

**Propriedades físicas de painéis de alta densidade (HDP) de pinus, bambu e
coparticipação de erva-mate**

**Physical properties of high density panels (HDP) from pine, bamboo and coparticipation
of yerba mate**

**Propiedades físicas de paneles de alta densidad (HDP) de pino, bambú y
coparticipación de yerba mate**

Recebido: 27/04/2020 | Revisado: 07/05/2020 | Aceito: 12/05/2020 | Publicado: 21/05/2020

Fernando Rusch

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5221-835X>

Doutor em Ciências Florestais, Brasil

E-mail: fe_rusch@yahoo.com.br

Erick Chagas Mustefaga

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8298-7897>

Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil

E-mail: erick_mustefaga@hotmail.com

Éverton Hillig

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7895-2453>

Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil

E-mail: hillig@hotmail.com

Rômulo Trevisan

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8535-0119>

Universidade Federal de Santa Maria, Brasil

E-mail: romulo_trevisan@yahoo.com.br

Evandro Teleginski

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2467-9102>

Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil

E-mail: evteleginski@yahoo.com.br

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades físicas de painéis de alta densidade (HDP) produzidos com pinus, bambu e coparticipação de erva-mate, por meio do método de modelagem de misturas. Foram utilizadas partículas de bambu (*Phyllostachys aurea*), de palitos finos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e da madeira de *Pinus taeda*. Estes materiais, em diferentes proporções de misturas, foram encolados em misturador rotativo tipo tambor, com a resina Melamina-Ureia-Formaldeído (MUF), pré-moldadas a mão e prensadas em prensa hidráulica a 120°C, por 10 minutos, com 60 kgf.cm⁻² de pressão, até a espessura de 6 mm. Os painéis foram produzidos com 0,90 g.cm⁻³ de densidade nominal e, após a prensagem, foram estabilizados em ambiente climatizado à 20° C e 65% de umidade relativa. A análise estatística seguiu o planejamento centróide simplex, com sete combinações dos três componentes e três repetições. Verificou-se que a densidade aparente, o teor de umidade, o inchamento em espessura (2 e 24 horas de imersão em água) e absorção de água (2 horas) foram explicadas pelo modelo cúbico, enquanto a absorção de água (24 horas) foi explicada pelo modelo quadrático. Os materiais utilizados possibilitaram a produção de painéis particulados de alta densidade (HDP), com propriedades físicas que variaram em função das diferentes misturas, contudo, os melhores resultados foram observados nos painéis produzidos com as misturas de bambu e *Pinus taeda*.

Palavras-chave: Materiais alternativos; Planejamento centróide simplex; *Phyllostachys aurea*; *Ilex paraguariensis*; *Pinus taeda*.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the physical properties of high density particleboard (HDP) produced with pine, bamboo and co-participation of yerba mate, by means of mixtures modeling. Particles of bamboo (*Phyllostachys aurea*), finely chopped sticks of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) and *Pinus taeda* wood were used. These particles, in different proportions of mixtures, were glued in a drum-type rotary mixer with Melamine-Urea-Formaldehyde (MUF) resin, handmade molded and pressed in hydraulic press at 120 °C and 60 kgf.cm⁻² for 10 minutes, up to the thickness of the 6 mm. The panels were produced with 0.90 g.cm⁻³ of nominal density and, after pressing, were stabilized in an air-conditioned environment at 20° C and 65% of the relative humidity. Statistical analysis follows simplex centroid planning, with seven combinations of the three components and three replicates. It was found that the apparently density, moisture content, thickness swelling (2 and 24 hours water immersion), water absorption (2 hours), are explained by the cubic model, while the water absorption (24 hours) are explained by the quadratic model. The materials used made it

possible to produce high density particleboard (HDP) with physical properties that varied according to the different mixtures, however, the best results were observed for the panels produced with bamboo and *Pinus taeda*.

Keywords: Alternative materials; Simplex centroid planning; *Phyllostachys aurea*; *Ilex paraguariensis*; *Pinus taeda*.

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar las propiedades físicas de los paneles de alta densidad (HDP) producidos con pino, bambú y coarticipación de yerba mate, a través del método de modelado de mezclas. Se utilizaron partículas de bambú (*Phyllostachys aurea*), finos palos de yerba mate (*Ilex paraguariensis*) y madera de *Pinus taeda*. Estos materiales, en diferentes proporciones de mezclas, se pegaron al mezclador de tambor giratorio, con resina de Melamina-Urea-Formaldehído (MUF), prefabricados y prensados en una prensa hidráulica a 120 °C, durante 10 minutos, con 60 kgf.cm⁻² de presión, en el espesor de 6 mm. Los paneles se produjeron con 0,90 g.cm⁻³ de densidad nominal y, después del prensado, se estabilizaron en un ambiente con aire acondicionado a 20 ° C y 65% de humedad relativa. Se realizó un análisis estadístico o plan central simplex, con siete combinaciones de tres componentes y tres repeticiones. Se encontró que la densidad aparente, el contenido de humedad, el aumento de espesor (2 y 24 horas de inmersión en agua) y la absorción de agua (2 horas) se explicaron por el modelo cúbico, mientras que la absorción de agua (24 horas) fue explicado por el modelo cuadrático. Los materiales utilizados permitieron producir paneles de partículas de alta densidad (HDP), con propiedades físicas que variaron según las diferentes mezclas, sin embargo, los mejores resultados se observaron en los paneles producidos con las mezclas de bambú y *Pinus taeda*.

Palabras clave: Materiales alternativos; Planificación centroide simplex; *Phyllostachys aurea*; *Ilex paraguariensis*; *Pinus taeda*.

1. Introdução

Os painéis de madeira aglomerada começaram a ser produzidos no início da década de 1940, para viabilizar a utilização de resíduos de madeira, em virtude da escassez de material com qualidade para produção de painéis compensados causada pelo isolamento da Alemanha durante o período da Segunda Guerra Mundial (Iwakiri et al., 2005a). No Brasil, a produção teve início em 1966, pela empresa Placas do Paraná S.A., instalada na cidade de Curitiba-PR (Iwakiri et al., 2005b), no

entanto, com baixa aceitação pelo mercado consumidor, devido à elevada absorção de água e inchamento em espessura (Melo, Santini, Haselein, & Stangerlin, 2009).

Na década de 1990 as empresas brasileiras produtoras de painéis aglomerados iniciaram investimentos buscando novas tecnologias como, por exemplo, pela substituição das prensas cíclicas pelas contínuas e pelo uso de novas resinas e aditivos. Este processo de aperfeiçoamento proporcionou melhor qualidade dos painéis e posterior expansão do seu consumo no mercado nacional. No Brasil, entre 1995 e 2005, seu consumo evoluiu de 866 mil m³ para 2.098 mil m³, o que representou um crescimento médio de 9,3 % ao ano, superior aos 4,5 % verificados na taxa mundial neste mesmo período (Mattos, Gonçalves, & Chagas, 2008).

Os painéis de partículas de madeira de média densidade (MDP), conforme descrevem Mesquita, Mendes, Mendes, Tonoli, & Marconcini (2015), foram considerados como uma evolução dos painéis aglomerados, pois passaram a ser produzidos com três camadas, duas de partículas finas nas faces e uma de partículas maiores no miolo, sendo utilizados para a fabricação de móveis. Contudo, a razão mais adequada para nova denominação seriam os investimentos na modernização tecnológica das empresas brasileiras que, na metade da década de 1990, possibilitaram a fabricação de produtos com menor absorção de umidade e maior resistência ao arrancamento de parafusos e ao empenamento. Da mesma forma, os painéis de partículas de alta densidade também passaram a ser produzidos com uso destas tecnologias. Com isso, implementou-se uma estratégia de marketing, por meio da modificação da sua nomenclatura tradicional para painel MDP ou HDP, em uma tentativa de dissociar estes novos tipos de painéis particulados do antigo “aglomerado”.

O termo ‘partícula’ corresponde ao componente agregado de um painel aglomerado, podendo ser de madeira ou outro material lignocelulósico. No segmento industrial de base florestal constata-se, anualmente, uma crescente demanda por madeira e, com isso, as indústrias têm buscado diversificar suas fontes de matérias-primas para complementar a produção de painéis reconstituídos (MDP e HDP) (Melo et al., 2009; Stangerlin, Melo, Garlet, & Gatto, 2011; Gauss, Araujo, Gava, Cortez-Barbosa, & Savastano Jr, 2019; Talgatti et al., 2019). A matéria-prima para produção destes painéis pode ser todo e qualquer material lignocelulósico, podendo-se ainda se utilizar da mistura de diferentes fontes (Soratto, Cunha, Vital, Carneiro, & Costa, 2013; Mesquita et al., 2015; Cravo, Sartori, Fiorelli, Balieiro, & Savastano Junior, 2015).

Neste contexto, surge a possibilidade do uso de diversos resíduos gerados pela agroindústria brasileira, como uma alternativa para atender à demanda do setor de painéis particulados. Isto pode agregar valor ao resíduo e proporcionar a expansão do complexo agroindustrial, reduzir os riscos de impactos ambientais com seu descarte, diminuir a pressão

sobre as florestas e tornar a produção dos painéis ainda mais competitiva, devido à redução de custos (Mendes et al., 2010, Melo, Stangerlin, Sousa, Cademartori, & Schneid, 2015).

A geometria das partículas interfere na qualidade dos painéis e, assim, quando são utilizados resíduos vegetais, o controle de suas dimensões é determinante para a padronização dos processos (Jordão, Razera, & Trianoski, 2017). Além disso, esse fator influencia nas propriedades físicas dos painéis.

Para avaliar o efeito da composição de diferentes misturas de materiais na produção de painéis particulados pode-se utilizar a técnica denominada de modelagem de misturas. Neste caso, deve-se considerar que as propriedades de uma mistura são determinadas pelas proporções de seus componentes e as proporções dos diversos componentes são dependentes entre si (Hillig, Haselein, & Iwakiri, 2003). O método da modelagem de misturas recebeu o nome de “planejamento em rede simplex”, sendo geralmente utilizado para avaliar misturas de três componentes. Para encontrar soluções que expressem os valores de uma variável dependente em função da proporção de cada componente da mistura, é utilizada a resolução de equações pelo método dos mínimos quadrados (Hillig et al., 2003; Talgatti et al., 2019).

A hipótese testada é de que esses materiais lignocelulósicos podem ser utilizados para a produção de painéis particulados em diferentes proporções de misturas. Deste modo, o objetivo do estudo foi avaliar as propriedades físicas de painéis de alta densidade (HDP) produzidos com pinus, bambu e coparticipação de erva-mate, utilizando o método de modelagem de misturas.

2. Metodologia

Pesquisas são necessárias para trazer novos saberes para a sociedade como afirmam Pereira et al. (2018). No presente estudo de natureza quantitativa, utilizam-se fórmulas, porcentagens e cálculos. Para a produção de cavacos utilizaram-se bambus (*Phyllostachys aurea*) maduros, com idades estimadas entre três e quatro anos, em virtude de sua aparência externa. Dessa forma, foram selecionadas trinta hastes com uniformidade em altura, diâmetro de haste e espessura de paredes, além de forma geométrica reta para facilitar o processo de picagem. As dimensões finais dos cavacos de bambu foram de, aproximadamente, 3; 20 e 40 mm de espessura, largura e comprimento, respectivamente. Posteriormente, o material foi encaminhado para secagem ao sol em ambiente aberto e ventilado, até atingir teor de umidade de equilíbrio.

Já os palitos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) foram obtidos de ramos finos, formato geral cilíndrico, com diâmetro máximo de 7,5 mm e comprimento variado na condição *in natura*.

Após o processamento e secagem, foram medidos com o auxílio de um paquímetro 150 palitos de erva-mate, com as dimensões médias de 3,4 mm e 39,7 mm, respectivamente.

Os cavacos de bambu e os palitos de erva-mate foram picados em triturador forrageiro, o material resultante foi peneirado em diferentes malhas *mesh*. Também foram utilizadas partículas comerciais de *Pinus taeda* produzidas numa indústria de painéis MDP da região. Na produção dos painéis de alta densidade (HDP) foram utilizadas partículas com granulometria variando entre 8 e 12 *mesh*. Após a classificação por peneiras, o material foi levado à estufa com temperatura de 60 ± 2 °C até atingir entre 3 e 5 % de teor de umidade. A razão de compactação (RC) dos painéis foi calculada pela relação entre densidade do painel e densidade natural da matéria-prima que originou as partículas ou a média da mistura dos diferentes materiais utilizados.

Para a encolagem das partículas foi utilizada a resina Melamina-Ureia-Formaldeído (MUF) comercial, da marca Pole Cola, caracterizada na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do adesivo (MUF) usado no experimento.

Parâmetros	Características e valores médios
Aspecto	Líquido leitoso homogêneo sem sólidos em suspensão
Densidade (25°C)	1.215 a 1.225
pH (25°C)	7,8 a 8,5
Formol livre	< 0,5%
Teor de sólidos	$62,0 \pm 0,5$ %
Viscosidade brookfield (25°C)	200 a 250 cP
Gel time (água fervente)	60 a 80 segundos

Fonte: Pole Cola (2011).

A proporção utilizada de adesivo foi igual a 14% em relação à massa seca das partículas, com a adição de 1% de emulsão de parafina, para reduzir a higroscopicidade dos painéis e 2% de catalizador sulfato de amônio, para acelerar a cura do adesivo.

Após a aplicação do adesivo, catalizador e parafina, com pistola e compressor de ar foi realizada a montagem do colchão com uma distribuição manual e uniforme da mistura em uma caixa formadora de 40x40 cm. O teor de umidade adotado foi de 13%, sendo acrescido água quando necessário.

Em seguida, o colchão passou pela pré-prensagem manual à frio para realizar sua compactação e, por fim, foi prensado em prensa hidráulica de pratos com aquecimento elétrico, à temperatura de 120°C, por 10 minutos a uma pressão específica de 60 kgf.cm^{-2} , sendo utilizadas

barras limitadoras de aço de 6 mm para delimitar a espessura do painel. Os painéis foram produzidos com $0,90 \text{ g.cm}^{-3}$ de densidade nominal e, após a prensagem, foram climatizados por uma semana em ambiente com temperatura de 20°C e 65% de teor de umidade relativa do ar.

Posteriormente, foram produzidos dois corpos de prova de cada painel, totalizando seis por ensaio em cada tratamento, seguindo as determinações das Normas Europeias (EN) 312/03, 323/93, 322/05, 317/05, respectivamente, para as especificações e ensaios de densidade aparente, teor de umidade, inchamento em espessura e absorção de água.

Foram testados os pressupostos de normalidade dos dados e a homogeneidade de variância, por meio dos testes de Shapiro Wilk (Shapiro e Wilk, 1965) e de Bartlett (Bartlett, 1937). Atendidas estas prerrogativas, foi realizada análise dos resultados pelos métodos de análise de variância e o planejamento em modelagem de misturas, utilizando sete combinações dos três componentes, com três repetições. A análise estatística foi realizada em duas etapas. Primeiro foi realizada análise de variância, a fim de verificar se ocorreu diferença das propriedades avaliadas entre os tipos de painéis produzidos. Havendo diferenças significativas, foi aplicado teste de médias (Tukey). Essa análise permitiu comparar as propriedades dos painéis entre eles e com as normas e padrões de referência.

Numa segunda etapa, foi utilizado o modelo experimental denominado planejamento em rede centróide simplex, constituídos por 7 tratamentos. Este delineamento resulta em três modelos, sendo o Linear o mais simples, que procura explicar o comportamento de uma propriedade apenas com os resultados obtidos com a utilização de cada componente individualmente (100% de bambu; 100% de erva-mate e 100% de pinus). Ao considerar as misturas, ocorrem os modelos quadráticos que consideram os efeitos das interações de dois componentes (mistura dupla, com 50% de cada: bambu e erva-mate; erva-mate e pinus; além de bambu e pinus), e por fim, o modelo cúbico que considera os efeitos da interação dos três componentes (em proporções iguais: 33% de bambu, erva-mate e pinus). Os modelos utilizados estão expressos nas equações derivadas 1, 2 e 3, respectivamente.

$$Y_i = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 \quad (1)$$

$$Y_i = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_{12} * X_1 * X_2 + b_{13} * X_1 * X_3 + b_{23} * X_2 * X_3 \quad (2)$$

$$Y_i = b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_{12} * X_1 * X_2 + b_{13} * X_1 * X_3 + b_{23} * X_2 * X_3 + b_{123} * X_1 * X_2 * X_3 \quad (3)$$

Y_i = Variável resposta; b_i = Coeficientes; X_i = Proporção de cada espécie na mistura.

Para a determinação dos coeficientes foram utilizadas as sete misturas mínimas necessárias para o modelo cúbico. Na avaliação foram testados modelos simples, quadrático e

cúbico para todas as propriedades analisadas, sendo descartados os coeficientes não-significativos pelo teste “t”.

3. Resultados e Discussão

Propriedades físicas

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios de densidade aparente de cada tipo de partícula ou mistura utilizada para produção dos painéis, a densidade aparente, teor de umidade e a razão de compactação (RC) de cada tipo de painel, sendo aplicada análise de variância para densidade e teor de umidade dos painéis.

Tabela 2. Densidade aparente das misturas e dos painéis, teor de umidade e razão de compactação dos painéis.

Tratamento	Densidade aparente do material (g.cm ⁻³)	Densidade aparente dos painéis (g.cm ⁻³)	Teor de umidade (%)	Razão de Compactação (RC)
T1 (B 100%)	0,740	0,877 a	9,35 ab	1,2
T2 (E 100%)	0,450	0,877 a	9,28 ab	1,9
T3 (P 100%)	0,410	0,922 a	10,86 c	2,2
T4 (B 50%; E 50%)	0,590	0,914 a	8,79 a	1,5
T5 (E 50%; P 50%)	0,430	0,936 a	9,76 abc	2,2
T6 (B 50%; P 50%)	0,570	0,897 a	9,95 abc	1,6
T7 (B 33,3%; E 33,3%; P 33,3%)	0,530	0,927 a	10,51 bc	1,7

B: Bambu *Phyllostachys aurea*; E: *Ilex paraguariensis* (Erva-mate); P: *Pinus taeda*. Na coluna, médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste F ou Tukey, a 5% de probabilidade de erro. Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

O valor médio verificado para a densidade dos diferentes tipos de painéis não apresentou diferença estatística ($p>0,05$). Estes resultados confirmam o relatado por Guimarães Jr., Mendes, Mendes, & Mori (2011), que todo e qualquer material lignocelulósico tem potencial para ser utilizado como matéria-prima para a fabricação de painéis de partículas. Os painéis confeccionados obtiveram a densidade semelhante à pré-determinada de 0,90 g.cm⁻³, variando de 0,877 a 0,936 g.cm⁻³, o que os classificam como painéis de alta densidade, destinados ao uso comercial ou industrial, segundo as normas ANSI A208.1 (1993; 2016), NBR 14810-2 (2018) e

CS 236-66 (1968). Esta classificação é importante, em virtude dos valores mínimos de módulo de elasticidade, módulo de ruptura, inchamento em espessura e absorção de umidade possuírem estreita relação com a densidade.

Nos painéis puros de bambu e erva-mate constataram-se valores inferiores de densidade, contudo, ao misturar estes materiais, ela é aumentada. As maiores densidades ocorreram no painel puro de pinus e nas misturas de erva-mate com pinus e dos três materiais. Por fim, o maior valor foi verificado na mistura entre erva-mate e pinus. Esse fato se deve à interação entre a reduzida densidade destes materiais e a geometria das partículas de erva-mate, possibilitando maior grau de compressão durante o processo de produção do painel.

A variação observada nos painéis pode ser associada às características das partículas utilizadas para sua fabricação, tais como umidade, mas, principalmente, diferença na densidade dos materiais empregados. O painel de bambu e das misturas de bambu e erva-mate e o de bambu e pinus apresentaram valores médios de RC variando entre 1,2 e 1,6, já a mistura tripla 1,7. Para as demais condições experimentais, painel puro de pinus e o de erva mate e da mistura de erva-mate e pinus, o valor médio foi de 1,9 a 2,2, consistente com os resultados de Mendes, Mendes, Guimarães Júnior, Santos, e César (2012), que observaram maiores valores em painéis que apresentaram densidade mais elevada.

Quanto ao teor de umidade, constatou-se que os painéis de pinus apresentaram valores superiores aos demais, tanto puros como em diferentes composições de misturas. Este resultado pode ser atribuído ao fato de a composição química dos materiais lignocelulósicos dos tipos de partículas ser semelhante à da madeira de folhosas, que contêm menor teor de lignina e maior teor de hemiceluloses (Silvy, Reza, Uddin, & Akther, 2018; Jahirul, Rasul, Chowdhury, & Ashwath, 2012).

O uso de partículas de bambu e de palitos de erva mate é uma possibilidade para a produção de painéis reconstituídos, em especial com uso de resinas resistentes à umidade. Com relação ao bambu, esse se constitui num material adequado para painéis de alta densidade, por apresentar naturalmente densidade elevada.

Os teores de umidade variaram entre 8,79% (mistura bambu e erva-mate) até 10,86% (pinus puro), sendo que todos os tipos de painéis apresentaram valores inferiores ao de equilíbrio da madeira serrada, em idênticas condições de climatização. A justificativa para a reduzida higroscopicidade pode estar associada a perda de água de constituição, devido ao processo termomecânico (elevada temperatura e pressão) aplicado, aliado à adição de resina e aditivos (Cunha et al., 2019; Weber & Iwakiri, 2015).

O menor valor de teor de umidade entre todos os tratamentos foi constatado na mistura de bambu e erva-mate, já seus painéis puros apresentaram valores maiores e semelhantes. Porém, ao ser adicionado pinus nas diferentes misturas, constata-se aumento no teor, entretanto ainda com valores inferiores ao seu painel puro.

A norma ANSI A208.1 (2016) especifica que o inchamento em espessura máximo permitido é de 8%, enquanto a absorção de água máxima é de 30% para painéis de alta densidade. Os painéis puros de bambu apresentaram maior absorção de água e inchamento após 24 h de imersão (Tabela 3). Essa tendência é uma consequência do contato enfraquecido entre as partículas e o adesivo, devido a higroscopicidade, condição menos polar (em comparação à madeira) e o pH do bambu, que provocou baixa retenção do adesivo, causando aumento do inchamento em espessura e da absorção de água.

Tabela 3. Valores médios das propriedades físicas dos painéis HDP.

TR	Bambu	Erva-mate	Pinus	IN2h (%)	AA2h (%)	IN24h (%)	AA24h (%)
1	100	0	0	21,48 e	22,12 bc	30,93 d	45,01 d
2	0	100	0	12,57 bc	32,17 d	13,34 a	43,30 d
3	0	0	100	11,85 b	8,96 a	20,51 c	24,86 a
4	50	50	0	11,38 ab	25,08 c	13,01 a	35,53 b
5	0	50	50	15,29 d	20,78 bc	19,22 c	40,98 cd
6	50	0	50	10,70 a	11,82 a	16,87 b	32,57 b
7	33,3	33,3	33,3	13,83 c	17,79 b	20,58 c	36,71 bc

TR = Tratamento; IN = Percentual de Inchamento (2 e 24 h); AA = Absorção de Água (2 e 24 h); % = Percentual. Na coluna, médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro. Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Neste estudo, nenhum tratamento atendeu as exigências da norma ANSI A208.1 para o inchamento após 24 h de imersão em água. Os tratamentos com erva-mate pura e na mistura entre bambu e erva-mate tiveram menor inchamento, enquanto a menor absorção de água ocorreu no pinus puro, diferindo estatisticamente dos demais ($p < 0,05$). Ocorreu diferença na absorção e no inchamento em espessura, com o uso de diferentes tipos de materiais e misturas. Para a absorção de água após 24 h de imersão, este estudo obteve para painel puro de bambu, valores semelhantes a Biswas, Bose, & Hossain (2011), para diferentes espécies de bambu.

Os painéis produzidos com palitos de erva-mate, por apresentarem partículas mais arredondadas e formadas por material juvenil (mais poroso), permitem maior absorção de água, por outro lado, inibem o inchamento. Isto pode ser em função de uma melhor compactação durante o processo de colagem termomecânica.

Modelagem de misturas

Na Tabela 4 são apresentadas as equações para as propriedades físicas dos painéis.

Tabela 4. Equações simplificadas para as propriedades físico-mecânicas dos painéis HDP, utilizando-se apenas os coeficientes significativos pelo teste “t”.

Equações Propriedades físicas	F	R ²
$Dap = 0,009*B+0,009*E+0,009*P+1,48*10^{-5}*B*E+1,48*10^{-5}*E*P-1,19*10^{-6}*B*P+1,25*10^{-7}*B*E*P$	3762,00	0,364
$TU = 0,094*B+0,093*E+0,109*P-6,32*10^{-5}*B*P+3,07*10^{-5}*B*E*P$	1233,17	0,601
$IN2h = 0,215*B+0,126*E+0,119*P-0,002*B*E+0,001*E*P-0,002*B*P+6,04*10^{-5}*B*E*P$	521,37	0,883
$AA2h = 0,221*B+0,322*E+0,09*P-0,001*B*E+8,63*10^{-5}*E*P-0,001*B*P-2,17*10^{-5}*B*E*P$	312,42	0,918
$IN24h = 0,309*B+0,133*E+0,205*P-0,004*B*E+0,001*E*P-0,004*B*P$	4145,18	0,990
$AA24h = 0,450*B+0,433*E+0,249*P-0,003*B*E+0,003*E*P-0,001*B*P+2,28*10^{-5}*B*E*P$	1128,37	0,901

F = valor de F calculado; R² = coeficiente de determinação; B = Proporção de bambu; E = Proporção de erva-mate; P = Proporção de pinus; Dap = Densidade aparente; TU = Teor de umidade; IN = Percentual de Inchamento (2 e 24 h); AA = Absorção de Água (2 e 24 h). Valores significativos ao nível de 5% de probabilidade de erro. Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

A análise dos dados de densidade mostra que não ocorreu influência dos componentes puros, o que era esperado, pois foi estabelecida uma densidade nominal de 0,90 g.cm⁻³. Ao término da prensagem, quando da abertura da prensa, pode ocorrer um aumento da espessura causada pela liberação das tensões de compressão e isso refletiu numa diminuição da densidade do painel. No entanto, o valor dos coeficientes de cada espécie pura foi 0,009, demonstrando que a densidade dos painéis foi semelhante à nominal estabelecida em todos os tipos de partículas usadas. Foi verificada interação quadrática entre bambu e erva-mate, erva-mate e pinus e interação cúbica entre bambu, erva-mate e pinus foi constatada uma correlação positiva, elevando os valores da densidade, contudo, foi negativa na mistura entre bambu e pinus.

Os painéis puros de bambu e erva-mate apresentaram teor de umidade semelhante, contudo foram mais elevados no pinus. Os coeficientes das misturas de duas espécies (interação dupla) não foram significativos, se presente a erva-mate. Na mistura de bambu, erva-mate e pinus, houve interação tripla e positiva, o que ocasionou maior teor de umidade em relação ao uso puro de bambu e erva-mate.

Para o inchamento em espessura dos corpos-de-prova quando submersos em água por duas horas, o bambu foi o material que apresentou estimativa mais elevada, seguida pela erva-mate. Os coeficientes das interações quadráticas e da cúbica foram todos significativos, no entanto, com sinais diferentes. As misturas de bambu com erva-mate e bambu com pinus

apresentaram interações negativas, pois contribuíram para a redução do percentual de inchamento, contudo, a mistura de erva-mate com pinus apresentou interação positiva. Já na mistura dos três tipos de partículas, a interação foi positiva por causar aumento no inchamento.

A absorção de água em duas horas teve variação diferente do inchamento entre os tipos de partículas usadas, sendo que nas de erva-mate ocorreu maior absorção, seguida das de bambu e pinus, respectivamente. A absorção de água em 2 horas foi menor para pinus em relação ao bambu e à erva-mate. Os coeficientes das interações quadráticas não foram significativos para as misturas de dois tipos de partículas, mostrando que não interagiram para influenciar na absorção de água em duas horas. A interação cúbica foi significativa e negativa, o que permite concluir que a absorção de água em duas horas foi menor com a mistura destes três materiais do que o esperado pela simples soma da absorção de água de cada componente puro.

Para o inchamento em espessura em 24 horas, o bambu teve os valores mais elevados. Os coeficientes das interações quadráticas foram todos significativos, no entanto, com sinais diferentes. As misturas de bambu com erva-mate e bambu com pinus apresentaram interação negativa, pois contribuíram para a redução do percentual de inchamento, contudo, a mistura de erva-mate com pinus apresentou interação positiva. Na mistura dos três tipos de partículas, a interação não foi significativa.

Para absorção de água em 24 horas todos os coeficientes foram significativos, mostrando que houve interação dupla entre todas as misturas de dois componentes e interação tripla. As interações entre bambu e erva mate e entre bambu e pinus foram negativas. A interação entre erva mate e pinus e a interação tripla foram positivas, no entanto a magnitude desta última é pequena. Por exemplo, numa mistura em partes iguais dos três componentes, o efeito da interação tripla na AA24 será de aumento desta propriedade em 0,82 pontos percentuais, por outro lado, o efeito da interação dupla entre erva mate e pinus será de aumento em 3,27 pontos percentuais. No caso de AA24, o uso do pinus puro favorece essa propriedade. As misturas de pinus e bambu, bambu e erva mate e a mistura tripla tende para valores intermediários. O uso de bambu puro e a mistura entre pinus e erva mate aumentam os valores de inchamento dos painéis.

A existência da camada de sílica na casca do bambu, revestida por cera e substâncias químicas hidrofóbicas, ou seja, com capacidade reduzida de interagir com a água, não inibiu a ocorrência dos maiores valores de inchamento e absorção de água, em painéis puros. Contudo, na mistura de bambu com erva-mate, o inchamento foi o menor do experimento. Devido às diversas interações significativas observadas nas propriedades de estabilidade dimensional, na Figura 1 são apresentados os gráficos ternários com suas linhas de tendência para facilitar a visualização

da ocorrência destas interações e de que forma a mistura de dois ou de três componentes pode influenciar em cada propriedade. Para facilitar a visualização, foram utilizadas cores sendo o vermelho para os piores resultados, o amarelo intermediário e o verde o melhor.

Figuras 1A, 1B, 1C e 1D. Propriedades físicas dos painéis de alta densidade (HDP).

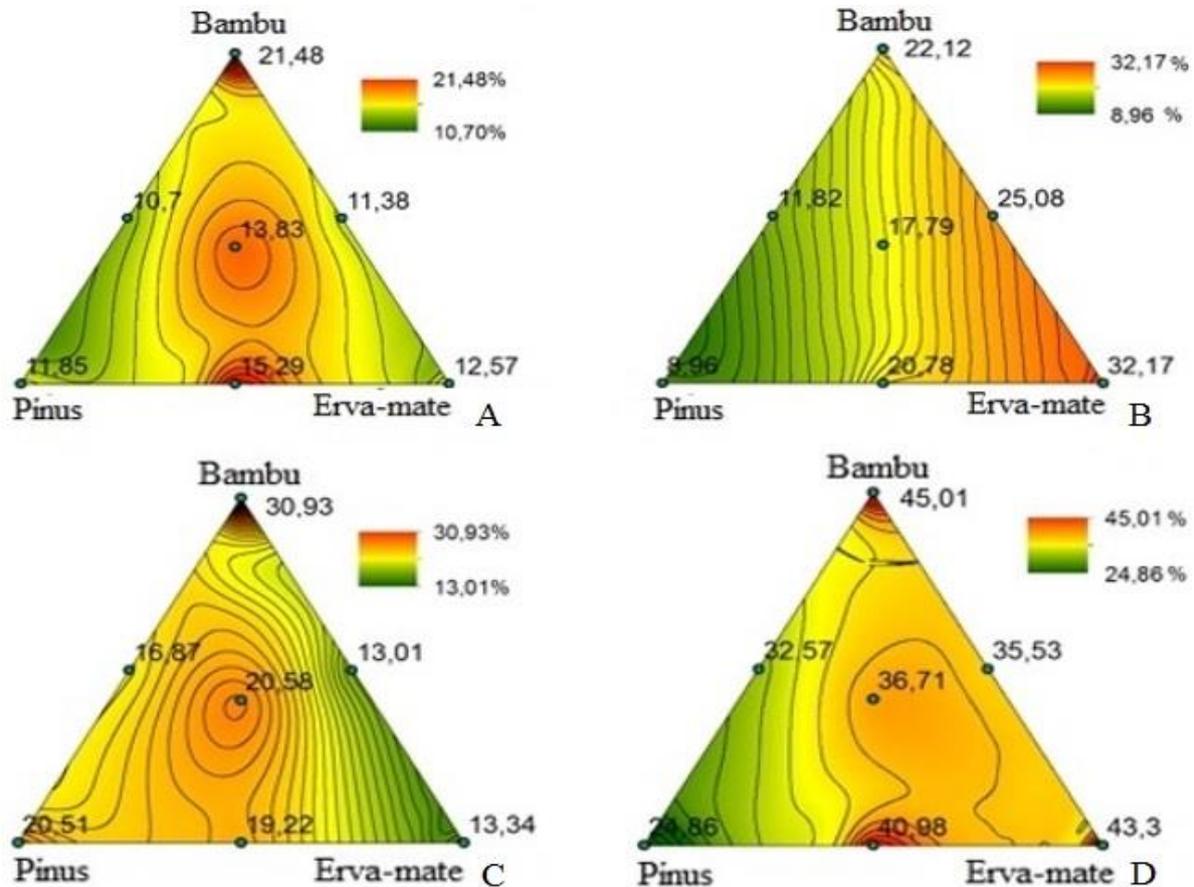


Figura 1A. Inchamento em espessura (2h); Figura 1B. Absorção de água (2h);
Figura 1C. Inchamento em espessura (24h); Figura 1D. Absorção de água (24h).
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

A Figura 1A mostra que os painéis de pinus puro e naqueles que faz parte da composição, ocorreram valores reduzidos de inchamento em espessura em duas horas. Por esta razão, pode-se afirmar que a espécie *Pinus taeda* possui boas propriedades para produção de painéis submetidos à condição severa de umidade, pois apresenta reduzida variação dimensional quando imersos em curto período. Os valores mais elevados de inchamento em espessura em duas horas ocorrem para o bambu e em seguida para erva-mate, contudo, a mistura deles resultou no menor valor.

Na Figura 1B são mostrados valores inferiores de absorção de água em duas horas, nos painéis puros de pinus ou nas suas misturas. Os mais elevados para absorção ocorreram nos painéis puros de erva-mate e em seguida nos de bambu. As figuras analisadas demonstraram

elevada variação de inchamento e absorção de água em duas horas de imersão, entre as espécies, em especial com relação ao pinus puro ou como composição de mistura.

Com relação ao inchamento em 24 horas de imersão em água (Figura 1C), pode-se afirmar que o uso de partículas de palitos de erva-mate proporcionou propriedades satisfatórias para produção de painéis, pois permitiu a redução da variação dimensional, inclusive com valores inferiores ao verificado para o pinus, espécie tradicionalmente utilizada na produção de painéis.

Na Figura 1D foram verificados valores inferiores de absorção de água nos painéis puros de pinus. Além disso, os com pinus presente na composição apresentaram absorção de água inferior aos com material puro das espécies erva-mate e bambu, contudo, ao misturá-los numa composição única, o teor foi reduzido.

Desta forma, observou-se que o bambu apresentou elevados percentuais, tanto para inchamento como para absorção de água. Isto pode ser atribuído ao fato das suas fibras não terem proporcionado uma boa colagem, permitindo maior absorção de água e aumento das dimensões. Para a erva-mate, constatou-se reduzido inchamento em espessura, mas elevada absorção de água. Em relação ao pinus, constatou-se o menor valor para absorção de água.

4. Considerações Finais

Os resultados obtidos permitem classificar os painéis como de alta densidade, atendendo aos parâmetros de densidade e teor de umidade da classe H1 da norma ANSI A208.1 (2016), contudo, as propriedades de inchamento e absorção de água não se adequaram às suas exigências.

A modelagem de misturas demonstrou que a densidade, o teor de umidade, o inchamento (2 e 24 horas) e a absorção de água (2 horas) foram explicadas pelo modelo cúbico, enquanto a absorção de água (24 horas) pelo modelo quadrático.

São escassas as pesquisas de painéis de alta densidade com uso de materiais alternativos, dificultando comparações de resultados, neste sentido, recomenda-se a realização de novas pesquisas, considerando diferentes materiais, além de teores e tipos de adesivos.

Os painéis desenvolvidos nesse estudo atenderam ao conceito de produto ecoeficiente por serem produzidos a partir de resíduos e por possibilitarem seu uso na indústria moveleira e na construção civil, em especial como material de apoio estrutural e de revestimento.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

Referências

ANSI. (1993). *ANSI A208.1: Mat-formed wood particleboard: Specification*; National Particleboard Association, Gaithersburg. American National Standards Institute – ANSI.

ANSI. (2016). *ANSI A208.1: Particleboard standard*; Composite Panel Association, Gaithersburg, MD. 12p. American National Standards Institute - ANSI.

ABNT. (2018). *NBR 14810-2: Painéis de partículas de média densidade - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro. 71 p. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

Bartlett, MS. (1937). Properties of sufficiency and statistical tests. *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 160, 268-282.

Biswas, D, Bose, SK & Hossain, MM. (2011). Physical and mechanical properties of urea formaldehyde-bonded particleboard made from bamboo waste. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(2), 84-87.

CS. (1968). *CS 236-66: Mat formed wood particleboard*. Commercial Standard – CS.

Cravo, JCM, Sartori, DL, Fiorelli, J, Balieiro, JCC & Savastano Jr, H. (2015). Paineis aglomerado de resíduos agroindustriais. *Ciência Florestal*, 25(3), 721-730.

Cunha, AB, Grubert, W, Brand, MA, Rios, PD, Belini, UL, Pereira, GF, Carvalho, CA & Barnasky, RRS. (2019). Technological properties of particleboards produced using mixture of pines and bamboo. *Ciência Rural*, 49(5), e20180670. doi: 10.1590/0103-8478cr20180670

CEN. (2003). *EN 312: Tableros de partículas - especificaciones*, Madrid. 10 p. European Committee for Standardization - CEN.

CEN. (2005). *EN 317: Particleboards and Fibreboards; Determination of Swelling in Thickness after Immersion in Water, test Method*, Brussels. 10 p. European Committee for Standardization - CEN. European Committee for Standardization - CEN.

CEN. (1993). *EN 323: Determinación de la densidad.*, Madrid. 10 p. European Committee for Standardization - CEN.

CEN. (2005). *EN 322: Wood-based Panels - Determination of Moisture Content, test Method*. Brussels. 10 p. European Committee for Standardization - CEN.

Gauss, C, Araujo, V, Gava, M, Cortez-Barbosa, J & Savastano Jr, H. (2019). Bamboo particleboards: recent developments. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 49, e55081, 2019.

Guimarães Jr, JB, Mendes, LM, Mendes, RF & Mori, FA. (2011). Painéis de madeira aglomerada de resíduos da laminação de diferentes procedências de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus cloeziana*. *Cerne*, 17(4), 443-452.

Hillig, É, Haselein, CR & Iwakiri, S. (2003). Modelagem de mistura de três espécies de madeiras na fabricação de painéis estruturais. *Floresta*, 33(3), 311-320.

Iwakiri, S, Caprara, AC, Saks, DCO, Guisantes, FP, Franzoni, JA, Krambeck, LBP & Rigatto, PA. (2005a). Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resinas. *Scientia forestalis*, 68, 39-43.

Iwakiri, S, Andrade, AS, Cardoso Jr, AA, Chipanski, ER, Prata, JG & Adriazola, MKO. (2005b). Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-uréia-formaldeído. *Cerne*, 11(4), 323-328.

Jahirul, MI, Rasul, MG, Chowdhury, AA & Ashwath, N. (2012). Biofuels Production through Biomass Pyrolysis: A Technological Review. *Energies*, 5, 4952-5001. doi:10.3390/en5124952

Jordão, D, Razera, D & Trianoski, R. (2017). A geometria das partículas das fibras vegetais para aplicação no design de produtos. *Estudos em Design*, 25(2), 50-65.

Mattos, RL, Gonçalves, RM & Chagas, FB. (2008). *Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas* (27ª ed.). BNDES Setorial, 37p.

Melo, RR, Santini, EJ, Haselein, CR & Stangerlin, DM. (2009). Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e casca de arroz. *Ciência Florestal*, 19, 449-460.

Melo, RR, Stangerlin, DM, Sousa, AP, Cademartori, PHG & Schneid, E. (2015). Propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados madeira-bambu. *Ciência Rural*, 45(1), 35-42. doi: 10.1590/0103-8478cr20120970

Mendes, RF, Guimaraes Jr, M, Raabe, J, Silva, DW, Tonoli, GHD, Mendes, RF, Mendes, LM, Abranches, RAS, Santos, RC & Guimaraes Jr, JB. (2010). Painéis aglomerados com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. *Scientia Forestalis*, 38(86), 285-295.

Mendes, RF, Mendes, LM, Guimarães Jr, JB, Santos, RC & César, AAS. (2012). Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. *Ciência Florestal*, 22(1), 161-170.

Mesquita, RGA., Mendes, LM., Mendes, RF, Tonoli, GHD & Marconcini, JM. (2015). Inclusão de feixes de sisal na produção de painéis MDP de eucalipto. *Scientia Forestalis*, 43(105), 75-82.

Pereira, AS, Shitsuka, DM, Parreira, FJ & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.

Pole Cola. (2011). *POLE COLA: Resina Melanina-ureia-formaldeído (MUF): considerações gerais para entendimento das qualidades do produto*. Boletim técnico. 3p.

Shapiro, SS & Wilk, MB. (1965) An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52, 591-611. doi: 10.1093/biomet/52.3-4.591

Silvy, NF, Reza, S, Uddin, N & Akther, M. (2018). Comparison between Different Components of Some Available Hardwood and Softwood in Bangladesh. *Journal of Biotechnology and Biochemistry*, 4(1), 1-5. doi: 10.9790/264X-04010105

Soratto, DN., Cunha, AB, Vital, BR, Carneiro, ACO & Costa, FR. (2013). Efeitos da adição de cavaco com casca na qualidade de painéis MDP produzidos com *Eucalyptus* sp. *Ciência da madeira*, 4(1), 46-59.

Stangerlin, DM, Melo, RF, Garlet, A & Gatto, DA. (2011). Durabilidade natural de painéis aglomerados confeccionados com *Eucalyptus grandis* e *Bambusa vulgaris* em ensaio de apodrecimento acelerado. *Ciência Rural*, 48(8), 1369-1374.

Talgatti, M, Souza, JT, Silveira, AG, Menezes, WM, Haselein, CR & Santini, EJ. (2019). Propriedades mecânicas do MDP produzido com partículas de madeira de *Ilex paraguariensis*, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, 47(122), 273-285.

Weber, C & Iwakiri, S. (2015). Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. *Ciência Florestal*, 25(2), 405-413. doi: 10.5902/1980509818460

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Fernando Rusch – 40%

Erick Chagas Mustefaga – 20%

Éverton Hillig – 20%

Rômulo Trevisan – 10%

Evandro Teleginki – 10%