

Painel particulado de baixa densidade produzido com resíduos de sisal

Low-density particleboards from sisal waste

Lucas Lima Costa 
 Filipe Luigi Dantas Lima Santos 
 Nilson Santana de Amorim Júnior 
 Henrique Almeida Santana 
 Daniel Veras Ribeiro 
 Rita Dione Araújo Cunha 
 Sandro Fábio César 

Resumo

O sisal (*Agave sisalana*) é uma planta explorada nas regiões semiáridas do Brasil para produção de fibras, mas o escapo floral do sisal (flecha) é coletado e frequentemente queimado causando problemas ambientais, até mesmo pelo descarte irregular. Para contornar este cenário, o objetivo deste trabalho foi produzir painéis reconstituídos usando a flecha do sisal e resina poliuretana à base de mamona. Os painéis foram obtidos empregando 175 g do miolo da flecha de sisal triturada com dimensões inferiores a 2 mm e adotando 10% de resina poliuretana à base de mamona e as amostras foram prensadas com tensão de 2 MPa. Avaliou-se no painel reconstituído, através da NBR 14810-1 (ABNT, 2013) e NBR 14810-2 (ABNT, 2018) as propriedades físicas: umidade, densidade, inchamento e absorção; bem como as propriedades mecânicas: MOR, MOE, força de ligação e compressão paralela. Os resultados encontrados mostram que o painel é classificado como de baixa densidade (419,8 kg/m³), e de propriedades físicas e mecânicas semelhantes a outros painéis de mesma classificação da literatura. Para MOR e MOE foram encontrados 5,24 MPa e 147,49 MPa de média, respectivamente. Já os ensaios de tração perpendicular e compressão paralela obtiveram resultados de 0,14 MPa e 1,14 MPa, respectivamente.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas. Escapo floral. Resina de Mamona.

Abstract

Sisal (Agave sisalana) is a plant exploited in semi-arid regions of Brazil for fiber production, but the floral scape of sisal (peduncle) is collected and often burned, causing environmental problems, even through irregular disposal. To circumvent this scenario, the objective of this work was to produce reconstituted panels using the sisal arrow and castor-based polyurethane resin. The panels were obtained using 175 g of crushed sisal arrow core with dimensions smaller than 2 mm and adopting 10% castor-based polyurethane resin and The samples were pressed under tension of 2 MPa. The properties of reconstituted panel were evaluated through NBR 14810-1 (ABNT, 2013) and NBR 14810-2 (ABNT, 2018), the physical properties were investigated: moisture, density, thickness swelling and absorption; as well as mechanical properties: MOR, MOE, internal bond and parallel compression. The found results show that the panel is classified as low density (419.8 kg/m³), and with physical and mechanical properties similar to other panels of the same classification in the literature. For average values of MOR and MOE it was found 5.24 MPa and 147.49 MPa, respectively. For internal bonding it was found 0.14 MPa and for parallel compression properties it was found 1.14 MPa.

Keywords: Mechanical properties. Floral scape. Castor oil resin.

¹Lucas Lima Costa
¹Universidade Federal da Bahia
 Salvador - BA - Brasil

²Filipe Luigi Dantas Lima Santos
²Universidade Federal da Bahia
 Salvador - BA - Brasil

³Nilson Santana de Amorim
 Júnior
³Universidade Federal da Bahia
 Salvador - BA - Brasil

⁴Henrique Almeida Santana
⁴Universidade Federal da Bahia
 Salvador - BA - Brasil

⁵Daniel Veras Ribeiro
⁵Universidade Federal da Bahia
 Salvador - BA - Brasil

⁶Rita Dione Araújo Cunha
⁶Universidade Federal da Bahia
 Salvador - BA - Brasil

⁷Sandro Fábio César
⁷Universidade Federal da Bahia
 Salvador - BA - Brasil

Recebido em 24/10/22
 Aceito em 22/08/23

Introdução

Segundo Bacha, Brugnro e Camargo Filho (2007) e Guimarães Junior *et al.* (2011), os painéis aglomerados são objetos de forma retangular de configurações variadas, sendo encontrados em diferentes larguras, espessuras e comprimentos, constituídos de materiais lignocelulósicos variados como fibras vegetais, partículas e lascas de madeira. A reconstrução é um processo de fabricação que relaciona o emprego de partículas secas de madeiras à mistura de adesivos sintéticos termofixos, e todo e qualquer material lignocelulósico detém potencial para ser empregado na produção de particulados, tornando-se de grande interesse principalmente em regiões com escassez de madeiras (Bufalino, 2010).

Dados publicados pelo 69º Cenários Ibá (IBÁ, 2021) demonstraram que o consumo brasileiro de painéis de madeira, em 2021, foi de 8,256 milhões de m³, uma marca histórica que representou 15,43% de aumento deste material em relação ao ano anterior. Por outro lado, dos nove milhões de hectares plantados de árvores, dos quais encontram-se espécies de eucalipto, teca e o pinus, entre outras, cerca de 6% da madeira proveniente desta área é destinada a produção de painéis e pisos laminados (IBÁ, 2021), através da reconstrução da madeira.

Além da madeira, os resíduos lignocelulósicos apresentam grande potencial econômico para o desenvolvimento de novos produtos. Entretanto, ainda são pouco explorados pelas indústrias, mesmo que denotem grande versatilidade para serem aplicados na indústria da construção (Araújo *et al.*, 2019). Segundo Macedo *et al.* (2015), na indústria da construção civil o emprego de painéis reconstruídos está presente em etapas diversificadas do processo construtivo, principalmente na fase de acabamento.

Por outro lado, a NBR 14810-1: Painéis de partículas de média densidade: Terminologia (ABNT, 2013) apresenta a possibilidade na incorporação de materiais especiais no processo de manufatura dos painéis, que visa a obtenção de propriedades específicas, aprimorando o desempenho de soluções reconstruídas.

Na literatura têm-se registros de substituição de teores de resíduos vegetais em relação à madeira na produção de reconstruídos. Autores como Baldin *et al.* (2016) e Keskin, Kucuktuvek e Guru (2015) analisaram o comportamento de reconstruídos produzidos de pinus com teores de substituição por *capim annoni* e resíduos de papoula, respectivamente; Oh e Lee (2012) analisaram painéis de *Populus alba* com teores de substituição de talos de trigo; Oliveira *et al.* (2016), Barros Filho *et al.* (2011) e Battistelle, Marcilio e Lahr (2008) analisaram a substituição da madeira por bagaço da cana de açúcar; Varanda *et al.* (2013) estudou a substituição de eucalipto por casca de aveia. E, entre estes autores o emprego da resina uréia-formaldeído foi mais recorrente, sendo menos estudado o emprego da resina à base de mamona na manufatura dos reconstruídos.

Centros de pesquisa de países como Brasil, Irã, Turquia, Coreia do Sul e Arábia Saudita, entre outros, têm analisado a produção de painéis reconstruídos empregando apenas resíduos vegetais na composição, em contrapartida a escassez de material adequado, conforme Bufalino (2010), ou pelo simples aproveitamento de resíduos agroindustriais que seriam descartados. Barbirato *et al.* (2014) analisaram o desempenho de painéis de casca de amendoim e resina à base de mamona, obtidos com tensão de prensagem de 5MPa e temperatura de 100 °C por 10 minutos. Sartori (2012) usaram bagaço de cana de açúcar e resina à base de mamona, com tensão de prensagem de 5 MPa e temperatura de 100 °C por 10 minutos. Cravo (2015) empregaram casca de amendoim e fibra de coco verde com resina de mamona, tensão de prensagem 5 MPa a 100 °C por 10 minutos.

Mais recentemente, Klímek *et al.* (2018) estudaram o emprego de talos de miscanthus usando como resina o diisocianato de metileno difenil, confeccionando os painéis com tensão de prensagem de 3,2 MPa e temperatura de 200 °C. Mesquita *et al.* (2018) produziram painéis com os resíduos do açaí e a resina à base de mamona, empregando tensão de 5 MPa a 100 °C por 10 minutos. Mahieua, Alish e Leblanca (2019) empregaram talos de linho e girassol com a uréia-formaldeído, presando os painéis a 190 °C por 10 minutos. Nadhari *et al.* (2019) usaram tronco de bananeiras sem uso de adesivos, com tensão de prensagem de 28,68 MPa, temperatura de 180 °C por 40 minutos. Na literatura encontra-se o emprego de matérias primas diversificadas na produção dos painéis alternativos, como também as configurações de manufatura como tensão de prensagem, tempo e temperatura.

A *Agave sisalana* ou sisal é uma espécie não nativa do Brasil implementada na região semiárida brasileira como solução às secas através da produção de fibras naturais (Santos; Silva, 2017). De acordo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o ano de 2021 registou uma produção de mais de 80 mil toneladas de fibras, sendo que, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2018), cerca de 70% desta produção foi destinada à exportação. Contudo, a flecha do sisal é outro subproduto obtido no cultivo da espécie. Santos e Silva (2017) dissertam que a flecha do sisal pode atingir de 6 a 8 metros de altura e crescer de 10 a 12 centímetros por dia. Entretanto, a flecha do sisal não recebe nenhum tipo de beneficiamento, sendo

empregada na construção de cercas de acordo o Centro Nordestino de Informações sobre Plantas (CNIP, 2020) ou é descartada em regiões do semiárido e posteriormente queimada, gerando um passivo ambiental.

Este trabalho teve como objetivo principal estudar o emprego da flecha de sisal para produzir painéis com resina poliuretana à base de mamona, verificando a potencialidade do resíduo de sisal como alternativa para composição de painéis de baixa densidade.

Revisão bibliográfica

Painel reconstituído

O desenvolvimento da solução em painéis particulados está atrelado ao movimento geopolítico imposto durante a Segunda Guerra Mundial que levou ao isolamento da Alemanha e uma efetiva escassez da madeira em estado adequado a produção de compensados (Iwakiri *et al.*, 2005). Este isolamento, segundo os mesmos autores, fomentou a busca por novas soluções na produção de painéis e forçou os alemães, ainda em 1940, ao desenvolvimento de uma tecnologia que permitia o emprego de resíduos lignocelulósicos para esta finalidade.

O processo de obtenção dos painéis de madeira reconstituída é feita a partir da coleta de árvores, oriundas de florestas plantadas. O material então é limpo (fazendo-se a remoção da casca), triturado, selecionado e posteriormente é seco, e, em seguida, é levado à prensa com uso de resinas termofixas. A prensagem ocorre com tensão, tempo e temperatura controlados, sendo possível a inserção de componentes químicos visando o melhor desempenho do material desenvolvido (Alves *et al.*, 2014).

O cenário imposto pela pandemia da COVID-19 beneficiou de forma direta o consumo de painéis de madeira. Com mais pessoas trabalhando em casa, a necessidade de adaptação dos ambientes tornou-se uma realidade, elevando em 3,9% as vendas domésticas de painéis em 2020 (IBÁ, 2021). Os painéis reconstituídos são empregados na construção civil como forros, divisórias, pisos e portas (Macedo *et al.*, 2015), mas podem ser matéria-prima em outros segmentos como a indústria moveleira para fabricação de móveis e na indústria naval para construção de navios e acabamentos em geral (Archangelo, 2019).

Resina de mamona

O adesivo ou resina é um material com propriedades aderentes, que tem a função de manter unidos os materiais a serem reconstituídos, podendo ainda ser um termoendurecedor de origem natural ou sintética. O emprego adequado de cada tipo de resina está relacionado à finalidade do produto gerado (Iwakiri *et al.*, 2005).

A revisão bibliográfica demonstrou escassez em relação ao emprego da resina poliuretana à base de mamona. Por outro lado, o emprego de resinas termofixas à base de formaldeído, tais como a ureia formaldeído que representa 90% dos painéis manufaturados (Iwakiri *et al.*, 2005), apresenta inconvenientes como a emissão de gases tóxicos, dificuldade na reciclagem e origem não renovável (González-Garcia *et al.*, 2011). Neste cenário, o emprego da resina à base de mamona torna-se uma alternativa às resinas sintéticas, por não emitir substâncias tóxicas, ser um material de origem vegetal e biodegradável, e adaptar-se bem ao semiárido brasileiro (Gryczak, 2016; Cangemi, 2006; Cartaxo *et al.*, 2004).

Estudos desenvolvidos por Ferro *et al.* (2019), Machado *et al.* (2017), Sartori (2012), Barbirato *et al.* (2014), Cravo (2015) e Shirotsaki *et al.* (2019) demonstram o potencial no emprego da resina bicomponente à base do óleo da mamona, através de resultados satisfatórios obtidos nestes trabalhos.

A resina à base do óleo de mamona pode ser utilizada com prensagem à frio, à temperatura ambiente, e também permite o emprego de prensagem à quente para reduzir o tempo de cura, no entanto, limitado à temperatura no intervalo de 60 °C a 110 °C, para cura em 15 minutos (KEHL, 2022).

Sisal e a flecha

Com o aumento no consumo de madeiras e a necessidade de produção de painéis reconstituídos que atendam aos padrões de qualidade e os anseios do comércio internacional para a proteção do meio ambiente, demandam-se novas tecnologias que otimizem o uso de insumos considerados como resíduos (Barbirato *et al.*, 2014).

A flecha do sisal é um subproduto, resíduo da exploração da *Agave sisalana* para produção de fibras vegetais nas regiões semiáridas do Brasil. Segundo o IBGE (2022), apenas na Bahia, mais de 49 municípios exploram o sisal, totalizando uma área superior a 93 mil hectares e 82 mil toneladas de fibras produzidas anualmente. Embora a Bahia seja responsável por mais de 94% da produção de sisal no Brasil, exportando 70% da produção

anual (CONAB, 2018), as flechas de sisal coletadas não recebem beneficiamento, sendo subutilizadas ou descartadas de forma irregular. A Figura 1 mostra flechas de sisal em uma fazenda de cultivo de sisal em Conceição do Coité na Bahia.

O Centro Nordestino de Informações sobre Plantas (CNIP, 2020) apontou que o uso da flecha de sisal foi observado na construção de cercas para criação de animais, confecção de jangadas e talas para imobilização de membros acidentados. Existe ainda o registro de emprego da flecha de sisal como alternativa construtiva nas regiões semiáridas do Brasil, como escoramento para estrutura de concreto (Costa *et al.*, 2019).

Materiais e métodos

Diante da profusão de resíduo como matéria-prima da flecha do sisal na região sisaleira do Brasil e da demanda atual para o desenvolvimento de tecnologias locais, delimitou-se neste estudo a investigação quanto ao emprego dos resíduos de sisal associados à resinas de mamona, tida como aglomerante de menor impacto ambiental, tendo em vista a produção de painéis de baixa densidade voltados ao ambiente construído. Ainda no recorte desta pesquisa, optou-se por usar apenas o miolo da flecha do sisal e empregar processos de manufatura que pudessem ser facilmente replicados em pequenas cooperativas, permitindo o real desenvolvimento, aplicação e aprimoramento do novo produto desenvolvido.

O fluxograma (Figura 2) apresenta o esquema metodológico para o desenvolvimento deste estudo. Após a coleta das flechas de sisal, o material foi devidamente tratado e empregado para manufatura do painel (em verde) que, após a cura, teve as propriedades físicas e mecânicas investigadas (em vermelho).

Materiais

Flechas de sisal

As flechas empregadas no estudo foram coletadas em fazenda de cultivo do sisal na cidade de Conceição do Coité, na Bahia – Brasil. Os exemplares foram coletados de forma randômica e foram destinados à manufatura do painel. A Figura 3 mostra as flechas de sisal coletadas para este estudo.

Figura 1 - Flechas de sisal no semiárido baiano - Conceição do Coité



Fonte: acervo particular (2021).

Figura 2 - Fluxograma metodológico

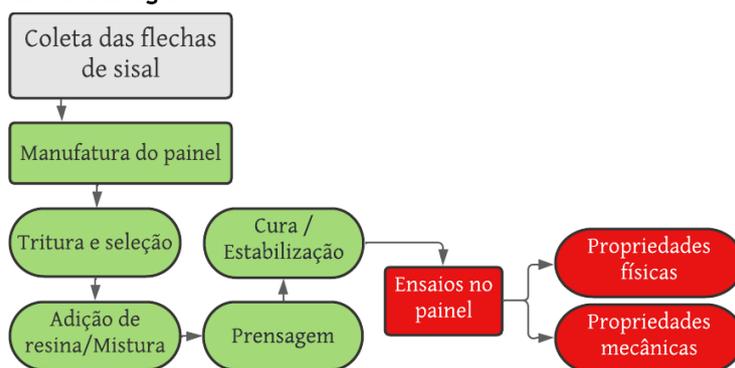


Figura 3 - Flechas utilizadas neste estudo



Resina de mamona

A resina utilizada para confecção dos painéis de flecha foi a poliuretana à base de mamona, fabricada pela KEHL Polímeros, uma empresa especializada em pesquisa e desenvolvimento sustentável de sistemas de poliuretano. A resina de mamona é composta por duas partes A e B, sendo o Composto A um isocianato e B um produto à base de óleos vegetais, entre eles o óleo da mamona. A resina de mamona foi escolhida por permitir a cura à frio no processo de manufatura e pelos benefícios frente as resinas de compostos formaldeídos. A Figura 4 mostra a resina de mamona utilizada na manufatura dos painéis.

Métodos

Manufatura do painel de flecha

As flechas de sisal coletadas foram cortadas em comprimentos de até 1,5 metros. A casca da flecha foi descartada e apenas o miolo foi triturado através de triturador de grãos (Trapp JK 700). A Figura 5 mostra o processo para obtenção do material triturado. Na Figura 5(a) a coleta da flecha, na Figura 5(b) e 5(c) o corte e remoção da casca, respectivamente; na Figura 5(d) a tritura e na Figura 5(e) o miolo da flecha triturado.

As partículas do material triturado foram separadas através de peneiramento em agitador (Abranzinox), Figura 6(a), e selecionou-se o material com granulometria inferior a 2 milímetros. O material selecionado foi seco em estufa (SOLAB – SL-100), Figura 6(b) e 6(c), a 100 ± 2 °C, até que a umidade fosse inferior a 3%, conforme indicado por Iwakiri *et al.* (2005). A umidade das partículas foi determinada através de balança determinadora de umidade (Marte ID200), Figura 6(d) e Figura 6(e).

Com a umidade das partículas adequada, foram usados 175 g de material seco para manufatura dos painéis. Em seguida, foi adicionado 10% de resina à base de mamona –homogeneizada manualmente por 5 minutos – em relação a massa seca das partículas, na proporção 2:1, sendo duas partes do composto à base de óleos vegetais (B), dentre eles a mamona, e uma parte do isocianato (A). O conjunto de partículas secas mais resina foi homogeneizado manualmente por mais 8 minutos, devido à indisponibilidade de equipamento automático.

O material misturado à resina foi adicionado à forma metálica e prensado por 3 horas à temperatura ambiente e tensão de prensagem de 2 MPa. Foram confeccionados 10 painéis com espessura de 10 mm. A Figura 7 mostra as etapas de manufatura do painel. Na Figura 7(a) a pesagem das partículas secas, na Figura 7(b) a mistura da resina às partículas, na Figura 7(c) a formação do colchão e na Figura 7(d) a prensagem.

Figura 4 - Componentes A (isocianato) à esquerda e B (base de mamona e óleos vegetais) à direita



Figura 5 - Processo de obtenção da matéria-prima



Figura 6 - Equipamentos para aferição da umidade da matéria-prima

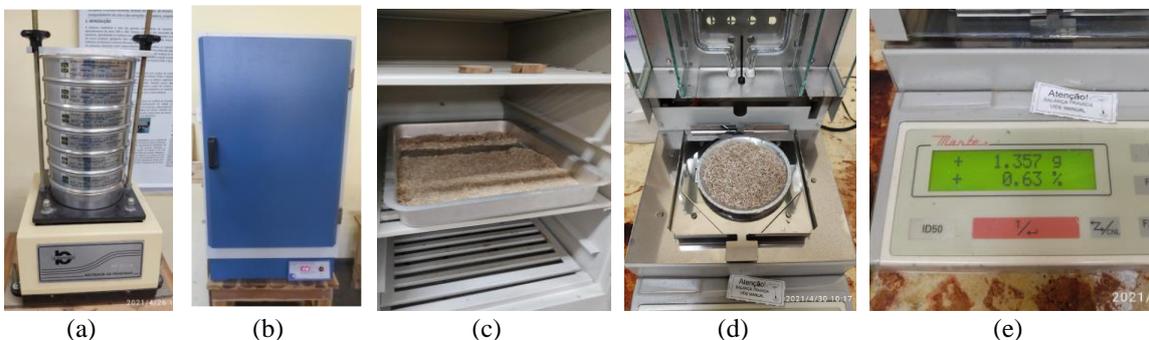
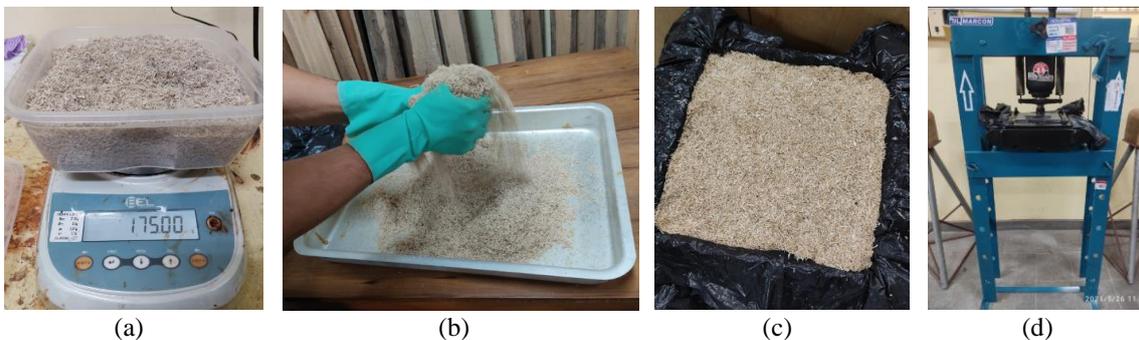


Figura 7 - Processo de manufatura dos painéis



Depois de prensado, o painel foi extraído da forma metálica e distribuído horizontalmente sobre superfície plana. A manufatura dos painéis foi conduzida no Laboratório de Madeiras da Universidade Federal da Bahia, com temperatura ambiente, aproximadamente $26\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar em torno de $70\% \pm 5$. Já o acondicionamento foi realizado conforme o item 5.1.6 da NBR 14810-2 (2018) para umidade ($65 \pm 5\%$) e temperatura ($20 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$) em ambiente climatizado controlado com auxílio de termo-higrômetro. Após cura o material foi aparelhado em dimensões de 20 cm por 20 cm. A Figura 8(a) e 8(b) mostram os painéis após prensagem e retirada da forma, respectivamente; na Figura 8(c) a temperatura e umidade do ambiente de acondicionamento, na Figura 8(d) a aparelhagem e na Figura 8(e) o resultado do painel desenvolvido.

Análises físicas e mecânicas no painel de flecha

As análises físicas do painel desenvolvido foram estudadas através da NBR 14810-2 (ABNT, 2018). As propriedades físicas: umidade, densidade, inchamento e absorção; foram avaliadas para o intervalo de 2 horas, 24 horas e 168 horas. A Figuras 9(a) a pesagem, na Figura 9(b) determinação das dimensões, Figura 9(c) imersão e Figura 9(d) retirada do excesso de água dos corpos de prova (CPs).

Os ensaios mecânicos foram realizados através de uma Máquina Universal de ensaios EMIC 23 – 10 kN. O ensaio de flexão estática foi realizado com velocidade de 6 mm por minuto. No ensaio de tração perpendicular os corpos-de-prova foram colados às faces das bases em madeira com resina de mamona na proporção 2:1, e o ensaio foi realizado com velocidade de 4 mm por minuto. Na compressão longitudinal, o material foi ensaiado com velocidade de 5 mm por minuto até a ruptura. A Figura 10 mostra os ensaios mecânicos no painel de flecha de sisal. Na Figura 10(a) o ensaio de flexão estática, na Figura 10(b) o ensaio de tração perpendicular e na Figura 10(c) o ensaio de compressão paralela.

O Quadro 1 mostra a quantidade de corpos de prova para os ensaios e as dimensões adotadas conforme a NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

Resultados e discussões

Propriedades físicas dos painéis

Umidade e densidade

Os resultados médios de umidade (%) e densidade (γ) podem ser observados na Tabela 1.

Figura 8 - Cura e acabamento dos painéis

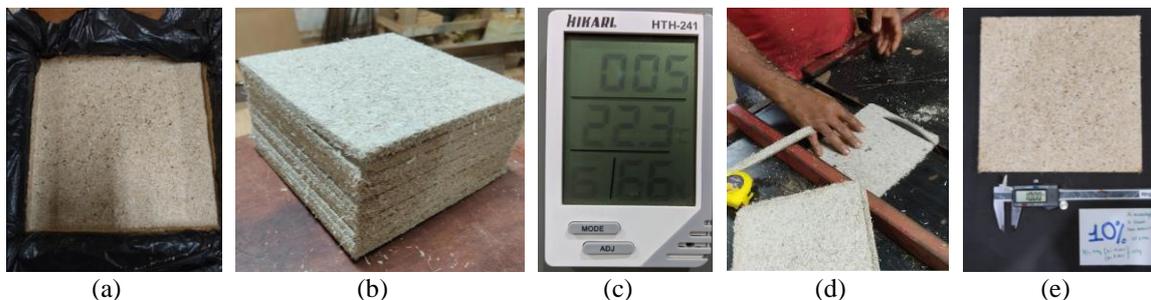


Figura 9 - Ensaios físicos no painel de flecha de sisal

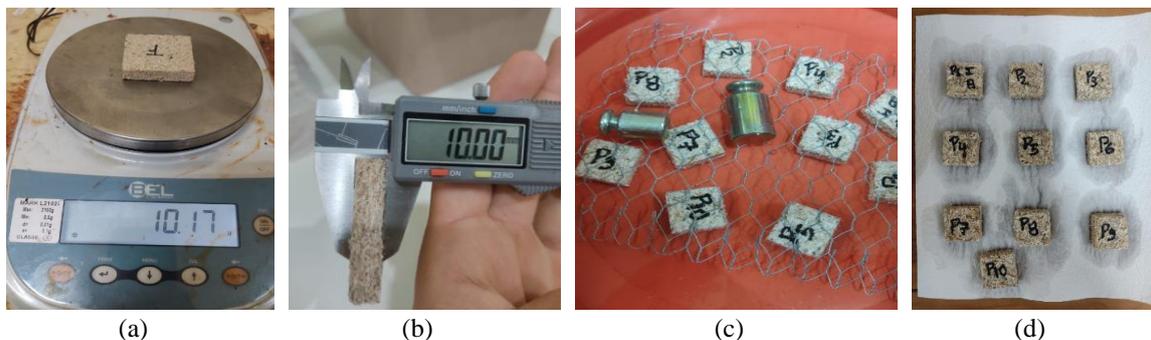
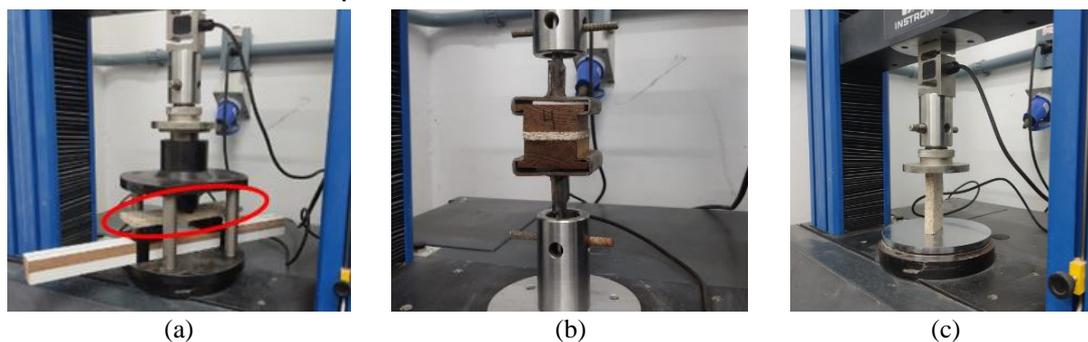


Figura 10 - Ensaios mecânicos no painel de flecha de sisal



Quadro 1 - Dimensões dos corpos de prova de flecha

Umidade	10	50 mm x 50 mm
Densidade	10	50 mm x 50 mm
Inchamento	10	50 mm x 50 mm
Absorção	10	25 mm x 25 mm
Flexão estática	10	200 mm x 50 mm
Tração perpendicular	10	50 mm x 50 mm
Compressão longitudinal	10	100 mm x 50 mm

Tabela 1 - Resultados médios dos ensaios de umidade e densidade no painel

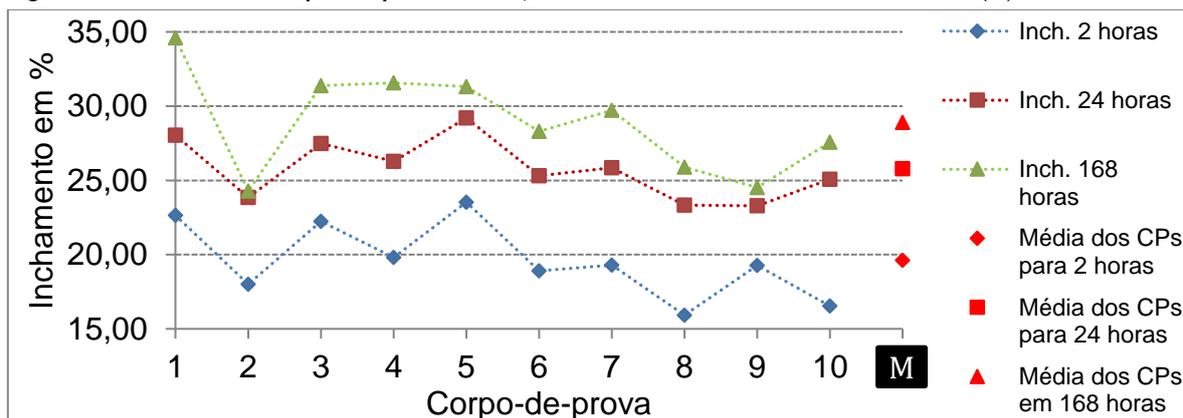
CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ (kg/m ³)	419,71	380,33	369,19	449,12	422,95	457,40	403,25	447,01	421,96	416,6
Umidade (%)	12,7	12,9	13,2	12,9	13,1	12,7	12,7	12,6	13,0	12,8
Propriedade				Umidade			Densidade			
Umidade				%			Kg/m³			
Média				12,8			419,8			
Desv. Padrão				0,19			28,92			
Coef. de var.				0,015			0,069			

O valor médio da umidade entre os painéis foi de 12,8%, dentro do intervalo de 5 a 13% citado pela NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Costa *et al.* (2021) ao estudar as propriedades físicas da flecha de sisal *in natura*, encontraram o valor médio de umidade de 12,13% após estabilização, valor próximo ao encontrado neste estudo, sugerindo o parâmetro de estabilização para este novo material vegetal, com variação de 0,67% entre as umidades do material *in natura* e após a reconstituição. Além disso, a umidade dos painéis do mesmo lote não excedeu 3%, conforme a NBR adotada. O resultado médio da densidade, de 0,419g/cm³ foi inferior ao intervalo de 0,551g/cm³ a 0,75g/cm³, o que classifica o painel de flecha de sisal produzido neste estudo como painel de baixa densidade, conforme a NBR 14810-1 (ABNT, 2013), a American National *Standat – Particleboards* (ANSI, 1999), já que tem densidade inferior a 551 kg/m³ e a 650kg/m³ (limites inferiores). Por outro lado, a baixa densidade observada para o painel pode ser um indicativo à boa capacidade isolante térmica do novo produto. Pelos escritos de Çengel e Ghajar (2015) os principais mecanismos de transferência de calor – condução e convecção – seriam afetados. A condução pela não continuidade da matéria e a convecção pela restrição de fluxo de ar aprisionado no interior das células. Já os valores médios de desvio padrão e coeficiente de variação da amostra podem ser melhorados através da mecanização do processo de produção, em detrimento do processo manual empregado.

Inchamento e absorção

O inchamento médio para os intervalos de 2 horas, 24 horas e 168 horas foram de 19,62%, 25,78% e 28,91% respectivamente. A Figura 11 relaciona os valores de inchamento com os corpos de prova para os intervalos investigados.

Figura 11 - Inchamento do painel para 2 horas, 24 horas e 168 horas e valores médios (M)



Os valores de inchamento médio para os intervalos de 2 horas e 24 horas foram de 19,62% e 25,78% respectivamente, e este último superior ao limite de 22% citado pela NBR 14810-2 (ABNT, 2018), na Tabela 2, p. 3 (Painéis não estruturais para uso interno em condições secas – Requisitos para propriedades mecânicas e inchamento). Verificou-se menor diferença em porcentagem do inchamento para o intervalo de 24 horas até 168 horas do que o primeiro. Cravo (2015), usando casca de amendoim, encontraram valores de 8,36% e 18,92% para intervalos de 2 horas e 24 horas respectivamente para painéis de baixa densidade. Scatolino *et al.* (2017), usando resíduos de café e serragem de eucalipto, encontraram 6,71% e para inchamento em 2 horas e 11,46% para a mesma propriedade, após 24 horas, também para painéis de baixa densidade.

Outra propriedade física relevante investigada, o comportamento de absorção obteve médias de 84,90%, 166,25% e 226,97 para os intervalos de 2 horas, 24 horas e 168 horas respectivamente. Na Figura 12 estão relacionados o comportamento dos painéis quanto a absorção.

Embora a NBR 14810-2 (ABNT, 2018) não determine valores limites para taxa de absorção de água de painéis reconstituídos, esta propriedade está diretamente relacionada à estabilidade em contato de painéis com ambientes de umidade elevada. Neste estudo, a absorção média foi de 84,90%, 166,25% e 226,97% para os intervalos de 2 horas, 24 horas e 168 horas respectivamente. Usando resíduos do café e serragem de eucalipto, Scatolino *et al.* (2017) encontraram absorção de 120,54% em 2 horas e 138,08% em 24 horas. Yeniocak *et al.* (2014), empregando podas de videira, encontraram 99,2% para 2 horas e 121,4% para o intervalo de 24 horas. Cravo (2015) com painéis de casca de amendoim encontraram valores de 21,27% e 61,13% para os intervalos de 2 horas e 24 horas respectivamente.

A análise do comportamento de inchamento e absorção ao longo do tempo, em alguns casos acima dos valores da literatura, indica maior capacidade da flecha de sisal em absorver água, retendo líquido no interior dos vazios celulares ou mesmo nas paredes das fibras. Com isto, a maior capacidade de absorção pode estar diretamente relacionada à presença de vazios e ao tamanho dos vazios em relação aos materiais vegetais comparados, contudo, faz-se necessária a investigação da microestrutura da flecha. Ainda nesta perspectiva, as condições microestruturais no tecido da flecha poderiam favorecer o isolamento térmico, permitindo empregar o material para tal finalidade.

Propriedades mecânicas

Flexão estática

A Tabela 2 mostra o resultado médio para o módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) dos painéis desenvolvidos.

O painel de flecha de sisal obteve valor de módulo de ruptura (MOR) médio igual a 5,24 MPa, superior ao verificado na A208.1 (ANSI, 1999) de 3 MPa. A NBR 14810-2 (ABNT, 2018) não cita valores para painéis de baixa densidade para a propriedade MOR. Com reconstituídos de talos de trigo, Hussein *et al.* (2018) encontraram MOR médio igual a 1 MPa. Yeniocak *et al.* (2014) usando podas de videira encontraram valores médios de MOR de 7,96 MPa, Scatolino *et al.* (2017) encontraram valor médio de 4,43 MPa. Já utilizando o bagaço da cana de açúcar, Barros Filho *et al.* (2011) encontraram 4,59 MPa para o valor de MOR. Cravo *et al.* (2015) encontraram 1,82 MPa com painéis de resíduos de amendoim. Os valores encontrados apontam que o resultado médio para MOR do painel de flecha está no intervalo dos resultados da literatura.

Figura 12 - Absorção em 2 horas, 24 horas e 168 horas e valores médios (M)

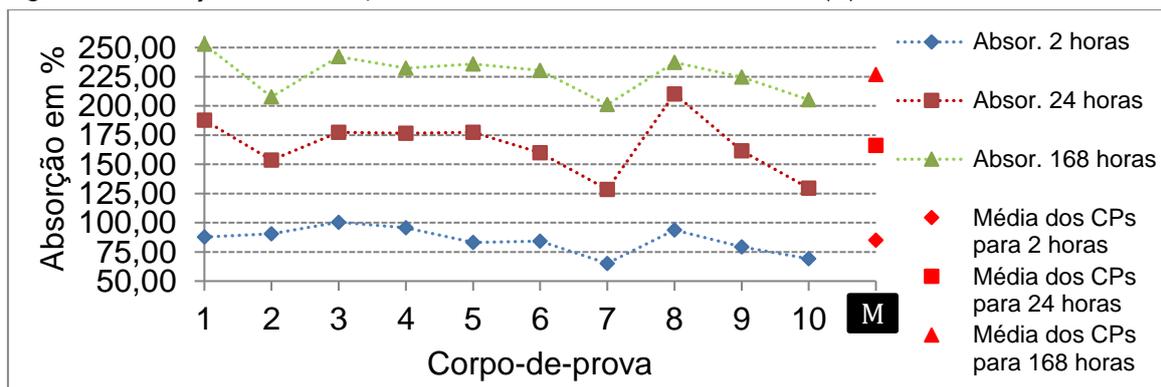


Tabela 2 - Resultados obtidos para MOR e MOE

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MOR (MPa)	3,14	4,57	4,56	5,00	6,13	5,05	7,28	3,87	4,40	8,39
MOE (MPa)	85,07	100,60	213,70	198,07	168,21	162,54	159,98	126,05	135,09	125,61
Propriedade							MOR	MOE		
Unidade							MPa	MPa		
Média							5,24	147,49		
Desv. Padrão							1,59	40,74		
Coef. De Var.							0,30	0,28		

O painel de flecha de sisal obteve MOE médio igual a 147,49 MPa. O valor mínimo do módulo de elasticidade (MOE) é apresentado pela NBR 14810-2 (ABNT, 2018) como 1800 MPa (6 a 13 mm), já a A208.1 (ANSI, 1999) cita 550 MPa, o que evidencia a discrepância entre os valores normatizados, cabendo a análise conforme o uso final do componente reconstituído. Visto que, na literatura, Cravo (2015) encontraram 333,8 MPa para o MOE. Scatolino *et al.* (2017) encontraram MOE de 400,73 MPa. Hussein *et al.* (2018) encontraram MOE médio de 181,9 MPa. Com estes resultados, observa-se na literatura grande variabilidade para o valor de MOE, em detrimento do emprego de materiais lignocelulósicos diversos usados para a reconstituição. Além disto, outros fatores particulares no processo de manufatura dos painéis, como a matéria prima empregada ou mesmo as condições de produção podem interferir diretamente nas características analisadas.

A Figura 13 mostra o estado de um exemplar do corpo de prova de painel de flecha após ensaiado à flexão.

Tração perpendicular

A resistência à tração perpendicular média obtida para o painel desenvolvido foi de 0,14 MPa. Próximo ao critério previsto na A208.1 (ANSI, 1999) que é de 0,15 MPa. Cravo (2015) encontraram valores de médios de 0,16 MPa para resíduos de amendoim e fibra de coco verde, já Scatolino *et al.* (2017) evidenciaram valor médio igual a 0,18 MPa usando resíduos de café e eucalipto. Mesquita *et al.* (2018), usando resíduos de açaí, encontraram valor de 0,28 MPa e Hussein *et al.* (2018) encontraram valor médio de 0,02 MPa nesta propriedade, com reconstituídos de talos de trigo. Estes resultados indicam que o comportamento do painel desenvolvido obteve desempenho semelhante a outros painéis empregados na literatura. Embora, fatores como o tipo de resina empregada, o processo de cura da resina e outros, podem interferir no resultado desta propriedade. A resistência à tração perpendicular média dos painéis de flecha pode ser observada na Tabela 3.

Observou-se que todos os CPs ensaiados romperam fora da linha de cola, entre as faces do painel e do material utilizado, o que demonstra a efetiva aderência entre o painel, a resina de mamona e as faces do dispositivo de ensaio. Por outro lado, a ruptura dos CPs fora da linha de cola, na região da espessura do painel, determina a ligação interna entre as partículas de flecha e o teor da resina de mamona utilizada, que neste caso demonstrou comportamento similar aos materiais vegetais e resinas da literatura, empregadas para a mesma finalidade. A Figura 14 mostra um dos CPs após ensaio de tração, e é possível verificar a região de ruptura.

Compressão paralela

O valor médio de resistência à compressão paralela do painel de flecha pode ser verificado na Tabela 4.

Neste ensaio, observou-se que todos os CPs sofreram encurtamento, que está relacionado ao preenchimento dos vazios pelas partículas devido à compressão, ou seja, a diminuição do diâmetro dos vazios. Segundo Benthien, Ohlmeyer e Schneider (2018) apenas a densidade dos painéis não é critério decisivo para resistência à compressão dos reconstituídos, estando mais relacionada às substâncias lignocelulósicas comprimidas. Hussein *et al.* (2018), usando talos de trigo, encontram média de 1,4 MPa nesta propriedade. Já de Barros Filho *et al.* (2011) reportaram valores médios de variando de 1 MPa à pouco mais de 2,5 MPa nesta propriedade, empregando resíduos de bagaço de cana-de-açúcar. A Figura 15 mostra o corpo de prova de particulados de sisal após ensaio de compressão longitudinal.

Figura 13 - Vista do corpo-de-prova após ensaio de flexão estática



Tabela 3 - Resultado da tração perpendicular

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tração perpendicular (MPa)	0,04	0,10	0,21	0,12	0,27	0,13	0,14	0,16	0,10	0,10
Propriedade								Tração perpendicular		
Unidade								MPa		
Média								0,14		
Desv. Padrão								0,06		
Coef. De Var.								0,43		

Figura 14 - Corpo-de-prova após ruptura no ensaio de tração

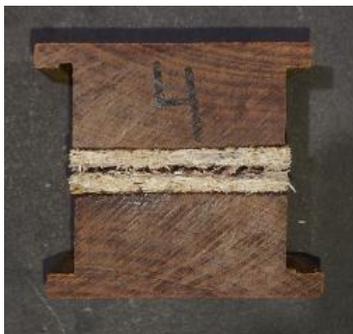
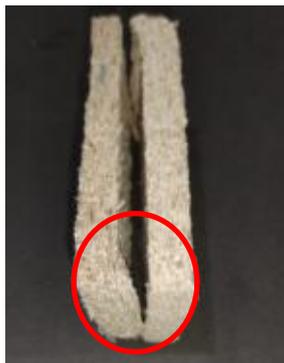


Tabela 4 - Resistência à compressão paralela do painel de flecha

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Compressão paralela (MPa)	1,28	1,14	0,87	1,45	1,09	1,35	0,89	1,39	1,01	0,90
Propriedade								Tração perpendicular		
Unidade								MPa		
Média								1,14		
Desv. Padrão								0,22		
Coef. De Var.								0,19		

Figura 15 - Corpo-de-prova após encurtamento no ensaio de compressão



Conclusões

Nas propriedades físicas, constatou-se que as configurações adotadas na manufatura permitiram desenvolver e classificar o painel de flecha como sendo de baixa densidade, conforme a NBR 14810-1 (ABNT, 2013). Os critérios de inchamento e absorção demonstram que o painel de flecha está acima dos limites verificados na literatura para inchamento de painéis confeccionados com outros materiais vegetais, mas obteve desempenho intermediário em relação aos valores de absorção da literatura.

Quanto às propriedades mecânicas, os valores de MOR e MOE estão em acordo com a literatura, embora o valor médio encontrado esteja abaixo do parâmetro citado na NBR 14810-2 (ABNT, 2018), mesmo que a referida norma cite painéis de média densidade. A força de ligação interna média entre as partículas determinada através do ensaio de tração perpendicular comportou-se de maneira similar a literatura e todos os CPs romperam na região esperada, fora da interface de colagem do painel à base de ensaio. Por fim, a resistência à compressão paralela média também não divergiu dos valores da literatura, quando empregados resíduos alternativos à produção de reconstituídos, mas verificou-se o encurtamento do painel ensaiado devido ao adensamento e diminuição dos espaços vazios no tecido da flecha. Já a resina poliuretana à base de mamona demonstrou-se eficiente para produção do painel reconstituído a base de flecha de sisal nas proporções e condições empregadas. Por fim, recomenda-se para estudos futuros, a análise das propriedades diversificando resíduos passíveis à reconstituição.

Finalmente, ressalta-se a necessidade de mecanização do processo de produção dos reconstituídos de flecha de sisal, tendo em vista a variabilidade estatística obtida nas propriedades ensaiadas. Contudo, condições do próprio material, composição química, método de armazenamento, são questões relevantes na qualidade do produto final e devem ser exploradas em investigações futuras.

Referências

- ALVES, S. *et al.* Study of the Feasibility of "mix" of Species from Sawmill Waste and Limiting for Particleboard. **International Journal of Composite Materials**, v. 1, n. 4, p. 30-37, 2014.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **A208.1**: mat-formed wood particleboard: specifications. Gaithersburg, 1999.
- 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, jan./mar. 2019.
- ARCHANGELO, A. **Fabricação e caracterização dos painéis homogêneos com partículas de madeira teca (*Tectona grandis L.F.*) e a adição da casca de arroz**. Bauru, 2019. 211 f. Tese (Doutorado em Processos de Fabricação) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-1**: painéis de partículas de média densidade: parte 1: terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: painéis de partículas de média densidade: parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- BACHA, C. J. C.; BRUGNRO, R.; CAMARGO FILHO, G. de B. A indústria de painéis: madeira. **Revista Mercado e Negócio. Agroanalysis**, v. 27, p. 32–35, 2007.

- BALDIN, T. *et al.* Qualidade de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e capim-annoni. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 3, p. 230–237, 2016.
- BARBIRATO, G. *et al.* Painel aglomerado híbrido de casca de amendoim reforçado com partículas de madeira itaúba. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 685–697, jul./set. 2014.
- BARROS FILHO, R. M. *et al.* Hybrid chipboard panels based on sugarcane bagasse, urea formaldehyde and melamine formaldehyde resin. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 2, p. 369–373, 2011.
- BATTISTELLE R. A. G.; MARCILIO, C.; LAHR, F. A. R. Emprego do bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e das folhas caulinares do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na produção de chapas de partículas. **Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia**, v. 5, n. 3, p. 297–305, 2008.
- BENTHIEN, J. T.; OHLMEYER, M.; SCHNEIDER, M. Experimental determination of the compression resistance of differently shaped wood particles as influencing parameter on wood-reduced particleboard manufacturing. **European Journal of Wood and Wood Production**, v. 76, p. 937–945, 2018.
- BUFALINO, L. **Avaliação da permeabilidade e sua influência sobre as propriedades físicas e de colagem em painéis aglomerados**. Lavras, 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- CANGEMI, J. M. **Biodegradação de poliuretano derivado do óleo de mamona**. São Carlos, 142 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, 2006.
- CARTAXO, W. V. *et al.* **O cultivo da mamona no semiárido brasileiro**. Circular técnica n. 77. Embrapa - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Junho, 2004.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**. 5. ed, New York: McGraw-Hill Education, 968.
- CENTRO NORDESTINO DE INFORMAÇÕES SOBRE PLANTAS. **Agave - banco de dados de plantas do nordeste**. Disponível em: <http://www.cnip.org.br/bdpm/fotosdb/Agave.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2020.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Fibras: conjuntura setembro 2018**. 2018. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br>. Acesso em: 06 set. 2019.
- COSTA, L. L. *et al.* A flecha do sisal como material lignocelulósico alternativo às habitações do semiárido brasileiro. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 17., São Carlos, 2021. **Anais [...]** Florianópolis: EESC – USP, 2021.
- COSTA, L. L. *et al.* Evolução no emprego dos subprodutos de sisal (*Agave sisalana*) no contexto do desenvolvimento de habitações rurais no semiárido brasileiro – período de 1920 até os dias atuais. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HISTÓRIA DA CONSTRUÇÃO LUSO-BRASILEIRA, 3., Salvador, 2019. **Anais [...]** Salvador, 2019.
- CRAVO, J. C. M. Painel aglomerado de resíduos agroindustriais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 721–730, jul./set. 2015.
- FERRO, F. S. *et al.* Painel híbrido OSB/MDP de madeira *Pinus taeda* e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 7–14, jul./set. 2019.
- GONZÁLEZ-GARCIA, S. *et al.* Environmental assessment of green hardboard production coupled with a laccase activated system. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 445–453, 2011.
- GRYCZAK, M. **Compósito sustentável casca de arroz/resina de óleo de mamona de baixa densidade**. Criciúma, 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Unidade Acadêmica Em Humanidades, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.
- GUIMARÃES JUNIOR, J. B. *et al.* Painéis de madeira aglomerada de resíduos de laminação de diferentes procedências de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 443 – 452, out./dez. 2011.
- HUSSEIN, Z. *et al.* Mechanical properties of particleboard panels made from agricultural wastes. **Biological Engineering**, v. 1, n. 33, p. 319–338, 2018.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ**. São Paulo, 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola** – Lavoura Permanente: Sisal ou Agave. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>. Acesso em: 21 jul. 2022.

- IWAKIRI, S. *et al.* **Painéis de madeira**. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2005.
- KEHL. **Datasheet**: AG211, Material: Polímero bicomponente, proporção 2:1, 1 folha. 2022. [Material obtido por mensagem pessoal].
- KESKIN, H.; KUCUKTUVEK, M.; GURU, M. The potential of poppy (*Papaver somniferum* Linnaeus) husk for manufacturing wood-based particleboards. **Construction and Building Materials**, v. 95, n. 1, p. 224–231, 2015.
- KLÍMEK, P. *et al.* Utilizing Miscanthus stalks as raw material for particleboards. **Industrial Crops and Products**, v. 111, p. 157–276, 2018.
- MACEDO, L. B. *et al.* Propriedades físicas de painéis aglomerados de madeira produzidos com adição de película de polipropileno biorientado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 7, p. 674–679, 2015.
- MACHADO, N. A. F. *et al.* Painéis aglomerados fabricados com resíduos do coco babaçu. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 2, p. 202–209, 2017.
- MAHIEUA, A.; ALIXB, S.; LEBLANCA, N. Properties of particleboards made of agricultural by-products with a classical binder or self-bound. **Industrial Crops & Products**, v. 130, p. 371–379, 2019.
- MESQUITA, A. de L. *et al.* Eco-particleboard manufactured from chemically treated fibrous vascular tissue of acai (*Euterpe oleracea* Mart.) fruit: a new alternative for the particleboard industry with its potential application in civil construction and furniture. **Industrial Crops & Products**, v. 112, p. 644–651, 2018.
- NADHARI, W. N. A. W. *et al.* Mechanical properties and dimensional stability of particleboard fabricated from steam pre-treated banana trunk waste particles. **Journal of Building Engineering**, v. 26, 2019.
- OH, Y.; LEE, S. Use of buckwheat stalk in particleboard bonded with urea-formaldehyde resin adhesive. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 46, p. 643–647, 2012.
- OLIVEIRA, S. L. *et al.* Particleboard panels made from sugarcane bagasse: characterization for use in the furniture industry. **Materials Research**, v. 19, n. 4, p. 914–922, 2016.
- SANTOS, E. M. C.; SILVA, O. A. Sisal na Bahia – Brasil. **Mercator**, Fortaleza, v. 16, e16029, 2017.
- SARTORI, D. L. **Painel portante estrutural com chapa de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina de mamona para centro de manejo bovino**. São Paulo, 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, 2012.
- SCATOLINO, M. V. *et al.* Eucalyptus wood and coffee parchment for Particleboard production: physical and mechanical properties. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 139–146, 2017.
- SHIROSAKI, R. K. *et al.* Caracterização de painéis de partículas de média densidade feitos com resina poliuretana monocomponente à base de mamona. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 37–43, jan./mar. 2019.
- VARANDA, L. C. *et al.* OAT hulls as addition to high density panels production. **Materials Research**, v. 6, n. 16, p. 1355–1361, 2013.
- YENIOCAK, M. *et al.* Investigating the use of vine pruning stalks (*Vitis vinifera* L. cv. sultani) as raw material for particleboard manufacturing. **Wood Research**, v. 59, n. 1, p. 167–176, 2014.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, pelo fomento à pesquisa através da concessão de bolsa. E, à coordenação do Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM) da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

Lucas Lima Costa

Conceitualização; Curadoria de dados; Análise dos dados; Recebimento de financiamento; Pesquisa; Metodologia; Administração do Projeto; Validação de dados e experimento; Design da apresentação dos dados; Redação do manuscrito original; Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Construção e Estruturas | Universidade Federal da Bahia | Rua Prof. Aristides Novis, 2, 3º andar | Salvador - Bahia - Brasil | CEP 40210-910 | Tel.: (75) 99190-2381 | Email: lucas.lc@ufba.br, lucaslcost@gmail.com

Filipe Luigi Dantas Lima Santos

Metodologia; Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Departamento de Construção e Estruturas | Universidade Federal da Bahia | Email: filipeluigi.s@gmail.com

Nilson Santana de Amorim Júnior

Ensaaios.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais | | Universidade Federal da Bahia | Email: nilson.amorim18@gmail.com

Henrique Almeida Santana

Ensaaios.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais | Universidade Federal da Bahia | Email: almeidahen@gmail.com

Daniel Veras Ribeiro

Disponibilização de ferramentas.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais | Universidade Federal da Bahia | Email: verasribeiro@hotmail.com

Rita Dione Araújo Cunha

Metodologia; Validação de dados e experimento; Design da apresentação de dados; Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Departamento de Construção e Estruturas | Universidade Federal da Bahia | Email: ritadi@uol.com.br

Sandro Fábio César

Supervisão; Validação de dados e Experimento; Design da apresentação de dados; Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Departamento de Construção e Estruturas | Universidade Federal da Bahia | Email: sfcesarpaz@uol.com.br

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Julio Cesar Molina**

Editoras de seção: **Ercília Hitomi Hirota e Juliana Parise Baldauf**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.