

Produção de painéis aglomerados empregando seringueira, teca e poliuretano derivado de óleo de mamona

Caroline Graminha Gilio ^[1], Rodrigo Andraus Bispo ^[2], Mariana Ferreira Trevisan ^[3], Felipe Reis Rodrigues ^[4], Luiz Carlos Frutuoso Amado Junior ^[5], Sérgio Augusto Mello da Silva ^[6].

[1] carolinegraminhagilio@gmail.com. [2] rodrigo-andraus.bispo@unesp.br. [3] maritrevisaan2@gmail.com.

[4] rodrigues.eng.ata@hotmail.com. [5] luizamadojunior@hotmail.com. [6] sergio.mello@unesp.br. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Ilha Solteira (FEIS-UNESP)/Departamento de Engenharia Civil.

RESUMO

Atualmente a utilização de madeiras de florestas plantadas para fabricação de derivados vem crescendo, sendo as espécies *Hevea brasiliensis* e *Tectona grandis* alternativas devido à abrangência de seus reflorestamentos no Brasil. Considerando seus ciclos de produção em torno de 30 anos, essas espécies podem ser alternativas de matéria-prima para fabricação de derivados de madeira. O objetivo desse trabalho foi produzir painéis aglomerados utilizando as referidas espécies, aglutinando-as com adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona. Os painéis foram avaliados de acordo com suas propriedades físico-mecânicas, com base na ABNT NBR 14810 - 1 e 2 e demais literaturas nacionais e internacionais. Foram considerados dois tratamentos empregando-se 10% e 5% de adesivo, ambos com mistura de 30% de seringueira e 70% de teca. Para cada tratamento foram produzidos três painéis e avaliados suas densidades, teor de umidade, inchamento em espessura, módulo de resistência à flexão estática, módulo de elasticidade e resistência à tração perpendicular. Os resultados obtidos evidenciaram potencialidades de uso das duas espécies de madeira para a produção de painéis aglomerados. Os painéis produzidos com 10% de adesivo apresentaram melhores resultados em comparação aos painéis com 5%, entretanto, o emprego de 5% de adesivo atende às exigências normativas brasileiras.

Palavras-chave: Poliuretano. Aglomerados. Seringueira. Teca.

ABSTRACT

*Currently, the use of wood from planted forests to produce derived materials has been growing, being the species *Hevea brasiliensis* and *Tectona grandis* alternatives due to the coverage of their reforestation in Brazil. Considering their production cycles of around 30 years, these species can be used as good alternatives of raw material for wood products manufacturing. The aim of this study was to produce particleboards using these species and bonding them with castor oil polyurethane adhesive. The panels were evaluated according to their physical and mechanical properties, based on ABNT NBR 14810 - 1 and 2 and other national and international literature. Two treatments were considered using 10% and 5% of adhesive, both with a mixture of 30% Rubber and 70% Teak. For each treatment, three boards were produced, and their following physical and mechanical parameters were analyzed: density, moisture content, thickness swelling, modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and strength in tension perpendicular to face were evaluated. The obtained results showed potentialities of use of both wood species to produce particleboards. It is noteworthy that panels produced with 10% adhesive presented better results compared to panels produced with 5%, however, the use of 5% adhesive meets the requirements of the Brazilian standard.*

Keywords: Polyurethane. Particleboards. Rubber tree. Teak.

1 Introdução

A Construção Civil enfrenta como principal problema a poluição e a geração de resíduos. Por esse motivo, são importantes as pesquisas no campo de materiais e métodos construtivos da Engenharia Civil que buscam por alternativas para diminuir a poluição e reutilizar materiais que são descartados.

O setor florestal tem importância mundial como fornecedor de energia ou matéria-prima para a indústria da construção civil. No Brasil, por se tratar de um país que está entre os principais detentores de recursos florestais, a importância florestal é imensurável (SNIF, 2018). A madeira é uma excelente alternativa de material para desenvolvimento de métodos construtivos e que vem sendo amplamente utilizado na construção civil em todo o mundo, porém, sua exploração predatória tem gerado escassez em âmbito nacional e internacional, propiciando limitações do uso da madeira sólida. Os problemas decorrentes de sua anisotropia e heterogeneidade são complicadores naturais que dificultam seu uso, conseqüentemente, a realização de estudos, para melhor aproveitamento da madeira, se apresenta como excelente alternativa tecnológica. Dentre os estudos desenvolvidos, uma solução viável, que gradativamente vem substituindo a madeira maciça, é a fabricação de derivados de madeira com a utilização de resíduos para agregar valor ao produto (SILVA, 2016).

Os painéis exibem uma série de vantagens sobre a madeira sólida, entre elas, de acordo com Müzel *et al.* (2015), na capacidade de reciclagem, maior homogeneidade, possibilidade de produção de partes de grandes dimensões, capacidade de imobilizar grande quantidade de dióxido de carbono da atmosfera em sua massa e demanda de menos energia para transporte e instalação.

De modo geral, os painéis de madeira podem ser produzidos a partir de qualquer resíduo lignocelulósico, com diversas formas e dimensões, através de sua reconstituição, com a utilização de adesivos, métodos e processos pré-determinados para cada tipo de produto final. Estudos mostram a viabilidade técnica de produção de aglomerados com espécies nativas e exóticas, de baixa e alta densidade, pura ou em mistura, com desempenho físico-mecânico que atendam aos requisitos do documento normativo brasileiro NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

Com base na NBR 14810-2 (ABNT, 2018), os painéis podem ser classificados, de acordo com o seu tipo de uso, em: 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 condições secas); e P7 (painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas).

Segundo Iwakiri *et al.* (2018), no Brasil, as espécies do gênero *Pinus* e *Eucalyptus* provenientes de plantação de rápido crescimento são as mais empregadas para a produção de painéis aglomerados. Embora exista maior área plantada dessas duas espécies, outras espécies como teca e seringueira também são de grande importância econômica para o setor madeireiro brasileiro (GAVA *et al.*, 2015). Estudos vêm sendo desenvolvidos para avaliar o potencial de uso de espécies alternativas de rápido crescimento, como as supracitadas, para suprimento de madeiras destinadas às indústrias de painéis aglomerados, as quais demandam grande volume de madeiras (IWAKIRI *et al.*, 2018).

Atualmente, realiza-se a mistura de espécies de madeira para formação de painéis de partículas que possibilita a combinação de madeiras com densidades mais baixas e elevadas.

A mistura de diversas espécies com características físico-químicas diferentes possibilita a formação de painel aglomerado e contribui para ampliar a oferta de matéria-prima para as indústrias que requerem grandes volumes de madeira (IWAKIRI *et al.*, 2010).

Os adesivos utilizados para a colagem de madeiras podem ser naturais, sintéticos termoplásticos e sintéticos termoendurecedores/termofixos.

No Brasil, atualmente, se utiliza a resina sintética à base de ureia formaldeído para produção de painéis aglomerados. Porém, as resinas à base de ureia formaldeído têm evidenciado alguns aspectos insatisfatórios, decorrentes da baixa resistência à ação da umidade, e quando aquecidos produzem gás formaldeído, prejudicando o meio ambiente e o ser humano de modo geral.

Uma alternativa para o uso de adesivos é a resina poliuretana derivada do óleo de mamona, que diferente das resinas à base de ureia, não gera problemas à saúde do aplicador. Esse adesivo também apresenta sua origem como uma vantagem, pois é proveniente de fontes mais renováveis e é biodegradável.

O objetivo desse trabalho foi avaliar as potencialidades de uso de painéis aglomerados produzidos com misturas de 30% de partículas de *Hevea brasiliensis* (seringueira) e 70% de partículas

da madeira de *Tectona grandis L. f* (teca), empregando-se 5 e 10% da resina poliuretano à base de óleo de mamona.

Dentre as principais vantagens para o uso de teca e seringueira na produção de painéis, além de estarem sendo amplamente reflorestadas no Brasil, possuem propriedades físico-mecânicas apropriadas para a produção de painéis, bem como, por serem oriundas de florestas plantadas, propiciam sustentabilidade às floretas nativas.

A seringueira é uma espécie brasileira explorada economicamente para produção de látex que, após seu ciclo produtivo, tem sido utilizada para geração de energia, entretanto, estudos realizados sobre suas propriedades físicas e mecânicas indicam ser uma excelente alternativa para produção de painéis.

A teca é uma espécie oriunda de florestas tropicais do subcontinente índico e do sudeste asiático. Além da facilidade do seu cultivo, se caracteriza por variar de leve a moderadamente pesada, de dureza média, boa estabilidade dimensional, fácil trabalhabilidade e boa resistência mecânica (PAES *et al.*, 2015). A vantagem do cultivo de Teca no Brasil é a diminuição do seu ciclo de produção devido à suas características endofoclimáticas.

O adesivo poliuretano utilizado nesse trabalho é obtido do óleo extraído da mamona, oriundo de uma planta facilmente encontrada, ou cultivada, na maioria das regiões do Brasil e possui demasiada vantagem, pois se trata de uma matéria-prima natural e renovável. São ainda vantagens o fato de ser classificado como impermeável, apresentar a característica de não ser agressivo ao meio ambiente e ao ser humano e com tecnologia brasileira (DIAS, 2005).

2 Referencial teórico

Esta seção apresenta o referencial teórico nacional e internacional em relação aos painéis produzidos com *Hevea brasiliensis*, *Tectona grandis L. f* e com resina poliuretano bicomponente (PU-Mamona).

2.1 Painéis com *Hevea brasiliensis* (seringueira)

De acordo com Sozim *et al.* (2019), as madeiras utilizadas para produção de painéis aglomerados como matéria-prima geralmente são oriundas de reflorestamento. A seringueira, *Hevea brasiliensis*, é uma espécie nativa da região amazônica do Brasil, onde são conhecidas cerca de dez espécies (IWAKIRI

et al., 2018). Caracterizada como de madeira leve, cor creme branco a pálido, boas propriedades de usinagem e trabalho e uma densidade dependente da idade da árvore, variando de 0,48 a 0,65 g/cm³ (LIM; GAN; CHOO, 2003).

Atualmente as pesquisas possuem como finalidade o uso da seringueira nas indústrias madeireiras. Esses estudos visam desenvolver novos produtos para aumentar o valor dessa madeira no final do ciclo de produção do látex, criando uma nova renda aos produtores brasileiros de látex (MÜZEL *et al.*, 2015).

Iwakiri *et al.* (2018) estudaram a madeira de *Hevea brasiliensis* em mistura com madeiras de três espécies de *Eucalyptus*, utilizando a resina ureia formaldeído para a produção de painéis aglomerados. A densidade nominal utilizada para o cálculo da massa de partículas foi de 0,75 g/cm³ e a densidade específica média obtida para as partículas de seringueira foi de 0,572 g/cm³. Os painéis foram prensados à temperatura de 160°C, pressão específica de 40 kgf/cm² e tempo de prensagem de 8 minutos.

De acordo com os autores, os resultados físicos indicaram maiores percentuais de absorção de água com o aumento na proporção de partículas de *Hevea* na composição dos painéis, sendo indicativa da influência da maior massa específica da madeira de *Hevea* e consequente redução na razão de compactação dos painéis, facilitando a entrada de água. Quanto aos resultados mecânicos, os painéis de seringueira obtiveram valores maiores do que os painéis com Eucalipto, uma vez que a madeira de *Hevea* tem maior massa específica, portanto, menor área superficial das partículas e aumento na distribuição de resina.

Gava *et al.* (2015) avaliaram o potencial de uso da madeira de *Hevea brasiliensis* (clones GT1 e RRIM600), com resina poliuretano à base de mamona para a produção de painéis de partículas de madeira. Os painéis foram produzidos com uma densidade nominal de 0,80 g/cm³, sendo utilizado 12% de resina em relação à massa seca e as partículas apresentavam-se com teor de umidade de 9,21%.

2.2 Painéis com *Tectona grandis L. f* (teca)

A teca é uma espécie arbórea decídua. Além da facilidade do seu cultivo, se caracteriza por variar a densidade de leve a moderadamente pesada, de dureza média, boa estabilidade dimensional, fácil trabalhabilidade e boa resistência mecânica (PAES *et al.*, 2015). A vantagem do cultivo de teca no Brasil é a redução do seu ciclo de produção de 80 anos para 25

anos. O acelerado crescimento da teca em algumas regiões brasileiras e a formação de fuste retilíneo impulsionou o plantio em larga escala para a produção de madeira serrada para o mercado externo (BRAZ *et al.*, 2014).

Lacombe (2015) estudou a produção de painel de madeira utilizando serragem residual (partículas de pinus, eucalipto, peroba e teca) com plástico EPS (isopor) como adesivo. Para produção dos painéis de teca, foi utilizado, juntamente com o adesivo, o solvente thinner. A densidade das partículas de teca utilizada era de 0,66 g/cm³. O autor identificou altos valores de absorção que podem ser reflexo da densidade do painel de teca que apresentou valores abaixo da média, gerando maior quantidade de vazios interiormente, os quais absorveram água a mais que o necessário.

Souza *et al.* (2018) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de estudar a viabilidade de produzir painéis utilizando resíduos sólidos de *Pinus sp.* e teca aglutinados com 5% da resina ureia formaldeído, em relação à massa seca das partículas, em associação com resíduos de tinta à base de epóxi, como adesivo alternativo. Os autores fabricaram painéis com densidade nominal de 0,80 g/cm³, com porcentagem de resina epóxi iguais a 20, 30 e 40% e adição de partículas de teca nas proporções 0, 25, 50, 75, 100%. Os resultados encontrados por Souza *et al.* (2018), para os painéis de alta densidade fabricados com maiores proporções de teca e resíduos de resina epóxi, alcançaram os requisitos mínimos exigidos pela NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

2.3 Painéis com resina poliuretana bicomponente (PU-Mamona)

O adesivo poliuretano, obtido do óleo extraído da mamona, é oriundo de uma planta facilmente encontrada, ou cultivada, na maioria das regiões do Brasil e possui demasiada vantagem, pois, se trata de uma matéria-prima natural e renovável.

Fiorelli *et al.* (2012), por meio de imagens eletrônicas de microscopia de varredura (MEV), observaram que o adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona ocupa as lacunas entre as partículas, contribuindo para melhorar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Sartori *et al.* (2012) produziram painéis de madeira de reflorestamento e de partículas de bagaço de cana de açúcar com resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona e afirmaram que essa resina se

apresenta com um potencial adesivo para fabricação de painéis de partículas. Os autores obtiveram em seus estudos módulo de ruptura dentro do valor exigido pela norma ANSI 208.1 (ANSI, 1999), módulo de elasticidade e tração perpendicular superior ao valor estipulado.

Nogueira, Lahr e Giacon (2018) estudaram a viabilidade da produção de painéis de partículas aglomeradas utilizando-se o resíduo obtido após o beneficiamento do ouriço da Castanha-do-Brasil associado à resina poliuretana derivada do óleo da mamona. Os autores concluíram que a adição de resina poliuretana à base do óleo da mamona mostrou-se eficiente como adesivo aglomerante, indicando que maiores porcentagens de resina tendem a implicar em diminuição da absorção de água e variação dimensional dos painéis, assim como aumento da resistência mecânica.

Wechsler *et al.* (2013) avaliaram painéis aglomerados feitos a partir de partículas de Pinus coladas com 20% de resina derivada do óleo de mamona. Os autores utilizaram a proporção 2:1, em peso, para a mistura polioliol com isocianato da resina PU-Mamona.

3 Materiais e métodos

Nesta seção são descritos os materiais e os métodos utilizados para produção dos painéis aglomerados, bem como os equipamentos e ensaios realizados na respectiva caracterização físico-mecânica.

3.1 Materiais

No presente trabalho foram utilizadas as madeiras de *Hevea brasiliensis* (seringueira) e *Tectona grandis* (teca) para a produção dos painéis, aglutinando-as com o adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona.

As partículas de seringueira foram obtidas pelo processamento de uma árvore clone *Rubber Research Institute of Malaysia* (RRIM) 600, proveniente do município de Selvíria-MS. A Figura 1 (a e b) ilustra aspectos gerais das toras oriundas da seringueira e das partículas utilizadas para produção dos painéis.

A árvore de teca utilizada para obtenção das partículas dessa espécie foi proveniente do viveiro de mudas da Prefeitura Municipal de Ilha Solteira-SP. A Figura 2 (a e b) mostra aspectos gerais das toras oriundas da teca e das partículas utilizadas para produção dos painéis.

O adesivo PU-Mamona utilizado, constitui-se de dois componentes (Figura 3), sendo o componente A o pré-polímero, composto por metileno difenil diisocianato (MDI) derivado do petróleo, e o componente B o polioli, oriundo do óleo da mamona. No presente trabalho foi utilizada a proporção de 1:1 dos dois componentes.

3.2 Métodos

A produção dos painéis foi desenvolvida com base no documento normativo NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

3.2.1 Preparação e classificação granulométrica das partículas

A partir de toras de seringueira e teca, foram produzidos cavacos, utilizando-se uma plaina desgrossadeira, que posteriormente foram processados em moinho de facas e transformados em partículas. Essas, por sua vez, foram inicialmente classificadas utilizando-se um peneirador elétrico equipado com peneiras com aberturas de 25,4; 19,05; 12,5; 9,52; 6,36; 4,36 e 2,36 (mm). Essa classificação inicial possibilitou a separação de todo o volume peneirado de partículas na faixa de 2 a 10 mm, que foram misturadas entre si para em seguida serem classificadas novamente, considerando-se o ensaio para determinação da composição granulométrica, de acordo com o documento normativo NBR NM 248 (ABNT, 2003), e adaptando, quando necessário. Esse ensaio possibilitou determinar a relação das quantidades de massa entre as dimensões das partículas nas faixas de 2 a 10 mm. Ressalta-se que as mesmas foram secas ao ar e a umidade foi controlada para a faixa de 10 a 12%.

3.2.2 Determinação das massas de partículas dos painéis e dos teores de resina

A massa de partículas necessária para confecção dos painéis foi calculada em função da densidade nominal e volume do painel. Foi adotada a densidade nominal de $0,65 \text{ g.cm}^{-3}$ para produção de painéis com dimensões de $35 \times 35 \times 1,5 \text{ cm}$, ou seja, volume de $1837,5 \text{ cm}^3$, conseqüentemente. A massa seca de partículas foi calculada conforme descrito no documento normativo NBR 14810-2 (ABNT, 2018), sendo o valor determinado de 1194,75 g para cada painel. Para as misturas com 5% de resina, adicionou-se às partículas 59,74 g de PU-Mamona e para

misturas com 10% de resina, adicionou-se 119,48 g de PU-Mamona.

Figura 1 – Matéria-prima para formação dos painéis (a) Toras de seringueira, (b) Partículas utilizadas



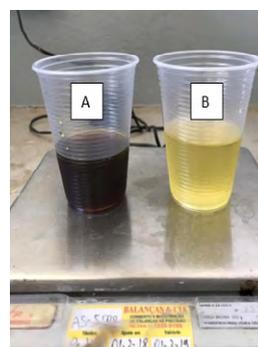
Fonte: acervo dos autores

Figura 2 – Matéria-prima para formação dos painéis (a) Toras de teca, (b) Partículas utilizadas



Fonte: acervo dos autores

Figura 3 – Componentes da resina PU-Mamona

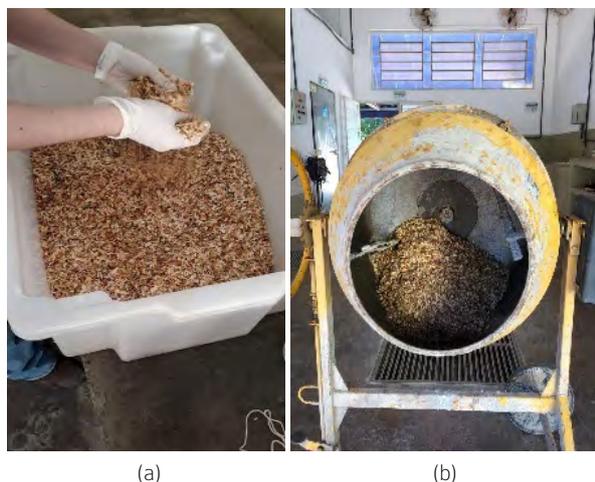


Fonte: acervo dos autores

3.2.3 Produção dos painéis

Iniciou-se com o processo de homogeneização da resina PU-Mamona às partículas. Adicionou-se primeiramente o polioli e realizou-se mistura manual para em seguida ser realizada homogeneização, por meio de uma betoneira com período de tempo de cinco minutos. Decorrido o tempo de homogeneização, a mistura foi retirada da betoneira para adição do pré-polímero e realizou-se novamente o procedimento descrito anteriormente. A Figura 4a ilustra a adição e homogeneização manual dos componentes da resina às partículas e a Figura 4b apresenta a homogeneização da mistura utilizando-se betoneira.

Figura 4 – Adição e homogeneização da resina PU-Mamona às partículas (a) adição e homogeneização manual dos componentes da resina às partículas, (b) homogeneização da mistura utilizando-se betoneira



Em seguida, preparou-se o colchão de partículas, conforme ilustrado na Figura 5a, para posterior prensagem em prensa hidráulica, com controle de temperatura e pressão. A Figura 5b ilustra o colchão de partículas na chapa metálica com controle de temperatura pronta para ser prensada. Para prensagem dos painéis, foi considerada pressão de 50 kgf/cm² e temperatura de 100°C durante 10 minutos.

Foram produzidos um total de 6 painéis, 3 painéis do tratamento T1 (30% de seringueira e 70% de teca com 5% de adesivo) e 3 painéis do tratamento T2 (30% de seringueira e 70% de teca com 10% de adesivo). Desses painéis foram obtidos 10 corpos de prova para cada ensaio, para os dois tratamentos.

Figura 5 – Formação do colchão de partículas e posicionamento na prensa (a) Partículas na formadora de colchão, (b) Posicionamento na prensa



3.2.4 Execução dos ensaios físicos

Os ensaios de Densidade (D), Teor de umidade (U) e Inchamento após 24h (I) foram realizados com base nas recomendações da NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Para o ensaio de inchamento após 24 horas as amostras foram submersas em água deionizada, utilizando-se um recipiente de PVC e telas metálicas com apoio de pesos (garantindo que as amostras permanecessem submersas com o nível de água de 25 mm, aproximadamente, acima da superfície superior do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Aparato experimental para o ensaio de inchamento após 24 horas

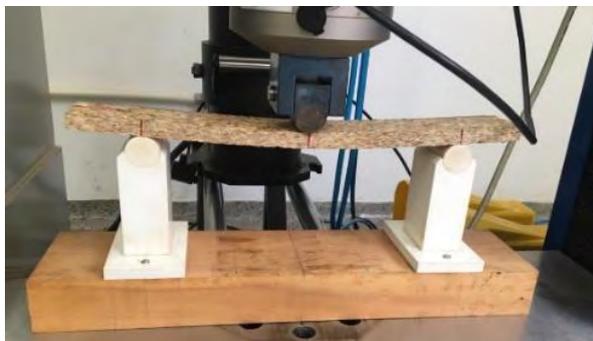


3.2.5 Execução dos ensaios mecânicos

Foram realizados os ensaios de flexão estática para obtenção do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), ilustrado na Figura 7, e de tração perpendicular (TP), conforme Figura 8, para determinação da resistência nessa solitação com base no documento normativo NBR 14810-2 (ABNT,

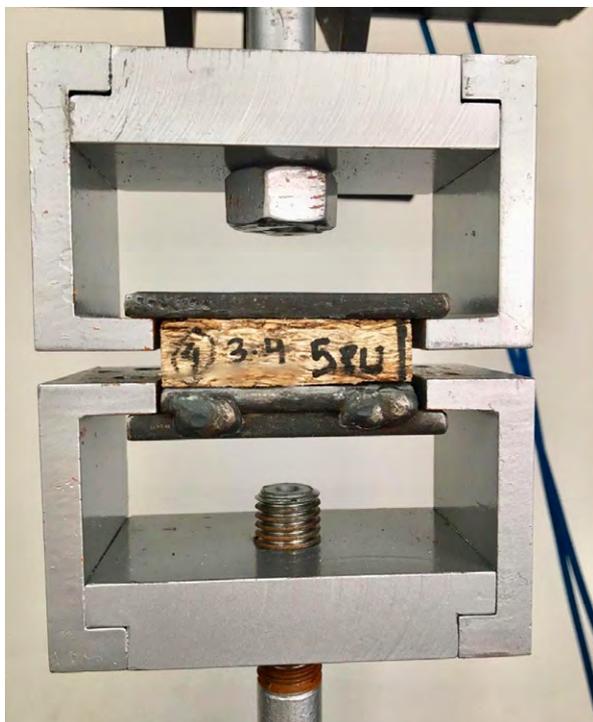
2018). Para execução dos ensaios mecânicos utilizou-se a máquina universal de ensaios EMIC GR048, com capacidade máxima de 300 kN.

Figura 7 – Aparato experimental para ensaio de flexão estática



Fonte: acervo dos autores

Figura 8 – Aparato experimental para ensaio de tração perpendicular



Fonte: acervo dos autores

4 Resultados

Esta seção apresenta os resultados e análises dos ensaios físicos e mecânicos dos painéis aglomerados empregando seringueira, teca e poliuretano derivado de óleo de mamona.

4.1 Teor de umidade e composição granulométrica das partículas

O valor médio do teor de umidade das partículas da mistura de 70% teca com 30% seringueira encontrado foi de 10,2% com coeficiente de variação de 1,5%.

As partículas ficaram retidas principalmente na faixa de 6,30 a 1,19 mm. Sendo o percentual retido na peneira nº4, nº8 e nº16 de 5,30%, 58,69% e 34,40%, respectivamente.

4.2 Densidade dos painéis

Com base no ensaio de determinação da densidade dos painéis, foi possível calcular a densidade média e o módulo máximo de variação da densidade (D), em %, de cada tratamento. Os valores encontrados estão representados na Tabela 1 e foram comparados com os exigidos pela NBR 14810-1 (ABNT, 2013) e com a literatura de referência.

Tabela 1 – Densidade dos painéis

| Tratamento | D média (g/cm ³) | D (%) | CV (%) |
|-------------------------------|------------------------------|-------|--------|
| T1 | 0,743 | 1 | 0,92 |
| T2 | 0,787 | 1 | 1,84 |
| Iwakiri <i>et al.</i> (2018) | 0,751 | - | - |
| Gava <i>et al.</i> (2015) | 0,843 | - | 6,79 |
| Lacombe (2015) | 0,478 | - | 0,03 |
| Souza <i>et al.</i> (2018) | 0,860 | - | - |
| Wechsler <i>et al.</i> (2013) | 0,691 | - | - |
| NBR 14810-1 (ABNT, 2013) | 0,551 a 0,750 | 7 | - |

Fonte: dados da pesquisa

A NBR 14810-1 (ABNT, 2013) estabelece que a densidade de painéis de partículas de média densidade seja determinada no intervalo de 551 a 750 kg/m³ e possuam módulo máximo de variação da densidade de 7%. Dessa maneira, o valor de densidade obtido com 5% de resina ficou de acordo com o intervalo estabelecido, enquanto a densidade obtida com 10% de PU-Mamona ficou pouco acima (4,93%) do valor máximo estabelecido pelo documento normativo.

Analisando os resultados da Tabela 1, verifica-se a diminuição da densidade média aparente com o decréscimo da porcentagem de resina, resultado esperado uma vez que no presente trabalho o peso de

resina foi considerado adicional à massa de partículas destinadas aos painéis. Recalculando a densidade nominal, incluindo o peso de resina, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Cálculo da densidade nominal com acréscimo da resina

| Trat. | Vol. (cm ³) | Massa part.(g) | Massa resina (g) | D nom. (g/cm ³) |
|-------|-------------------------|----------------|------------------|-----------------------------|
| T1 | 1837,5 | 1194,38 | 59,72 | 0,680 |
| T2 | 1837,5 | 1194,38 | 119,44 | 0,720 |

Fonte: dados da pesquisa

Comparando-se os dados das Tabela 1 e 2, observa-se que a densidade do painel obtida é 9% maior que a densidade nominal, para ambos os teores de resina. No estudo de Gava *et al.* (2015), no qual foi utilizada a mesma resina, os autores obtiveram densidade do painel 5% superior à densidade nominal, enquanto no estudo de Iwakiri *et al.* (2018), com resina ureia formaldeído, essa diferença é praticamente nula. Portanto, evidencia-se que painéis com resina PU – mamona quando comparados a painéis com adesivo ureia formaldeído, têm menor expansão e maior aglutinamento das partículas.

As densidades apresentadas como resultado deste artigo se encontram em concordância aos da referência consultada. Ambos os tratamentos apresentaram valores inferiores aos encontrados por Gava *et al.* (2015) e Souza *et al.* (2018), pois os autores utilizaram densidade nominal de 0,8 g/cm³, enquanto no presente trabalho foi utilizada densidade nominal de 0,65 g/cm³. Entretanto, os resultados dos tratamentos T1 e T2 foram superiores aos encontrados por Wechsler *et al.* (2013) e Lacombe (2015).

4.3 Teor de umidade dos painéis

Os valores médios determinados para os teores de umidade dos painéis foram de 7,84%, com coeficiente de variação de 2,16 para o tratamento com 5% de resina, e 7,97%, com coeficiente de variação de 1,43% para o tratamento com 10% de PU-Mamona, valores esses que se encontram dentro do intervalo de 5 a 13% estabelecido pela norma de referência NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

4.4 Inchamento após 24 horas dos painéis

Os resultados médios obtidos de inchamento após 24 h, a classificação nas condições de uso que podem ser empregados e os valores encontrados pelos documentos de referência, estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Inchamento após 24 horas

| Tratamento | I 24 h médio (%) | CV (%) | Tipo de uso |
|-------------------------------|------------------|--------|---------------------|
| T1 | 28,26 | 5,53 | Nenhuma |
| T2 | 10,49 | 17,26 | P2, P3, P4, P5 e P6 |
| Iwakiri <i>et al.</i> (2018) | 35,55 | - | - |
| Gava <i>et al.</i> (2015) | 17,09 | 6,18 | - |
| Lacombe (2015) | 0,84 | 0,61 | - |
| Souza <i>et al.</i> (2018) | 7,27 | - | - |
| Wechsler <i>et al.</i> (2013) | 12 | 9,1 | - |

Fonte: dados da pesquisa

Verificou-se que o tratamento com 5% de resina apresentou valor de inchamento médio muito alto, portanto, não pode ser enquadrado em nenhuma classificação. O tratamento com 10% de PU-Mamona pode ser empregado em quase todos os tipos de uso, exceto na condição P7 (painéis estruturais para uso em condições severas de carga, em condições úmidas). A Figura 9 ilustra o inchamento com 5% de resina em comparação com 10% de adesivo.

Figura 9 – Ensaio de inchamento após 24 horas



Fonte: acervo dos autores

Analisando os resultados e a Figura 9, observa-se que a maior quantidade de resina garante um menor inchamento dos painéis, podendo ser empregados até mesmo em condições úmidas. Em suma, os resultados indicam que 5% de resina não garante efetivo recobrimento das partículas, pois o agente

fundamental em impedir o inchamento do painel é a resina, ou seja, com menor porcentagem de resina as partículas permanecem sem recobrimento e causando esse alto inchamento observado. Já nos painéis com 10% de PU, o ótimo desempenho em inchamento deve-se ao efetivo recobrimento das partículas pela resina e maior distribuição dessa.

O inchamento médio observado nos painéis com 5% de PU-Mamona apresentou valor superior aos de referência, exceto ao encontrado por Iwakiri *et al.* (2018) nos painéis aglutinados com ureia formaldeído, pois essa resina caracteriza-se por não apresentar desempenho satisfatório em relação à percolação de água.

O valor de inchamento do tratamento com 10% de resina PU-Mamona foi inferior aos encontrados por Gava *et al.* (2015) e Wechsler *et al.* (2013), porém superior aos determinados por Souza *et al.* (2018) e Lacombe (2015), que também utilizaram teca em seus estudos, porém o alto desempenho de inchamento encontrado por esses autores pode estar ligado às resinas alternativas.

4.5 Módulo de Ruptura à Flexão Estática e Módulo de Elasticidade

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados médios obtidos de módulo de ruptura à flexão estática (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), bem como a classificação nas condições de uso que podem ser empregados e os valores encontrados pela referência.

Tabela 4 – Módulo de ruptura à flexão estática (MOR)

| Tratamento | MOR (MPa) | CV (%) | Tipo de uso |
|-------------------------------|-----------|--------|-----------------|
| T1 | 11,77 | 7,15 | P2 |
| T2 | 18,60 | 4,00 | P2, P3, P4 e P5 |
| Iwakiri <i>et al.</i> (2018) | 14,5 | - | - |
| Gava <i>et al.</i> (2015) | 13,21 | 20,88 | - |
| Lacombe (2015) | 1,92 | 0,27 | - |
| Souza <i>et al.</i> (2018) | 19,67 | - | - |
| Wechsler <i>et al.</i> (2013) | 8,7 | - | - |

Fonte: dados da pesquisa

Tabela 5 – Módulo de elasticidade (MOE)

| Tratamento | MOE (MPa) | CV (%) | Tipo de uso |
|-------------------------------|-----------|--------|-------------|
| T1 | 1913,89 | 6,47 | P2 |
| T2 | 2468,28 | 4,87 | P2, P3 e P4 |
| Iwakiri <i>et al.</i> (2018) | 2205 | - | - |
| Gava <i>et al.</i> (2015) | 1893,55 | 18,79 | - |
| Lacombe (2015) | 245,19 | 0,18 | - |
| Souza <i>et al.</i> (2018) | 3883,33 | - | - |
| Wechsler <i>et al.</i> (2013) | 930 | - | - |

Fonte: dados da pesquisa

Com base nos valores das Tabelas 4 e 5, verifica-se que os dois tratamentos podem ser empregados em pelo menos um tipo de uso para as duas propriedades analisadas.

O MOR encontrado no tratamento T1 apresentou valor superior ao encontrado por Wechsler *et al.* (2013) e Lacombe (2015). O módulo de resistência à flexão estática do T2 apresentou-se maior em relação aos encontrados por Gava *et al.* (2015), Wechsler *et al.* (2013), Lacombe (2015) e Iwakiri *et al.* (2018), porém inferior ao encontrado por Souza *et al.* (2018). De modo geral, para os dados obtidos na pesquisa e os de referência, exceto para Gava *et al.* (2015), observa-se que existe uma correlação entre densidade e Módulo de ruptura, uma vez que quanto maior a densidade do painel, observa-se maior resistência à flexão estática.

O tratamento com 10% de resina apresentou valores de MOE superiores ao tratamento com 5% de resina. As propriedades do Módulo de Elasticidade estão relacionadas principalmente com as características da resina PU-Mamona, enquanto as partículas auxiliam para a maior transferência da tensão mecânica na resina poliuretana. Portanto, com menor quantidade de PU-Mamona, existe um menor recobrimento e, conseqüentemente, uma diminuição dos valores do módulo de elasticidade.

Comparando-se os resultados encontrados no presente trabalho com os de referência, verifica-se que ambos os tratamentos apresentaram valores de MOE superiores aos encontrados por Gava *et al.* (2015), Wechsler *et al.* (2013) e Lacombe (2015), porém inferiores aos encontrados por Souza *et al.* (2018).

4.6 Tração Perpendicular dos painéis

A Tabela 6 apresenta os valores médios obtidos de tração perpendicular às faces, bem como a classificação indicando em quais condições podem ser utilizados os tratamentos e os valores de referência.

Com base nos valores da Tabela 6, observa-se que os tratamentos podem ser empregados em diversos tipos de uso e verifica-se que ocorre o aumento da resistência à tração perpendicular com o acréscimo de adesivo.

O tratamento T1 apresentou resistência à tração perpendicular inferior aos documentos de referência, exceto ao apresentado por Lacombe (2015). O tratamento T2 apresentou resultado superior ao encontrado por Wechsler *et al.* (2013), Iwakiri *et al.* (2018) e Lacombe (2015), porém inferior aos encontrados por Gava *et al.* (2015) e Souza *et al.* (2018).

Tabela 6 – Resistência à tração perpendicular

| Tratamento | TP (MPa) | CV (%) | Tipo de uso |
|-------------------------------|----------|--------|-----------------|
| T1 | 0,52 | 10,97 | P2, P3, P4 e P5 |
| T2 | 1,06 | 7,73 | Todos |
| Iwakiri <i>et al.</i> (2018) | 0,78 | - | - |
| Gava <i>et al.</i> (2015) | 2,68 | 11,61 | - |
| Lacombe (2015) | 0,23 | 0,45 | - |
| Souza <i>et al.</i> (2018) | 1,77 | - | - |
| Wechsler <i>et al.</i> (2013) | 0,99 | - | - |

Fonte: dados da pesquisa

De acordo com Silva *et al.* (2008), a caracterização da resistência à tração perpendicular está diretamente relacionada à densidade das chapas e, conseqüentemente, ao desempenho da resina utilizada para confecção dos painéis. Os dados apresentados na Tabela 7 corroboram com tal afirmação. Ou seja, os painéis com 10% de resina possuem maior distribuição e recobrimento das partículas, bem como maior densificação do painel e, conseqüentemente, maior adesão das partículas e resistência à tração perpendicular.

Tabela 7 – Comparativo dos parâmetros, densidade do painel (D) e resistência à tração perpendicular (TP)

| Tratamento | D (g/cm ³) | TP (MPa) |
|------------------------------|------------------------|----------|
| Lacombe (2015) | 0,478 | 0,23 |
| T1 | 0,743 | 0,52 |
| Iwakiri <i>et al.</i> (2018) | 0,751 | 0,78 |
| T2 | 0,787 | 1,06 |
| Gava <i>et al.</i> (2015) | 0,843 | 2,68 |

Fonte: dados da pesquisa

A Figura 10 ilustra aspectos gerais do ensaio de tração perpendicular realizado.

Figura – 10 Ruptura à tração perpendicular

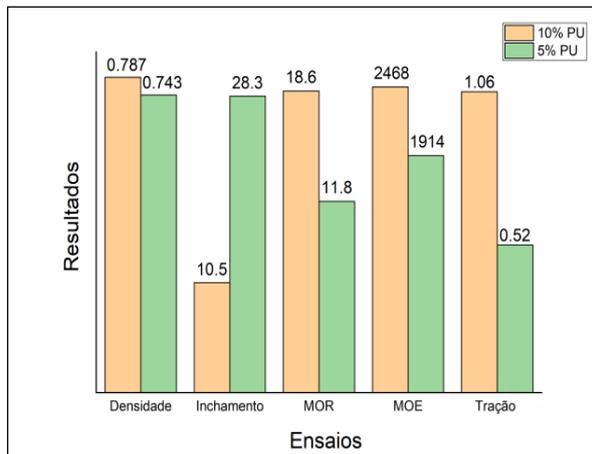


Fonte: acervo dos autores

4.7 Comparação dos resultados físicos e mecânicos com 5% e 10% de resina

A Figura 11 apresenta um gráfico da comparação dos resultados com 5% e 10% de resina, obtidos para os ensaios físicos e mecânicos. Resumidamente, na figura é possível observar que os painéis com 10% de resina apresentam maior densidade, módulo de ruptura estática, módulo de elasticidade e resistência à tração perpendicular, bem como menor inchamento em espessura após 24 h, em relação aos painéis com 5% de resina.

Figura 11 – Comparação dos resultados com 5% e 10% de resina



Fonte: dados da pesquisa

5 Considerações finais

Os tratamentos com 10% de resina PU-Mamona obtiveram resultados melhores, se comparados com os confeccionados com 5% da mesma resina.

Com base nas análises realizadas para caracterização das propriedades físicas e mecânicas consideradas dos painéis, conclui-se que os painéis confeccionados com 10% do adesivo PU-Mamona estão de acordo com as exigências da NBR14810-2 (ABNT, 2018) e, de modo geral, com a literatura referenciada neste trabalho.

Os painéis com 5% de PU-Mamona também podem ser empregados em pelo menos uma classificação de uso (P2 - Painéis não estruturais para uso interno em condições secas), exceto no que tange ao inchamento em umidade, apesar de terem apresentado valores inferiores aos obtidos para os painéis com 10% de teor de resina.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 - Agregados: Determinação da composição granulométrica**. ABNT: Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-1 - Painéis de partículas de média densidade - Parte 1: Terminologia**. ABNT: Rio de Janeiro, 2013.

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

ANSI. AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208: 1: Mat-formed wood particleboard: Specification**. ANSI: Gaithersburg, 1999.

BRAZ, R. L. *et al.* Caracterização anatômica, física e química da madeira de clones de *eucalyptus* cultivados em áreas sujeitas à ação de ventos. **Revista Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 5, n. 2, p. 138-150, 30 nov. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/cienciadamadeira/article/view/4790>. Acesso em: 10 fev. 2021.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005. 116 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-31082009-105836/pt-br.php>. Acesso em: 21 abr. 2021.

FIORELLI, J. *et al.* Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: an eco-efficient product. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 40, p. 69-75, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669012001264>. Acesso em: 25 mar. 2021.

GAVA, M. *et al.* Production of Particleboards from Hevea brasiliensis Clones and Castor Oil-based Polyurethane Resin. **Bioresources**, v. 10, n. 4, p.6896-6905, aug. 2015. Disponível em: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_10_4_6896_Gava_Particleboards_Hevea_Polyurethane_Resin. Acesso em: 26 mar. 2021.

IWAKIRI, S. *et al.* Avaliação do potencial de utilização da madeira de *schizolobium amazonicum* "Paricá" e *cecropia hololeuca* "Embaúba" para produção de painéis aglomerados. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 2, p. 303-308, jan. 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672010000200008. Acesso em: 25 abr. 2021.

IWAKIRI, S. *et al.* Produção de painéis aglomerados de *hevea brasiliensis* (Clone RRIM 600) em mistura com três espécies de *eucalyptus* utilizadas pelas

indústrias de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 117, p. 31-39, mar. 2018. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr117/cap03.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021.

LACOMBE, J. E. de A. **Painéis de madeira aglomerada produzidos com resíduos de serragem e poliestireno expandido para aplicações na construção civil**. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-08032016-100536/publico/JaneElizadeAlmeidaLacombe_versaocorrigida.pdf. Acesso em: 21 abr. 2021.

LIM, S. C.; GAN K. S.; CHOO, K. T. The characteristics, properties and uses of plantation timbers – rubberwood and acacia mangium. **Timber Technology Centre**, Kepong, v. 26, p. 1–11, 2003. Disponível em: <http://myagric.upm.edu.my/id/eprint/11431/>. Acesso em: 22 mar. 2021.

NOGUEIRA, I. M. S.; LAHR, F. A. R.; GIACON, V. M. Desenvolvimento e caracterização de painéis de partículas aglomeradas utilizando o resíduo do ouriço da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) e resina poliuretana derivada do óleo da mamona. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762018000100440&script=sci_abstract&lng=pt. Acesso em: 9 abr. 2021.

PAES, J. B. *et al.* Caracterização tecnológica da madeira juvenil de Teca (*Tectonagrandis*) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 3, p. 437-442, set. 2015. Disponível em: http://www.agraria.pro.br/ojs-2.4.6/index.php?journal=agraria&page=article&op=view&path%5B%5D=agraria_v10i3a3906. Acesso em: 9 abr. 2021.

SARTORI, D. L. *et al.* Paineis em madeira de reflorestamento e chapas de partículas para instalações rurais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 2, p. 171-178, 2012. Disponível em: <https://www.floram.org/article/doi/10.4322/floram.2012.020>. Acesso em: 20 abr. 2021

SILVA, S. A. M. da. **Confecção e avaliação de painéis de partículas de madeira de média densidade com aproveitamento de resíduos industriais**. 2016. 92 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha

Solteira, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/14026>. Acesso em: 21 abr. 2021.

SILVA, S. A. M. *et al.* Avaliação da resistência à tração perpendicular e da densidade de chapas de fibras de média densidade confeccionadas com resina poliuretana monocomponete e bicomponete derivada de óleo de mamona. **Revista Minerva**, Mexicali, v. 5, p. 235-240, 2008.

SNIF. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. **Site**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/cadeia-produtiva>. Acesso em: 9 mai. 2019.

SOUZA, A. M. *et al.* Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: a cleaner production alternative. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 193, p. 549-562, ago. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618314239>. Acesso em: 5 jan. 2021.

SOZIM, P. C. L. *et al.* Propriedades de painéis aglomerados produzidos com madeiras de *Ligustrum lucidum* e *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 39, n. 1, p. 1-8, mai. 2019. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1696>. Acesso em: 20 abr. 2021.

WECHSLER, A. *et al.* Macadamia (*Macadamia integrifolia*) shell and castor (*Ricinus communis*) oil based sustainable particleboard: a comparison of its properties with conventional wood based particleboard. **Materials & Design**, v. 50, p. 117-123, sep. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306913002082>. Acesso em: 19 abr. 2021.