



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

LEONARDO AMADOR CRUZ

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E EUCALIPTO
NAS PROPRIEDADES DE PAINÉIS MDP**

Prof. Dr. EDVÁ OLIVEIRA BRITO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
MARÇO – 2023



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

LEONARDO AMADOR CRUZ

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E EUCALIPTO
NAS PROPRIEDADES DE PAINÉIS MDP**

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

Prof. Dr. EDVÁ OLIVEIRA BRITO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
MARÇO – 2023

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E EUCALIPTO
NAS PROPRIEDADES DE PAINÉIS MDP**

LEONARDO AMADOR CRUZ

APROVADA EM: 03/03/2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. EDVÁ OLIVEIRA BRITO – UFRRJ
Orientador

JOSÉ HENRIQUE CAMARGO PACE – UFRRJ
Membro

ROBERTO CARLOS COSTA LELIS – UFRRJ
Membro

A meus pais, à minha avó materna
Creuza e à minha falecida avó paterna Maria
Elizabete.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à Deus e aos meus pais, Adriana e Cândido, por todo amor, apoio, carinho, segurança, por terem sido minha base de sustentação, amparo e meus maiores exemplos em vida.

Aos meus irmãos, Bruno e Cauã, que me inspiram a ser melhor a cada dia e são meus orgulhos.

Ao meu amor, melhor amiga e companheira, Natália, que nunca deixou que eu desanimasse e sempre acreditou em minha capacidade, desde IFRJ até hoje. Você iluminou meu caminho com amor, felicidade e boas energias, mostrando “que a estrada vai além do que se vê”.

À minha avó Creuza, minhas tias - Beth, Socorro, Solange, Eliane, Cristina, Flávia, Adriana e Denise - assim como meus tios e primos(as), que sempre me amaram, apoiaram e ensinaram, desde cedo, o valor da família.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, minha segunda casa, por me proporcionar uma formação profissional de qualidade no ensino superior público e por me permitir desfrutar dos incríveis pores do sol no lago, que fazem tudo valer a pena.

Ao programa de Iniciação Científica da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ, pela bolsa que viabilizou a pesquisa e tornou possível minha graduação.

À equipe do Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica pela oportunidade de desenvolvimento profissional e pelo acolhimento durante nossa colaboração de 5 anos.

Ao professor Fernando por ter aceitado me orientar, sempre priorizando meu crescimento pessoal e profissional. Sua dedicação, excelência e exemplo como profissional me ofereceram uma perspectiva valiosa dentro da Engenharia Florestal.

À Larisse por ter enxergado minha capacidade técnica, pelos ensinamentos que compartilhou comigo e também pelos "puxões de orelha" quando necessário. Colaborar com você e seu alto nível de exigência me estimulava a ser uma versão melhor.

Ao professor Edvá, pela orientação nesta pesquisa, pela oportunidade de aprender um pouco mais sobre essa incrível área específica e por ceder o uso do Laboratório de Painéis de Madeira da UFRRJ.

Ao Laboratório de Painéis de Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, em especial ao professor Fabrício, pela orientação durante uma semana de trabalho intenso e crescimento pessoal.

Ao professor Alexandre Miguel pela sua disponibilidade em esclarecer todas as minhas dúvidas e por disponibilizar toda a infraestrutura do Laboratório de Ensaio Físico-mecânicos da Madeira para o sucesso do meu trabalho.

Ao professor Lelis por ter aceito o meu convite para participar da banca de defesa e por estar sempre disposto a ajudar.

Ao Nilton, meu amigo, companheiro de trabalho e grande incentivador, a quem tenho enorme estima e orgulho. Seu crescimento profissional, sua capacidade de resolução de problemas, sua segurança e maturidade me inspiraram a buscar ser melhor todos os dias.

Às minhas amigas, Julie e Amanda, por trazerem tanta luz à minha vida e por me proporcionarem momentos de imensa felicidade. A presença delas tem sido um apoio constante e uma fonte de alegria e boas energias fazendo tudo valer a pena.

Ao Eloy, Junilha, Zé, Cadu, Sabrina e Carol, por me instruírem a ser melhor e confiarem no meu desenvolvimento, bem como a todos os outros alunos de pós-graduação que colaboraram de forma direta ou indireta nesse projeto.

À empresa júnior de Engenharia Florestal – Flora Júnior, por ter sido a melhor experiência que eu poderia ter vivido e por me proporcionar a oportunidade de conhecer pessoas incríveis, em especial a Duda e o Gui. Vocês foram muito além de diretores, se tornaram meus amigos e apoio quando mais precisei, e sou grato por todo o aprendizado, crescimento e resultado que obtivemos juntos.

Aos meus grandes amigos da turma 2017.2, Laís, Ste, Rodrigo e Marcelo, por todos os momentos de felicidade e diversão que compartilhamos, sempre vou lembrar dos almoços no lago, mas também por todo o apoio e confiança que depositaram em mim ao longo do nosso percurso juntos.

E, por último, mas não menos importante, agradeço ao Matheus, Mike, Maria, Rafa, Pedro e todos os meus amigos que me apoiaram, confiaram no meu potencial e tornaram a caminhada mais leve, significativa e prazerosa. Sua amizade e incentivo têm sido fundamentais para meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

O Medium Density Particleboard (MDP) é um material altamente relevante dentro da categoria de painéis de madeira reconstituída em escala global. Os painéis de madeira reconstituída são especialmente importantes, pois permitem um melhor aproveitamento do volume de madeira, incluindo partes que seriam descartadas no processamento da madeira maciça, contribuindo para a redução do desperdício de matéria-prima. No entanto, as indústrias brasileiras de painéis enfrentam um desafio constante devido à oferta cada vez mais limitada de madeira proveniente dos povoamentos de *Pinus* e *Eucalyptus*, ocasionada pelo aumento dos custos de produção de madeira e pelo aumento da demanda em todos os segmentos do setor florestal. Nesse contexto, é viável o estudo de outros materiais lignocelulósicos para fabricar painéis de madeira reconstituída. O bagaço de cana-de-açúcar é particularmente interessante devido à sua alta disponibilidade e volume de geração, além de ter características químicas e fibrosas semelhantes às da madeira. O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de utilização de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e de eucalipto em diferentes proporções de mistura (10%, 20% e 30%) nas propriedades de painéis MDP. Os painéis foram produzidos com duas dosagens de adesivo de ureia-formaldeído (UF), 10% e 12%, e densidade nominal de 0,7 g/cm³, prensados a 160°C por 10 minutos a 40 kgf/cm². Suas propriedades físicas, como densidade aparente, razão de compactação e inchamento após 24 horas de imersão em água, e propriedades mecânicas, como resistência à flexão estática e ligação interna, foram analisadas e classificadas de acordo com a ABNT NBR 14810 (2018). Além disso, as biomassas utilizadas e o adesivo de ureia-formaldeído foram devidamente caracterizados. Os resultados demonstraram que o aumento da fração de bagaço de cana-de-açúcar promoveu alterações significativas no aumento da razão de compactação dos painéis. Ademais, o aumento da fração de biomassa e o maior dosagem de adesivo também resultaram em uma redução do inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água. No entanto, verificou-se que a substituição parcial do eucalipto por até 30% de bagaço de cana e o aumento da dosagem de resina não apresentaram efeitos significativos na resistência à flexão, cumprindo os requisitos mínimos estabelecidos pela norma de referência, mas observou-se uma tendência positiva de aumento da resistência na linha de cola. Os resultados mais satisfatórios para esse critério foram obtidos com o tratamento que consistiu em 20% de bagaço de cana e 10% de adesivo de UF, bem como nos painéis com 30% de substituição e duas dosagens de adesivo.

Palavras-chave: aglomerados; resíduos; agroindústria;

ABSTRACT

Medium Density Particleboard (MDP) is a highly relevant material within the category of reconstituted wood panel products on a global scale. Reconstituted wood panels are particularly important as they allow for a better use of the wood volume, including parts that would be discarded in solid wood processing, contributing to the reduction of raw material waste. However, Brazilian panel industries face a constant challenge due to the increasingly limited supply of wood from *Pinus* and *Eucalyptus* plantations, caused by rising wood production costs and increased demand across all segments of the forestry sector. In this context, the study of other lignocellulosic materials for producing reconstituted wood panels is feasible. Sugarcane bagasse is particularly interesting due to its high availability and generation volume, as well as having chemical and fibrous characteristics similar to wood. The objective of this study is to evaluate the potential use of sugarcane bagasse and eucalyptus particles in different mixing ratios (10%, 20%, and 30%) on the properties of MDP panels. The panels were produced with two dosages of urea-formaldehyde adhesive (UF), 10% and 12%, and nominal density of 0.7 g/cm³, pressed at 160°C for 10 minutes at 40 kgf/cm². Their physical properties, such as bulk density, compaction and swelling ratio after 24 hours of water immersion, and mechanical properties, such as static bending strength and internal bonding, were analyzed and classified according to ABNT NBR 14810 (2018). In addition, the biomasses used and the urea-formaldehyde adhesive were properly characterized. The results showed that the increase in the sugarcane bagasse fraction promoted significant changes in the increase of the panels compaction ratio. Furthermore, the increase in the biomass fraction and the higher adhesive dosage also resulted in a reduction in thickness swelling after 24 hours of water immersion. However, it was found that partial substitution of eucalyptus with up to 30% sugarcane bagasse and increasing the resin dosage did not have significant effects on flexural strength, meeting the minimum requirements established by the reference standard, but a positive trend of increased strength in the glue line was observed. The most satisfactory results for this criterion were obtained with the treatment consisting of 20% sugarcane bagasse and 10% UF adhesive, as well as in panels with 30% substitution and two adhesive dosages.

Keywords: particleboards; waste; agroindustry;

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1. Painéis de partículas de média densidade	2
2.2. Histórico de produção e mercado atual de painéis de MDP	4
2.3. Principais matérias-primas e custos da produção de aglomerados	6
2.4. Potencialidades do uso de biomassas alternativas	8
2.5. Propriedades tecnológicas dos painéis de MDP com bagaço de cana.....	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1. Material	10
3.2. Métodos.....	11
3.2.1. Determinação da densidade das partículas	11
3.2.2. Composição química das biomassas	12
3.2.3. Caracterização do adesivo de ureia-formaldeído	13
3.2.4. Produção dos painéis	14
3.2.5. Requisitos e métodos de ensaio dos painéis	16
3.2.6. Delineamento experimental	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1. Densidade básica das partículas	23
4.2. Caracterização química das biomassas	24
4.3. Propriedades do adesivo de ureia-formaldeído	25
4.4. Propriedades físicas dos painéis	26
4.4.1. Densidade aparente	26
4.4.2. Razão de compactação	27
4.4.3. Inchamento em espessura	28
4.5. Propriedades mecânicas dos painéis	30
4.5.1. Flexão estática	30
4.5.2. Resistência à tração perpendicular (TP) ou ligação interna (LI).....	34
5. CONCLUSÃO.....	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de distribuição de partículas. Fonte: adaptado de Moslemi (1974) e Buzo (2018).....	3
Figura 2. Fração por cada tipo de painel de madeira reconstituída fabricados no mundo. Fonte: adaptado de Peździk; Janiszewska; Rogoziński (2021).	5
Figura 3. Vendas domésticas de painéis de MDP, 2021. Fonte: adaptado IBÁ (2022).	6
Figura 4. Área de árvores plantadas no Brasil em milhões de hectares para o ano de 2021. Fonte: IBÁ (2022).	7
Figura 5. Distribuição dos custos na fabricação de painéis de MDP. Fonte: Vidal e Hora (2012).	8
Figura 6. Foto do detalhamento das partículas de eucalipto após a etapa de peneiramento. Fonte: autoria própria.	11
Figura 7. Ensaio adaptado para densidade básica das partículas de eucalipto e bagaço de cana pelo método da balança hidrostática.....	12
Figura 8. Registro do ensaio de viscosidade do adesivo de ureia-formaldeído no Copo Ford. Fonte: autoria própria.	14
Figura 9. Encoladeira laboratorial contendo pistola de aspersão pneumática do adesivo e com rotação mecânica para homogeneização das partículas.....	15
Figura 10. Fotos das etapas seguintes a encoladeira: (I) molde para formação do colchão de partículas; (II) e (III) detalham o painel após a prensagem a frio, com detalhe para as barras de ferro que limitam a densificação da prensagem na espessura desejada; (IV) prensa hidráulica laboratorial utilizada para prensagem a quente; (V) Foto da chapa após a prensagem; (VI) Acondicionamento dos painéis finalizados para equalização da temperatura. Fonte: autoria própria.....	16
Figura 11. Registro do painel esquadrejado com detalhe em suas laterais mais uniformes e retilíneas. Fonte: autoria própria.....	17
Figura 12. Modelo de corte dos corpos-de-prova dos painéis MDP. Detalhando bordas em cinza escuro que foram removidas no esquadrejamento e em cinza claro com as partes recuperadas após o ensaio de flexão, a fim de serem aplicadas em outros ensaios. Fonte: autoria própria.....	17
Figura 13. Corpos-de-prova submersos para ensaio de inchamento em 24 horas. Fonte: autoria própria.....	19
Figura 14. Medição das dimensões exatas dos corpos-de-prova para o cálculo de volume na densidade aparente e da mensuração da espessura inicial antes do inchamento em 24 horas. Fonte: autoria própria.	20
Figura 15. Registro do ensaio de tração perpendicular finalizado com detalhe para o rompimento no miolo do corpo-de-prova. Fonte: autoria própria.....	21
Figura 16. Ensaio de flexão estática finalizado com detalhe na ruptura do corpo-de-prova. Fonte: autoria própria.	22
Figura 17. Boxplot dos valores obtidos no ensaio de densidade aparente (kg.m^{-3}) dos painéis de MDP produzidos por tratamento. Fonte: autoria própria.....	27
Figura 18. Boxplot dos valores alcançados para o critério de razão de compactação por tratamento. Fonte: autoria própria.	28
Figura 19. Boxplot com os resultados alcançados para inchamento em espessura após 24h de imersão em água por tratamentos. Fonte: autoria própria.	29
Figura 20. Boxplot dos valores de MOR e MOE na flexão estática para duas diferentes orientações de corte dos painéis para cada tratamento. Fonte: autoria própria.	31

Figura 21. Boxplot dos valores de módulo de ruptura (MOR) em kgf.cm^{-2} obtidos para os painéis nos diferentes tratamentos. Fonte: autoria própria.	32
Figura 22. Boxplot dos valores de módulo de elasticidade (MOE) em N.mm^{-2} obtidos para os painéis nos diferentes tratamentos. Fonte: autoria própria.	33
Figura 23. Boxplot dos valores de resistência a ligação interna (LI) em kgf.cm^{-2} obtidos para os painéis nos diferentes tratamentos. Fonte: autoria própria.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Delineamento dos tratamentos para produção dos painéis com as variações de associação entre as biomassas e duas diferentes dosagens de ureia-formaldeído.	15
Tabela 2. Requisitos e ensaios e detalhamento das dimensões dos corpos-de-prova baseados na norma ABNT NBR 14810-2.....	18
Tabela 3. Resultados da análise de densidade básica das partículas.	23
Tabela 4. Valores médios para os diferentes componentes químicos das partículas de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar.	24
Tabela 5. Valores médios obtidos para as propriedades do adesivo ureia-formaldeído.....	26
Tabela 6. Densidade aparente média dos painéis de MDP produzidos por tratamento.....	26
Tabela 7. Razão de compactação média dos painéis de MDP de acordo com seu respectivo tratamento.	27
Tabela 8. Resultado médio de inchamento em espessura após 24h de imersão em água para os painéis de MDP por tratamento.	29
Tabela 9. Valores médios de MOR (kgf.cm^{-2}) flexão estática dos painéis MDP nos diferentes tratamentos.....	31
Tabela 10. Valores médios de MOE (N.mm^{-2}) na flexão estática dos painéis MDP nos diferentes tratamentos.....	33
Tabela 11. Valores médios de resistência à tração perpendicular ou ligação interna (kgf.cm^{-2}) dos painéis MDP nos diferentes tratamentos.....	35

1. INTRODUÇÃO

Medium Density Particleboard (MDP) é um material altamente relevante da produção de painéis derivados de madeira em escala global, correspondendo a aproximadamente 29% de toda a produção. Esse tipo de produto tem como principal destino a indústria moveleira, sendo amplamente utilizado na fabricação de diversos tipos de móveis; além disso, também possuem aplicações na construção civil, na fabricação de divisórias, forros, revestimentos e elementos decorativos (PEĐZIK; JANISZEWSKA; ROGOZIŃSKI, 2021).

No Brasil – 8º maior produtor mundial de painéis, o MDP ocupa o segundo lugar como o painel de madeira reconstituída (PMR) mais produzido e comercializado, tendo alcançado uma produção de 3,2 milhões de metros cúbicos em 2021 após aumento de 14,6% nas vendas domésticas, segundo dados do Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ, 2022).

Atualmente, o país conta com 11 unidades produtoras de painéis do tipo MDP, principalmente na região Sul e Sudeste, desde a instalação da primeira planta produtiva no estado do Paraná há mais de 50 anos (FREIRE et al., 2011). Além disso, a partir da década de 1990, as empresas brasileiras investiram em modernização tecnológica, migrando do processo de compressão cíclica para a prensagem contínua, o que conferiu ao produto melhorias em suas propriedades tecnológicas (VIDAL; HORA, 2014).

Os painéis de madeira reconstituída proporcionam um melhor aproveitamento do volume da madeira, inclusive de partes que seriam descartadas na processamento da madeira maciça, o que contribui para a redução do desperdício de matéria-prima. Isso se dá, pois são produzidas a partir de etapas de desestruturação da biomassa, seja a nível de partículas de variadas granulometrias ou fibras, posteriormente coladas e prensadas sob altas temperaturas e pressão, obtendo-se ao fim do processo um produto com vantagens em relação ao uso da madeira sólida, como na redução do desperdício de lenho, eliminação da anisotropia e heterogeneidade da madeira (ARAÚJO et al., 2019).

Como resultado, tem-se um material homogêneo e livre de defeitos comuns, utilização de madeiras de rápido crescimento e de reflorestamento para uma abordagem mais sustentável, menor variação dimensional, maior resistência à biodeterioração, melhorias nas propriedades físicas e mecânicas e possibilidade de uso de outras partículas com composições químicas semelhantes na fabricação (BUZO, 2018).

As indústrias brasileiras que utilizam matéria-prima proveniente de culturas florestais de *Pinus* e *Eucalyptus* enfrentam desafios devido ao aumento da demanda por painéis e novos produtos de madeira reconstituída. Houveram melhorias no sistema produtivo, retomada econômica do setor de construção civil e aumento do consumo das famílias, o que proporcionou aumento na demanda de painéis pela indústria moveleira (MENDES et al., 2012).

Além disso, a oferta limitada de madeira oriunda de plantios florestais e o aumento do custo da matéria-prima, que já sofreu uma valorização de 94% até 2021, estão afetando toda a cadeia produtiva do setor florestal (IBÁ, 2022; SILVA et al., 2023).

Segundo Andrade et. al (2019) na fabricação de painéis de madeira reconstituída, é viável empregar qualquer material lignocelulósico, visto a semelhança na composição química e na característica fibrosa em relação a madeira, o que possibilita o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis e com propriedades físico-mecânicas satisfatórias.

De acordo com Pędzik, Janiszewska e Rogoziński (2021), as características físicas e químicas, a disponibilidade, a capacidade de estocagem estacional, o volume de fornecimento e a baixa emissão de carbono do material são os principais aspectos que influenciam na possibilidade de uso de matérias-primas alternativas para a produção de painéis.

Esse potencial também depende do manejo adequado das matérias-primas agrícolas e da possibilidade de reuso dos resíduos gerados por essas atividades; outro fator relatado por

Silva et al. (2015), é o rápido crescimento e o número de rotações ao ano para o cultivo da espécie relativa ao cultivo gerador do resíduo.

Além disso, Lee et al. (2022), ao avaliaram que a maior parte dos custos na produção de aglomerados era representado pelas partículas de madeira e o adesivo, o que constitui até 60% do custo total da manufatura, propuseram então a substituição da madeira por biomassa agrícola, o que pode resultar em uma redução significativa de custos, visto que essas possuem custo estimado até 50% menor do que cavacos de madeira.

Diversos resíduos lignocelulósicos possuem grande potencial para serem aproveitados, como o bagaço de cana, o sabugo de milho, a casca de arroz, o bagaço de sorgo, a casca e a madeira do café, a casca de amendoim, as podas de erva mate, o talo de banana, a fibra de coco, o talo de mandioca, a casca de mamona, entre muitos outros resíduos (SOARES et al., 2017). Dentre esses destaca-se o bagaço de cana, visto que é um subproduto lignocelulósico bastante comum na agricultura e com alta disponibilidade. Trata-se de uma fibra residual obtida dos colmos da cana-de-açúcar após o processo de moagem e extração do caldo da cana. Anualmente, aproximadamente 54 milhões de toneladas de bagaço seco são gerados em todo o mundo (TABARSA; ASHORI; GHOLAMZADEH, 2011).

No cenário exposto, a presente pesquisa tem como principal objetivo avaliar o potencial de utilização de partículas de bagaço de cana-de-açúcar, *Saccharum* sp., e de eucalipto, *Eucalyptus* sp., em diferentes proporções de mistura nas propriedades de painéis MDP (medium density particleboard) com densidade nominal de $0,7\text{g/cm}^3$, analisando sua resistência físico-mecânica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Painéis de partículas de média densidade

Os painéis de partículas de média densidade (MDP), também conhecidos como aglomerados, são produtos engenheirados produzidos a partir de partículas de biomassa reconstituídas através de ligação adesiva com resinas sintéticas ou qualquer outro tipo de adesivo com aplicação de uma certa temperatura e pressão (TORQUATO, 2008; LEE et al., 2022)

Esses materiais para serem nomeados como painéis de média densidade possuem massa específica no intervalo de 550 kg.m^{-3} até 750 kg.m^{-3} e podem ser classificados como homogêneos, quando formados por uma camada com partículas de granulometria predeterminada, ou multicamadas, sendo confeccionados com materiais de maior dimensão na camada interna e partículas menores nas superfícies dos painéis, podendo conferir melhorias no revestimento das peças devido a compactação e acabamento superficial, conforme pode ser visualizado na Figura 1 (COUTO, 2019).

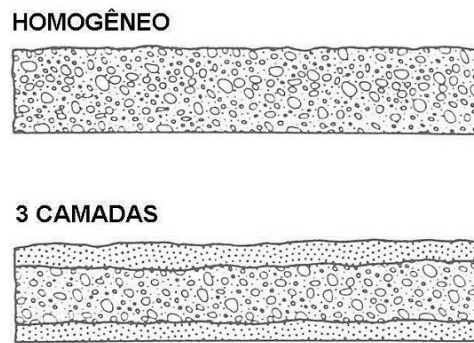


Figura 1. Sistema de distribuição de partículas. Fonte: adaptado de Moslemi (1974) e Buzo (2018).

Além disso, de acordo com a norma ABNT NBR 14810-2, os painéis de MDP podem ser classificadas em seis tipos especificados em função de suas finalidades e condições de uso, conforme pode ser visto a saber:

- P2 – Painéis não estruturais para uso interno em condições secas;
- P3 – Painéis não estruturais para uso em condições úmidas;
- P4 – Painéis estruturais para uso em condições secas;
- P5 – Painéis estruturais para uso em condições úmidas;
- P6 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes secos;
- P7 – Painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes úmidos;

Segundo Weber e Iwakiri (2015), o setor de construção civil e a indústria moveleira são os principais consumidores de painéis de madeira reconstituída. De acordo com projeções, o setor de construção deve alcançar um crescimento médio global de 4,4% ao ano até 2025 (ADAMS, 2023), para indústria de móveis, de acordo com projeção da Mordor Intelligence (2021), espera-se que o mercado registre crescimento acumulado de 5% até 2026.

Além disso, conforme relatado por Tabarsa, Ashori e Gholamzadeh (2011), especificamente a procura por painéis de partículas nos setores de construção, fabricação de móveis e decoração de interiores (revestimento de paredes e teto) continuará a crescer nos próximos anos, pois as características desse tipo de chapa a tornam especialmente necessárias na produção de móveis retilíneos, sejam residenciais ou comerciais, sendo aplicados após revestimento em portas retas, laterais de móveis, prateleiras, divisórias, tampos retos, tampos pós-formados e gavetas (COUTO, 2019).

Portanto, a utilização de painéis compostos por partículas de madeira tem como objetivo superar algumas das desvantagens apresentadas pela madeira natural. A utilização desses painéis oferece uma série de vantagens em relação à madeira maciça. De acordo com Iwakiri et al. (2005), Nascimento, Lahr e Christoforo (2015) e Buzo (2018), entre as vantagens da produção de painéis aglomeradas em relação ao processamento de madeira maciça, podem ser citados:

- i. O melhor aproveitamento do lenho, o que reduz o desperdício de material. Além disso, os painéis apresentam uma diminuição da anisotropia e heterogeneidade características da madeira, resultando em um material uniforme e livre de defeitos comuns da madeira, como nós, lenhos de reação, rachaduras entre outros;
- ii. A possibilidade de utilizar madeiras de rápido crescimento e reflorestamento, o que permite o uso mais sustentável de matérias-primas. Os painéis também apresentam

- menor variação dimensional e melhoria na resistência à biodeterioração, além de melhorias nas propriedades físicas e mecânicas;
- iii. A utilização de partículas de composição química semelhante à da madeira, que permite o uso de praticamente todo tipo de biomassa lignocelulósica no processo produtivo, reduzindo significativamente a geração de resíduos;
 - iv. A fabricação de produtos com menor variação das propriedades em relação à madeira serrada e que podem ser produzidos a partir da reutilização de madeira proveniente da indústria de processamento primário do material.

Em resumo, a utilização de painéis compostos por partículas de madeira oferece diversas vantagens em relação à madeira maciça, tais como a possibilidade de uso mais sustentável de matérias-primas, melhorias nas propriedades físicas e mecânicas e menor desperdício de material. Além disso, o processo de fabricação dos painéis permite a utilização mais eficiente da árvore e a redução da geração de resíduos.

2.2. Histórico de produção e mercado atual de painéis de MDP

A produção de aglomerados teve início na Alemanha em 1940 para reutilização de resíduos provenientes do processamento de madeira nativa, principalmente em função da escassez de madeira destinada à produção de lâminas para painéis compensados, resultante das restrições comerciais impostas pela Segunda Guerra Mundial. Os painéis na época eram produzidos com resíduos cortados em moinho rudimentar, o que ocasionava a utilização de partículas ou lascas de maiores dimensões (BUZO, 2018; COUTO, 2019).

No Brasil, as primeiras unidades produtivas iniciaram suas atividades em 1953 e 1954 e alcançaram uma produção integral de cerca de 7.700 m³/ano, contudo foi a partir da década de 60 que inúmeras empresas do segmento madeireiro se instalaram no país. Como consequência, a capacidade instalada para a produção de painéis evoluiu de 40 mil m³/ano no início da década em questão para 630 mil m³/ano em 1975, valor superior a demanda doméstica de aglomerados para o ano (ROQUE; VALENÇA, 1998).

Relaciona-se a isso, acontecimentos políticos importantes ocorridos na época, como a introdução e incentivo fiscais ao reflorestamento, o que trouxe sólidos investimentos a silvicultura brasileira e transformaram a atividade em uma operação de larga escala, principalmente com foco no plantio de espécies tropicais do gênero *Pinus*, a criação do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, IBDF (atualmente incorporado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis, Ibama) e o surgimento das primeiras escolas de Engenharia Florestal no país (ANTONANGELO; BACHA, 1998).

Ainda de acordo com Roque e Valença (1998), a capacidade instalada se manteve estável durante toda década de 80, em parte pela falta de regulamentação ambiental que limitasse o uso da madeira nativa, principalmente na produção de compensados, o que tornaria o MDP mais competitivo no mercado. Entretanto, a partir da década de 90 até os dias atuais, viu-se sucessão de aumentos significativos do consumo de aglomerados no país, fortemente associado ao aumento do PIB per capita, assim como cenários de estagnação associadas à redução do consumo em cenários de recessão local ou global.

Além disso, conforme detalhado por Vidal e Hora (2012), a partir de meados dos anos 90, as empresas no Brasil investiram em avanços tecnológicos para aprimorar a qualidade de seus produtos. Isso incluiu a substituição do método de prensagem cíclica pela prensagem contínua, resultando em painéis de melhor resistência. Para distinguir o novo produto do aglomerado tradicional, a nomenclatura foi alterada para MDP, que significa painel de partículas de média densidade.

Em tempos atuais, para o ano de 2019, segundo Pędzik; Janiszewska; Rogoziński (2021), a produção global de painéis de madeira reconstituída (PMR) está estimada em 358 milhões de m³, sendo dividida em função dos diferentes tipos de painéis produzidos, conforme detalhado na Figura 2.

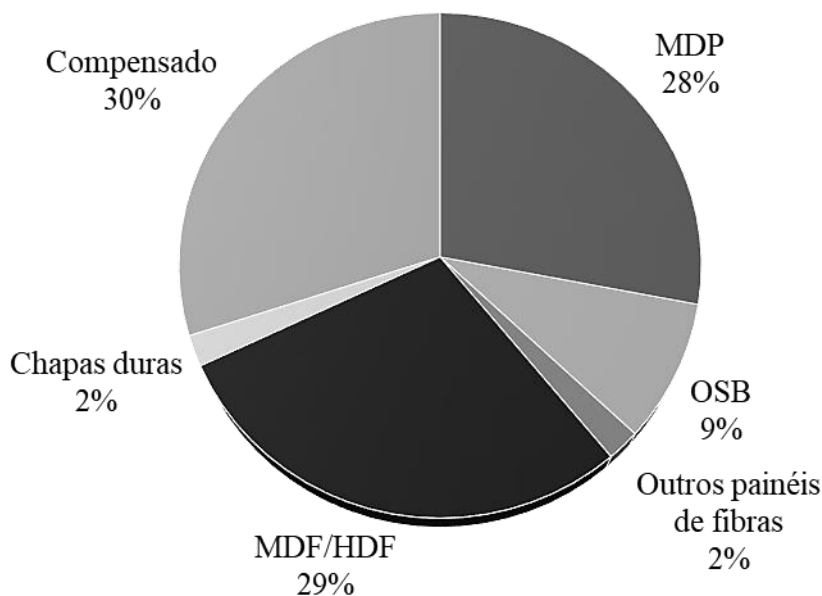


Figura 2. Fração por cada tipo de painel de madeira reconstituída fabricados no mundo. Fonte: adaptado de Pędzik; Janiszewska; Rogoziński (2021).

Ainda sobre o mercado global, segundo estimativas do Grand View Research (2022), o mercado de painéis de madeira reconstituída poderá ser avaliado em US \$247,23 bilhões até 2027, apresentando uma taxa composta de crescimento anual de 6,9% ao ano. A demanda por painéis à base de madeira é impulsionada pelo baixo custo, resistência e durabilidade do produto, além de sua aplicabilidade em tetos, revestimentos, telhados, pisos e móveis. A previsão é de que a demanda cresça devido aos investimentos na construção residencial e comercial em várias regiões geográficas, assim como o aumento de parcerias público-privadas para o desenvolvimento do setor em economias emergentes como China, Índia e Arábia Saudita.

A capacidade produtiva das empresas brasileiras de painéis vem apresentando crescimento contínuo, alcançando em 2021 a produção de 8,9 milhões de metros cúbicos, o que posiciona o país como o 8º maior produtor mundial. Desses números, mais de 90% (8,2 milhões de metros cúbicos) são direcionados ao mercado interno de painéis, que mesmo em meio à pandemia, apresentou um aumento nas vendas de MDP em 13,1%, conforme ilustrado na Figura 3. Esse cenário demonstra uma recuperação acelerada após a retração do mercado consumidor interno, ocasionada pela recessão política e econômica a partir de 2015. Além disso, desde 2016, o setor tem alcançado novos mercados com aumento na participação da exportação nas vendas totais (IBÁ, 2022).

É válido destacar que, de acordo com Vidal e Hora (2012), as vendas diretas correspondem à maior parte da comercialização dos painéis de MDP, sendo que cerca de 95% desse consumo está relacionado à indústria moveleira.

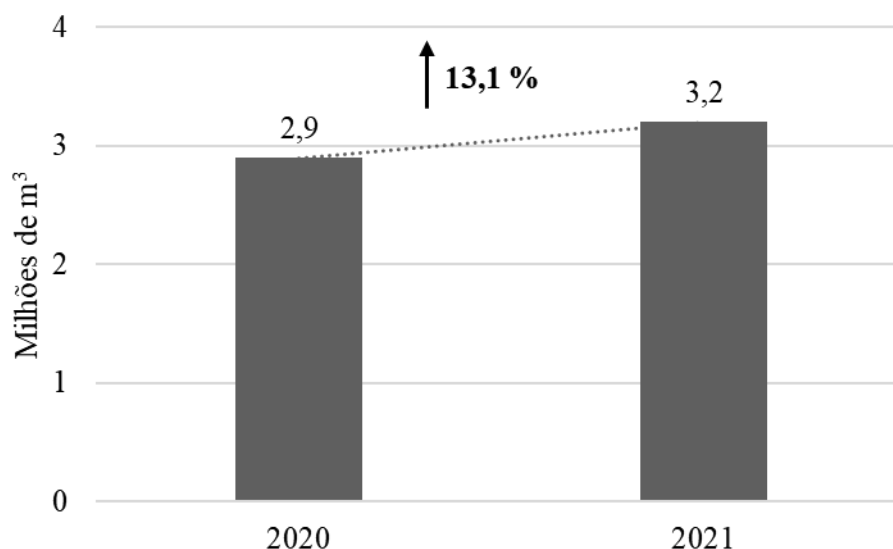


Figura 3. Vendas domésticas de painéis de MDP, 2021. Fonte: adaptado IBÁ (2022).

2.3. Principais matérias-primas e custos da produção de aglomerados

A indústria brasileira de painéis aglomerados emprega principalmente madeira de reflorestamento do gênero *Pinus*, além de algumas espécies do gênero *Eucalyptus*. Esse uso de matéria-prima proveniente de florestas cultivadas permite um controle mais rigoroso da qualidade do produto final, resultando em painéis de aglomerados de maior qualidade em relação à homogeneidade da matéria-prima utilizada (Fiorelli et al. 2012).

De acordo com Belini et al. (2014): (i) o menor ciclo de corte das árvores; (ii) o maior rendimento na conversão volume de madeira/volume de painel; (iii) a utilização integral das toras; (iv) a composição química das espécies, o que pode aumentar a qualidade do produto final, tornam vantajosas para a produção de painéis de madeira com essas matérias-primas.

Para atender à elevada demanda de madeira cultivada em todos os segmentos do setor florestal, é crucial contar com uma grande área de árvores plantadas no país. A madeira é uma matéria-prima essencial para diversas indústrias, como a de celulose e papel, painéis de madeira, madeira serrada, siderúrgica e de construção civil.

De acordo com dados de 2021, a área total de árvores plantadas no Brasil foi de 9,93 milhões de hectares (Figura 4). Do total, 75,8% da área é destinada ao cultivo de eucalipto, com 7,53 milhões de hectares, e 19,4% para pinus, com cerca de 1,93 milhão de hectares. Além dessas espécies, há cerca de 475 mil hectares de outras espécies plantadas, como seringueira, acácia, teca e paricá (IBÁ, 2022). É importante destacar que a disponibilidade de áreas adequadas para o plantio de florestas é um fator crucial para o desenvolvimento sustentável da indústria florestal.

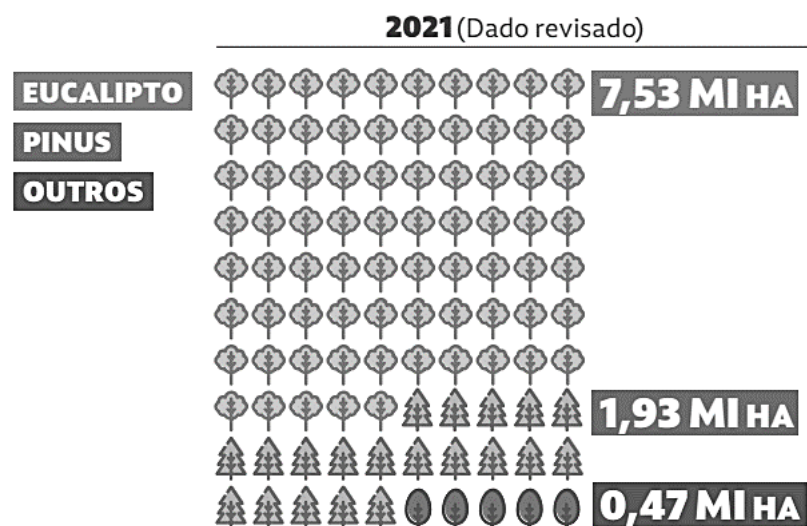


Figura 4. Área de árvores plantadas no Brasil em milhões de hectares para o ano de 2021. Fonte: IBÁ (2022).

Apesar da grande área cultivada, em 2021 a escassez de matérias-primas aumentou os custos de produção em várias indústrias, incluindo as de árvores cultivadas. A falta de ureia, adubos e fertilizantes químicos afetou a produção de árvores e lavouras. Isso resultou em um aumento de 94% no índice de custo de produção da madeira em 2021, soma-se a isso a tendência de crescimento dos principais segmentos do setor florestal para os próximos anos (IBÁ, 2022; SILVA et al. 2023).

Para a fabricação de painéis de MDP, além de partículas de biomassa, é utilizada outra matéria-prima: resinas. Os adesivos de ureia-formaldeído são os mais empregados nesse caso, representando mais de 90% do adesivo utilizada. Esses adesivos são escolhidos devido ao baixo custo, facilidade de uso sob diversas condições de cura, alta reatividade, solubilidade em água e cor clara, além de apresentarem bom desempenho (FERREIRA, 2017).

Contudo, é importante salientar que os adesivos de ureia-formaldeído são derivados de fontes não-renováveis, têm o preço atrelado às variações do dólar e emitem formaldeído durante o processo de prensagem, o que pode ser um inconveniente para países que possuem rigorosos controles ambientais e de saúde e segurança do trabalhador. Além disso, esses adesivos apresentam baixa resistência físico-mecânica e durabilidade em condições de alta umidade quando comparados a outros tipos de adesivos sintéticos. Em 2016, a produção mundial de ureia-formaldeído foi estimada em 18,7 milhões de toneladas e, nos Estados Unidos, cerca de 3,6 milhões de toneladas de adesivos à base de formaldeído são utilizados anualmente (PAN; CATHCART; WANG, 2006; LÚCIO, 2017).

Ao analisarem os custos relativos à produção de painéis de madeira reconstituída pelas principais produtoras brasileiras, Vidal e Hora (2012) constataram que, excluindo-se os custos não atrelados a produção, como depreciação, amortização e exaustão, e atualizando os preços ao mercado, os custos de madeira, resinas e outros materiais representam, respectivamente, 31%, 16% e 32% do total. É importante destacar que cerca de 20% dos custos de produção florestal estão atrelados ao dólar. Consequentemente, uma parcela significativa da produção de painéis de madeira fica sujeita às flutuações cambiais, especialmente no caso de painéis revestidos. Esse cenário também é observado nos custos de produção de MDP, como pode ser visto na Figura 5.

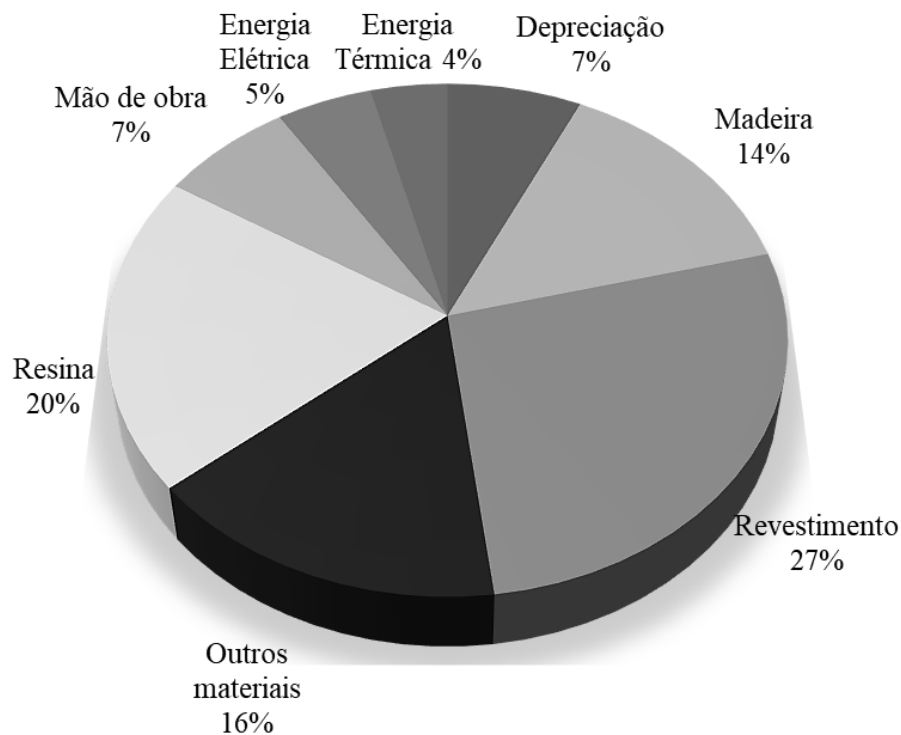


Figura 5. Distribuição dos custos na fabricação de painéis de MDP. Fonte: Vidal e Hora (2012).

2.4. Potencialidades do uso de biomassas alternativas

A utilização de matérias-primas alternativas, tais como biomassa agrícola e resíduos e subprodutos de madeira reciclada, é uma estratégia viável para atender à crescente demanda global por materiais derivados de madeira, além de estar em conformidade com os princípios da economia circular. Além disso, a demanda global por matérias-primas de madeira aumentou e as regulamentações ambientais criaram desafios para a indústria de painéis derivados de madeira. A otimização da madeira e o uso de matérias-primas alternativas, como resíduos agrícolas e subprodutos da produção florestal, é uma estratégia viável para reduzir o impacto ambiental, melhorar a eficiência da indústria de painéis e contribuir com o combate às mudanças climáticas. O uso de biomassa agrícola na fabricação de painéis aglomerados deve ser economicamente rentável e atender aos requisitos das normas técnicas (PEŃDZIK; JANISZEWSKA; ROGOZIŃSKI, 2021; LEE et al., 2022).

Nesse sentido, destaca-se o Brasil pela variedade e quantidade produzida de diversas culturas agrícolas. Segundo Campos (2022), a agricultura foi responsável por gerar valorização recorde de R\$ 743,3 bilhões com produção de 254,4 milhões de toneladas de grãos.

Diversas pesquisas têm apresentado a potencialidade do uso de biomassas alternativas na produção de painéis de MDP, como o bagaço de cana-de-açúcar (BUZO et al., 2020), os resíduos da produção de soja (MARTINS et al. 2018), a palha de milho (SILVA et al., 2015), a casca do café (FERREIRA; FIRME; BALDANSI, 2019), resíduos da produção de algodão (SCATOLINO et al., 2019), a casca de arroz (GONÇALVES et al., 2022) e palha de trigo (AZIZI; TABARSA; ASHORI, 2011).

De acordo com Lee et al., (2022), é de suma importância salientar que os resíduos agrícolas convencionais utilizados na confecção de painéis aglomerados incluem palha, caule, casca, folhas, entre outros. Esses resíduos gerados após a colheita e a produção podem representar uma alternativa valiosa para a fabricação de painéis aglomerados, sem competir diretamente com a produção de alimentos e contribuindo para o atendimento das exigências dos órgãos ambientais sobre a disposição e reaproveitamento dos resíduos, intensificados após a

promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305 de 2010), que versa sobre o gerenciamento dos resíduos sólidos.

Conforme exposto anteriormente, das diversas opções de resíduos agroindustriais com potencial para utilização em painéis aglomerados, o bagaço de cana-de-açúcar, resíduo fibroso proveniente da moagem dos colmos de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), se destaca como uma das matérias-primas mais promissoras pela maior similaridade com madeiras de folhosas, no que tange ao conteúdo químico (32-50% de celulose, 19-25% de hemicelulose, 23-32% de lignina, 2% de cinzas, sendo 46% de fibras e 50% de umidade), pelas suas características físicas, enquanto partículas fibrosas e pelo seu volume de geração. Estima-se que para cada tonelada de cana moída nas indústrias de açúcar e álcool seja extraído 30% de bagaço de cana (SOARES et al., 2017; BUZO, 2018).

De acordo com o Observatório da Cana e Bioenergia, na safra de 2020/2021 foram processadas 657,433 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em grande parte concentrada na região sudeste do país, gerando uma estimativa posterior de cerca de 197,229 milhões de toneladas de bagaço. Após a produção dos principais produtos das usinas, como álcool e açúcar, uma grande quantidade do bagaço extraído é queimada para conversão em energia elétrica. Embora haja um forte estímulo econômico e a importância do resíduo para o setor elétrico, bem como a modernização das caldeiras de cogeração para diminuir a emissão de gases poluentes na atmosfera, é importante considerar novas rotas de valorização do subproduto, como sugerido por Buzo et al. (2020).

Além da cogeração de energia, em função das suas características físico-químicas, o bagaço de cana vem sendo estudado para aplicação em diversos segmentos, dentre eles: a produção de ração animal, na indústria química fina para produção de bioplásticos ou outros compostos renováveis substitutos a produtos de origem petroquímica, na produção de etanol de segunda geração a partir da celulose e, eventualmente da hemicelulose, na produção de bicarbonato de sódio e cloreto de amônio, fabricação de fibras e polímeros diversos e também na confecção de painéis de biomassa reconstituída (MENDES et al., 2012; CRUZ et al., 2019).

No Brasil, que é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, ainda não se explorou todo o potencial dessa cultura. Em contraste, na China, a situação é muito diferente. O governo chinês criou o "Programa de Proteção das Florestas Anuais" para proteger as florestas, enquanto a demanda por produtos reconstituídos aumentou e a oferta de madeira diminuiu. Isso levou ao desenvolvimento de programas que promovem a substituição de madeira por outros produtos para diversos fins nos últimos 10 anos. A produção de painéis reconstituídos a partir de resíduos agrícolas, incluindo o bagaço de cana, é o principal interesse para a utilização desses resíduos na China e já faz parte do portfólio de produtos das empresas produtoras (FREIRE et al., 2011).

No entanto, segundo Mendes et al., (2012) e Buzo (2018), um obstáculo significativo em relação ao uso do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima na fabricação de painéis reconstituídos é a sua tendência a apresentar instabilidade dimensional dos painéis, em comparação aos painéis produzidos exclusivamente com partículas de madeira. Além disso, há vantagens e desvantagens em relação às fibras da cana-de-açúcar na produção de painéis de partículas, incluindo maior umidade, melhor degradabilidade, menor resistência à tração e menor módulo de elasticidade.

2.5. Propriedades tecnológicas dos painéis de MDP com bagaço de cana

É fundamental conhecer as propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglomerados produzidos em conjunto com bagaço de cana-de-açúcar para avaliar sua qualidade. Essas propriedades incluem a densidade aparente dos painéis, a razão de compactação, a estabilidade dimensional em condições de imersão em água, bem como a resistência à flexão e à tração perpendicular. Vários fatores são importantes para determinar essas características, como a

densidade do material lignocelulósico, a densidade dos painéis, a umidade das partículas, a razão de compactação, o ciclo de prensagem e a quantidade e tipo de adesivo (MENDES et al., 2012).

O estudo realizado por Buzo et al. (2020) teve como objetivo avaliar o efeito da adição de proporções de 40% e 60% de bagaço de cana-de-açúcar em associação com madeira de pinus, utilizando resina de poliuretano e ureia-formaldeído na produção de painéis de partículas. Os resultados indicaram que a adição de bagaço de cana-de-açúcar melhorou significativamente as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, incluindo redução na absorção de água e inchamento em espessura em 24h, aumento na densidade, módulo de ruptura, módulo de elasticidade e ligação interna. A umidade e a porcentagem de bagaço de cana-de-açúcar foram fatores significativos para a melhoria das propriedades quando comparados com os tratamentos de referência que utilizaram apenas partículas de madeira de pinus.

Ao avaliar as incorporações de bagaço de cana em painéis produzidos com resíduos da produção madeireira, Yano et al. (2020) observaram que, embora as adições de bagaço não tenham apresentado um aumento significativo nas propriedades mecânicas, houve um incremento em todos os resultados quando comparados ao painel produzido apenas com resíduos de processamento de madeira. Além disso, foi constatada uma redução significativa na estabilidade dimensional, com aumento da absorção de água em 24 horas, mas redução do inchamento em espessura, quando comparado ao painel.

Segundo Ribeiro et al. (2020), as propriedades dos painéis ainda podem ser melhoradas após a exposição das partículas de bagaço de cana a tratamentos térmicos com temperaturas de 230 °C, o que promoveu diminuição da absorção de água e do inchamento em espessura nos painéis mesmo após 24h de imersão em água e incremento no módulo de elasticidade ou ainda, com a remoção da medula do bagaço de cana, que tende a piorar as propriedades mecânicas (MENDES et al., 2012).

Ao avaliar a produção de painéis fabricados de 100% de composto de pinus e eucaliptos, combinados com bagaço de cana em uma proporção de 50%, bem como painéis feitos inteiramente de bagaço de cana, Mendes et al. (2014), descobriram que os painéis compostos de 50% de pinus/50% de bagaço, 50% de eucalipto/50% de bagaço e 100% de bagaço de cana não apresentaram diferenças significativas em relação à estabilidade dimensional após imersão em água por 24 horas em comparação com os painéis de referência.

Por outro lado, ainda segundo Mendes et al. (2014), os ensaios mecânicos revelaram uma redução significativa em todos os ensaios para os painéis produzidos integralmente com o bagaço de cana. Isso também foi observado no ensaio de resistência à ligação interna dos painéis compostos de 50% de pinus/50% de bagaço, enquanto para os painéis confeccionados com 50% de eucalipto/50% de bagaço não apresentaram diferenças em relação aos painéis de madeira de referência em todos os ensaios mecânicos. E, portanto, relataram que os painéis produzidos com associação entre bagaço de cana e eucalipto demonstraram propriedades físico-mecânicas equivalentes aos integralmente confeccionados em madeira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

As partículas de *Eucalyptus* spp. utilizadas na presente pesquisa foram cedidas por uma empresa produtora de painéis, o bagaço de cana-de-açúcar é proveniente de uma usina sucroalcooleira e o adesivo utilizado na produção foi a ureia-formaldeído adquirido de forma comercial com empresa especializada na produção e distribuição de produtos químicos.

Os materiais lignocelulósicos foram pré-processados com a separação granulométrica e com a redução da umidade no Laboratório de Painéis de Madeira da Universidade Federal Rural

do Rio de Janeiro (UFRRJ), Campus Seropédica, onde utilizou-se uma peneira vibratória para classificar a granulometria das partículas, sendo utilizado para a confecção dos painéis o material que passou pela peneira de 4.5mm e ficou retido na peneira de 0.5mm, ou seja, promoveu-se a remoção do material grosso e fino, garantindo a homogeneidade das partículas conforme demonstrado na Figura 6, baseando-se nos estudos de Peixoto e Brito (2000).

Enquanto, a secagem das partículas de biomassa foi feita em estufa de secagem a 105 °C para, posteriormente, serem acondicionadas em sacos de polietileno devidamente fechados, tal controle de umidade, em até 12%. O adesivo foi armazenado conforme as orientações do fabricante em local isolado, coberto e em baixa temperatura.



Figura 6. Foto do detalhamento das partículas de eucalipto após a etapa de peneiramento.
Fonte: autoria própria.

3.2. Métodos

3.2.1. Determinação da densidade das partículas

Os particulados tiveram sua densidade básica avaliada conforme uma adaptação do método descrito por Foelkel et al. (1971). Ambas as biomassas foram separadamente acondicionadas em imersão em um sistema ligado a uma bomba de vácuo, com o propósito de acelerar o processo de saturação das partículas com a remoção do ar presente no lúmen delas. Após a saturação dos materiais, adaptou-se a metodologia descrita pelo autor para ser realizada com partículas, visto que ela descreve a análise utilizando corpo-de-prova de maior dimensão (cavacos ou discos).

Nesse caso, utilizou-se um recipiente poroso, que permitia a entrada de água, contendo as partículas a serem analisadas, submerso em um sistema com um recipiente com água em uma balança e realizou-se a medição indireta do volume saturado das partículas de madeira e bagaço pelo método da balança hidrostática (Figura 7). Após isso, as partículas contidas no recipiente poroso foram levadas à estufa por seis horas a 105°C para obtenção da massa seca do material.

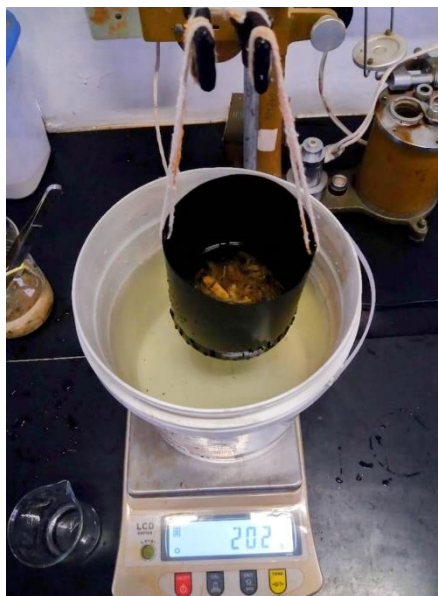


Figura 7. Ensaio adaptado para densidade básica das partículas de eucalipto e bagaço de cana pelo método da balança hidrostática.

A densidade básica das partículas foi dada pela expressão a saber:

$$D_b = \frac{M_{sec.}}{V_{sat.}}$$

D_b – Densidade básica;

$M_{sec.}$ – Massa seca;

$V_{sat.}$ – Volume saturado;

3.2.2. Composição química das biomassas

As biomassas foram preparadas para a realização das análises químicas, onde foram coletadas amostras representativas de cada material e, utilizando um moinho de facas tipo Willey, tiveram sua granulometria reduzida. As serragens produzidas foram classificadas em peneiras sobrepostas com aberturas de 40 mesh e 60 mesh respectivamente e o experimento foi conduzido com o material que passou na peneira de maior abertura e ficou retida na peneira de menor abertura, posteriormente foram acondicionadas em sala climatizada à umidade relativa do ar de $60 \pm 5\%$ e à temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ para equalização da umidade, de acordo com Tappi T 257 cm-85.

As espécies foram submetidas à caracterização de sua composição química, sendo realizada a análise do teor de extrativos de acordo com uma mistura de métodos. Primeiramente, foi realizada a remoção de extrativos solúveis em mistura de etanol/tolueno. Em seguida, foram retirados os extrativos solúveis em água quente. Esses procedimentos foram realizados de acordo com a norma adaptada pelo Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica (LBL/UFRRJ) das normas Tappi 204 cm 97.

O teor de lignina Klason foi determinado seguindo a norma Tappi T222 om-98, que utiliza a técnica de gravimetria do material retido na membrana de filtração após hidrólise. Essa técnica consiste em realizar a hidrólise ácida da biomassa, seguida de filtração e pesagem do precipitado sólido, que contém a lignina não solúvel em ácido. Enquanto para determinar o teor de lignina solúvel em ácido sulfúrico, é utilizada a técnica da absorção ultravioleta do filtrado ácido, de acordo com a norma Tappi UM 250, essa técnica consiste em medir a absorção de luz ultravioleta do filtrado ácido após a reação de hidrólise da biomassa com ácido sulfúrico.

A quantificação de α -celulose foi determinada segundo a norma Tappi T203 OS-61, onde a celulose é extraída consecutivamente com soluções de hidróxido de sódio a 17,5% e 9,45% a 25°C. A fração solúvel, constituída por beta e gama-celuloses, é determinada volumetricamente por oxidação com dicromato de potássio, e a alfa-celulose, como fração insolúvel, é obtida por diferença.

Para a determinação do teor de holocelulose em amostras de biomassa vegetal, foi adotada a metodologia descrita por Wise et al. (1946). Esse método consiste em uma série de estágios de cloração ácida, utilizando uma mistura de clorito de sódio e ácido acético glacial, com o objetivo de remover a lignina e outros componentes não celulósicos da amostra. Após a remoção desses componentes, a amostra é lavada com água para remover resíduos ácidos e, em seguida, submetida a um processo de branqueamento com peróxido de hidrogênio. O teor de holocelulose é então determinado a partir da diferença entre o peso da amostra antes e após o processo de cloração ácida.

Para a determinação do teor de cinzas em amostras de biomassa, foi adotada a norma Tappi T211 om-02. Esse método consiste em calcinar a amostra em uma mufla com rampa de temperatura predeterminada até atingir 575°C, temperatura em que os componentes orgânicos da amostra são completamente oxidados e apenas as cinzas permanecem. Em seguida, as cinzas resultantes são pesadas e o teor de cinzas é calculado a partir da diferença entre o peso inicial da amostra e o peso das cinzas.

3.2.3. Caracterização do adesivo de ureia-formaldeído

Para a caracterização do adesivo de ureia-formaldeído foi determinada a viscosidade pelo método do Viscosímetro copo Ford, de acordo com a norma ASTM D1200. Dessa forma, 130ml do adesivo de ureia-formaldeído foram adicionados ao copo Ford nº 4, como pode ser observado na Figura 8, sendo registrado o tempo total de escoamento do fluido. O valor da viscosidade foi alcançado a partir da equação a saber:

$$V_d = (3,28 \cdot t - 17,28) \cdot d$$

Onde,

V_d – viscosidade dinâmica, expressa em centipoise (cP);

t – tempo de escoamento do fluido, em segundos (s);

d – densidade do adesivo, em g.cm^{-3} ;



Figura 8. Registro do ensaio de viscosidade do adesivo de ureia-formaldeído no Copo Ford. Fonte: autoria própria.

Para determinação do teor de sólidos do adesivo, segundo a norma ASTM 1490-01, foram adicionados 5 g do adesivo em cadinhos de porcelanas de pesos previamente conhecidos e acondicionados em estufa aquecida a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24h.

Após isso registrou-se o peso dos cadinhos contendo o material seco. O teor de sólidos foi calculado a partir da seguinte equação:

$$Ts (\%) = \left(\frac{PS}{PU} \right) \cdot 100$$

Em que,

Ts – teor de sólidos, expresso em %;

PS – peso seco ou final, expresso em gramas (g);

PU – peso úmido ou inicial, expresso em gramas (g);

O tempo de gelatinização - “gel time” do adesivo foi determinado seguindo a metodologia utilizada por Ferreira (2017), em conformidade com a norma americana ASTM D 2471-99. A análise foi realizada em duplicata, adicionando-se 1 g de adesivo em dois tubos de ensaio de 15 cm de altura e 2,5 cm de diâmetro.

Em seguida, adicionou-se com base no teor de sólidos do adesivo, 2% do catalisador sulfato de amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ 24% (m/v). Posteriormente, os tubos de ensaio foram submersos até altura do nível do adesivo em banho de glicerina à temperatura de 160°C , em agitação manual com bastão de vidro e registrando-se o tempo para o início da gelatinização do adesivo.

3.2.4. Produção dos painéis

Os painéis foram produzidos em colaboração com o Laboratório de Painéis da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Campus Jerônimo Monteiro, onde utilizou-se uma prensa pneumática elétrica com pratos aquecidos. Além disso, na manufatura não foram adicionados aditivos ou extensores e utilizou-se pressão e temperatura constante para as

dimensões predeterminadas dos painéis. Sendo assim, para os tratamentos propostos foram produzidos painéis de partículas com dimensões de 42,5 x 42,5 x 1,25 cm, com densidade nominal de 0,7g/cm³ em 6 tratamentos distintos com 3 repetições cada, totalizando 18 painéis. O delineamento experimental é retratado na Tabela 1.

Tabela 1. Delineamento dos tratamentos para produção dos painéis com as variações de associação entre as biomassas e duas diferentes dosagens de ureia-formaldeído.

Tratamento	Associação de materiais		Adesivo	
	Madeira de Eucalipto (%)	Bagaço de Cana (%)	Tipo	%
A	90	10	UF	10
B	90	10	UF	12
C	80	20	UF	10
D	80	20	UF	12
E	70	30	UF	10
F	70	30	UF	12

Para cada tratamento os materiais foram devidamente pesados, com base na sua respectiva umidade e o percentual de perda considerado, e alocados em uma encoladeira com tambor de rotação mecânica, este equipado em seu interior com uma pistola com aspersão pneumática (Figura 9).



Figura 9. Encoladeira laboratorial contendo pistola de aspersão pneumática do adesivo e com rotação mecânica para homogeneização das partículas.

A solução contendo o adesivo foi preparada e acondicionada no sistema de aspersão, contendo 10% ou 12% de ureia-formaldeído com base na massa seca de partículas, de acordo com o tratamento aplicado, mais a proporção de 2% sobre a teor de sólidos do adesivo da solução catalisadora de sulfato de amônio [(NH₄)₂SO₄] a uma concentração de 24% (m/v) e, por fim, 12% de água destilada sobre a proporção total da mistura para a confecção da chapa, conforme descrito por Gonçalves et al. (2017). A solução adesiva foi totalmente aspergida sobre as partículas com o auxílio da pistola de ar dentro da encoladeira sob rotação até a completa homogeneidade da mistura.

Posteriormente, as partículas encoladas foram dispostas de forma uniforme em um molde de madeira com as medidas predeterminadas de 42,5 cm x 42,5 cm sob uma chapa

metálica para formação do colchão de partículas, onde foi realizada a prensagem a frio de forma manual.

Após isso, retirou-se o molde do colchão de partículas e duas barras de ferro de 1,25 cm de altura foram adicionadas de forma paralela às suas laterais para serem utilizadas como espaçadores, garantindo assim a manutenção da espessura desejada nos painéis.

Então, adicionou-se mais uma chapa metálica por cima do colchão de partículas e o sistema foi levado a uma prensa hidráulica laboratorial, onde empregou-se, para as dimensões predefinidas dos painéis, uma pressão de 40 kgf.cm^{-2} a temperatura de 160°C durante 10 minutos.

Por fim, os painéis foram identificados e acondicionados para estabilização, sendo necessária a passagem de ar entre as mesmas. As imagens detalhadas com os processos de formação do colchão de partículas no molde, prensagem a frio e a quente e disposição após a prensagem. Posteriormente, os painéis foram acondicionados em sala climatizada à umidade relativa do ar de $60 \pm 5\%$ e à temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ para equalização da umidade. O registro das etapas posteriores a formação do colchão de partículas é encontrado na Figura 10, a saber:

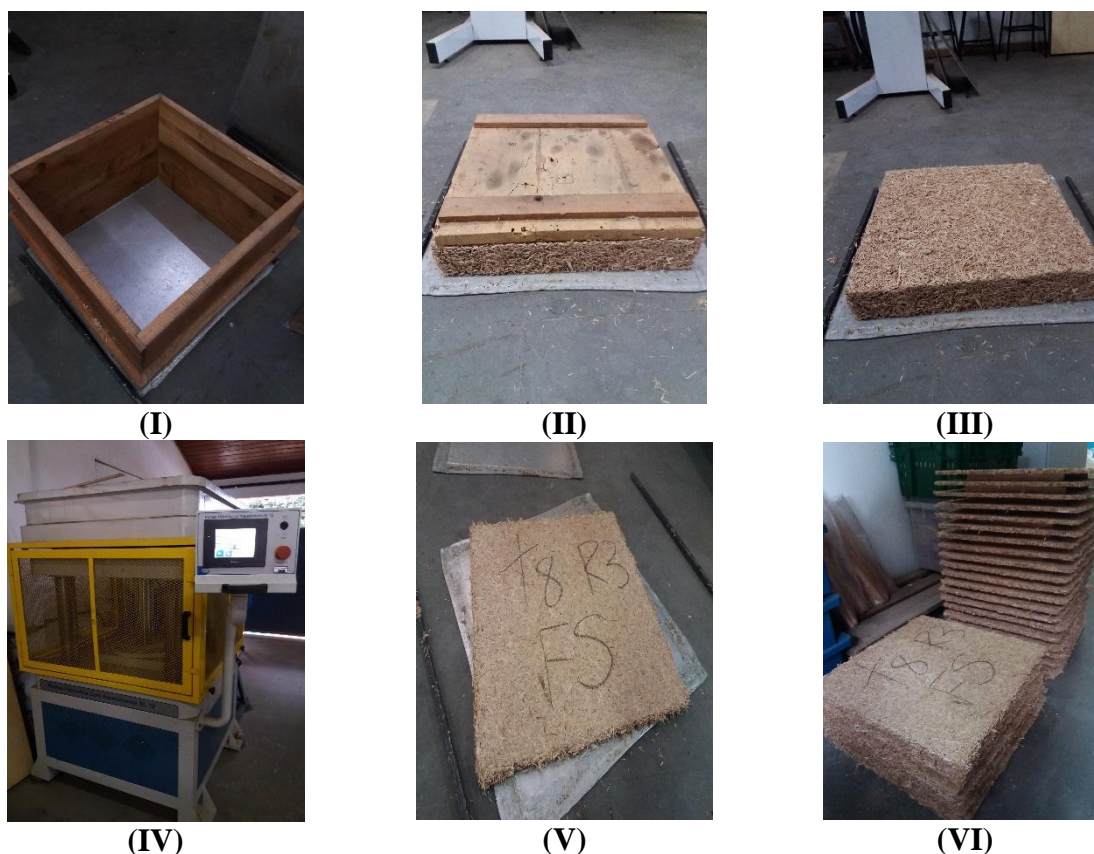


Figura 10. Fotos das etapas seguintes a encoladeira: (I) molde para formação do colchão de partículas; (II) e (III) detalham o painel após a prensagem a frio, com detalhe para as barras de ferro que limitam a densificação da prensagem na espessura desejada; (IV) prensa hidráulica laboratorial utilizada para prensagem a quente; (V) Foto da chapa após a prensagem; (VI) Acondicionamento dos painéis finalizados para equalização da temperatura. Fonte: autoria própria.

3.2.5. Requisitos e métodos de ensaio dos painéis

Os painéis foram esquadrejados com a remoção de 2,5 cm de cada lateral em serra circular na Marcenaria do Instituto de Florestas da UFRRJ, como resultado obteve-se painéis mais uniformes, retilíneos e com melhor trabalhabilidade para o corte dos corpos-de-prova dos ensaios físicos e mecânicos requisitados pela normatização adotada, como pode ser observado na Figura 11.

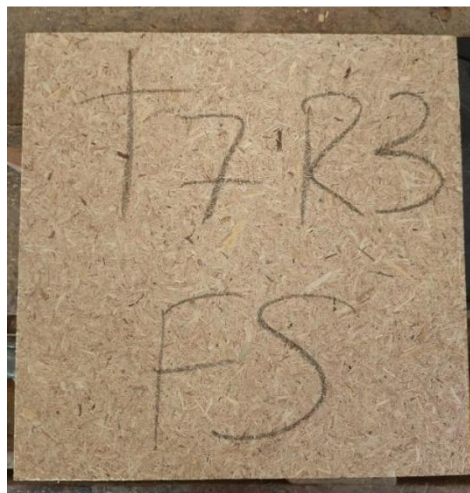


Figura 11. Registro do painel esquadrejado com detalhe em suas laterais mais uniformes e retilíneas. Fonte: autoria própria.

Após isso, os painéis foram classificados como do tipo P2 – para uso não estrutural, internos e em condições secas, e tiveram definidos os seus respectivos requisitos de ensaio a serem avaliados de acordo com a norma ABNT NBR 14810-2 (2018), adotada como referência para a avaliação da qualidade dos painéis produzido.

Nesse caso, os painéis foram seccionados para a realização dos seguintes critérios: **i.** inchamento durante 24 horas (IN.); **ii.** densidade aparente (D.); **iii.** resistência à tração perpendicular ou ligação interna (T.P.); **iv.** resistência à flexão estática ou módulo de elasticidade nas orientações de corte paralela (F.E.P) e transversal (F.E.T). O modelo de corte utilizado para os painéis pode ser observado na Figura 12.

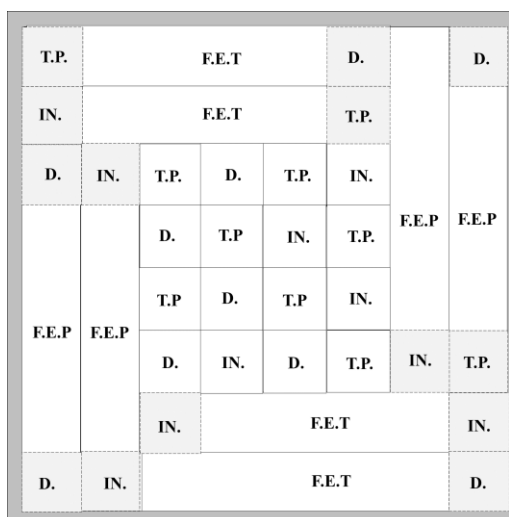


Figura 12. Modelo de corte dos corpos-de-prova dos painéis MDP. Detalhando bordas em cinza escuro que foram removidas no esquadrejamento e em cinza claro com as partes recuperadas após o ensaio de flexão, a fim de serem aplicadas em outros ensaios. Fonte: autoria própria.

Na Tabela 2, está descrito o delineamento dos ensaios, bem como as dimensões dos corpos-de-prova e quantidade de ensaios realizados no experimento. Posteriormente à secção, os corpos-de-prova foram devidamente identificados e acondicionados em sala climatizada.

Tabela 2. Requisitos e ensaios e detalhamento das dimensões dos corpos-de-prova baseados na norma ABNT NBR 14810-2.

Corpos-de-prova para análises	Dimensões dos corpos-de-prova	Quant./painel	Total de ensaios
Inchamento 24h (IN.)	50 x 50mm	10**	240
Densidade aparente (D.)	50 x 50 mm	10**	240
Resistência à tração perpendicular (T.P.)	50 x 50 mm	10**	240
Resistência à flexão estática (F.E.) e módulo de elasticidade (MOE)	300* x 50mm	4 transversais e 4 longitudinais	192

*Comprimento teste F.E = (20 x espessura + 50) mm.

**Parte dos corpos-de-prova foram extraídos das extremidades do corpo-de-prova de flexão.

Os corpos-de-prova foram identificados após o corte, especialmente os de flexão estática, que tiveram a orientação detalhada no momento da secção, tal qual descrito no item anterior. Posteriormente, todos foram dispostos em sala climatizada com controle de umidade (65 ± 5) % e temperatura (20 ± 5) °C por duas semanas.

Após isso, as propriedades físicas dos painéis foram analisadas no Laboratório de Painéis de Madeira, enquanto os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Ensaios Físico-Mecânicos da Madeira, ambos localizados no Instituto de Florestas da UFRRJ, que conta em sua estrutura com um equipamento universal de ensaios da linha UMC da marca PAVITEST, fabricada pela empresa Contenco. Toda a caracterização físico-mecânica dos painéis foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 14810-2 (2018).

i. Ensaio de inchamento em espessura em 24 horas

O ensaio de inchamento em espessura foi realizado com 10 corpos-de-prova de 50 mm x 50 mm para cada painel produzido. Utilizando-se de um paquímetro digital mensurou-se a espessura no ponto de interseção das diagonais de todos os corpos-de-prova a serem ensaiados.

Posteriormente, encheu-se um banho térmico com água deionizada e ajustou-se o termostato para a temperatura de 20 °C, onde então submergiu-se todos os corpos-de-prova com auxílio de uma grade, conforme ilustrado na Figura 13.



Figura 13. Corpos-de-prova submersos para ensaio de inchamento em 24 horas. Fonte: autoria própria.

Após 24h de imersão, os corpos-de-prova foram retirados do banho térmico e removeu-se o excesso de água. Subsequentemente, foi mensurada novamente a espessura no ponto de interseção das diagonais e registrado os respectivos valores com precisão de 0,01. Para o cálculo de inchamento da espessura do corpo-de-prova, utilizou-se a seguinte equação:

$$In = \frac{E1 - E0}{E0} \times 100$$

Onde,

In – é o inchamento em espessura do corpo-de-prova, expresso em percentual (%);

E1 – é a espessura do corpo-de-prova após a imersão no período considerado, expressa em milímetros (mm);

E0 – é a espessura do corpo-de-prova antes da imersão, expressa em milímetros (mm);

ii. Determinação da densidade aparente e razão de compactação dos painéis

Para a avaliação da densidade aparente dez corpos-de-prova medindo 50 mm x 50 mm de cada painel produzido tiveram suas massas mensuradas com precisão de 0,1g. Após isso, determinou-se as dimensões dos corpos-de-prova individualmente utilizando-se de um paquímetro digital. A espessura (*e*) foi registrada no ponto de interseção das diagonais de cada corpo-de-prova, enquanto as dimensões laterais (*b*₁ e *b*₂) foram selecionadas estando perpendiculares entre si, conforme verificado na Figura 14.



Figura 14. Medição das dimensões exatas dos corpos-de-prova para o cálculo de volume na densidade aparente e da mensuração da espessura inicial antes do inchamento em 24 horas. Fonte: autoria própria.

O cálculo da densidade de cada um dos corpos-de-prova foi efetuado pela seguinte equação, com precisão de 1 kg.m^{-3} :

$$D = \frac{M}{V} \times 1000 \ 000$$

Sendo,

$$V = b_1 \times b_2 \times e$$

Onde,

D – é a densidade aparente do corpo-de-prova, expresso em quilogramas por metro cúbico (kg.m^{-3});

M – é a massa do corpo-de-prova, expressa em gramas (g);

V – é o volume do corpo-de-prova, expressa em milímetros cúbicos (mm^3);

b_1 e b_2 – são as dimensões laterais do corpo-de-prova, expressa em milímetros (mm);

e – é a espessura do corpo-de-prova, expressa em milímetros (mm);

A avaliação dessa propriedade física é importante, pois permite o cálculo da razão de compactação dos painéis produzidos, sendo esta uma variável adimensional que relaciona a massa específica aparente do painel e a densidade básica da matéria-prima (que diferiu em função do tratamento, em função do percentual de bagaço de cana), conforme definido por Ribeiro et al. (2020) e descrita na equação a saber:

$$RC = \frac{(D_{b1} \times B1) + (D_{b2} \times B2)}{D_{ap}}$$

Sendo,

RC – é a razão de compactação;

D_{b1} – é a densidade básica do madeira de eucalipto, expressa em kg.m^{-3} ;

D_{b2} – é a densidade básica da biomassa de bagaço de cana, expressa em kg.m^{-3} ;

D_a – é a densidade aparente da chapa, expressa em kg.m^{-3} ;

B_1 – percentual relativo a proporção de madeira de eucalipto;

B_2 – percentual relativo a proporção de bagaço de cana-de-açúcar;

iii. Ensaio de resistência à tração perpendicular (TP) ou ligação interna (LI)

Na avaliação da resistência à tração perpendicular, 10 corpos-de-prova medindo 50 mm x 50 mm, ainda com a superfície bruta, tiveram suas superfícies homogeneamente lixadas e limpas. Posteriormente, todos os corpos-de-prova foram colados sob pressão moderada com cola PVA aos blocos de tração, confeccionados com madeira de Teca (*Tectona grandis*) em dimensões que se encaixassem às garras de tração da máquina universal de ensaios, conforme ilustrado na Figura 15.



Figura 15. Registro do ensaio de tração perpendicular finalizado com detalhe para o rompimento no miolo do corpo-de-prova. Fonte: autoria própria.

A máquina de ensaios foi preparada para os ensaios, considerando um intervalo de tempo para ruptura de $60\text{s} \pm 30\text{s}$ após o início da aplicação da carga e, então, o conjunto contendo os blocos de tração e corpos-de-prova foram testados quanto à resistência à tração perpendicular. O cálculo desta propriedade mecânica para cada corpo-de-prova foi dado pela seguinte equação:

$$TP = \frac{P}{S}$$

Sendo,

TP – é a resistência à tração perpendicular, expressa em quilograma-força por centímetro quadrado (kgf.cm^{-2});

S – é a área da superfície do corpo-de-prova, em centímetros quadrados (cm^2);

P – é a carga de ruptura, expressa em quilograma-força (kgf);

iv. Ensaio de resistência à flexão estática e módulo de elasticidade

Na determinação desta propriedade mecânica 10 corpos-de-prova retangulares, medindo 300 mm x 50 mm de cada chapa produzida, tiveram seu centroide identificados. Posteriormente, ajustou-se o vão entre os apoios para as extremidades do corpo-de-prova para 25 cm, e dispôs-se o corpo-de-prova, de modo que o dispositivo aplicador da carga coincidissem com o seu centroide identificado anteriormente.

Para a realização do ensaio, a máquina foi ajustada com as dimensões da peça a ser analisada e considerando um intervalo de tempo para ocorrência de ruptura do corpo-de-prova de $60s \pm 30s$. Ao fim do processo, registrou-se a carga no limite proporcional (P_1), bem como o valor da força de ruptura (P), conforme registrado na Figura 16.



Figura 16. Ensaio de flexão estática finalizado com detalhe na ruptura do corpo-de-prova. Fonte: autoria própria.

O cálculo da resistência à flexão estática ou módulo de ruptura do corpo-de-prova foi dado pela seguinte equação:

$$MOR = \frac{1,5 \times (P \times D)}{B \times (E)^2}$$

Onde,

- MOR – é o módulo de resistência à flexão estática, expresso em $(kgf.cm^{-2})$;
- P – é a carga de ruptura registrada na máquina de ensaios, expressa em (kgf) ;
- D – é a distância entre os apoios do aparelho, expresso em milímetros (mm) ;
- B – é a largura do corpo-de-prova, expressa em milímetros (mm) ;
- E – é a espessura do corpo-de-prova, expressa em milímetros (mm) ;

O ensaio possibilita o cálculo do módulo de elasticidade (MOE) do corpo-de-prova, sendo dado pela equação a saber:

$$MOE = \frac{P_1 \times D^3}{d \times 4 \times B \times (E)^3}$$

Sendo,

MOE – é o módulo de elasticidade, expresso em newtons por milímetro quadrado ($N \cdot mm^{-2}$);

P_1 – é a carga no limite proporcional registrada no indicador de cargas da máquina, expressa em newtons (N);

D – é a distância entre os apoios do aparelho, expresso em milímetros (mm);

d – é a deflexão, expressa em milímetros (mm), correspondente à carga P_1 ;

B – é a largura do corpo-de-prova, expressa em milímetros (mm);

E – é a espessura do corpo-de-prova, expressa em milímetros (mm);

3.2.6. Delineamento experimental

Todos os resultados alcançados no software R Studio para cada critério em cada tratamento definido, sendo os derivados da flexão estática instalados em um delineamento em blocos casualizados, em função das duas orientações de corte do corpo-de-prova, e todos os outros critérios analisados em delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e três repetições cada.

Todos os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, estabelecendo-se diferenças significativas e atendendo-se aos pressupostos da análise de variância, os tratamentos foram comparados entre si pelo teste de Tukey com nível de confiança de 95%, entretanto em caso de ambiguidade no resultado, o teste de Scott-Knott (SK) foi aplicado no mesmo nível de probabilidade, para comparação das médias obtidas.

Para representar as informações dos dados de forma visual, foram criados gráficos do tipo boxplot. Esses gráficos mostram o valor mínimo na barra inferior, o segundo quartil na base inferior do bloco, a mediana na linha interna do bloco, o terceiro quartil na base superior do bloco e o valor máximo como barra superior. Além disso, os outliers, que são valores fora do padrão, são representados como círculos acima ou abaixo da região de dispersão dos dados, que fica entre as barras superior e inferior.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidade básica das partículas

Os valores médios para densidade básica das partículas são observados na Tabela 3, a saber:

Tabela 3. Resultados da análise de densidade básica das partículas.

Parâmetro	Eucalipto	Bagaço de cana-de-açúcar
Média de densidade básica das partículas ($g \cdot cm^{-3}$)	0,3194	0,1986

No que tange aos resultados obtidos, os valores de densidade para as partículas de bagaço de cana-de-açúcar mostraram-se menos densos que as partículas de eucalipto.

De acordo com os estudos de Ferreira e Kageyama (1978), foram observados que as espécies *E. grandis*, *E. saligna*, *E. dunnii* e *E. botryoides*, do gênero *Eucalyptus*, possuem densidade abaixo de 0,500 g/cm³, sendo consideradas madeira de média densidade. Da mesma forma, ao analisar diferentes clones de última geração destinados à produção de celulose, Gomide et. al (2005), destacou que 60% das madeiras apresentaram densidade básica variando de 465 – 490 kg.m⁻³, o que difere do observado na presente análise.

Entretanto, a média de densidade básica da madeira alcançada na presente pesquisa corresponde ao encontrado por Jesus et al. (2017) e Cremonez et al. (2019), visto que eles encontraram valores abaixo de 400 kg.m⁻³ para madeira de eucalipto.

A baixa densidade da madeira encontrada para madeira em questão, pode ser associada a ambientes favoráveis ao crescimento, com boa disponibilidade hídrica, temperaturas elevadas e solos férteis e de boa qualidade. Nesses ambientes, a atividade fisiológica e cambial das plantas é intensa, resultando em uma proporção inferior de lenho tardio em relação ao lenho inicial, o que pode levar a uma densidade mais baixa da madeira (OLIVEIRA et al., 2012).

Além disso, ainda segundo o autor, o próprio lenho tardio pode ser mais estreito e de baixa densidade nessas condições. A hipótese é que os mesmos fatores ambientais que condicionam as diferentes fitofisionomias também resultem em efeitos significativos sobre a densidade da madeira das espécies presentes nas mesmas. Embora a maioria dos estudos sobre esse assunto sejam restritos a uma única espécie ou a pequenos grupos de espécies e apresentem resultados pouco conclusivos.

Outra possível explicação para os resultados obtidos pode ser atribuída à baixa eficácia do método de balança hidrostática para medir a densidade básica da madeira em partículas, visto que esse método é mais indicado para formas de discos ou cavacos. É possível que a falta de precisão do método tenha afetado a confiabilidade dos dados coletados.

Enquanto para a densidade do bagaço de cana-de-açúcar encontrou-se resultados maiores do que os obtidos por Mendes et al. (2017), porém foi similar aos valores encontrados por Ribeiro et al. (2020).

4.2. Caracterização química das biomassas

Os resultados obtidos nas análises de composição química das espécies são encontrados na Tabela 4, a saber:

Tabela 4. Valores médios para os diferentes componentes químicos das partículas de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar.

Componentes	Eucalipto (%)	Bagaço de cana-de-açúcar (%)
Extrativos totais	2,6	2,4
Lignina insolúvel	22,9	17,2
Lignina solúvel	3,8	2,4
Lignina total	26,7	19,6
Holocelulose	70,6	75,6
Alfa celulose	44,7	40,3
Cinzas	0,3	2,2

Os resultados encontrados para madeira de eucalipto foram comparados com os valores obtidos por Gomes et al. (2015) encontrando-se referências para eles, enquanto para o bagaço de cana-de-açúcar os componentes foram comparáveis aos analisados por Batalha et al. (2015).

A holocelulose é um termo utilizado para relacionar o conteúdo total de carboidratos presentes nos materiais lignocelulósicos, sendo possível alcançar a partir da diferença entre ela e a alfa celulose o teor de hemicelulose (MORAIS et al., 2010).

Esses componentes de carboidratos em conjunto com as moléculas de ligninas são responsáveis por uma possível ligação covalente entre os adesivos, com base de formaldeído, segundo detalhado por Bianche (2014), e essas ocorreriam a partir das ligações de oximetileno, formadas pelo grupo metilol do adesivo com as hidroxilas alifáticas presentes nos carboidratos e na lignina. Logo, os teores de holocelulose e ligninas podem influenciar positivamente na umectação e adesão dos adesivos às partículas.

Além disso, seguindo as considerações de Bufalino et al. (2012) e Andrade et al. (2019), a substância lignina apresenta-se como uma cola natural, sendo que quantidades mais elevadas são almejadas no contexto da fabricação de painéis de madeira reconstruída, uma vez que esta contribui significativamente para os mecanismos de união, desempenhando um papel crucial como um amortecedor para as microfibrilas de celulose, limitando o movimento paralelo às fibras e auxiliando, portanto, o processo de aderência das partículas.

Para além dos macrocomponentes dos vegetais, os teores de extrativos e teores de cinzas são considerados os mais importantes atributos químicos da madeira para a eficiência da colagem. Os extrativos são materiais orgânicos – graxas, óleos, gorduras, taninos, carboidratos, ácidos, gomas e resinas –, e geralmente sua função está associada a redução da higroscopicidade e permeabilidade, como ocorre no inchaço em espessura resultante da diminuição da adesão das partículas durante o processo de prensagem, onde ocorre migração de extrativos do lúmen para a superfície dos materiais, criando uma camada protetora que pode impedir a aderência do adesivo às partículas, além de impermeabilizar a passagem da água, sendo possível aumentar o tempo de prensagem retardando a taxa de evaporação da água. (IWAKIRI et al., 2002; RIBEIRO et al., 2020).

Ainda segundo as considerações de Iwakiri et al. (2002), o conteúdo de componentes inorgânicos (cinzas) quando abaixo de 0,5% não afeta na qualidade do produto, porém quando utilizadas matérias-primas com cinzas (%) acima desse valor pode-se verificar efeitos na usinabilidade podendo desgastar os equipamentos de corte, principalmente causados pela presença de sílica.

Além disso, de acordo com Andrade et al. (2019), a quantidade de minerais presentes no material lignocelulósico pode afetar o pH da solução adesiva, provocando a pré-cura do adesivo.

Entretanto, um aspecto positivo do alto teor de cinzas em biomassas, em especial minerais de sílica, foi destacado por Brito et al. (2020), sobre a maior resistência ao ataque biológico, devido a secagem das hifas dos fungos na presença de óxido de silício (SiO_2).

4.3. Propriedades do adesivo de ureia-formaldeído

O adesivo de ureia-formaldeído é atualmente o mais utilizado em painéis de madeira aglomerada e seu uso é justificado em função do seu baixo custo, em relação a outros ligantes sintéticos de origem petroquímica, além de apresentar baixo tempo de gelatinização a quente, utilização relativamente simples, disponibilidade no mercado e a resistência conferida aos painéis, porém seu uso é classificado para ambientes internos devido a sua baixa resistência a umidade (IWAKIRI et al., 2005). Os resultados obtidos para as propriedades do adesivo são encontrados na Tabela 5, a saber:

Tabela 5. Valores médios obtidos para as propriedades do adesivo ureia-formaldeído.

Parâmetros	Médias
Viscosidade (cP)	980
Gel time (s)	86
Teor de sólidos (%)	63,35
pH	8,65

Dentre os atributos avaliados para o adesivo, a viscosidade possui a maior capacidade de interferir no processo de colagem, pois segundo Gonçalves et al. (2003) elevadas viscosidades prejudicam a fluidez do adesivo interferindo na capacidade de umectação e adesão às partículas, além disso menores viscosidades tendem a facilitar o processo de pulverização do adesivo pela pistola pneumática, visto que valores mais elevados podem causar o entupimento dela.

Os valores de teor de sólidos (%) e pH foram comparáveis aos detalhados por Peixoto e Brito (2000) e por Iwakiri et al (2005), enquanto para a viscosidade (cP) encontrou-se valores mais elevados. A determinação da viscosidade foi importante para a definição da solução de adesivo, a qual foi adicionado 12% de água destilada sobre o peso total da mistura para a confecção da chapa, conforme descrito por Gonçalves et al. (2017), com a finalidade de diluir o adesivo e ajustar sua viscosidade para valores entre 600-800 (cP), de acordo com os autores supracitados. Para a característica de tempo de polimerização os valores foram considerados dentro do esperado, tendo como referência Ferreira (2017).

De forma geral, a habilidade de fluidez do adesivo é influenciada por sua viscosidade, teor de sólidos e variações de viscosidade em temperaturas elevadas durante o processo de cura. Se a fluidez for baixa, o adesivo não conseguirá penetrar adequadamente na superfície da madeira, resultando em baixa força de adesão. Por outro lado, se a fluidez for muito alta, o adesivo penetrará em excesso na madeira, o que pode causar deficiências na linha de ligação. A capacidade de fluidez e a dureza do adesivo são processos inversamente proporcionais durante a cura, ou seja, à medida que a dureza aumenta, a fluidez diminui (NURYAWAN; PARK; SINGH, 2014).

4.4. Propriedades físicas dos painéis

4.4.1. Densidade aparente

Os valores médios para densidade aparente dos painéis MDP referentes a cada tratamento estão apresentados na Tabela 6, bem como seus grupos definidos pelas letras adjacentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. Dessa forma, as médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, além disso, na Figura 17 está detalhado o gráfico do tipo boxplot para o ensaio de densidade aparente em todos os tratamentos.

Tabela 6. Densidade aparente média dos painéis de MDP produzidos por tratamento.

Tratamentos	Médias de densidade aparente (kg.m⁻³)
A	587,70 a
B	615,74 a
C	594,53 a
D	609,42 a
E	609,03 a
F	596,39 a

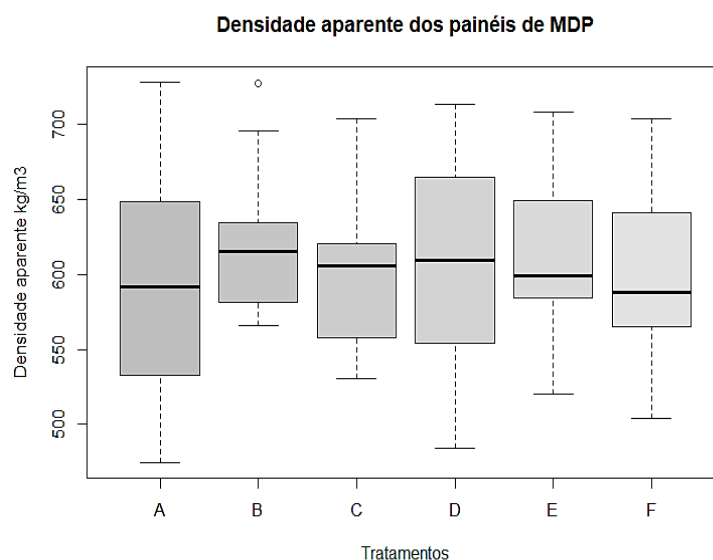


Figura 17. Boxplot dos valores obtidos no ensaio de densidade aparente ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) dos painéis de MDP produzidos por tratamento. Fonte: autoria própria.

De acordo com a análise da variância dos dados, os seguintes resultados foram obtidos: os resíduos podem ser considerados normais, conforme indicado pelo teste de Shapiro-Wilk com um nível de significância de 5%; as variâncias podem ser consideradas homogêneas, conforme indicado pelo teste de Bartlett com um nível de significância de 5%; e o coeficiente de variação dos dados foi de 8,82%.

Não foi observada diferença significativa entre todos os tratamentos que receberam associação de materiais. Todos os painéis apresentaram médias para densidade aparente reduzidas em relação a densidade nominal definida no escopo do projeto ($700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Esse resultado pode estar relacionado à perda de material durante a etapa de colagem das partículas na encoladeira, assim como no retorno em espessura dos painéis após a etapa de prensagem a quente durante a equalização da temperatura, com possível aumento do volume dos mesmos, o que poderia ocasionar uma redução da densidade nominal inicialmente descrita, conforme detalhado por Mendes et. al (2010).

Apesar disso, todos os painéis podem ser classificados como de média densidade, já que apresentaram densidade aparente entre 550 e $750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (ABNT, 2018).

4.4.2. Razão de compactação

As médias obtidas para razão de compactação dos painéis de MDP para cada tratamento estão apresentados na Tabela 7, bem como seus grupos definidos pelas letras adjacentes pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância, dessa forma, as médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, além disso, na Figura 18 está retratado o gráfico tipo boxplot para a razão de compactação, em função do percentual de mistura entre biomassas e da dosagem de adesivo.

Tabela 7. Razão de compactação média dos painéis de MDP de acordo com seu respectivo tratamento.

Tratamentos	Razão de compactação
A	1,91 a
B	2,00 b

C	2,01 b
D	2,06 c
E	2,15 c
F	2,10 c

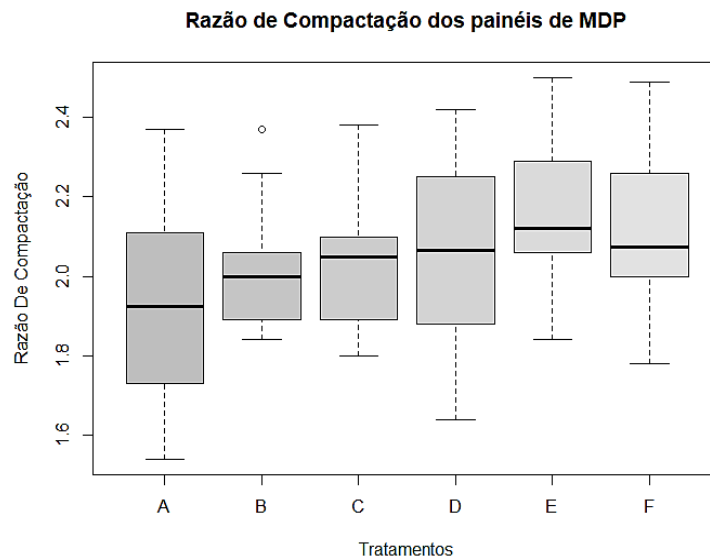


Figura 18. Boxplot dos valores alcançados para o critério de razão de compactação por tratamento. Fonte: autoria própria.

De acordo com a análise da variância dos dados, os seguintes resultados foram obtidos: os resíduos podem ser considerados normais, conforme indicado pelo teste de Shapiro-Wilk com um nível de significância de 5%; as variâncias podem ser consideradas homogêneas, conforme indicado pelo teste de Bartlett com um nível de significância de 5%; e o coeficiente de variação dos dados foi de 8,82%.

Houve diferença significativa entre a razão de compactação dos diferentes tratamentos avaliados, sendo observada uma discreta tendência de acréscimo na taxa de compactação com o aumento das porcentagens de bagaço de cana-de-açúcar, em função da baixa densidade da biomassa (198,6 kg.m³).

Nenhum dos painéis confeccionados apresentou valores dentro da faixa ideal de razão de compactação descrita por Maloney (1993) e Tsoumis (1991), que é de 1,3 – 1,6, o que pode ter ocorrido em função da própria densidade básica do bagaço de cana ou de uma possível subestimativa da densidade básica da madeira.

Entretanto, cabe ressaltar que os valores encontraram similaridade com os intervalos alcançados pelos painéis produzidos associando de madeira de pinus e bagaço de cana, por Mendes et al. (2012), que apresentou taxa de compactação variando de 1,64 – 3,27, e Silva et al. (2015), onde diferentes proporções de mistura de *Eucalyptus grandis* e da palha de milho foram avaliadas na fabricação de painéis de MDP, obtendo-se um intervalo de razão de compactação entre 1,34 e 4,09.

4.4.3. Inchamento em espessura

Na Tabela 8 estão apresentados os valores médios de inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água, bem como o resultado do teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. Enquanto, na Figura 19 está detalhado um gráfico do tipo boxplot para o

resultado do ensaio em todos os tratamentos e a linha que define o valor máximo de inchamento em 24 horas (22%) admitido para painéis de MDP do tipo P2 – uso interno, não estrutural e em condições secas, segundo a norma ABNT NBR 14810-2.

Tabela 8. Resultado médio de inchamento em espessura após 24h de imersão em água para os painéis de MDP por tratamento.

Tratamentos	Inchamento em 24 horas (%)
A	24,55 a
B	19,50 c
C	17,62 d
D	15,58 e
E	21,45 b
F	14,48 e

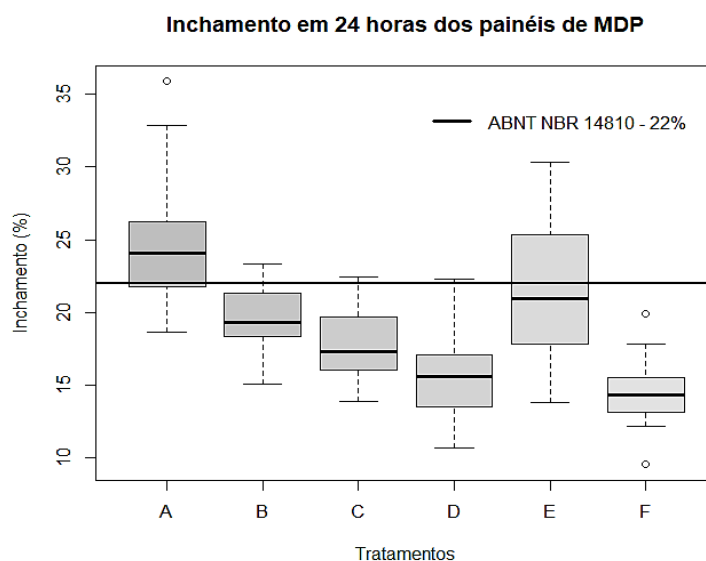


Figura 19. Boxplot com os resultados alcançados para inchamento em espessura após 24h de imersão em água por tratamentos. Fonte: autoria própria.

Na análise dos dados para o ensaio, verificou-se que os pressupostos da ANOVA não foram atendidos, ou seja, não houve normalidade dos resíduos à 5% de significância pelo teste de Shapiro-Wilk e as variâncias não foram consideradas homogêneas pelo teste de Bartlett para o mesmo nível de significância. O coeficiente de variação encontrado foi de 16,09%.

Em função dos resultados, observa-se que, tanto para o percentual de bagaço de cana adicionado à mistura quanto para a dosagem de adesivo aplicada, os resultados demonstraram haver diferença estatística, sendo os melhores resultados médios observados nos painéis dos tratamentos F, D, C e B, respectivamente, sendo os dois primeiros estatisticamente semelhantes e os tratamentos C e D diferentes entre si e dos demais.

Em suma, os valores alcançados para inchamento em espessura após 24h foram compatíveis com os observados por Mendes et al. (2012), onde avaliando o efeito da adição de bagaço de cana na produção de painéis aglomerados de pinus, não foi possível encontrar diferença significativa em substituições de até 50% pelo bagaço de cana-de-açúcar, da mesma forma, por Yano et al. (2020) que observaram uma tendência de redução no inchamento após

24h de imersão em água, em painéis confeccionados com resíduos madeireiros e até 50% de substituição por bagaço de cana.

Para a associação de materiais, verifica-se que o aumento do percentual de bagaço de cana na manufatura dos painéis ocasionou uma diminuição significativa no critério de aumento em espessura, com exceção do tratamento E.

De acordo com Mendes et al. (2012), painéis com maior razão de compactação apresentam menor absorção de água e, conseqüentemente, menor inchamento em espessura. Tal fato, justificaria a tendência observada no ensaio, onde com o acréscimo do percentual de resíduo a mistura para confecção da chapa observou-se um aumento na taxa de compactação.

Da mesma forma, para a dosagem de adesivo de ureia-formaldeído, analisa-se que os tratamentos que receberam uma maior parte do adesivo apresentaram uma redução significativa para o parâmetro em questão. Nesse caso, possivelmente a maior quantidade de adesivo foi responsável por melhorar a adesão entre as partículas, reduzindo o inchamento em espessura provocado pela absorção de água, conforme descrito por Bufalino et al. (2012).

De modo geral, pode-se observar que a adição de partículas de bagaço de cana, bem como o aumento da dosagem de adesivo melhoraram as propriedades físicas dos painéis. Os resultados tiveram tendência compatível com o apresentado por Belini (2012) e Yano, Silva e Minillo (2017).

Embora Iwakiri et al. (2004) tenham afirmado que painéis com maiores valores para razão de compactação geralmente apresentam piora nas propriedades físicas de inchamento após 24 horas de imersão em água, o que prejudica a estabilidade dimensional dos mesmos, não foi encontrada correlação entre essa afirmação e os resultados obtidos na presente pesquisa.

E, nesse sentido, o bagaço de cana-de-açúcar pode ser considerado um material benéfico como matéria-prima associada para produção de painéis por promover um aumento na densificação sem afetar as suas propriedades físicas, pois em função da sua composição química apresentando teores de extrativos e lignina total comparáveis a madeira de eucalipto utilizada evita-se que haja, respectivamente, alterações na cura do adesivo e problemas na estabilidade dimensional dos painéis e entre outras alterações que normalmente são observado com o uso de outras biomassas agrícolas (SILVA, 2015).

4.5. Propriedades mecânicas dos painéis

4.5.1. Flexão estática

Para os ensaios de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), utilizou-se o delineamento em blocos casualizados em função da orientação paralela e transversal de corte dos corpos-de-prova, contudo para tal delineamento não foi observada diferença significativa entre os blocos definidos a 5% de significância, como pode ser observado na Figura 20.

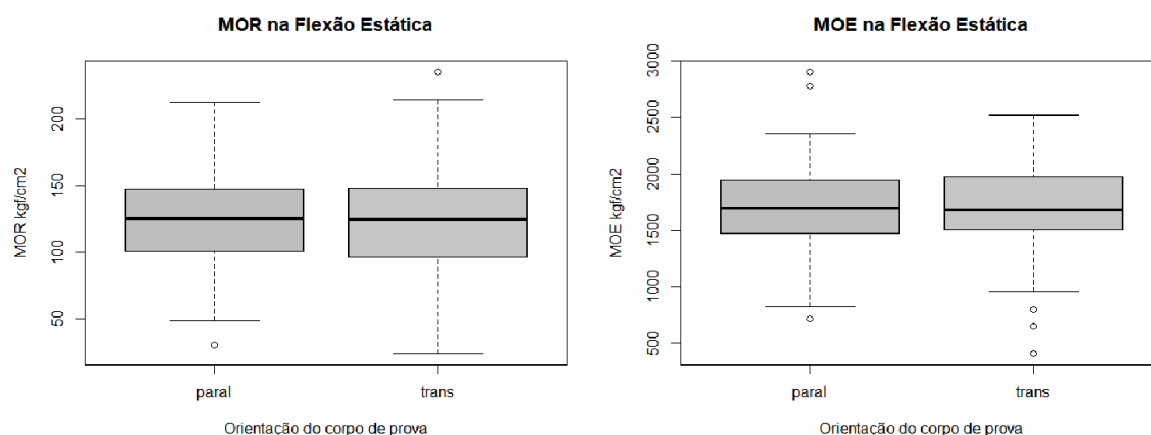


Figura 20. Boxplot dos valores de MOR e MOE na flexão estática para duas diferentes orientações de corte dos painéis para cada tratamento. Fonte: autoria própria.

De acordo com a análise da variância para a efetividade da separação em blocos pela orientação de corte do corpo-de-prova, os seguintes resultados foram obtidos: os resíduos podem ser considerados normais, conforme indicado pelo teste de Shapiro-Wilk com um nível de significância de 5%; as variâncias podem ser consideradas homogêneas, conforme indicado pelo teste de Bartlett com um nível de significância de 5%.

Os valores médios encontrados para o módulo de ruptura (MOR) à flexão estática e o teste de Scott-Knott a 5% de significância podem ser observados na Tabela 9, enquanto na Figura 21 está detalhado os gráficos boxplot com os valores de MOR em todos os tratamentos, bem como a linha que define o valor mínimo de resistência à ruptura (112 kgf.cm^{-2}) para painéis de MDP do P2 – uso interno, não estrutural e em condições secas, segundo a norma ABNT NBR 14810-2.

Tabela 9. Valores médios de MOR (kgf.cm^{-2}) flexão estática dos painéis MDP nos diferentes tratamentos.

Tratamentos	Médias de MOR (kgf.cm^{-2})
A	130,90 a
B	125,90 a
C	139,63 a
D	137,44 a
E	133,28 a
F	153,92 b

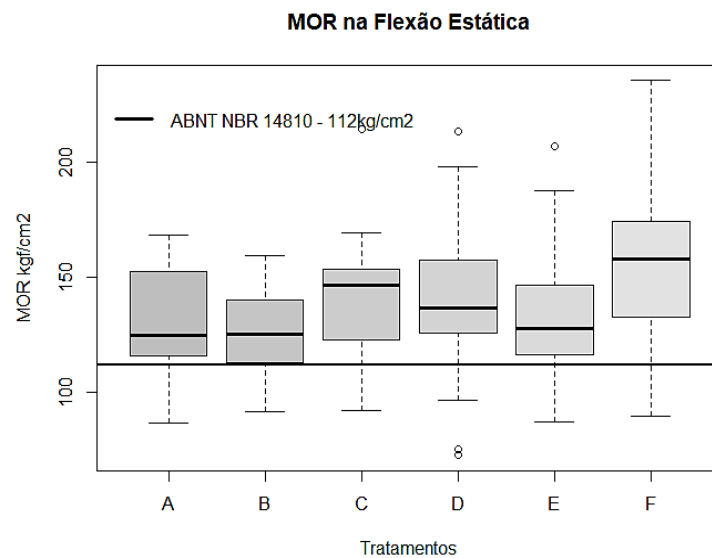


Figura 21. Boxplot dos valores de módulo de ruptura (MOR) em kgf.cm^{-2} obtidos para os painéis nos diferentes tratamentos. Fonte: autoria própria.

De acordo com a análise da variância dos dados, os seguintes resultados foram obtidos: os resíduos podem ser considerados normais, conforme indicado pelo teste de Shapiro-Wilk com um nível de significância de 5%; as variâncias podem ser consideradas homogêneas, conforme indicado pelo teste de Bartlett com um nível de significância de 5%; e o coeficiente de variação dos dados foi de 20,47%.

Para o critério de módulo de ruptura (MOR) todos os painéis que receberam associação de matérias apresentaram valores de mediana acima do mínimo recomendado pela norma ABNT NBR 14810-2:2018, sendo os tratamentos A, B, C, D e E estatisticamente semelhantes à 95% de probabilidade, enquanto o tratamento F apresentou os melhores resultados de resistência a ruptura divergindo-se estatisticamente dos demais.

Portanto, não houve uma tendência clara de acréscimo dessa propriedade mecânica para os cenários avaliados de adição de bagaço de cana e do aumento da dosagem de ureia-formaldeído, exceto pelo tratamento F (com 30% de bagaço e 12% de UF), que apresentou valores mais altos para resistência a ruptura, ocasionando em uma média significativamente maior.

Os resultados da presente pesquisa foram diferentes dos encontrados em estudos anteriores. Enquanto Silva et al. (2015) encontraram uma tendência de decréscimo no módulo de ruptura ao substituir o eucalipto por partículas de palha de milho em painéis de MDP, a presente pesquisa obteve médias superiores para esse critério, Brito et al. (2020) relataram um aumento significativo na resistência à ruptura com a adição de bagaço de cana em painéis de colmo de bambu, mas, quando comparados, os valores médios foram inferiores aos observados.

Ribeiro et al. (2020) encontraram valores médios mais altos para painéis confeccionados com bagaço de cana termicamente tratado, enquanto Mendes et al. (2012) encontraram resultados inferiores e uma tendência de decréscimo na resistência para o aumento do percentual de bagaço de cana acima de 50% e acréscimo para condições de aumento na dosagem de adesivo.

É importante salientar, que os resultados da presente pesquisa foram muito superiores aos encontrados por Buzo et al. (2020), exceto para a condição em que o bagaço foi termicamente tratado.

Yano et al. (2020) não encontraram diferenças significativas no critério de MOR em painéis confeccionados com resíduos madeireiros e proporções de até 50% de bagaço de cana, semelhante ao verificado na análise.

Portanto, de forma geral, a partir da análise dos resultados alcançados e de estudos anteriores, observa-se que substituições de matéria-prima em até 30% do total e o aumento de 2% no teor do adesivo de ureia-formaldeído não demonstraram a capacidade de interferir na propriedade de módulo de ruptura.

Os valores médios encontrados para o módulo de elasticidade (MOE) à flexão estática e o teste de Scott-Knott a 5% de significância podem ser observados na Tabela 10, enquanto na Figura 22 está detalhado o gráfico do tipo boxplot com os valores alcançados para MOE em todos os tratamentos, bem como a linha que define o valor mínimo de resistência à flexão no módulo de elasticidade para painéis de MDP do P2 – uso interno, não estrutural e em condições secas, segundo a norma ABNT NBR 14810-2.

Tabela 10. Valores médios de MOE ($N.mm^{-2}$) na flexão estática dos painéis MDP nos diferentes tratamentos.

Tratamentos	Médias de MOE ($N.mm^{-2}$)
A	1738,79 a
B	1734,12 a
C	1816,04 a
D	1858,25 a
E	1894,04 a
F	1746,62 a

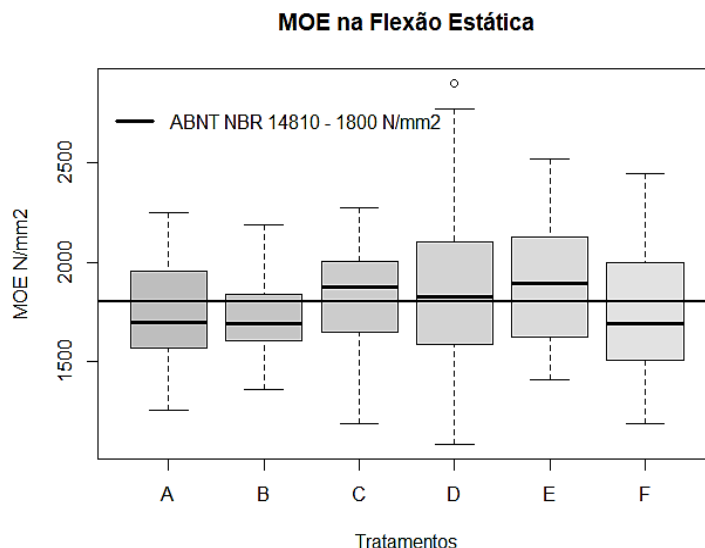


Figura 22. Boxplot dos valores de módulo de elasticidade (MOE) em $N.mm^{-2}$ obtidos para os painéis nos diferentes tratamentos. Fonte: autoria própria.

De acordo com a análise da variância dos dados, os seguintes resultados foram obtidos: os resíduos podem ser considerados normais, conforme indicado pelo teste de Shapiro-Wilk com um nível de significância de 5%; as variâncias podem ser consideradas homogêneas, conforme indicado pelo teste de Bartlett com um nível de significância de 5%; e o coeficiente de variação dos dados foi de 17,67%.

Com relação ao módulo de elasticidade (MOE) os painéis produzidos em todas as condições foram estatisticamente iguais pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância,

contudo apenas as médias para MOE encontradas nos tratamentos C, D e E satisfazem a recomendação mínima de resistência (1800 N.mm^{-2}) da norma adotada como referência. Logo, não foi possível verificar a relação das condições de adição de bagaço de cana e do aumento da dosagem de ureia-formaldeído na alteração desta propriedade mecânica.

Mendes et al. (2014) encontraram médias superiores às encontradas na presente pesquisa e sem diferença significativa para o módulo de elasticidade ao avaliar painéis de eucalipto e pinus substituídos em até 50% por bagaço de cana-de-açúcar. Ao contrário, Martins et al. (2018) observaram correlação negativa ao avaliar a manufatura de painéis de eucalipto substituídos por resíduos de soja.

Enquanto, Veloso et al. (2020) relataram a possibilidade de substituição de até 23% de resíduos da produção de cacau para confecção de painéis aglomerados associados a partículas de pinus, sem comprometer o alcance aos requisitos mínimos da norma utilizada como referência. Da mesma forma, Gonçalves et al. (2022) não encontraram diferença significativa no critério de MOE em painéis que receberam até 30% de adição de casca de arroz tratada termicamente, com resultados maiores que os da presente pesquisa.

A partir da análise dos resultados observado e de estudos anteriores, observa-se que substituições de matéria-prima em até 30% do total e o aumento de 2% no teor do adesivo de ureia-formaldeído não demonstraram a capacidade de interferir significativamente na propriedade de módulo de elasticidade.

Os painéis foram avaliados quanto à sua resistência à flexão estática, com base nos requisitos mínimos estabelecidos pela norma ABNT NBR 14810.2 para painéis do tipo P2. Em geral, os painéis atenderam aos requisitos mínimos de resistência. O módulo de ruptura foi o parâmetro que melhor atendeu às exigências da norma, enquanto o módulo de elasticidade demonstrou resistência dentro do limite aceitável. No entanto, a resistência à flexão do painel pode ser aprimorada por meio de pré-tratamentos realizados na biomassa, como a remoção da medula do bagaço de cana, que pode proporcionar um aumento de até 60% na resistência, ou por meio de tratamento térmico, conforme detalhado em estudos anteriores (MENDES et al., 2012; RIBEIRO et al., 2019).

Portanto, de forma geral, os painéis foram considerados resistentes à flexão estática de acordo com os requisitos mínimos de resistência da norma ABNT NBR 14810.2 para painéis do tipo P2. Esse resultado foi melhor contemplado na análise de módulo de ruptura quando comparado ao módulo de elasticidade, onde os painéis demonstraram resistência no limite aceitável da norma. Contudo a resistência do painel pode ser aprimorada em função de pré-tratamentos realizados na biomassa como com a remoção da medula do bagaço de cana, o que pode garantir um acréscimo de resistência de até 60%, conforme detalhado por Mendes et al. (2012), ou com o tratamento térmico da biomassa a temperaturas de 230° C , conforme detalhado por Ribeiro et al. (2020).

4.5.2. Resistência à tração perpendicular (TP) ou ligação interna (LI)

Para o ensaio de resistência à tração perpendicular (TP) ou ligação interna (LI), o teste de Scott-Knott a 5% de significância foi aplicado em delineamento inteiramente casualizados, como pode ser observado na Tabela 11, bem como na Figura 23 está detalhado o gráfico boxplot com os valores de resistência à tração perpendicular em todos os tratamentos e a linha que define o valor mínimo de resistência para painéis de MDP do P2 – uso interno, não estrutural e em condições secas, segundo a norma ABNT NBR 14810-2.

Tabela 11. Valores médios de resistência à tração perpendicular ou ligação interna (kgf.cm^{-2}) dos painéis MDP nos diferentes tratamentos.

Tratamentos	Ligação interna (kgf.cm^{-2})
A	3,19 b
B	3,26 b
C	4,34 a
D	3,18 b
E	4,03 a
F	4,28 a

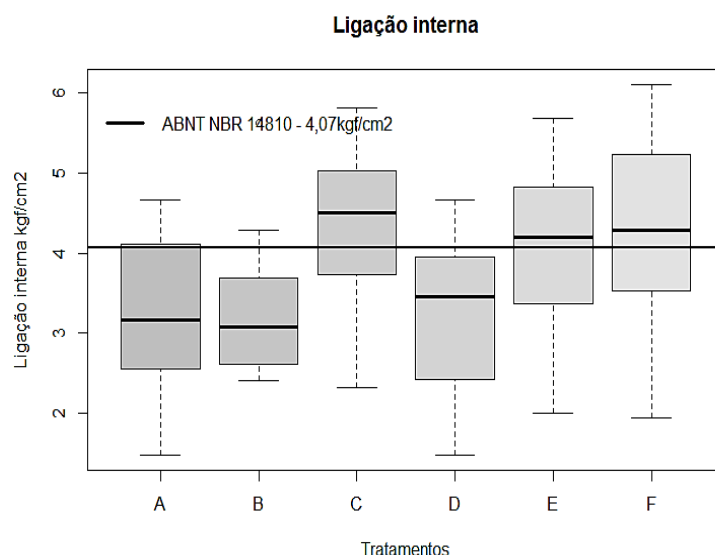


Figura 23. Boxplot dos valores de resistência a ligação interna (LI) em kgf.cm^{-2} obtidos para os painéis nos diferentes tratamentos. Fonte: autoria própria.

De acordo com a análise da variância dos dados, os seguintes resultados foram obtidos: os resíduos podem ser considerados normais, conforme indicado pelo teste de Shapiro-Wilk com um nível de significância de 5%; as variâncias podem ser consideradas homogêneas, conforme indicado pelo teste de Bartlett com um nível de significância de 5%; e o coeficiente de variação dos dados foi de 28,05%.

Com relação aos valores médios registrados para resistência à ligação interna ou tração perpendicular verifica-se que as maiores médias foram registradas para os painéis dos tratamentos C, E e F, sendo estatisticamente iguais pelo teste de Scott-Knott à 5% de significância e, nesse caso, satisfazendo a recomendação mínima de resistência da norma ABNT NBR 14810-2:2018. Todos os outros tratamentos apresentaram valores médios inferiores a recomendação da norma, sendo eles estatisticamente semelhantes entre si. Sendo assim, para o ensaio de tração perpendicular não foi possível vislumbrar correlação clara entre a adição de bagaço de cana e aumento da dosagem de adesivo no aumento da resistência na linha de cola.

Mendes et al. (2012) encontraram uma correlação positiva entre o aumento do teor de adesivo de UF e o acréscimo na resistência à ligação interna em painéis confeccionados com madeira de pinus e adições de até 50% de bagaço de cana. Em contraste, Silva et al. (2015) observaram uma redução significativa na resistência à tração perpendicular em painéis de eucalipto associados a 50% de palha de milho, enquanto Brito et al. (2020) observaram um

decréscimo significativo na resistência à ligação interna em painéis produzidos em diferentes condições de associação entre bagaço de cana e colmo de bambu.

A formação de uma linha de cola eficaz em todos os tratamentos pode ter sido prejudicada pelo alto conteúdo de cinzas do bagaço de cana, o que conseqüentemente diminuiu a adesão interna dos painéis. Embora os painéis com maior percentual de bagaço tenham apresentado maiores valores de resistência, esses valores foram inferiores aos observados em outros trabalhos. De acordo com Andrade et al. (2019), biomassas com alto teor de composição inorgânica podem causar alterações no pH do material, e esse fato também foi verificado por Bianche et al. (2012) na produção de painéis com resíduos de madeira com alto teor de minerais.

Em suma, verificou-se que aplicações de até 30% de bagaço de cana não demonstraram a tendência de alterar as propriedades mecânicas dos painéis produzidos, da mesma forma não foi possível verificar correlação clara entre o aumento da dosagem de adesivo e diferenças significativas para os critérios avaliados.

Os resultados de caracterização mecânica dos painéis foram considerados satisfatórios e compatíveis com a literatura, uma vez que os painéis produzidas com adição do resíduo possuíam valores mais altos para a razão de compactação, o que proporciona uma maior densificação das partículas na etapa de prensagem, bem como uma maior superfície de contato entre as matérias-primas e a redução dos poros, resultando em painéis aglomeradas com maior uniformidade das tensões internas e, conseqüentemente, maior resistência a compressão (BRITO et al., 2020).

5. CONCLUSÃO

O incremento de partículas de bagaço de cana-de-açúcar às partículas de eucalipto e o aumento da dosagem de adesivo não afetaram a densidade aparente dos painéis produzidos, mas apresentaram efeitos significativos no aumento da razão de compactação e da estabilidade dimensional das painéis após 24 horas água de imersão em água.

Quanto à propriedade mecânica de resistência à flexão estática, todas os painéis produzidos atenderam aos requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 14810.2. Em relação ao módulo de ruptura, não foi possível identificar diferenças significativas nos resultados obtidos com o aumento do percentual do resíduo ou na variação da dosagem do adesivo, com exceção do tratamento F (30% de bagaço e 12% de UF), que apresentou uma média de resistência superior às demais. Quanto ao módulo de elasticidade, não foram observadas diferenças significativas entre os painéis produzidos.

Os resultados mais satisfatórios em relação à resistência à ligação interna foram obtidos nos tratamentos com 20% de bagaço de cana e 10% de UF. Esses resultados não apresentaram diferença significativa em comparação aos painéis com 30% de bagaço de cana e duas dosagens do adesivo, atendendo assim aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma de referência.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14810-2. **Painéis de partículas de média densidade**. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. 71f., 4.ed., 2018.

ADAMS, L. **Mercado de compensados atingirá US\$ 73,3 bilhões até 2027**. 2023. REMADE. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/noticias/18896/mercado-de-compensados-atingira-us\\$-73-3-bilhoes-ate-2027#:~:text=No%20m%C3%A9dio%20prazo%2C%20a%20constru%C3%A7%C3%A3o,U\\$%24%2015%2C%20trilh%C3%B5es.>](http://www.remade.com.br/noticias/18896/mercado-de-compensados-atingira-us$-73-3-bilhoes-ate-2027#:~:text=No%20m%C3%A9dio%20prazo%2C%20a%20constru%C3%A7%C3%A3o,U$%24%2015%2C%20trilh%C3%B5es.>)>. Acessado em: fev. 2023.

ANDRADE, N. C. et al. Painéis MDP produzidos com resíduos de extração de celulose. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, n.3, e6446, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i3a6446>.

ANTONANGELO, A.; BACHA, C. J. C. **As Fases da Silvicultura no Brasil**. RBE Rio de Janeiro, 52(1):207-238, jan.-mar. 1998. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rbe/article/view/721/8086>>.

ARAÚJO, C. K. C. et al. Caracterização mecânica de painéis particulados de média densidade produzidos a partir de resíduos de madeira. **Revista Gestão Industrial**, v. 15, n. 1, p. 197-211, 2019. DOI: 10.3895/gi.v15n1.9159.

ASTM. American Society for Testing and Materials. D 1490-01: **Standard test method for nonvolatile content of urea-formaldehyde resin solutions**. West Conshohocken: ASTM Internacional, 2013, 2 p.

ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1200-10. **Standart test method for viscosity by Ford Viscosity Cup**. West Conshohocken: ASTM Internacional, PA, 2014.

BATALHA, L. A. R. et al. Production of fermentable sugars from sugarcane bagasse by enzymatic hydrolysis after autohydrolysis and mechanical refining. **Bioresource Technol.** 180, 97-105. 2015. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.060.

BELINI, U. L. **Caracterização tecnológica de painéis de fibras da madeira de eucalipto, *Eucalyptus grandis*, e de partículas do bagaço do colmo de cana-de-açúcar, *Saccharum sp.*** 2012. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. DOI:10.11606/T.11.2012.tde-10072012-094054.

BELINI, U. L. et al. “Bioensaios em painéis confeccionados com Eucalipto e Bagaço de Cana-de-Açúcar”. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.2, p.361-368, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200017>.

BIANCHE, J. J. et al. Propriedades de painéis aglomerados fabricados com partículas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) e vassoura (*Sida spp.*). **Cerne**, Lavras, v.18, n.4, p. 623-630, out. – dez, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000400012>.

BIANCHE, J. J. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Viçosa: UFV. 85p. 2014. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/13276>>.

BRITO, F. M. S. et al. Technological characterization of particleboards made with sugarcane bagasse and bamboo culm particles. **Construction and Building Materials**, v.262, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120501>.

BUFALINO, L. et al. Particleboards made from australian red cedar: processing variables and evaluation of mixed-species. **Journal of Tropical Forest Science** 24(2): 162–172, 2012. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/23617071>>.

BUZO, A. L. S. C. et al. Addition of sugarcane bagasse for the production of particleboards bonded with urea-formaldehyde and polyurethane resins. **Wood Research**, 65 (5), 727-736, 2020. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/65.5.727736.

BUZO, A. L. S. C. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de pinus e bagaço de cana empregando-se ureia-formaldeído e poliuretano à base de mamona**. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas). Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP. São Paulo. 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/157188>>.

CAMPOS, A. C. **Produção agrícola em 2021 bate novo recorde e atinge R\$ 743,3 bilhões**. Agência Brasil. 2022. Disponível em: <[COUTO, L. R. D. **Viabilidade tecnológica da produção de mdp homogêneo a partir do residuo úmido de cervejaria**. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso \(Graduação em Engenharia Florestal\). Departamento de Engenharia Florestal – UnB. Brasília. 2019. Disponível em: < <https://bdm.unb.br/handle/10483/27363>>.](https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2022-09/producao-agricola-em-2021-bate-novo-recorde-e-atinge-r-7433-bilhoes#:~:text=O%20valor%20da%20produ%C3%A7%C3%A3o%20agr%C3%ADcola,suprior%20%C3%A0%20registrada%20em%202020.>. Acessado em: fev. 2023.</p></div><div data-bbox=)

CREMONEZ, V. G. et al. Wood basic density effect of *Eucalyptus grandis* in the paper making. **Revista Matéria**, v.24, n.03, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0735>.

CRUZ, L. A. et al. **Biorrefinarias: Um panorama do avanço tecnológico no setor de produtos florestais e biocombustíveis**. In: Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia, vol. 2. 1. Ed. Belo Horizonte. Poisson, cap. 12, p. 112-121. 2019. DOI: 10.36229/978-85-7042-203-3.CAP.12.

FERREIRA, B. C. S.; FIRME, M. G.; BALDANSI, N. O. Uma proposta de uso da casca de café na confecção de painéis de madeira do tipo MDP. **Brazilian Journal of Development**, v.5, n. 7, p. 10021-10027, jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n7-167>.

FERREIRA, J. C. **Sínteses de adesivos de ureia-formaldeído com adição de nanocristalina, lignina Kraft e celulose**. 2017. Tese de Doutorado em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa. 119 p., 2017. DOI: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/10010>.

FERREIRA, M. & KAGEYAMA, P.Y. Melhoramento genético da densidade básica da madeira do eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3, Manaus, 1978. **Anais**. São Paulo, SBS, 1978. v.2, p. 148-52.

FIORELLI, J. et al. Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. **Industrial Crops and Products**, v.40, p. 69-75, Nov. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.033>.

FOELKEL, C.E.B. et al. - **Métodos para determinação de densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas**. IPEF, Piracicaba n.2/3, p. 65- 74, 1971. Disponível em: <<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr02-03/cap04.pdf>>.

FREIRE, C. S. et al. Propriedades físicas de painéis aglomerados comerciais confeccionados com bagaço de cana e madeira. **Floresta e Ambiente**, 18(2): 178-185. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2011.036>.

GOMES, F. J. B. et al. Thorough characterization of brazilian new generation of Eucalypt clones and grass for pulp production. **Int J For Res** 2015:1–10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/814071>.

GOMIDE, et al. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do brasil. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.129-137, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100014>.

GONÇALVES, C. A. et al. Produção de chapas de madeira aglomerada com adesivo ureia-formaldeído modificado com tanino de Mimosa *Caesalpiniaefolia bentham* (sabiá). **Floresta e Ambiente**, v.10, n.1, p. 18-26, 2003. Disponível em: <https://www.floram.org/article/588e2201e710ab87018b45ed/pdf/floram-10-1-18.pdf>.

GONCALVES, F. G. et al. Chapas aglomeradas confeccionadas com ureia-formaldeído sob adição de tanino em pó. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1349-1363, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509830216>.

GONÇALVES, F. G. et al. Feasibility of incorporating thermally treated lignocellulosic waste in particleboard composites. **European Journal of Wood and Wood Products**, vol. 80, p. 647–656, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01804-8>.

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

IWAKIRI S et al. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-uréia-formaldeído. **Cerne** 11 (4): 323–328. 2005. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/18150>.

IWAKIRI, S. et al; **Painéis de Madeira**. 1º Edição. Curitiba, 2002.

IWAKIRI, S.; SHIMIZU, J.; SILVA, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. S.; PUEHINGHER, C. A.; VENSON, I. L. C. Particleboard manufacturing from *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 883-887, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600013>.

JESUS, M. S. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta**, Curitiba, PR, v.47, n.1, p. 11-16, jan. - mar. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v47i1.48418>.

LEE, S. H. et al. Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v.20, p.4630-4658, sept-oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.166>.

LÚCIO, D. de M. **Efeito da adição de ureia nas propriedades de adesivos fenólicos produzidos com óleo pirolítico de *Eucalyptus* sp.** 49f.:il. Dissertação (Mestrado em Ciências

Florestais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/23226>>.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Ed. Miller Freeman, 1993, v. 2.

MARTINS, E. H. et al. Soybean waste in particleboard production. **Ciência e Agrotecnologia**, 42(2):186-194, Mar. - Apr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542018422015817>.

MENDES, R. F. et al. Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 285-295, jun. 2010. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/16459>>.

MENDES, R. F. et al. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 161-170, jan.-mar., 2012. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050985088>.

MENDES, R. F. et al. Use of Sugarcane Bagasse for Particleboard Production. **Key Engineering Materials**, v.634, p.163–171. 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.163>.

MENDES, R. F. et al. 1 - Lignocellulosic residues in cement-bonded panels. Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites. **Woodhead Publishing**, p. 3-16, 2017. DOI:10.1016/B978-0-08-102001-2.00001-2.

MERCADO de móveis - crescimento, tendências, impacto do covid-19 e previsões (2023 - 2028). **Mordor Intelligence**, 2021. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/furniture-market>>. Acessado em: fev. 2023.

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

MORAIS, J. P. S.; ROSA, M. F.; MARCONCINI, J. M. (2010). **Procedimentos para análise lignocelulósica**. Documentos, Embrapa, São Carlos. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/900898/procedimento-para-analise-lignocelulosica>>.

NASCIMENTO, M. F.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. **MDP fabricação e caracterização painéis de partículas de média densidade**. Série Didática – Produtos Derivados de Madeira. São Carlos. EESC – USP, 2015. ISBN 978-85-8023-030-7. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281968152_Paineis_de_particulas_de_media_densidade_Fabricacao_e_caracterizacao_Serie_didatica_Produtos_derivados_da_madeira>.

NURYAWAN, A.; PARK, B. D.; SINGH, A. P. Penetration of urea–formaldehyde resins with different formaldehyde/urea mole ratios into softwood tissues. **Wood Sci Technol** v. 48, p. 889–902, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0649-9>

OLIVEIRA, et al. Efeito do ambiente sobre a densidade da madeira em diferentes fitosionomias do Estado de Minas Gerais. *Cerne*, Lavras, v. 18, n. 2, p. 345-352, abr./jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000200020>.

PAN, Z.; CATHCART; A.; WANG, D. Properties of particleboard bond with rice bran and polymeric methylene diphenyl diisocyanate adhesives. **Industrial Crops and Products**, v.23, p. 40-45, Jan. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.03.004>.

PEŃZIK, M.; JANISZEWSKA, D.; ROGOZIŃSKI, T. Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review. **Industrial Crops and Products**, v. 174. Article 114162, dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114162>.

PEIXOTO, G. L; BRITO, E. O. Avaliação da granulometria de partículas de Pinus taeda combinadas com adesivos comerciais para a fabricação de aglomerados. **Floresta e Ambiente**, v.7, n.1, p.60-67, 2000. Disponível em: <https://www.floram.org/journal/floram/article/588e21ee710ab87018b459e>.

RIBEIRO, D. P. et al. Effect of Heat Treatment on the Properties of Sugarcane Bagasse Medium Density Particleboard (MDP) Panels. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, p. 6429–6441, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00882-9>.

ROQUE, C. A. L.; VALENÇA, A. C. de V. Painéis de madeira aglomerada. **BNDES Setorial**. Rio de Janeiro. n. 8. p. 153-170. set. 1998. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2538>.

SCATOLINO, M. V. et al. Does the Addition of Cotton Wastes Affect the Properties of Particleboards? **Floresta e Ambiente**, 26(2): e20170300, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.030017>.

SILVA, D. W. et al. MDP com partículas de eucalipto e palha de milho. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 853-862, dez. 2015. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.10](https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.10).

SILVA, K. C. A. da S. et al. Escassez de madeira no Brasil. **Campo&Negócios Online**. 2023. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/escassez-de-madeira-no-brasil/>. Acessado em: jan. 2023.

SOARES, S. S. et al. Valorização do bagaço de cana-de-açúcar na produção de painéis aglomerados de baixa densidade. **Revista Ciência da Madeira**, 2017, 8, 2. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/31621>.

TABARSA, T.; ASHORI, A; GHOLAMZADEH, M. Evaluation of surface roughness and mechanical properties of particleboard panels made from bagasse. **Composites Part B: Engineering**, v.42, p. 1330-1335, Jul. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.12.018>.

TAPPI. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **Tappi test methods**: 1992-1993. Atlanta: 1992.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization** New York: V. N. Reinhold, 1991. 494 p. ISBN: 978-3-941300-22-4. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-90001279>.

VELOSE, M. C. R. de A. et al. Potential destination of Brazilian cocoa agro-industrial wastes for production of materials with high added value. **Waste Management**, v. 118, p. 36-44, dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.019>.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. Panorama de mercado: painéis de madeira. **BNDES Setorial**. 40:323-84. 2014. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/3023>.

WEBER, C.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. **Ciência Florestal**, 25(2), 405–413. 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509818460>.

Wise, L. E., Murphy, M., D'Addieco, A. A. 1946. Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on hemicellulose. Paper Trade J. 122: 35–43

WOOD Based Panel Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product (Plywood, MDF, HDF, OSB, Particleboard, Hardboard), By Application (Furniture, Construction), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027. **Grand View Research**. 2022. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wood-based-panel-market>. Acessado em: fev. 2023.

YANO, B. B. R.; DA SILVA, S. A. M.; MINILLO, L. Produção e avaliação de painéis aglomerados com resíduos de madeira e de bagaço de cana-de-açúcar. In: Anais Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2017. **Anais Eletrônicos**. Campinas, Galoá, 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/cbctem/trabalhos/producao-e-avaliacao-de-paineis-aglomerados-com-residuos-de-madeira-e-de-bagaco?lang=pt-br>.

YANO, B. B. R. Use of Sugarcane bagasse and industrial timber residue in particleboard production. **BioResources**, v. 15(3), p. 4753-4762, 2020. DOI: 10.15376/biores.15.3.4753-4762.

