de resinas ureia formaldeído e difenilmetano 4,4'- diisocianato (MDI) nas propriedades mecânicas e emissão de formaldeído de painéis de madeira aglomerada.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2017.

CARVALHO, L. H.; MAGALHÃES, F. D.; FERRA, J. M. Emissões de formaldeído de painéis derivados de madeira - métodos de teste e perspectivas industriais. *In:* CHENG, C. B.; LN, F. H. **Formaldeído: química, aplicações e papel na polimerização**, Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, Inc., 2012. p. 207.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L.; CHAMMA, P. V. C. Avaliação de painéis produzidos a partir de resíduos sólidos para aplicação na arquitetura. **Polímeros**, v. 19, p. 47-53, 2009.

CADEMARTORI, P. H. G.; ARTNER, M. A.; DE FREITAS, R. A; MAGALHAES, W. L. E. Nanopartículas de alumina como removedor de formaldeído para resina de ureia-formaldeído: desempenho reológico e de cura in-situ. **Compósitos,** Parte B, v. 176, 107281, 2019.

CESÁRIO, H. A. **Obtenção de propriedades de corpos de prova confeccionados com resíduo de papel melamínico.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

COMISSÃO DE POLÍTICAS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E DA AGENDA 21 NACIONAL. **Agenda 21 brasileira: ações prioritárias.** Brasília, DF: PNUD, 2002.

CONNER, A. H. **Resinas adesivas ureia-formaldeído**. *In*: SALAMONE, J. C. Polymeric materials encyclopedia. Boca Raton, Florida: CRC Press, v. 11, p. 8496- 8501, 1996.

COSTA, N. A.; PEREIRA, J.; FERRA, J.; CRUZ, P.; MARTINS, J.; MAGALHÃES, F. D.; MENDES, A.; CARVALHO, L. H. Sequestrantes para alcançar emissão zero de formaldeído de painéis derivados de madeira. **Ciência e tecnologia da madeira**, v. 47 , p. 1261-1272, 2013.

COSTA, N.; PEREIRA, J.; MARTINS, J.; FERRA, J.; CRUZ, P.; MAGALHÃES, F.; CARVALHO, L. Alternativa aos catalisadores latentes para cura de resinas UF utilizadas na produção de painéis derivados de madeira com baixa emissão de formaldeído. **Revista Internacional de Adesão e Adesivos**, v. 33, p. 56-60, 2012.

DACOSTA, L. P. E.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; SCHNEIDER, P. R.; CALEGARI, L. Qualidade das chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos do processamento mecânico da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 3/4, p. 311-322, 2005.

DIOP, C. I. K.; TAJVIDI, M.; BILODEAU, M. A.; BOUSFIELD, D. W.; HUNT, J. F. Isolamento de nanofibrilas de lignocelulose (LCNF) e aplicação como substituto adesivo em compósitos de madeira: exemplo de painel de fibra. **Celulose**, v. 24, p. 3037-3050, 2017.

DUNKY, M. Resinas adesivas de ureia-formaldeído (UF) para madeira. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Holanda, v. 18, n. 2, p. 95–107, 1998.

DUNKY, M. Adhesives based on formaldehyde condensation resins. **Macromol. Symp**., Alemanha, v. 217, p. 417-429. 2004.

DUNKY, M.; NIEMZ, P. **Holzwerkstoffe und Leime: technologie und Einflussfaktoren**. Berlim, Alemanha: Springer, 2002.

DUKARSKA, D.; CZARNECKI, R. Sílica pirogênica como carga da resina MUPF no processo de fabricação de compensado resistente à água. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 1, p. 5-14, 2016.

ECHA, EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. **OELs for Certain Carcinogens, Mutagens, Reprotoxins: Annex III, Directive 37/2004**. Disponível em: <https://echa.europa.eu/pt/substance-information/-/substanceinfo/100.000.002> Acesso em: 10 ago. 2023.

ELEOTÉRIO, J. R. **Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes densidades e teores de resina.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2000.

EPA. **Eviromental protection agency.** Disponível em: <https://www.epa.gov/formaldehyde/facts-about-formaldehyde#whatisformaldehyde>. Acessado em mar. de 2022.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION**. EN 13986:** Wood-based panels for use in construction - Characteristics, evaluation of conformity and marking; German version. EN, Brussels, Belgium, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. **EN 310:** Wood-based panels; determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength; German version. EN, Brussels, Belgium, 1993.

EUGÊNIO, R. A. P. **Painéis de medium density fiberboard produzidos com adesivo alternativo.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, SP, 2016.

FRANÇA, M. C.; da CUNHA, A. B.; TRIANOSKI, R.; SCHIMALSKI, M. B.; RIOS, P. D. A. Produção de painéis aglomerados homogêneos a partir de fibras *oversize* residuais de uma indústria de MDF. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 665-674, 2016.

FREITAS, A.; LENZ, D. M. Produção de painéis de madeira com resíduos de MDF e MDP da indústria moveleira e resina à base de tanino de Acácia Negra. **Engevista**, v. 21, n. 1, p. 141-153, 2019.

FREIRE, E. dos S. **Síntese e caracterização de uma resina à base de melamina, tioureia e formaldeído para remediação de mercúrio em amostras ambientais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Química e Biotecnologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

FRACKOWIAK, I.; WARCOK, F.; FUCZEK, D.; ANDRZEJAK, C. The influence of UF molar ration selected particleboard properties. **Drewno Prace Naukowe, Doniesienia Komunikaty**, v. 54, n. 186, 2011.

FUJII, I.; MURATA, Y.; UEDA, S.; NEGISHI, S.; TAGUCHI, T. **Formaldehyde scavenger and wood material using same.** United States Patet Patente US 8,389,125 B2. 2013. Disponível em : <https://patents.google.com/patent/US8389125B2/en> Acesso em: 02 ago. 2023.

FERREIRA, J. L. **Influência das variáveis de processo nas propriedades tecnológicas de painéis de fibras de média densidade (MDF).** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) –Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2020.

GHANI, A.; BAWON, P.; ASHAARI, Z.; WAHAB, M. W.; HUA, L. S. Addition of propylamine as formaldehyde scavenger for urea formaldehyde-bonded particleboard. **Wood research**, v. 62, n. 2, p. 329-334, 2017.

GOMES, J. W.; GODOI, G. S.; SOUZA, L. G. M.; SOUZA, L. G. V. M. Absorção de água e propriedades mecânicas de compósitos poliméricos utilizando resíduos de MDF. **Polímeros**, v. 27, p. 48-55, 2017.

GONÇALVES, F. G.; BROCCO, V. F.; PAES, J. B.; LOIOLA, P. L.; LELIS, R. C. C. Resistência de painéis aglomerados de *Acacia mangium* Willd. colados com ureia formaldeído e taninos a organismos xilófagos. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 3, p. 409-416, 2014.

GONÇALVES, C.; PEREIRA, J.; PAIVA, N.; FERRA, J.; MARTINS, J.; MAGALHÃES, F.; BARROS-TIMMONS, A. CARVALHO, L. Estudo dos parâmetros de síntese de uma resina de uréia-formaldeído sintetizada pelo processo alcalino-ácido. **Jornal Internacional de Adesão e Adesivos**, Oxford, UK, v. 102, p. 102646, 2020.

GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; ANDRADE, W. S. P. **Engenharia madeireira: pesquisa e produção.** Seropédica, RJ: Edur UFRRJ, 2017. p. 261-306.

GUMOWSKA, A.; KOWALUK, G. Propriedades físicas e mecânicas de placas de fibra de alta densidade coladas com adesivos de base biológica. **Florestas**, v. 14, n. 1, p. 84, 2023.

GUMOWSKA, A.; KOWALUK, G.; LABIDI, J.; ROBLES, E. Barrier properties of cellulose nanofiber film as an external layer of particleboard. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, p. 2073-2079, 2019.

GUIMARÃES JR., J. B.; XAVIER, M. M.; SANTOS, T. S.; PROTÁSIO, T. de P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Inclusão de resíduo da cultura de sorgo em painéis aglomerados de eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, 2016.

HONG, M. K.; LUBIS, M. A. R.; PARK, B. D.; SOHN, C. H.; ROH, J. Effects of surface laminate type and recycled fiber content on properties of threelayer medium density fiberboard. **Wood Material Science & Engineering**, v. 15, n. 3, p. 163-171, 2018.

HIDAYAT, W.; APRILLIANA, N.; ASMARA, S.; BAKRI, S.; HIDAYATI, S.; BANUWA, I.S.; ISWANTO, A. H. Desempenho de painéis aglomerados ecológicos provenientes de resíduos agroindustriais colados com adesivo látex de borracha natural sem formaldeído para aplicações em interiores. **Compósitos Poliméricos**, v. 43, n. 4, p. 2222-2233, 2022.

IARC. Monographs on the Evaluation of Cancinogenic Risck to Humans. **Formaldeído, 2-Butoxietanol e 1-** ***terc*** **-Butoxipropan-2-ol.** Lyon, França: International Agency For Research On Cancer IARC, v. 88, 2006.

IARC. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. **Chemical agentes and related occupations: a review of human carcinigens.** Lyon, França: International Agency For Research On Cancer IARC, 2012. v. 100F, p. 401-435, 2012.

IBÁ. **Relatório anual.** Indústria Brasileira de Árvores, 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf> Acesso em 23 mar.2023.

IBÁ. **Relatório anual.** Indústria Brasileira de Árvores, 2021. Disponível em: < https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf> Acesso em 23 mar.2023.

INCA. **Causas e prevenção Formol.** Instituto Nacional do Câncer. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/solventes/formol>. Acesso em: mar. de 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO: 14001:2015**. Sistema de Gestão Ambiental: Requisitos com Orientação de Uso; ISO: Genebra, Suíça, 2015.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPE, 2005. 254 p.

IWAKIRI, S.; KEINERT JR., S.; MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. **Painéis de madeira.** 1.ed. Curitiba: Universidade Federal Do Paraná, 2002, 196p

IWAKIRI, S.; de ANDRADE, A. S.; CARDOSO, A. A.; do ROCIO CHIPANSKI, E.; PRATA, J. G.; ADRIAZOLA, M. K. O. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina ureia-formaldeído. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 323-328, 2005.

IWAKIRI, S.; SHIMIZU, J.; SILVA, J. C.; DEL MENEZZI, H. S.; PUEHRINGHER, C. A.; VENSONS, I.; LARROCA, C. Particle board manufacturing from *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 883-887, 2004.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. **JIS A 1460**: Building boards Determination of formaldehyde emission - Desiccator method. Particleboard: Japanese Standards Association, Tokyo; 2001.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. **JIS A 5908**: Particleboard. Japanese Standards Association, Tokyo; 2003.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS A 5905**: Fiberboards. Japanese Standard Association, Tokyo; 2003.

JIN, S.; Li, K.; Li, J.; Chen, H. Um adesivo para madeira de baixo custo, sem formaldeído e com alto retardamento de chama a partir de adesivos inorgânicos: Propriedades e desempenho. **Polímeros**, v. 9, n. 10, p. 513, 2017.

KATSUKAKE, A. **Uma revisão sobre a resina ureia formaldeído empregada na produção de painéis de madeira reconstituída.** 2009. Projeto de conclusão de curso (Licenciatura em Química) – Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, SP, 2009.

KAWALERCZYK, J.; SIUDA, J.; MIRSKI, R.; DZIURKA, D. Hemp flour as a formaldehyde scavenger for melamine-urea-formaldehyde adhesive in plywood production. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 4052-4064, 2020.

KAWALERCZYK, J.; DZIURKA, D.; MIRSKI, R.; SZENTNER, K. Properties of plywood produced with urea-formaldehyde adhesive modified with nanocellulose and microcellulose. **Drvna industrija: Znanstveni časopis za pitanja drvne tehnologije**, v. 71, n. 1, p. 61-67, 2020.

KEINERT, A. C. **Resistência à umidade e emissão de formaldeído em painéis de partículas de média densidade fabricados com diferentes resinas melamina ureia**

formaldeído. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

KIM, M. G. Examination of selected synthesis parameters for typical wood adhesivetype urea–formaldehyde resins by C NMR spectroscopy. **Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry**, Estados Unidos, v. 37, p. 995-1007, 1999.

KIM, S. Control of formaldehyde and TVOC emission from wood-based flooring composites at various manufacturing processes by surface finishing. **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, p. 14-19, 2010.

KIM, J.W.; CARLBORN, K.; MATUANA, L. M.; HEIDEN, P.A. Modificação termoplástica de adesivos de madeira de ureia formaldeído para melhorar a resistência à umidade. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 101, n. 6, p. 4222–4229, 2006.

KOZAK, P. A.; CORTEZ, A. M.; SCHIRMER, W. N.; CALDEIRA, M. V. W.; BALBINOT, R. Identificação, quantificação e classificação dos resíduos sólidos de uma fábrica de móveis. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 6, n. 2, p. 203-212, 2008.

LEE, H. H.; MALONEY, T. M. The effect of final moisture content of mat on the physical and mechanical properties of UF-bonded MDF. **Wood Science and Technology**, Alemanha, v. 23, n. 4, p. 85-90, 1995.

LESSMANN, V. E. **Estudo da reação de cura de resinas ureia-formol por espectrometria de ressonância magnética nuclear.** 2008. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LI, J.; ZHANG, Y. Morfologia e cristalinidade de adesivos de resina de ureia formaldeído com diferentes razões molares. **Polímeros**, v. 13, n. 5, p. 673, 2021.

LI, J.; LEI, H.; XI, X.; LI, C.; HOU, D.; SONG, J.; DU, G. Um adesivo para madeira sustentável com ácido cítrico e tanino, com propriedades de adesão favoráveis e resistência à água. **Culturas e Produtos Industriais**, v. 201, p. 116933, 2023.

LIU, B.; ZHOU, Y.; ESSAWY, H.; CHEN, Q.; LIANG, J.; ZHOU, X.; DU, G. Adesivo à base de tanino isento de formaldeído e com epóxi como endurecedor para compensados. **Madeiras. Ciência e tecnologia** , v. 24, 2022.

LIU, Z.; LIU, T.; ZHANG, J.; LI, Y.; LUO, J.; LI, J.; MAO, A. Preparação de um adesivo de proteína de soja forte, de alta intensidade de pré-prensagem e multifuncional usando polímero funcional hiper-ramificado. **Teste de Polímero**, v. 119, p. 107931, 2023.

LOPES, T. A. **Nanopartículas de lignina kraft para modificação do adesivo ureia-formaldeído para colagem de madeira.** 2022. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2022.

LUCKMAN, S. S. **Influência da incorporação de lignina kraft à resina ureia formaldeído nas propriedades tecnológicas de painéis aglomerados convencionais.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) –Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry process fiberboard manufacturing.** San Francisco: Miller Freeman, 1989. 672 p.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing.** San Francisco: Miller Freeman, 1993. 689 p.

MARTINS, D. A. L. **A importância das emissões de formaldeído e compostos orgânicos voláteis de placas de derivados de madeira na qualidade do ar interior.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais) – Universidade do Porto, Portugal, 2020.

MARUTZKY, R.; RANTA, L. Die Eigenschaften formaldehydarmer HF-Leimharze und daraus hergestellter holzspanplatten. **Holz als Roh und Werkstoff**, Alemanha, v.37, p. 389-393, 1979.

MARUTZKY, R.; ROFFAEL, E.; RANTA, L. Untersuchungen fiber den zusammenhang zwischen dem molverhiiltnis und der formaldehydabgabe bei harnstoff-formaldehyd-leimharzen. **Holz als Roh- und Werksloff**, Alemanha v. 37, p. 303 307, 1979.

MAURICIO, S. **Como reduzir a emissão de formaldeído em chapas de madeira?** 2015. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/como-reduzir emiss%C3%A3o-de-formalde%C3%ADdo-em-chapas-madeira-sedeur mauricio/?originalSubdomain=pt> Acesso em: 03 ago. 2023.

MEDVED, S.; GAJŠEK, U.; TUDOR, E. M.; BARBU, M. C.; ANTONOVIĆ, A. Efficiency of bark for reduction of formaldehyde emission from particleboards. **Wood research**, v. 64, n. 2, p. 307-316, 2019.
MERLINE, D. J.; VUKUSIC, S.; ABDALA, A. A. Melamine formaldehyde: curing studies and reaction mechanism. **Polymer journal**, v. 45, n. 4, p. 413-419, 2013.

MELO, R. R.; STANGERLIN, D. M.; SOUSA, A. P.; CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E. Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados madeira-bambu. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n.1, p.35-42, 2015.

MILAGRES, E. G.; VITAL, B. R.; LÚCIA, R. M. D.; PIMENTA, A. S. Compósitos de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, polipropileno e polietileno de alta e baixa densidades. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, p. 463-470, 2006.

MOREIRA, C. S. Métodos de preparação industrial de solventes e reagentes químicos. **Revista Virtual de Química**, v.7, n. 4, 2015.

MOTHÉ, C. G.; AMARAL, P. S. T. **Estudo da estabilidade térmica de resinas LCC/poliéster**. *In:* Anais do 7° Congresso Brasileiro de Polímeros, 2003.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard: materials**. London: Southern Illinois University, 1974. v. 1, 244 p.

MYERS, G. E. How mole ratio of UF resin affects formaldehyde emission and other properties: a literature critique. **Forest Products Journal**, Estados Unidos, v. 34, n. 5, p. 35 - 41, 1984.

NEMLI, G.; ÇOLAKOGLU, G. The influence of lamination technique on the properties of particleboard. **Building and Environment**, v. 40, p. 83-87, 2005.

NEITZEL, N.; HOSSEINPOURPIA, R.; ADAMOPOULOS, S. A Dialdehyde starch-based adhesive for medium-density fiberboards**. BioResources**, v. 18, n. 1, 2023.

NURYAWAN, A.; SINGH, A. P; ZANETTI, M. Insights sobre o desenvolvimento de cristalinidade em resinas líquidas de ureia-formaldeído. **Jornal Internacional de Adesão e Adesivos**, Oxford, UK**.** v. 72, p.62–69, 2017.

OSHA, Occupational Safety and Health Administration. **OSHA Instruction CPL 02-02-052** October 7, 1991, Revised 2017. Disponível em: < https://www.osha.gov/ enforcement/directives/cpl-02-02-052> Acesso em: 10 ago. 2023.

PARK, J. Y.; LEE, S. M.; PARK, B. D.; LIM, J.Y.; JANG, S. G.; KIM, S. Effect of surface laminate type on the emission of volatile organic compounds from wood-based composite panels. **Journal of adhesion Science and Technology**, v. 27, n. 5-6, p. 620–631, 2013.

PARK, B. D.; KANG, E. C.; PARK, J. Y. Efeitos da proporção molar de formaldeído para uréia no comportamento de cura térmica da resina de uréia-formaldeído e nas propriedades do painel de partículas. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 101, n. 3, p. 1787–1792, 2006.

PARK, B. D.; KANG, E. C.; PARK, J. Y. Comportamento de cura térmica de adesivos modificados de resina de ureia-formaldeído com dois removedores de formaldeído e sua influência no desempenho da adesão. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, Nova Jersey, v. 110, n. 3, p. 1573–1580, 2008.

PARK, B. D.; KIM, J.W. Effects of formaldehyde to urea mole ratio on thermomechanical curing of urea-formaldehyde resin adhesives. **Mokchae Konghak Journal of the Korean Wood Science and Technology**, Seoul, República da Coréia, v. 35, n. 5, p.76-86, 2007.

PARK, B. D.; JEONG, H. W. Estabilidade hidrolítica e cristalinidade de adesivos de resina de uréia-formaldeído curados com diferentes proporções molares de formaldeído/uréia. **Jornal Internacional de Adesão e Adesivos**, Oxford, UK**.**, v. 31, n. 6, p. 524–529, 2011.

PEREIRA, C. J. F. **Aditivos naturais para redução de emissões de formaldeído de resinas ureia-formaldeído**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade do Porto em Engenharia Química, Portugal, 2015.

PEREIRA, F.; PEREIRA, J.; PAIVA, N.; FERRA, J.; MARTINS, J. M.; MAGALHÃES, F. N.; CARVALHO, L. Natural additive for reducing formaldehyde emissions in urea-formaldehyde resins. **J. Renew. Mater**., v. 4, n. 1, 2016

PINA, C. D. S. **Avaliação da Exposição Profissional ao Formaldeído: Efeito Genotóxico**. 2010. Dissertação (Mestrado em Contaminação e Toxicologia Ambientais) – Universidade do Porto, Portugal, 2010.

PIRES, P. G.; MAIA, A. A.; PAIVA, J. M. **Efeito da adição de resíduo de laminado termofixo nas propriedades de tração e flexão de polipropileno reciclado.** *In:* Anais do 15° Congresso Brasileiro de Polímeros (15 CBPOL). Bento Gonçalves, RS, 2019.

PIZZI, A. **Synthetic adhesives for wood panels: Chemistry and technology**. *In:* MITAL, K. L. Progress in adhesion and adhesives. Estados Unidos: Scrivener Publishing, 2015.

QUE, Z. L.; FURUNO, T.; KATOH, S.; NISHINO, Y. Evaluation of three test methods in determination of formaldehyde emission from particleboard bonded with different mole ratio in the urea-formaldehyde resin. **Building and Environment,** Reino Unido, v. 42, n. 3, p. 1242-1249, 2007.

QUE, Z.; FURUNO, T.; KATOH, S.; NISHINO, Y. Effects of the molar ratio of urea-formaldehyde resin on the properties of agglomerated panels. **Building and Environment**, Reino Unido, v. 42, n. 3, p. 1257–1263, 2007.

REZENDE, L. C. S. H.; SILVA, C. A.; OTTO, G. P.; MOISÉS, M. P.; BERGAMASCO, R.; FÁVARO, S. L. Análise das propriedades físicas, químicas e mecânicas de placas de aglomerado de madeira contendo polipropileno orientado biaxialmente. **Acta Scientiarum. Tecnologi**a , v. 39, n. 2, pág. 193-200, 2017.

RIOS, P. D.'A.; PEREIRA, G. F.; VIEIRA, H. C.; GRUBERT, W.; da CUNHA, A. B.; BRAND, M. A. Avaliação do potencial da madeira de *Pinus patula* Schltdl. & Cham para a produção de painéis de madeira aglomerada. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 497-508, 2016.

RÉH, R.; IGAZ, R.; KRIŠT'ÁK, L'.; RUŽIAK, I.; GAJTANSKA, M.; BOŽÍKOVÁ, M.; KUČERKA, M. Functionality of beech bark in adhesive mixtures used in plywood and its effect on the stability associated with material systems. **Materials**, v. 12, n. 1298, 2019.

ROFFAEL, E.; JOHNSSON, B. Perforator method in balance. **International Wood Products Journal**, Reino Unido, v. 3, p. 43-50, 2012.

RUŽIAK, I.; IGAZ, R.; KRIŠT'ÁK, L.; RÉH, R.; MITTERPACH, J.; OČKAJOVÁ, A.; KUČERKA, M. Influence of ureaformaldehyde adhesive modification with beech bark on chosen properties of plywood. **Bioresources**, v. 12, p. 3250–3264, 2017.

SANTOS, R. C. dos.; MENDES, L. M.; CARNEIRO, A. D. C. O.; MORI, F. A.; CASTRO, R. V. O.; MENDES, R. F. Utilização de resíduos da madeira de candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish) na produção de painéis aglomerados com adição de pet. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, p. 149-158, 2011.

SCHULZ, R. H.; COSTA, A. P.; BARBOSA, K. T.; GATTO, D. Propriedades químicas, mecânicas, térmicas e ópticas da madeira tratada termicamente de *Pinus elliottii* plantada no Brasil. **Quebracho**, Santiago del Estero, v. 29, n. 2, p. 122-131, 2021.

SILVA, A. F.; FIGUEIREDO, C. F. Reaproveitamento de resíduos de MDF da indústria moveleira. **Design e Tecnologia**, v. 1, n. 02, p. 77-87, 2010.

SILVA, F. J. C. **Caracterização de resinas de ureia formaldeído.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade do Porto, Portugal, 2008.

SILVA, G. C.; LELIS, R. C. C.; OLIVEIRA, G. D. L.; SILVA, B. C. D.; LOSSANO, W. C. D. S.; ABREU, H. D. S. Propriedades de adesivo aplicado em painéis a partir da substituição por lignossulfonato do processo sulfito. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 322-335, 2019.

SILVA, A. A. da. **Aproveitamento de resíduos de madeira (maravalha) de Pinus e bagaço de cana de açúcar para produção de chapas de madeira aglomerado.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2013.

SILVA, G. A.; MENDES, L. M.; CALEGÁRIO, N.; MORI, F. A.; SILVA, J. R. M.; SANTOS, I. F. Estimativa da umidade de equilíbrio de painéis de madeira. **Scientia Forestalis,** Piracicaba, n. 70, p. 23-29, 2006.

SOLYON, G. J. P. **Minimização e reaproveitamento de resíduos de uma indústria de tintas e impressão de papéis decorativos.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

SCATOLINO, M. V.; COSTA, A. O.; JÚNIOR, J. B. G.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. *Eucalyptus* wood and coffee parchment for particleboard production: physical and mechanical properties. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 139-146, 2017.

SULAIMAN, N. S.; HASHIMA, R.; SULAIMANA, O.; NASIRA, M.; HAZIM, M.; AMINIB, M.; HIZIROGLUC, S. Partial replacement of urea-formaldehyde with modified oil palm starch-based adhesive to fabricate particleboard. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 84, p. 1-8, 2018.

SOZIM, P. C. L.; NAPOLI, L. M.; FERRO, F. S.; MUSTEFAGA, E. C.; HILLIG, E. Propriedades de painéis aglomerados produzidos com madeiras de *Ligustrum lucidum* e *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 39, 2019.

TAYO, J. L.T; BETTELHÄUSER, R. J.; EURING, M. Canola meal as raw material for the development of bio-adhesive for medium density fiberboards (MDFs) and particleboards **Production. Polymers**, v. 14, n. 17, p. 3554, 2022.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TOMAZELLO FILHO, M.; BELINI, U. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; GONÇALVES, F. G. Avaliação tecnológica da madeira e de painéis MDF de eucalipto por densitometria de raios X. **Madeira arquitetura e engenharia**, São Carlos, v. 11, n. 27, 2010.

TORQUATO, L. P.; IWAKIRI, S.; BONDUELLE, G. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; MATOS, J. L. M. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de painéis de fibras de média densidade (MDF) produzidos pelas indústrias brasileiras. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 40, n. 2, p. 275-280, 2010.

ULLAH, S.; BUSTAM, M. A.; NADEEM, M.; NAZ, M. Y.; TAN, W. L.; SHARIFF, A. M. Synthesis and thermal degradation studies of melamine formaldehyde resins. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014.

VIEIRA, M. C.; BRITO, E. O.; GONÇALVES, F. G. Evolução econômica do painel compensado no brasil e no mundo. **Floresta e ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 3, p. 277–285, 2012.

VUKUSIC, S. B.; KATOVIC, D.; SCHRAMM, C.; TRAJKOVIC, J.; SEFC, B. Ácidos policarboxílicos como agentes anti-inchaço não formaldeído para madeira. **Holzforschung**, Berlim, v. 60, n. 4, p. 439-444. 2006.

WEBER, C.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, p. 405-413, 2015.

WIBOWO, E. S.; PARK, B. D. Análise bidimensional por ressonância magnética nuclear da formação de pontes de hidrogênio em resinas termoendurecíveis cristalinas de ureia-formaldeído em baixa razão molar. **ACS Applied Polymer Materials**, Washington, v. 4, n. 2, p. 1084-1094, 2022.

WIBOWO, E. S.; PARK, B. D. Estrutura lamelar cristalina de resinas de ureia-formaldeído termoendurecíveis em uma razão molar baixa. **Macromoléculas**, Washington, v. 54, n. 5, p. 2366-2375, 2021.

WIBOWO, E. S.; PARK, B. D.; CAUSIN, V. Cristalização induzida por ligação de hidrogênio em resinas de ureia formaldeído de baixa razão molar durante a síntese. **Industrial Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 59 , n. 29, 2020.

WIBOWO, E. S.; LUBIS, M. A. R.; PARK, B. D. Simultaneous improvement of formaldehyde emission and adhesion of medium-density fiberboard bonded with low-molar ratio urea-formaldehyde resins modified with nanoclay. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 49, n. 5, p. 453-461, 2021.

WILCZYŃSKI, A.; KOCISZEWSKI, M. Propriedades de flexão de camadas de aglomerado e MDF. **Holzforschung**, Alemanha, v. 61, n. 6, 2007.

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

YORULMAZ, S. Y.; ATIMTAY, A. T. Investigation of combustion kinetics of treated and untreated waste wood samples with thermogravimetric analysis. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 7-8, p. 939-946, 2009.

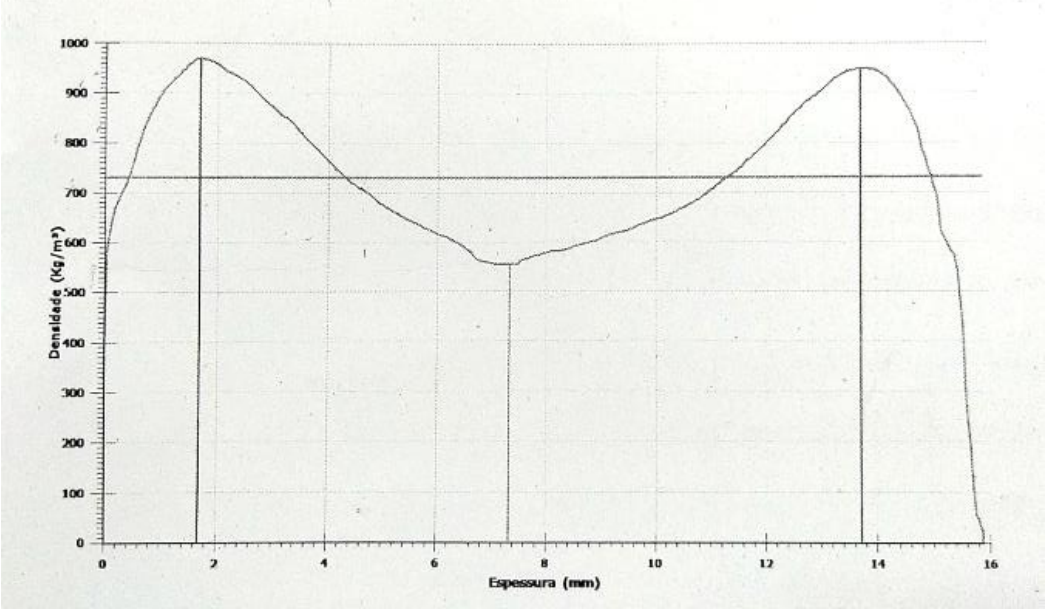
ZAMARIAN, E. H. C.; IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; ALBUQUERQUE, C. E. C. D. Produção de aglomerado a partir de móveis descartados. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, 2017.

ZHANG, H.; LIU, J.; LU, X. Reducing the formaldehyde emission of composite wood products by cold plasma treatment. **Wood Research**, Japão, v. 58, n. 4, p. 607-616, 2013.

ZIDANES, U. L; LORENÇO, M. S.; da SILVA, A. E.; DIAS, M. C.; RODRIGUES, L. L. A.; DORES, B. A. B.; MORI, F. A. Substitution of petrochemical compounds for polyphenols of natural origin reinforced with cellulose nanofibrils to formulate adhesives for wood bonding. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 29, p. 74426-74440, 2023.

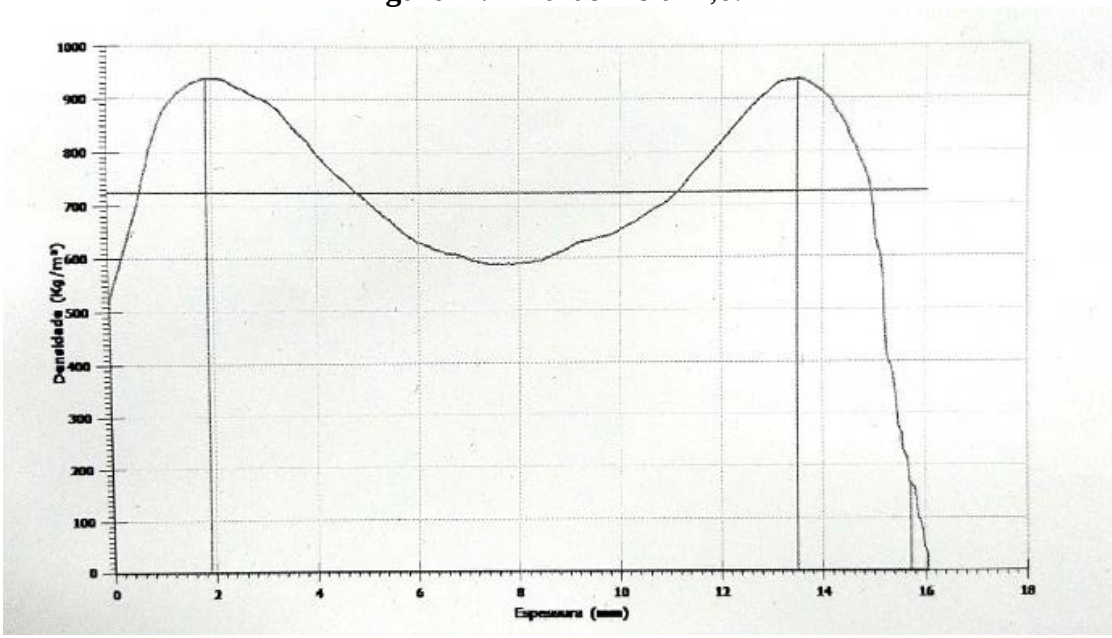
APÊNDICE A– GRÁFICOS DE PERFIL DE DENSIDADE DOS PAINÉIS MDF.

Figura A.1- Razão molar 0,9:1



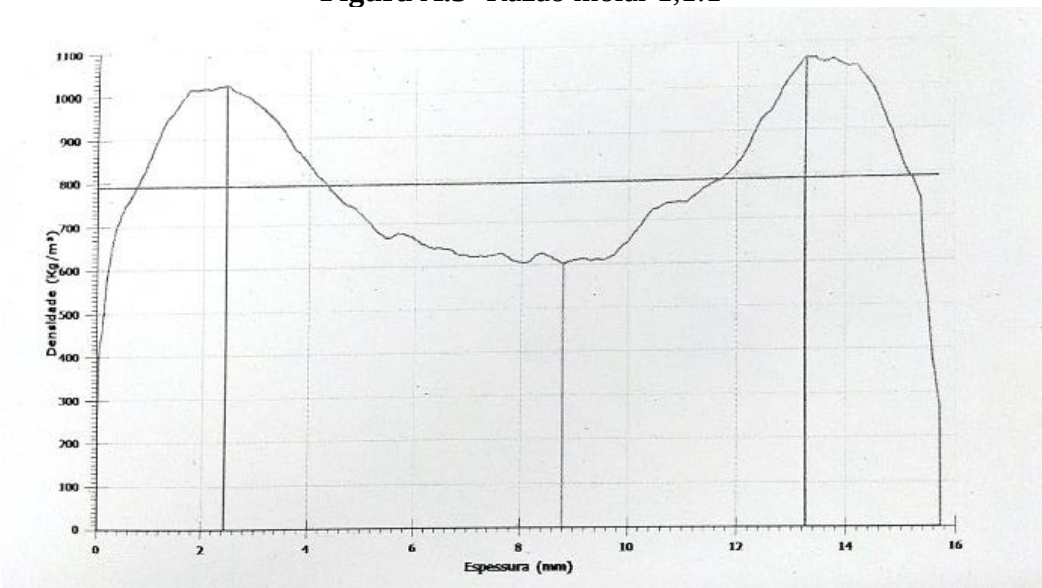
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura A.2- Razão molar 1,0:1



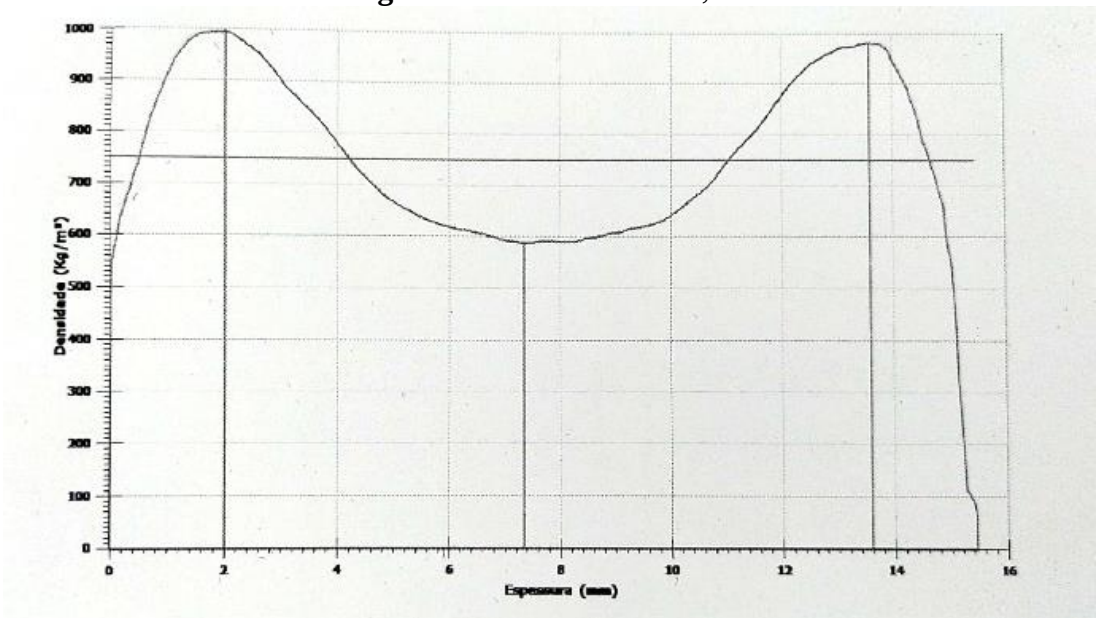
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura A.3- Razão molar 1,1:1



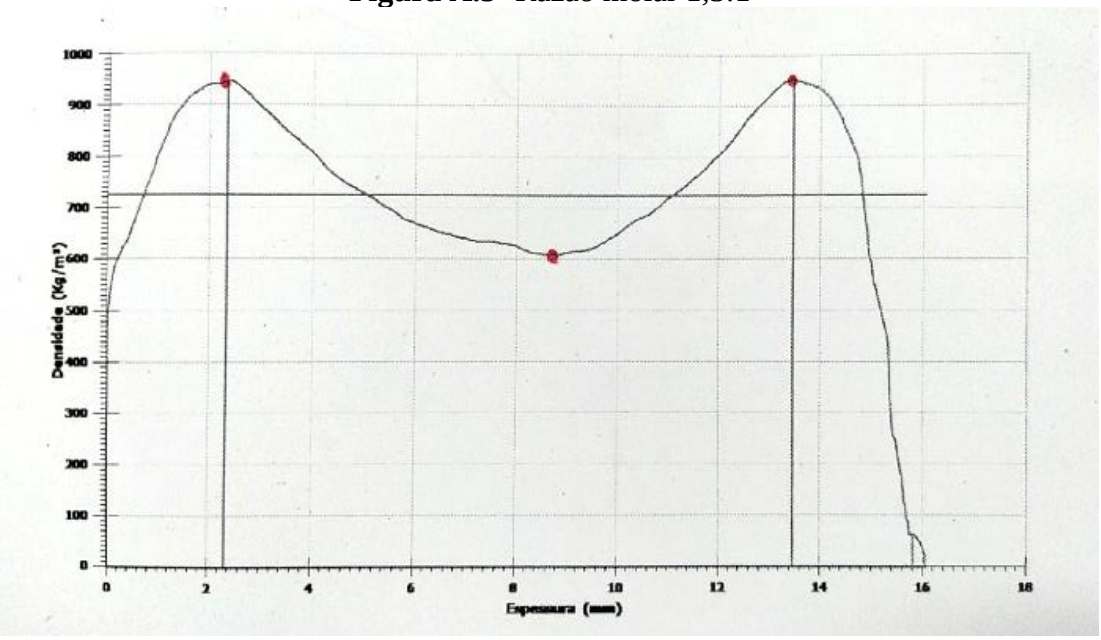
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura A.4- Razão molar 1,2:1



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura A.5- Razão molar 1,3:1



Fonte: Elaborado pela autora (2024).