

Artigos

Produção de painéis de partículas de madeira com inclusão de poliestireno

Producing wood particleboards with the inclusion of polystyrene

Felipe Reis Rodrigues¹ 
Pedro Henrique da Silva Cazella¹ 
Matheus Viana de Souza¹ 
Rodrigo Andraus Bispo¹ 
Letícia Freitas Assis¹ 
Caroline Graminha Gilio¹ 
André Luis Christoforo^{II} 
Sérgio Augusto Mello da Silva¹ 

¹Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP, Brasil

^{II}Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil

RESUMO

O crescimento do consumo humano tem causado inúmeros transtornos para o meio ambiente, inclusive pelo descarte inapropriado de materiais inorgânicos de longa vida útil. A incorporação de potenciais resíduos na fabricação de painéis aglomerados à base de madeira se apresenta como uma alternativa a essa problemática. Esta pesquisa teve por objetivo avaliar os efeitos da substituição parcial de partículas de madeira por partículas de poliestireno expandido aglutinados com poliuretano de mamona. As partículas de madeira (50% de Pinus + 50% de Eucalipto) foram substituídas por 25 e por 50% (em massa) de partículas de poliestireno expandido visando aprimorar as propriedades físicas e mecânicas de painéis fabricados com 5% de adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. Os compósitos fabricados com 50% de partículas de poliestireno resultaram nos melhores valores das propriedades físicas e mecânicas avaliadas (ABNT NBR 14810 e EN 312), designando credibilidade à produção de painéis com a substituição parcial de partículas de madeira por partículas de poliestireno.

Palavras-chave: Eucalipto; Pinus; Poliestireno; Reciclagem; Painéis de partículas



ABSTRACT

The growth of human consumption has caused countless inconveniences to the environment, including the inappropriate disposal of inorganic materials with a long useful life. The incorporation of potential residues in the manufacture of wood-based particleboards presents itself as an alternative to this problem. This research by objective to evaluate the effects of replacing partial of wood particles of expanded polystyrene particles bonded with mammon bean polyurethane. Wood particles (50% pine + 50% Eucalyptus) were replaced by 25 and 50% (by mass) of expanded polystyrene particles in order to improve the physical and mechanical properties of panels manufactured with 5% polyurethane adhesive based on mammon oil. Composites manufactured with 50% of polystyrene particles resulted in the best values of the evaluated physical and mechanical properties (ABNT NBR 14810 and EN 312), designating credibility to the production of panels with the partial replacement of wood particles by polystyrene particles.

Keywords: Eucalyptus; Pine; Polystyrene; Recycling; Particleboard

1 INTRODUÇÃO

A madeira é uma das riquezas naturais mais antigas existentes, com características e propriedades amplamente exploradas pela humanidade, sendo presente na cultura de povos primitivos e também de povos tecnicamente avançados (BELLO; CUNHA; CAMPOS; PEREIRA; SANTOS; MARTINS; BRITO FILHO, 2022; TASCIOGLUA; UMEMURAB; YOSHIMURAB, 2017). Segundo Yano e Silva (2020), o uso da madeira promoveu exploração das florestas naturais sem a conscientização de uma reposição visando futuras gerações que ainda utilizariam esse material. Uma das formas de reduzir a escassez de madeira, gerada pelo desmatamento de árvores nativas no Brasil, consiste em promover pesquisas e soluções que a nível ambiental visam fomentar programas de metas para a utilização de resíduos industriais e agrários (SHIROSAKI; ALMEIDA; PANZERA; CHRISTOFORO; LAHR, 2019; WINCKLER; CARVALHO FILHO; VASCONCELOS; MARTINES, 2022). Uma forma de aproveitar os materiais provenientes da produção florestal consiste no uso dos painéis aglomerados (mistura de resina e partículas de madeira conformada sob pressão e temperatura), proporcionando um destino mais nobre às madeiras de dimensões ou qualidades inferiores (GONÇALVES; PAES; LOPEZ; SEGUNDINHO; OLIVEIRA; FASSARELLA; BRITO; CHAVES; MARTINS, 2020).



Os adesivos (fase matriz) são componentes essenciais para a união das partículas na fabricação dos painéis. Porém, esses têm sido prejudiciais à saúde humana (MACEDO; FERRO; VARANDA; CAVALHEIRO; CHRISTOFORO; LAHR, 2016). Muitas pesquisas vêm sendo realizadas com o objetivo de desenvolver um aglutinante para substituir ou tentar diminuir o uso dos adesivos mais usuais, buscando uma solução que seja menos prejudicial à saúde e ao meio ambiente. Ainda hoje, por questões de custo, a uréia formaldeído (aglutinante sintético) é mundialmente utilizada na confecção de painéis à base de madeira, entretanto, com a comprovação de ser cancerígeno, o que motiva empresas na reformulação desse adesivo visando redução dos níveis de emissão do formaldeído (WONG; HENDRIKSE; SHERRELL; ELLIS, 2020; AKINYEMI; OLAMIDE; OLUWASOGO, 2019; SILVA; NASCIMENTO; OLIVEIRA; PANZERA; REZENDE; SILVA; AQUINO; LAHR; CHRISTOFO, 2021).

Outro adesivo comumente utilizado em pesquisas é a PU-mamona, que foi desenvolvida no Instituto de Química de São Carlos-SP (Brasil) da Universidade de São Paulo. O adesivo poliuretano à base do óleo de mamona é um produto nacional, sendo uma proposta de utilização de produtos biodegradáveis, não poluentes e derivados de biomassa (OLIVEIRAA; BISPOA; TREVISANA; GILIOA; RODRIGUESA; SILVA, 2021; MACEDO; FERRO; VARANDA; CAVALHEIRO; CHRISTOFORO; LAHR, 2016). Possui como matéria prima principal a mamona, planta da família *Euforbiáceas*, abundante no Brasil por ser uma planta nativa de regiões tropicais e subtropicais.

No contexto da preservação do meio ambiente e da sustentabilidade, a utilização de poliestireno pode representar uma alternativa viável no uso como aglutinante, pois é um polímero termoplástico usado em vários setores industriais, como produção de talheres, pratos, recipientes, copos (descartáveis ou não) e adesivos. Na construção civil, o PS é muito utilizado em forros e em paredes com a finalidade de isolamento térmica e acústica (LATTMANNA; LUNELLIA; SCREMINA; PADILHAA; TRINDADEA; ZAWADZKIA, 2019; KASEEM; HAMAD; GUN KO, 2017).



De acordo com Plastics Europe (2020), a produção mundial de plásticos em 2018 atingiu cerca de 359 milhões de toneladas e, em 2019, esse valor chegou a 368 milhões de toneladas, sendo que 28% desse total foi gerado no continente americano. Em relação à produção de resíduos plásticos, o Brasil é o quarto país do mundo que mais gera esses poluentes, sendo 11,3Mt ao ano, reciclando apenas 1,28% desses resíduos (WWF-Brasil, 2019). Com o crescente uso de plásticos e com o aumento do seu descarte na natureza, pesquisadores têm procurado incorporar os resíduos de plásticos na fabricação de materiais compósitos diversos (MASRI; OUNIS; SEDIRA; KACI; BENCHABANE, 2018). Um dos plásticos utilizados em pesquisas acerca de compósitos à base de madeira é o poliestireno expandido (EPS). O processo de expansão não afeta as propriedades físicas do material, apenas altera as células do polímero através de um agente expensor por um processo que se utiliza de um contato com vapor de água. Após o processo de expansão, esse material é armazenado para estabilização térmica e química.

Independentemente do baixo custo, boa inércia química e excelente capacidade de processo, os avanços tecnológicos impõem exigências adicionais aos materiais (PS e EPS). Para melhorar o desempenho, as indústrias desenvolvedoras de polímeros vêm demonstrando um esforço considerável para modificar suas propriedades químicas e físicas, como por exemplo, misturando (PS e EPS) com cargas inorgânicas na forma de nano partículas. Além disso, os compósitos PS/madeira têm atraído a atenção de pesquisadores nos últimos anos devido ao reforço potencial das fibras lignocelulósicas e a vantagem econômica de usá-los como cargas para termoplásticos, (KASEEM; HAMAD; DERI; GUN KO, 2017).

Pelo exposto, os resíduos de plástico representam uma fonte promissora de material bruto para a fabricação de materiais, pois esses são encontrados em grandes quantidades. Os compósitos polímeros termoplásticos oferecem várias vantagens, incluindo baixo custo, densidade e energia de produção, além de serem renováveis (MASRI; OUNIS; SEDIRA; KACI; BENCHABANE, 2018). Entretanto, cabe destacar a existência de poucas pesquisas que visam a incorporação de plástico, em especial, do PS na fabricação de painéis à base de partículas de madeira.



Dessa maneira, esta pesquisa objetivou avaliar a viabilidade (atendimento aos requisitos normativos) da substituição parcial da massa da mistura de partículas de madeira (50% de Pinus e 50% Eucalipto) por 25 e por 50% de partículas de EPS considerando-se apenas 5% de resina poliuretana à base do óleo de mamona (PUR), cabendo destacar que o teor de PUR usualmente empregado na fabricação de painéis de partículas de madeira em pesquisas correlatas é cerca de 10% ou mais (SILVA; NASCIMENTO; OLIVEIRA; PANZERA; REZENDE; SILVA; AQUINO; LAHR; CHRISTOFO, 2021; OLIVEIRAA; BISPOA; TREVISANA; GILIOA; RODRIGUESA; SILVA, 2021; FIORELLI; BUENO; CABRAL, 2019; MACEDO; FERRO; VARANDA; CAVALHEIRO; CHRISTOFORO; LAHR, 2016).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação das partículas de madeira

Para produção das partículas de madeira, foram adquiridas uma prancha de madeira Eucalipto (*Eucalipto* sp) e uma de Pinus (*Pinus* sp) nas dimensões nominais de 4 cm × 22 cm × 300 cm, ambas provenientes do comércio local da cidade Ilha Solteira (SP). As pranchas foram processadas em uma desgrossadeira para produção de cavacos e, em seguida, esses foram transformados em partículas menores através do moinho de facas, que posteriormente foram peneiradas (malhas de 2 a 10 mm) com um agitador elétrico. Os intervalos de malhas de 2 a 10 mm foram utilizados visando uma melhor distribuição granulométrica e conseqüentemente maior estabilidade dimensional dos painéis. Em seguida, ajustou-se o teor de umidade das partículas de madeira para a faixa de 10 a 12% (SILVA; NASCIMENTO; OLIVEIRA; PANZERA; REZENDE; SILVA; AQUINO; LAHR; CHRISTOFO, 2021).

O material EPS foi obtido por meio da recuperação de 3,5kg de copos descartáveis em mais de um ponto de coleta na cidade de Araçatuba (SP). Após a coleta dos copos, esses foram lavados com água e sabão e em seguida foram expostos ao sol para a devida secagem. O material no estado seco foi processado em moinho de bolas por um período de 1,5h para a redução nas dimensões das partículas do EPS (≈ 2 mm).



2.2 Preparação das partículas de PS

Os painéis foram confeccionados nas dimensões nominais de 35 cm × 35 cm × 1 cm e densidade nominal de 0,8 g/cm³. Considerando-se o volume e a densidade nominal, determinou-se a massa 980 gramas para cada painel, cabendo destacar que foram produzidos 10 painéis por tratamento, resultando em 20 painéis ao todo. Na Tabela 1, são apresentadas as composições que resultaram nos dois tratamentos delineados.

Tabela 1 – Quantidade sem massa (g) dos materiais constituintes dos painéis

Tratamento	Pinus (g)	Eucalipto (g)	Poliestireno (g)	PUR (g)	Total (g)
T1 (25% de EPS)	367,5	367,5	245,0	49,0	2.940
T2 (50% de EPS)	245,0	245,0	490,0	49,0	2.940

Fonte: Autores (2021)

2.3 Confeção dos Painéis

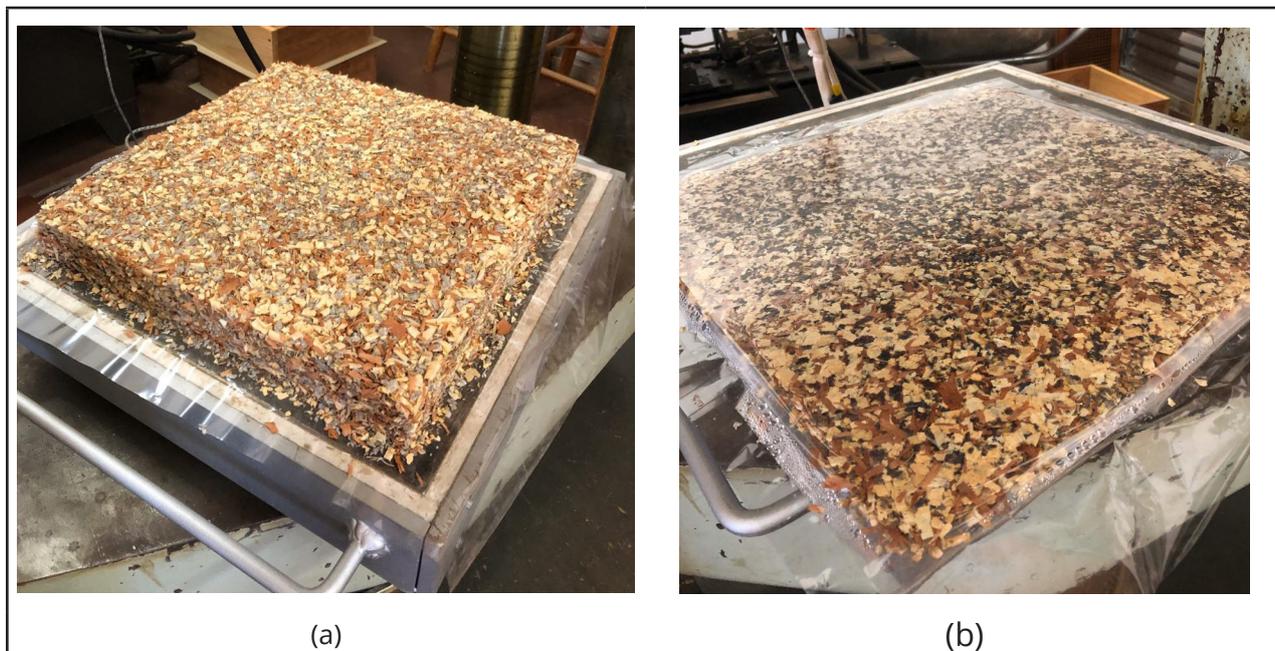
Para homogeneização do material (partículas de madeira + EPS + PUR), inicialmente realizou-se a mistura manual do PUR adicionando-se o polioli e em seguida a massa resultante foi homogeneizada em um tambor giratório por um período de 5 minutos. Esse mesmo procedimento foi realizado com a inclusão posterior do pré-polímero (OLIVEIRA; BISPOA; TREVISANA; GILIOA; RODRIGUESA; SILVA, 2021). Em seguida, o material misturado foi depositado em uma formadora de colchão de partículas; na sequência o colchão de partículas (Figura 1a) foi levado ao prato da prensa com controle de temperatura e pressão para produção dos painéis aglomerados (Figura 1b).

A prensagem foi realizada com uma força de 60 tf (0,60 kN), o que resultou em uma pressão de 50kgf/cm² (5 MPa) e a temperatura de 110°C, durante 10 minutos. A pressão de 5 MPa foi aplicada inicialmente por 5 minutos. Atingido o tempo de 5 minutos, tal pressão foi removida dos painéis, ficando esses isentos de carga por 30 segundos, o que possibilitou a liberação dos gases e também a umidade retida,



evitando-se assim o surgimento de bolhas. Após os 30 segundos, a pressão de 5MPa foi novamente aplicada por um tempo de 5 minutos (OLIVEIRA; BISPOA; TREVISANA; GILIOA; RODRIGUESA; SILVA, 2021), finalizando o ciclo de prensagem.

Figura 1 – Colchão de partículas (a) e painel pós prensagem (b)



Fonte: Autores (2021)

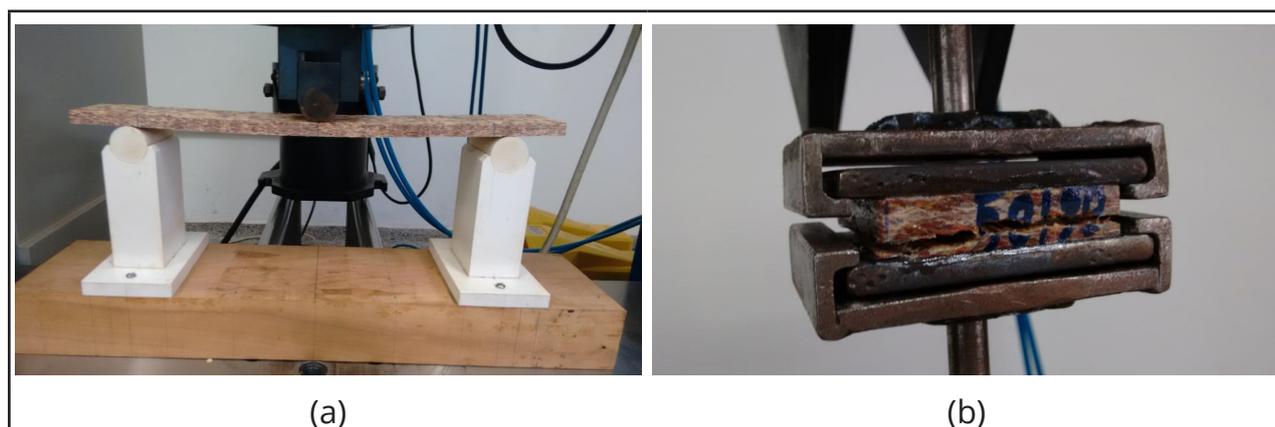
Diferentemente do trabalho de Masri, Ounis, Sedira, Kaci e Benchabane (2018), não foi necessário efetuar a diluição das partículas de EPS para a sua efetiva aderência às madeiras e também ao adesivo PUR, pois a aplicação da temperatura de 110°C, considerada na fabricação dos painéis, permitiu atingir a transição vítrea do EPS, que consiste em uma característica muito presente também nos termoplásticos. Em um polímero, ao ser atingida a sua temperatura de transição, o que caracteriza o fenômeno da transição vítrea, as cadeias moleculares aumentam de mobilidade e o volume do polímero também aumenta continuamente, transformando esse material de um estado mais rígido para um estado mais flexível (SAMITH; RAMOS-MOORE, 2015; MICHEL; FERRIER, 2020; SAMITH; RUÍZ-FERNÁNDEZ; BAHAMONDES-PADILLA; MUÑOZ-GACITÚA; RAMOS-MOORE; DAVIS, 2017). A temperatura de transição vítrea, conforme Callister Júnior e Rethwisch (2020) para o PS, encontra-se na faixa de 100°C, cabendo destacar que a temperatura de prensagem utilizada para a fabricação dos painéis da presente pesquisa foi de 110°C.



2.4 Ensaios Físicos e Mecânicos

Os ensaios para a determinação da densidade aparente (ρ), do teor de umidade (TU), do inchamento em espessura (IE 24h) após 24 horas de imersão em água, da resistência à tração perpendicular (TP) e do módulo de elasticidade (MOE) e do módulo de ruptura (MOR), foram realizados com base nas premissas e nos métodos de cálculo da norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (2018), onde foram utilizados 10 corpos de prova para cada tratamento (1 corpo de prova por painel produzido). Na Figura 2, são ilustrados os ensaios de flexão estática (Figura 2a) e de tração perpendicular (Figura 2b).

Figura 2 – Ensaio de tração perpendicular



Fonte: Autores (2021)

O teste de comparações múltiplas de Tukey, ao nível de 5% de significância, foi utilizado para avaliar a influência da substituição de 25 e 50% da massa de partículas de madeira (mistura de 50% Pinus com 50% Eucalipto) por partículas de poliestireno. Do teste de Tukey, A denota o tratamento associado ao maior valor médio da propriedade física ou mecânica avaliada, B o de segundo maior valor médio e letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si.

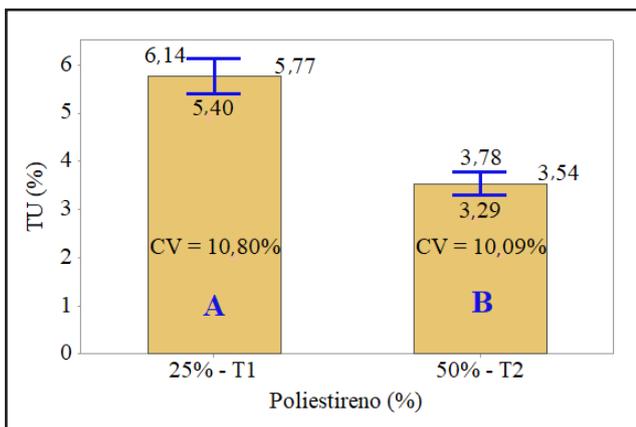


3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Teor de Umidade

Os valores obtidos com o ensaio de Teor de Umidade (TU) foram caracterizados conforme a Figura 3, onde também são apresentados os valores médios, os coeficientes de variação (CV), os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade) e os resultados do teste de contraste de médias Tukey (5% de significância) dos painéis fabricados de acordo com os dois tratamentos (T1, T2) experimentais delineados. O processo utilizado na presente pesquisa consistiu em aquecer o poliestireno acima da temperatura de transição vítrea no momento de prensagem para a sua aglutinação com a madeira. Mesmo com processos diferentes, os resultados obtidos do teor de umidade (3,54 e 5,77%) dos painéis produzidos no presente trabalho.

Figura 3 – Resultados do teor de umidade dos painéis fabricados com base nos dois tratamentos experimentais



Fonte: Autores (2021)

Valores semelhantes foram dispostos por Lopez, Paes, Gustave, Gonçalves, Méndez e Nantet (2020), este utiliza-se da espécie de madeira *Cedrela odorata*, que foi processada em moinho tipo Willey, para obter partículas (teor de umidade entre 3 e 4%) em dimensões entre 0,25mm e 0,50mm. Os polímeros plásticos utilizados na confecção dos compósitos foram o polietileno tereftalato termoplástico (PET),

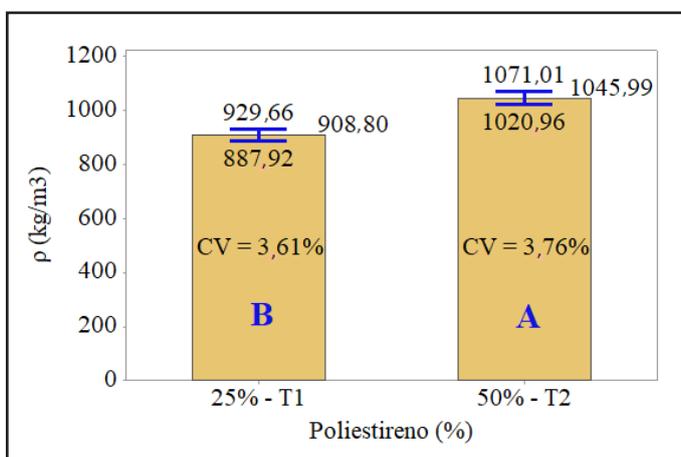


o polietileno de alta densidade (PEAD) e o polipropileno (PP), ambos triturados no moinho tipo Willey, resultando em partículas em dimensões entre 3 e 7mm. Também foi utilizado carbonato de cálcio (CaCO_3). Os compósitos foram confeccionados em extrusora à temperatura de 170°C . Os valores do TU de Lopez, Paes, Gustave, Gonçalves, Méndez e Nantet (2020) variaram entre 2,00 e 8,00%, próximo ao que foi mencionado nesta pesquisa (3,54 e 5,77%).

3.2 Densidade

Conforme a Figura 4, são apresentados os valores médios, os coeficientes de variação (CV), os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade) e os resultados do teste de contraste de médias Tukey (5% de significância) da densidade dos painéis fabricados de acordo com os dois tratamentos (T1, T2) experimentais delineados. Os valores da densidade dos painéis fabricados de acordo com os tratamentos T1 e T2 foram superiores ao valor máximo (800 kg/cm^3) considerado pela norma brasileira ABNT NBR 14810 - 2 (2018) para painéis aglomerados. Conforme o teste de Tukey, é possível observar na Figura 4 que a densidade dos painéis fabricados com 50% de EPS apresentou um aumento, explicado por efeito da transição vítrea (amolecimento do poliestireno), que possibilitou maior densificação (preenchimento de vazios) dos compósitos.

Figura 4 – Resultados da densidade dos painéis fabricados com base nos dois tratamentos experimentais



Fonte: Autores (2021)



Ao comparar os valores médios da densidade dos painéis fabricados com 25% de EPS com os da literatura, é possível notar que apenas os valores das densidades dos painéis fabricados por Macedo, Ferro, Varanda, Cavalheiro, Christoforo e Lahr (2016) foram superiores, sendo que no estudo referido foi-se utilizado o adesivo PUR e tratamento térmico (assim como considerado na presente pesquisa) dos polímeros plásticos (BOPP). Já os painéis fabricados com 50% de EPS resultaram em valores médios da densidade apenas inferior à taxa de Lopez, Paes, Gustave, Gonçalves, Méndez e Nantet (2020), em que os valores maiores ficaram a cima dos resultados obtidos nesta pesquisa e pela literatura correlata.

Ao observarmos os ensaios de Macedo, Ferro, Varanda, Cavalheiro, Christoforo e Lahr (2016), estes que produziram painéis aglomerados com a substituição de 20% em massa de partículas de madeira (misturas de Pinus e de Eucalipto) por polipropileno, em que apenas propriedades físicas foram avaliadas. Os autores consideraram as composições: 100% de Eucalipto; 50% de Pinus e 50% de Eucalipto e 100% de Pinus e com o uso ou não de produto impermeabilizante, cabendo destacar que a PUR foi utilizada para aglutinar as partículas (proporção de 12%). Os painéis foram prensados a uma temperatura de 150°C e carga de 4.5 MPa.

Se observarmos o modo de preparo dos ensaios de Masri, Ounis, Sedira, Kaci e Benchabane (2018), ocorre a diluição do EPS em solvente. Esse processo foi realizado para diminuir as dimensões das partículas do EPS e liberar os gases presentes, dessa forma, com o intuito de ficar apenas o PS. Após é misturado o PS nas folhas de Tamareira. O intuito dessa pesquisa consistiu no desenvolvimento de compósitos com os resíduos de Tamareira e a matriz polimérica. A proporção mássica da matriz e das partículas de Tamareira foi de: 30/70, 25/75 e 20/80%. Para moldagem dos corpos de prova, os materiais foram depositados em formas metálicas com prensagem sem calor, com pressão de 10 bars (1 MPa) por 10 minutos. Além do estudo do polímero como aglutinante, os autores também realizaram ensaios para a análise da granulometria da folha de Tamareira (0.1 - 0.315; 0.315 - 0.5; 0.5 - 1 mm).



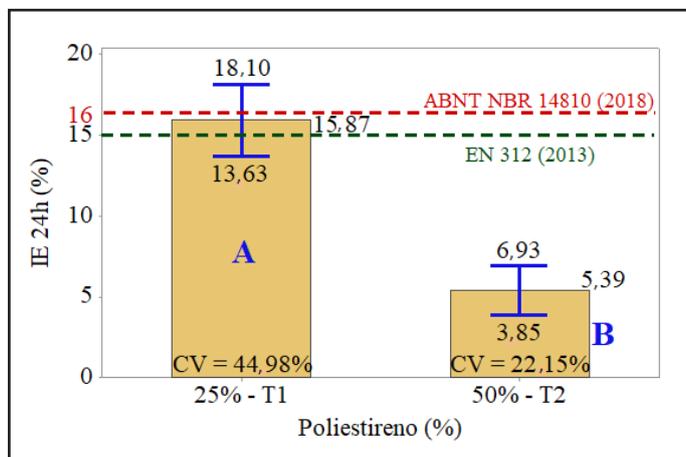
Referente às referências anteriores, Silva, Nascimento, Oliveira, Panzera, Rezende, Silva, Aquino, Lahr e Christofó (2021), por sua vez, desenvolveram uma pesquisa com painéis aglomerados feitos de resíduos de madeira das espécies de Pinus e Eucaliptos, utilizando os polímeros (adesivos ou agentes aglomerantes): uréia formaldeído (UF) e PUR, sendo o adesivo PUR proveniente de dois fabricantes distintos (Kehl e Imperveg), e duas faixas de densidade (média e alta). Para a produção dos aglomerados com o uso do polímero PUR, o teor de umidade das partículas de madeira foi próximo de 12%. O uso do adesivo PUR foi considerado na proporção de 1:1, sendo utilizados 15% do PUR em relação à massa de partículas de madeira. A mistura das partículas com o respectivo polímero por 5 minutos foi considerada no processo de moldagem dos painéis. Na sequência, realizou-se uma pré-prensagem com pressão de 0.013 MPa para formar o colchão de partículas, em seguida a prensagem de 3.5 MPa de intensidade e a temperatura de 100°C por 10 minutos foi considerada na fabricação desses dos compósitos.

3.3 Inchamento em espessura

Na Figura 5, são apresentados os valores médios, os coeficientes de variação (CV), os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade) e os resultados do teste de contraste de médias Tukey (5% de significância) do inchamento em espessura dos painéis fabricados de acordo com os dois tratamentos (T1, T2) experimentais delineados. Esses resultados indicam que a adição de EPS aperfeiçoou a resistência ao inchamento dos painéis, pois verificou-se inclusive que os painéis do tratamento 1 (25% de poliestireno) apresentaram valores conforme as exigências da norma ABNT NBR 14810-2 (2018) e também da norma europeia EN 312 (2013) para painéis do tipo P4 (Painéis estruturais para uso em condições secas). Os resultados da IE24h do tratamento 2 (50% de poliestireno) estiveram de acordo com os valores exigidos pelas normas 14810-2 (2018) e EN 312 (2013), sendo classificados como painéis do tipo P6 (Requisitos para painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes secos), que definem o IE24h = 16% para espessuras entre 6 e 10 mm.



Figura 5 – Resultados do inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água dos painéis fabricados com base nos dois tratamentos experimentais



Fonte: Autores (2021)

Os compósitos desenvolvidos no trabalho de Lopez, Paes, Gustave, Gonçalves, Méndez e Nantet (2020) apresentaram os menores valores (1,00% a 6,00%) do inchamento em espessura com relação aos compósitos desenvolvidos pelos demais pesquisadores e também inferiores aos valores do IE24h obtidos dos resultados da presente pesquisa. Destaca-se as diferenças na produção dos painéis desenvolvidos pelo autores em relação aos painéis fabricados de acordo com os tratamentos T1 e T2, que resultaram em valores significativamente inferiores do módulo de elasticidade (MOE) e da resistência (MOR) na flexão estática quando comparados aos valores dessas propriedades (Figuras 7 e 8) dos painéis aqui desenvolvidos (T1 e T2).

Conforme as demais literaturas obtidas por Silva, Nascimento, Oliveira, Panzera, Rezende, Silva, Aquino, Lahr e Christofo (2021) - Pinus/PU e Eucalipto/PU e Macedo, Ferro, Varanda, Cavalheiro, Christoforo e Lahr (2016) – BOPP, (9,28% a 13,93%; 5,50% a 7,85%; 2,97% a 13,37%, respectivamente) ambos têm resultados inferiores aos obtidos nas pesquisas de 50% de EPS obtido por esta.

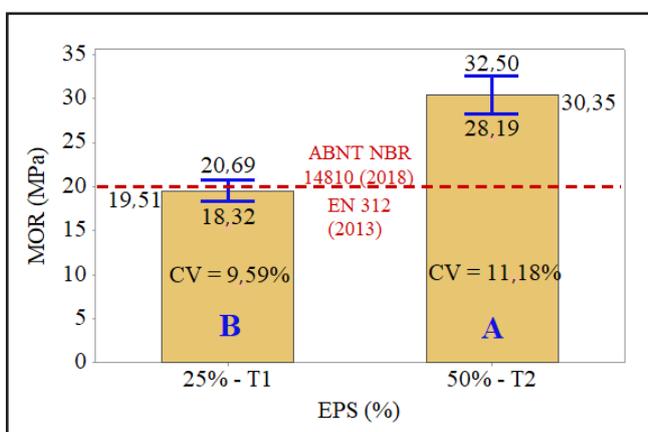


3.4 Módulo de elasticidade e resistência na flexão

O aumento do teor de partículas de poliestireno em substituição às partículas de madeira de Pinus e de Eucalipto promoveu aumento nos valores médios do MOE e do MOR, resultado esse em conformidade com o aumento da densificação e também no menor teor de umidade e inchamento em espessura. Nas Figuras 6 e 7, são apresentados os valores médios, os coeficientes de variação (CV), os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade) e os resultados do teste de contraste de médias Tukey (5% de significância) do MOR e do MOE dos painéis fabricados de acordo com os dois tratamentos (T1, T2) experimentais delineados.

Para que possamos analisar as referências no ensaio de MOR e MOE, é importante analisarmos as diferenças. Kaseem, Hamad, Deri e Gun Ko (2017) realizaram uma pesquisa com o objetivo da incorporação de PS como matriz em compósitos de fibras de madeira com a intenção de analisar o fluxo capilar e também as propriedades mecânicas dos mesmos, elevando a temperatura do PS à temperatura de transição vítrea. Foram utilizadas partículas de madeira com espessuras nas dimensões de 100 e 600µm. Essas partículas foram misturadas (misturador aberto de dois rolos) com pallets de PS a uma temperatura de 180°C e velocidade de 20rpm por 20 minutos.

Figura 6 – Resultados do módulo de resistência na flexão estática dos painéis fabricados com base nos dois tratamentos experimentais

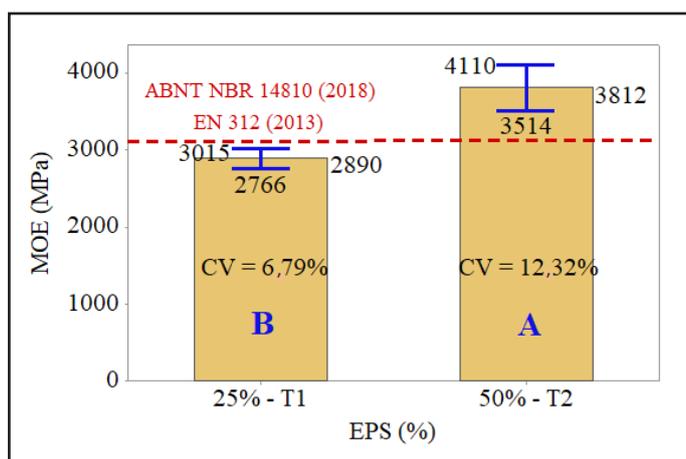


Fonte: Autores (2021)



Com base nos resultados do MOE, os compósitos feitos com 25% de poliestireno são enquadrados pelas normas ABNT NBR 14810-2 (2018) e EN 312 (2013) como sendo painéis do tipo P5 (18000 a 2550 MPa - painéis estruturais para uso em condições úmidas, espessura entre 6 e 10 mm). Já para o tratamento T2, o valor médio do MOE se apresenta acima do exigido (2000 e 3150 MPa) para painéis do tipo P6 (painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes secos) com 6 a 10mm, o que reforça a potencialidade dos painéis fabricados, uma vez que a quantidade (5%) de adesivo PUR utilizado na fabricação dos painéis da presente pesquisa é menor do que o teor desse de adesivo (10% ou mais) considerado em pesquisas correlatas. Pode-se basear o resultado de MOE pelos encontrados na literatura: Lopez, Paes, Gustave, Gonçalves, Méndez e Nantet (2020) – WPC 2.120 MPa à 4.050 MPa, Silva, Nascimento, Oliveira, Panzera, Rezende, Silva, Aquino, Lahr e Christoforo (2021) – Pinus/PUR 1.369 MPa à 1.943 MPa e Eucalipto/PUR 1.796 MPa à 2.165 MPa.

Figura 7 – Resultados do módulo de elasticidade na flexão estática dos painéis fabricados com base nos dois tratamentos experimentais



Fonte: Autores (2021)

As pesquisas de compósitos que não utilizaram a termodinâmica (MASRI; OUNIS; SEDIRA; KACI; BENCHABANE, 2018) obtiveram os piores resultados de resistência à flexão estática (0,43 MPa a 2,96 MPa e 120 MPa a 760 MPa, respectivamente). Kaseem,



Hamad, Deri e Gun Ko (2017) produziram compósitos em sua pesquisa, porém utilizaram a termodinâmica, e é possível observar que os valores foram os mais elevados em MOR (61,64 MPa e 67,50 MPa), mesmo utilizando um agente de acoplamento. Conforme os resultados obtidos pelas referências seguidas, obtiveram-se: Lopez, Paes, Gustave, Gonçalves, Méndez e Nantet (2020) – WPC 5,00 MPa à 24,00 MPa, Silva, Nascimento, Oliveira, Panzera, Rezende, Silva, Aquino, Lahr e Christofo (2021) – Pinus/PUR 16,67 MPa à 22,17 MPa e Eucalipto/PUR 18,50 MPa à 24,17 MPa. Todos obtiveram valores acima referentes aos compósitos prensados a frio. Este trabalho produziu painéis aglomerados de madeira prensados com o uso da termodinâmica, os valores ficaram abaixo apenas dos observados por Kaseem, Hamad, Deri e Gun Ko (2017). Apenas o MOE esteve acima de todos os valores da referência tanto para T1 como para T2.

3.5 Tração perpendicular

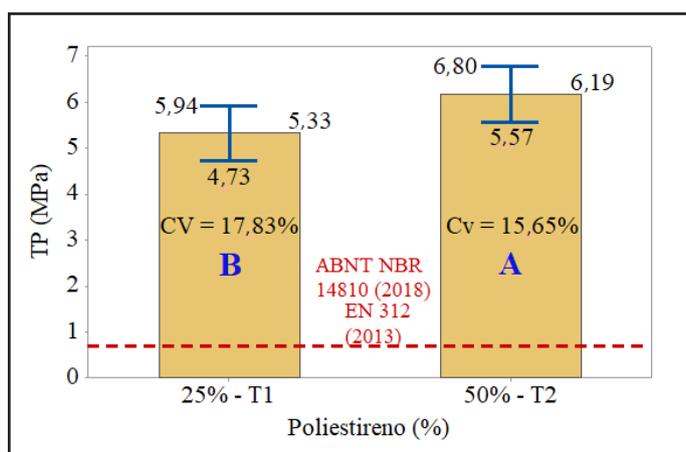
Do teste de Tukey, o uso de 50% de EPS promoveu aumentos nos valores da Tração Perpendicular (TP) dos painéis em relação à substituição de 25% da mistura de partículas de madeira por partículas do referido plástico. As resistências mecânicas são proporcionais às densidades, logo uma densidade maior tende a apresentar uma maior resistência mecânica, assim como apontado na pesquisa desenvolvida por Iwakiri, Keinert Júnior, Mendes, Albuquerque e Latorraca (2005). Na Figura 8, são apresentados os valores médios, os coeficientes de variação (CV), os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade) e os resultados do teste de contraste de médias Tukey (5% de significância) da resistência a TP dos painéis fabricados de acordo com os dois tratamentos (T1, T2) experimentais delineados.

A matriz polimérica plástica tem comprovado pela literatura de referência (LOPEZ; PAES; GUSTAVE; GONÇALVES; MÉNDEZ; NANTET, 2020; (MASRI; OUNIS; SEDIRA; KACI; BENCHABANE, 2018; KASEEM; HAMAD; DERI; GUN KO, 2017) que além de criar uma boa camada de resistência à umidade ou infiltração de água, também tem fornecido bons resultados de resistência mecânica com o aumento nas suas



proporções, assim como notado na presente pesquisa (Figura 8). O aumento do teor de partículas de EPS, assim como notado para o MOE e MOR, também promoveu aumentos nos valores da TP.

Figura 8 – Resultados da resistência à tração perpendicular dos painéis fabricados com base nos dois tratamentos experimentais



Fonte: Autores (2021)

Com base nos valores médios obtidos da resistência à tração perpendicular dos painéis fabricados com 25% (T1 – 5,33 MPa) e 50% (T2 – 6,19 MPa) de EPS, constata-se que ambos podem ser classificados como sendo do tipo P6 (painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes secos) segundo as normas ABNT NBR 14810-2 (2018) e EN 312 (2013). Na Tabela 6, são apresentados os valores médios da resistência à tração perpendicular dos compósitos resina-madeira fabricados com a incorporação de plástico.

Ao observarmos os resultados encontrados por Lopez, Paes, Gustave, Gonçalves, Méndez e Nantet (2020) em seu estudo, a resistência à TP varia entre 9.00 MPa e 31.00 MPa, os melhores resultados são aqueles que possuem maior quantidade de madeira e mais volume de plásticos. Silva, Nascimento, Oliveira, Panzera, Rezende, Silva, Aquino, Lahr e Christofo (2021) obtiveram bons resultados (Pinus/PUR 1,51MPa à 2,18 MPa e Eucalipto/PUR 1,61 MPa à 2,38 MPa) com o uso da resina poliuretano de mamona, porém ao ser acrescentado essa resina com o poliestireno dos tratamentos (T1 eT2) só fortalecemos a qualidade do uso dos plásticos em painéis aglomerados de madeira.



4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, o aumento no teor de partículas de poliestireno de 25 para 50% em substituição às partículas de Pinus e de Eucalipto resultou:

- Em aumento ($\approx 12\%$) na densidade dos painéis (de 930 para 1046 kg/m³);
- Em redução ($\approx 61\%$) no TU (de 5.77 para 3.54%) e também no IE24h de imersão em água (de 15.87 para 5.39%);
- Em aumentos nos valores do MOE (de 2890 para 3812 MPa - $\approx 32\%$) e também nos valores do MOR (20.69 para 30.35 MPa - $\approx 47\%$) na flexão estática;
- Em aumentos ($\approx 16\%$) nos valores da resistência a TP (de 5.33 para 6.19 MPa).

Com base nos requisitos de desempenho estabelecidos pelas normas ABNT NBR 14810-2 (2018) e EN 312 (2013), os painéis fabricados com 25% de partículas de poliestireno foram classificados como P5 (painéis estruturais para uso em condições úmidas), sendo categorizados como P6 (painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em ambientes secos) os painéis produzidos com 50% de partículas de poliestireno. Com relação à resistência a TP, ambos os painéis podem ser classificados como P6.

Pelo exposto, mesmo sendo os painéis fabricados com apenas 5% de adesivo PUR, constata-se ser viável a produção desses com a inclusão de 50% partículas de EPS, uma vez que os requisitos de desempenho dos documentos normativos considerados foram todos atendidos.

REFERÊNCIAS

AKINYEMI, B. A.; OLAMIDE, O.; OLUWASOGO, D. Formaldehyde free particleboards from wood chip wastes using glutaraldehyde modified cassava starch as binder. **Case Studies in Construction Materials**, [s.l], n. 11, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00236>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-1: Painéis de partículas de média densidade - Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-2: Painéis de partículas de média densidade - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018b.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9939: Agregados - Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

BATTISTELLE, R.; LAHR, F. A. R.; VARUM, H. S.; VALARELLI, I. D. Caracterização física das chapas de partículas com os rejeitos oriundos da cana-de-açúcar e das folhas de bambu. In. XII Encontro Brasileiro em Madeira e Estrutura de Madeira, Lavras, Minas Gerais. **Anais...**, jul. 2010. Disponível em: https://core.ac.uk/display/15566987?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1. Acesso em: 06 abr. 2021.

BELLO, O. C.; CUNHA, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; PEREIRA, M. G.; SANTOS, L. A. C.; MARTINS, T. S.; de BRITO FILHO, E. G. Produção e decomposição de serapilheira em árvores de reflorestamento e floresta nativa no sul do Amazonas. **Ciência Florestal**, [s.l.], v. 32, n. 4, p. 1854-1875, out/dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509843526>

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, LTC, Rio de Janeiro, 2020.

FIORELLI, J.; BUENO, S. B.; CABRAL, M. R. Assessment of multilayer particleboards produced with green coconut and sugarcane bagasse fibers. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 205, p. 1 – 9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.024>

GONÇALVES, F. G.; PAES, J. B.; LOPEZ, Y. M.; SEGUNDINHO, P. G. A.; OLIVEIRA, R. G. E.; FASSARELLA, M. V.; BRITO, A. S.; CHAVES, I. L. S.; MARTINS, R. S. Resistance of particleboards produced with ligno-cellulosic agro-industrial wastes to fungi and termites. **International Biodeterioration and Biodegradation**, [s.l.], n. 157, dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105159>

IWAKIRI, S.; KEINERT JUNIOR, S.; MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. E. C. de; LATORRACA, J. V. F. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

KASEEM M.; HAMAD K.; DERI F.; GUN KO Y. Effect of Wood Fibers on the Rheological and Mechanical Properties of Polystyrene/Wood Composites. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, [s.l.], v.37, n.4, p. 251-260, feb. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773813.2016.1272127>

LATTMANNA, B. H.; LUNELLIA, C. E.; SCREMINA, D. M.; PADILHAA, B.; TRINDADEA, E. M.; ZAWADZKIA, S. F. Synthesis and Characterization of Modified Polystyrene with Oleic Acid and an Allyl Ester Derivative. **Materials Research**, [s.l.], v.22, jul. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0905>

LOPEZ, Y. M.; PAES, J. B.; GUSTAVE, D.; GONÇALVES, F. G.; MÉNDEZ, F. C.; NANTET, A. C. T. Production of wood-plastic composites using cedrela odorata waste and recycled thermoplastics mixture from post-consumer products – A sustainable approach for cleaner production in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v.244, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118723>

MACEDO L. B. de; FERRO F. S.; VARANDA L. D.; CAVALHEIRO R. S.; CHRISTOFORO A. L.; LAHR F. A. R. Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v.19, n.7, p. 674-679, jul. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p674-679>



MASRI T.; OUNIS H.; SEDIRA L.; KACI A.; BENCHABANE A. Characterization of new composite material based on date palm leaf lets and expanded polystyrene wastes. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v.164, 410-418, Mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.197>

MICHEL, M.; FERRIER, E. Effect of curing temperature conditions on glass transition temperature values of epoxy polymer used for wet lay-up applications. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v.231, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117206>

NETO, M. M. C. **Avaliação da degradação do poliestireno expandido (geofoam) por meio de ensaios de laboratório**. 2019. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, 2019. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/191150/carneironeto_mm_me_bauru.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 05 nov. 2021.

OLIVEIRAA, R. C.; BISPOA, R. A.; TREVISANA, M. F.; GILIOA, C. G.; RODRIGUESA, F. R.; SILVA, S. A. M. Influence of Leather Fiber on Modulus of Elasticity in Bending Test and of Bend Strength of Particleboards. **Materials Research**, [s.l.], v.24, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0287>

PLASTICS EUROPE, The Facts 2020. Belgium, 2020. Disponível em: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>. Acesso em: 04 abr. 2021.

SILVA, V. U.; NASCIMENTO, M. F.; OLIVEIRA, P. R.; PANZERA, T. H.; REZENDE, M. O.; SILVA, D. A. L.; AQUINO, V. B. M.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFO, A. L. Circular vs. Linear economy of building materials: A case study for particleboards made of recycled wood and biopolymer vs. **Conventional particleboards**. *Construction and Building Materials*, [s.l.], n. 285, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122906>

SAMITH, V. D.; RÚÍZ-FERNÁNDEZ, A. R.; BAHAMONDES-PADILLA, V. E.; MUÑOZ-GACITÚA, D.; RAMOS-MOORE, E.; DAVIS, S. Microcanonical molecular dynamics simulation of the vitreous phase transition of poly (binaphthylphosphazene). *Journal of Non-Crystalline Solids*, [s.l.], v.460, p. 90-97, jan. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.023>

SAMITH, V. D.; RAMOS-MOORE, E. Study of glass transition in functionalized polys (itaconate) by differential scanning calorimetry, Raman spectroscopy and thermogravimetric analysis. **Journal of Non-Crystalline Solids**, [s.l.], v.408, p. 37-42, jan. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.10.009>

SHIROSAKI, R. K.; ALMEIDA, T. H. de; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Caracterização de painéis de partículas de média densidade feitos com resina poliuretana mono componente à base de mamona. **Ambiente Construído**, [s.l.], v.19, n.1, p. 37-43, Jan/mar. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p674-679>

TASCIOGLUA, C.; UMEMURAB, K.; YOSHIMURAB, T. Seventh-year durability evaluation of zinc borate incorporated wood-plastic composites and particleboard. **Composites Part B**, [s.l.], Part B 137, p. 123-128, nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.011>

WINCKLER, J. R.; CARVALHO FILHO, M. A. S.; de VASCONCELOS, E. C.; MARTINES, M. P. Cinzas



de Pinus spp. e o mecanismo de desenvolvimento limpo: reduções certificadas de emissões e créditos de carbono. **Ciência Florestal**, [s.l.], v. 32, n. 4, p. 2219-2243, out/dez. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509867679>

WONG, M. C.; HENDRIKSE, S. I. S.; SHERRELL, P. C.; ELLIS, A. V. Grapevine waste in sustainable hybrid particleboard production. **Waste Management**, [s.l.], n. 118, p. 501-509, set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.007>

WWF-BRASIL, Relatório Anual, In: **Fundo mundial para a natureza**, 2019. Disponível em: Relatório Anual | WWF Brasil. Acesso em: 17 abr. 2021.

YANO, B. B. R.; SILVA, S. A. M. da. Produção e avaliação físico-mecânica de painéis de média e alta densidade com resíduos. **Ambiente Construído**, [s.l.], v.20, n.4, p. 329-345, out/dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400476>

Contribuição de Autoria

1 Felipe Reis Rodrigues

Mestre em Engenharia Civil, Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0003-3895-7169> • rodrigues.eng.ata@hotmail.com

Contribuição: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Escrita – revisão e edição

2 Pedro Henrique da Silva Cazella

Mestre em Engenharia Civil, Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0002-9323-808X> • p.cazella@unesp.br

Contribuição: Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Escrita -revisão e edição

3 Matheus Viana de Souza

Mestre em Engenharia Civil, Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0003-1867-3249> • mv.souza@unesp.br

Contribuição: Conceitualização, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Escrita -revisão e edição

4 Rodrigo Andraus Bispo

Mestre em Engenharia Civil, Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0001-8320-6490> • rodrigo-andraus.bispo@unesp.br

Contribuição: Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original



5 Letícia Freitas Assis

Mestre em Engenharia Civil, Pesquisadora

<https://orcid.org/0000-0001-9956-3978> • lf.assis@unesp.br

Contribuição: Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original

6 Caroline Graminha Gilio

Mestre em Engenharia Civil, Pesquisadora

<https://orcid.org/0000-0002-4221-6331> • carolinegraminhagilio@gmail.com

Contribuição: Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original

7 André Luis Christoforo

Doutor em Engenharia Civil, Professor, Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0002-4066-080X> • christoforoal@yahoo.com.br

Contribuição: Curadoria de dados, Análise de dados, Administração do projeto, Desenvolvimento, Design da apresentação de dados

8 Sérgio Augusto Mello da Silva

Doutor em Engenharia Agrícola, Mestre em Tecnologia do Ambiente Construído, Graduação em Arquitetura e Urbanismo

<https://orcid.org/0000-0001-6114-0283> • sergio.mello@unesp.br

Contribuição: Curadoria de dados, Análise de dados, Administração do projeto, Redação do manuscrito final

Como citar este artigo

Rodrigues, F. R.; Cazella, P. H. S.; Souza, M. V.; Bispo, R. A.; Assis, L. F.; Gilio, C. G.; Christoforo, A.L.; Silva, S. A. M. Produção de painéis de partículas de madeira com inclusão de poliestireno. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 33, n. 2, e68402, p. 1-22, 2023. DOI 10.5902/1980509868402. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509868402>.