

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5313>

ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 20/01/2021

APROVADO 14/10/2021

PUBLICADO ON-LINE 14/10/2021

PUBLICADO 30/09/2022

EDITORA ASSOCIADA
Ane Cristine Fortes da Silva

Análise das propriedades físicas e mecânicas de painéis de partículas fabricados com maravalhas integrais de *Pinus* sp. e resinal

-  Vitor Uemura da Silva ^[1]
-  Felipe Nascimento Arroyo ^[2] *
-  Vinícius Borges de Moura Aquino ^[3]
-  Diogo Aparecido Lopes Silva ^[4]
-  André Luis Christoforo ^[5]
-  Francisco Antonio Rocco Lahr ^[6]

[1] japauemura@gmail.com.

[6] frocco@sc.usp.br. Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM-SET), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), Brasil

[2] lpe.arroyo@gmail.com

[5] christoforoal@yahoo.com.br. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil.

[3] aquino.vini@hotmail.com.

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Sul e do Sudeste de Pará (UNIFESSPA), Brasil.

[4] diogo.apls@ufscar.br. Departamento de Produção, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil.

RESUMO: A cadeia produtiva da madeira sólida gera grande quantidade (60%) de resíduos, que, alternativamente ao descarte e à queima, podem ser utilizados na fabricação de outros produtos, como painéis particulados. Dessa forma, esta pesquisa objetivou, com o uso do mix de maravalhas na forma integral de madeiras de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* e do adesivo ureia-formaldeído, avaliar as propriedades físicas dos painéis gerados com partículas de diferentes densidades, além de estimar propriedades em função de outras, através de modelos de regressão lineares, considerando também parâmetros colorimétricos. Foram produzidos seis painéis de partículas de média e seis de alta densidade. As propriedades foram obtidas de acordo com as premissas e métodos de cálculo da norma brasileira ABNT NBR 14.810-2:2018, sendo os requisitos avaliados com base em normas brasileiras e internacionais. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que a densidade dos painéis afetou, significativamente, em praticamente 50% as propriedades determinadas. Os painéis podem ser classificados como P2 pela norma brasileira, cabendo destacar que, em algumas propriedades, os valores superaram os requisitos da classe P7. A condutividade térmica indica ser apropriada a aplicação dos compósitos em edificações. Dos modelos de regressão, apenas quatro apresentaram coeficiente de determinação ótimo.

Palavras-chave: colorimetria; madeira particulada; painéis de madeira reconstituída; resina ureia-formaldeído.

*Analysis of the physical and mechanical properties of particleboard manufactured with integral wood shaving of *Pinus* sp. and resin*

ABSTRACT: The production chain of solid wood generates a large amount (60%) of waste, which alternatively to disposal and burning, can be used in the

*Autor para correspondência.

manufacture of other products, such as particulate panels. Thus, this research aimed at evaluating the physical properties of panels generated with particles of different densities, by using the mix of wood shavings in the full form of *Pinus elliottii* and *Pinus taeda* woods and the urea-formaldehyde adhesive, in addition to estimating properties as a function of others through linear regression models, also considering colorimetric parameters. Six medium and six high density particle panels were produced. The properties were obtained according to the assumptions and calculation methods of the Brazilian standard ABNT NBR 14.810-2:2018, and the requirements were evaluated based on Brazilian and international standards. According to the results obtained, it was found that the density of the panels affected, significantly, by almost 50% the determined properties. The panels can be classified as P2 by the Brazilian standard, it should be noted that in some properties the values exceeded the requirements of the P7 class. The thermal conductivity indicates the application of composites in buildings as appropriate. Of the regression models, only four showed optimal determination coefficients.

Keywords: colorimetry; particulate wood; reconstituted wood panels; urea-formaldehyde resin.

1 Introdução

A madeira é um material que gera grande quantidade de resíduos em sua produção. Desde a etapa de plantio até o produto final, um total de 30 milhões de toneladas de resíduos pode ser gerado. Sendo assim, estudos que analisam a viabilidade na utilização desses resíduos como material da construção civil ganham espaço (FAGUNDES, 2003).

No Brasil, observam-se dois cenários comuns quando o assunto é a destinação de resíduos sólidos de madeira. No primeiro deles, que na maioria das vezes ocorre em pequenas serrarias afastadas dos grandes centros, os resíduos são empilhados e deixados na natureza, ou então queimados ao ar livre. No segundo, geralmente onde há um processo industrial envolvido, os resíduos são utilizados para a produção de energia através da queima (energia que retorna para o processo produtivo) ou são recolhidos por empresas especializadas (IBÁ, 2017).

A maravalha, gerada durante o aplanamento de tábuas, é um dos principais resíduos sólidos gerados no processamento mecânico da madeira, apresentando um formato característico de fácil identificação (SANTOS *et al.*, 2014). Para sua utilização, é necessário que as tábuas passem por um processo de homogeneização – elas são colocadas em um moinho, com peneira, para a redução de suas dimensões, o que resulta em um produto homogêneo e de melhor aplicabilidade (CABRAL *et al.*, 2017; HAZRATI-BEHNAGH *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2014).

Uma das utilizações das maravalhas é na produção de painéis, os quais podem ser considerados por sua densidade em média ($0,550 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,750 \text{ g.cm}^{-3}$) ou alta (superior a $0,750 \text{ g.cm}^{-3}$), alterando assim a sua aplicabilidade (ABNT, 2018; VARANDA *et al.*, 2013). Diferentemente dos painéis *Oriented Strand Board* (OSB), que são compostos por tiras de madeira prensadas dispostas na mesma direção, esses tipos de painéis produzidos com tábuas não são desenvolvidos priorizando aplicações estruturais (FERRO *et al.*, 2018; MACEDO *et al.*, 2016). Em relação a sua fabricação, geralmente são utilizadas maravalhas da madeira *Pinus* sp. e resina (adesivo) ureia-formaldeído (DACOSTA *et*

al., 2005, IWAKIRI *et al.*, 2001; IWAKIRI *et al.*, 2012; TRIANOSKI *et al.*, 2016). Essa resina é largamente utilizada devido ao baixo custo e boa resistência mecânica, porém é bastante vulnerável à ação da umidade e altas temperaturas, sendo utilizada somente para aplicações internas (MALONEY, 1977).

A partir desses estudos, esta pesquisa objetivou investigar o uso integral de maravalhas, ou seja, sem pré-classificação dimensional, com o intuito de eliminar uma das etapas de produção e destinar o uso de todo o resíduo gerado à produção de painéis de baixa e alta densidade. O resíduo utilizado foi o de madeiras de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, com o uso do adesivo ureia-formaldeído. Foi investigado se as propriedades físicas e mecânicas atendem aos requisitos mínimos normativos, além da influência da densidade dos painéis nas propriedades investigadas, assim como a estimativa de propriedades em função de outras por meio de modelos de regressão.

2 Método da pesquisa

As madeiras foram secas em estufa até atingirem teor de umidade de 12%, de acordo com a ABNT NBR 7190:1997 (ABNT, 1997). Em seguida, as peças de madeira foram cortadas em partes de 3000 mm × 89 mm × 38 mm, que passaram posteriormente por uma desengrossadeira (INVICTA), com faca de 40 cm de largura e altura máxima de corte de 25 cm. As maravalhas resultantes desse processo foram devidamente recolhidas do chão e estocadas em tambores herméticos, para diminuir o contato com a atmosfera e protegê-las das variações de temperatura e umidade do ambiente.

A resina ureia-formaldeído (UF), fornecida pela SI Group, possui pH variando entre 7 e 8,5 e um teor de sólidos que pode variar de 50% até 65%.

Foram confeccionados seis painéis de média densidade (560 gramas de partículas por painel) e outros seis de alta densidade (720 gramas de partículas por painel), todas as 12 peças com a adição de 15% de adesivo UF e com dimensões nominais de 280 mm × 280 mm × 10 mm, cabendo destacar que 4% desses 15% de adesivo UF ficaram retidos nos recipientes metálicos das bateadeiras industriais (LIEME BP-12 SL e G. PANIZ BP 38C) utilizadas, o que implica o uso efetivo de 11% de adesivo.

Após a encolagem, os compostos formados foram colocados em uma forma quadrada com aresta de 28 cm, na qual ocorreu a pré-prensagem com cerca de 0,013 Mpa, para que os materiais fossem condensados na forma básica dos painéis (formação dos colchões de partículas). Em seguida, os colchões foram encaminhados à prensa (marca Marconi modelo MA 098/50) e submetidos a uma pressão de 3,5 MPa e a uma temperatura de 130 °C, por um intervalo de tempo de 10 minutos (BUZO, 2018). Depois disso a pressão foi liberada e os painéis foram colocados em posição vertical, para que o processo de cura se completasse, o que levou aproximadamente 72 horas (POLETO *et al.*, 2020).

De cada painel foram extraídos 10 corpos de prova (50 mm × 50 mm × 10 mm) para a determinação da densidade aparente (ρ); 5 para os ensaios de flexão estática (250 mm × 50 mm × 10 mm), obtendo-se os módulos de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR); 3 (50 mm × 50 mm × 10 mm) para os ensaios de inchamento em espessura IE, avaliados após 2 (IE2h) e 24 (IE24h) horas de imersão em água, sendo que 24h é o exigido pela norma e 2h apenas para verificar um inchamento imediato; 3 (50 mm × 50 mm × 10 mm) para os ensaios de adesão interna (determinação da tração perpendicular – TP); 3 para os ensaios de arrancamento de parafuso, em que foram determinadas as resistências ao arrancamento de parafuso de face (APf) e de topo (APt) (Figura 1); e 1 (50 mm de diâmetro) para a determinação da condutividade térmica (λ).

Figura 1 ▶

Ensaio de arrancamento de parafuso de topo.

Fonte: arquivo dos autores



As propriedades ρ , MOE, MOR, IE2h, IE24h, TP, APf e APt e os requisitos mínimos para utilização foram obtidas e analisadas seguindo as premissas e os métodos de cálculo da norma brasileira ABNT NBR 14.810-2:2018.

Os ensaios de tração perpendicular e de arrancamento de parafuso foram realizados em uma máquina universal de ensaios (AMSLER), com capacidade de 250 kN, enquanto os ensaios de flexão estática ocorreram com o uso de máquina universal de ensaios (EMIC), com 30 kN de capacidade.

A colorimetria foi realizada com o espectrofotômetro Konica Minolta Chroma Meter CR-410, juntamente com o processador de dados DP-400, da mesma fabricante. Foram medidos os níveis de luminosidade (L), coordenada no eixo vermelho-verde (a) e a coordenada no eixo amarelo-azul (b), em cada um dos corpos de prova produzidos.

Para a análise estatística, o *software* BioEstat foi utilizado. O teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, foi utilizado para verificar a influência do fator densidade dos painéis (média, alta) nos valores das propriedades físicas e mecânicas avaliadas.

Com relação aos modelos de regressão linear para a estimativa das propriedades, antes da geração desses modelos, o teste de correlação de Pearson foi aplicado às variáveis, de maneira a indicar a existência ou não de correlação entre as propriedades analisadas, medida pelo coeficiente r ($-1 \leq r \leq 1$). A análise de variância (ANOVA), também ao nível de 5% de significância, foi utilizada de maneira a avaliar a significância da correlação obtida. A análise de variância (5% de significância) também foi considerada sobre os modelos de regressão.

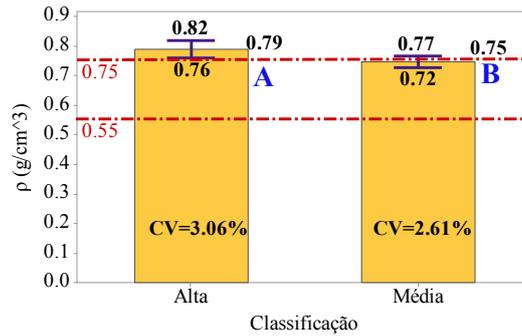
3 Resultados da pesquisa

Na Figura 2, são indicados os valores médios das densidades dos painéis, os coeficientes de variação (CV), os intervalos de confiança (IC) da média (ao nível de 95% de confiabilidade), assim como os resultados do teste de Tukey sobre o fator densidade dos painéis (média e alta densidade), em relação à densidade e aos inchamentos em espessura, após 2 e 24 horas de imersão em água.

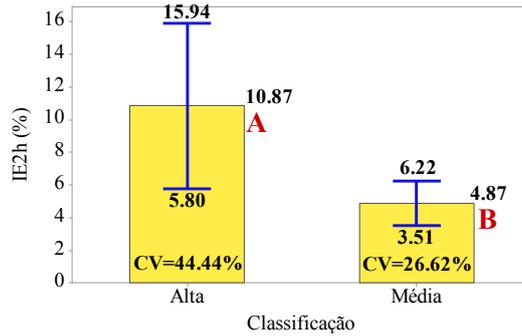
Figura 2 ►

Resultados das propriedades físicas dos painéis de média e alta densidade: densidade (a) e inchamento em espessura após 2 (b) e 24 (c) horas de imersão em água.

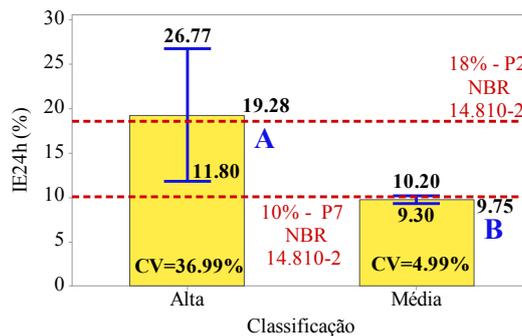
Fonte: dados da pesquisa



(a)



(b)



(c)

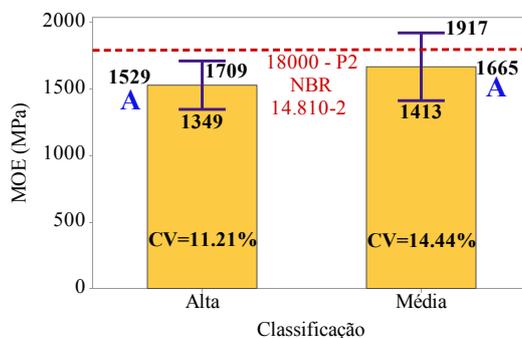
Fica evidente que os painéis fabricados de média densidade encontram-se no limite de classificação, segundo a norma brasileira (entre 0,55 g.cm⁻³ e 0,75 g.cm⁻³). Esses foram assim fabricados (densidade mais próxima do limite superior da definição de média densidade pela norma brasileira) com o intuito de apresentarem melhor desempenho das propriedades físicas e mecânicas (MIN *et al.*, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2018). Mesmo sendo próximas às densidades dos painéis fabricados para serem de média e de alta densidade, o teste de Tukey acusou diferença significativa, como já esperado.

Com relação ao inchamento em espessura, tanto após 2 horas quanto após 24 horas de imersão em água, o CV e, conseqüentemente, o IC dos painéis de média densidade foram inferiores aos dos painéis de alta densidade. Isso implica maior dificuldade em se dispersar o adesivo sobre as partículas dos painéis de alta densidade (fabricados com 720 gramas de partículas), que apresentaram maior área superficial total para encolagem quando comparados aos painéis de partículas de média densidade (560 gramas de partículas) (VARANDA *et al.*, 2013). Maiores valores do CV dos painéis são indicativos de maiores porosidades dos compósitos (MOUBARIK, 2010), e isso pode implicar um desempenho mecânico não tão distinto entre os painéis de média e os de alta densidade.

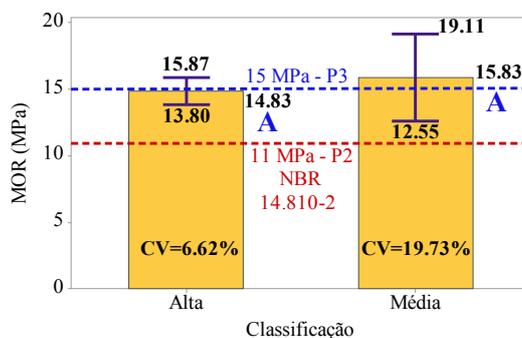
Com relação aos requisitos, os painéis de média densidade se enquadram na classe P7 (painéis estruturais em condições severas de cargas) da ABNT NBR 14.810-2:2018, enquanto os de alta densidade são classificados como P2 (painéis não estruturais para uso interno, em condições secas). Mesmo sendo pequena a diferença de densidade entre os tipos de painéis, fica evidente que o desempenho dos de média densidade se apresentou como condição limite, pois, para um pequeno aumento nesse valor, resultando em painéis de alta densidade, as propriedades de inchamento em espessura aumentaram significativamente. Cabe destacar que a falta de trabalhos com o uso da maravalha integral, ressaltando-se ainda o uso do mix entre *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, aliado às características da não adição de parafina no adesivo ureia-formaldeído assim como do teor de resina adotado neste trabalho, impossibilitam uma comparação fidedigna dos resultados de inchamento assim como dos resultados das demais propriedades obtidas com os oriundos de pesquisas correlatas.

Na Figura 3, são apresentados os valores médios de MOE e MOR, os coeficientes de variação (CV), os intervalos de confiança da média assim como os resultados do teste de Tukey.

Figura 3 ▶
Resultados do
módulo de elasticidade (a)
e de ruptura (b) na
flexão estática.
Fonte: dados da pesquisa



(a)



(b)

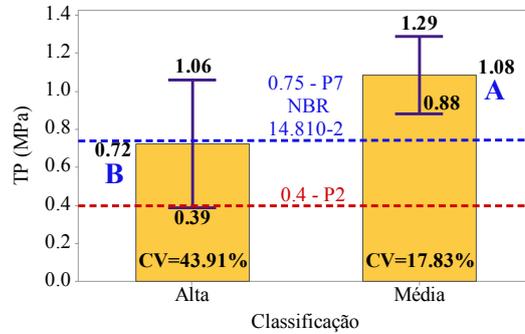
Não houve diferença estatística nos valores do MOE (Figura 3a) e do MOR (Figura 3b) entre os painéis de média e de alta densidade. A equivalência dos resultados para o MOE e para o MOR se justifica pela pequena diferença entre as densidades dos painéis (média = 0,75 g.cm⁻³; alta = 0,79 g.cm⁻³), e a tendência de superioridade dos painéis de média densidade (tendência de comportamento, pois a estatística acusou equivalência nos valores médios em ambas as propriedades) em relação aos de alta densidade pode ser explicada pelos valores de inchamento em espessura, que foram significativamente menores nos painéis de média densidade.

Com relação aos requisitos, o valor médio do MOE dos painéis de média densidade (1665 MPa) foi muito próximo ao valor normativo de referência (1800 MPa) para painéis

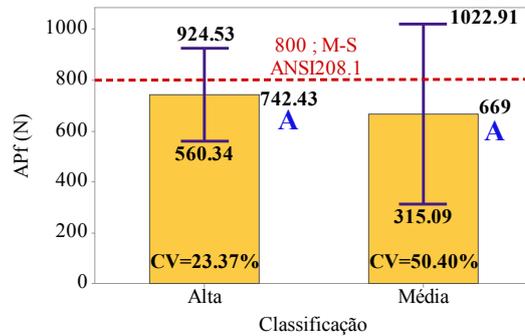
P2 (painéis não estruturais para uso interno em condições secas). Com relação ao MOR, ambos os tipos de painéis se enquadram na classe P3 (painéis não estruturais para uso em condições úmidas).

Na Figura 4, são apresentados os resultados da tração perpendicular e das resistências ao arrancamento de parafuso de face e de topo para ambos os tipos de painéis.

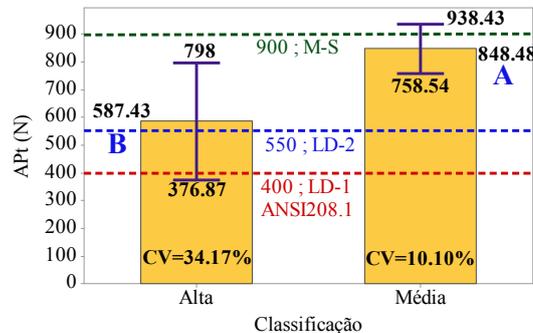
Figura 4 ►
 Resultados da tração perpendicular (a) e das resistências ao arrancamento de parafuso de face (b) e de topo (c).
 Fonte: dados da pesquisa



(a)



(b)



(c)

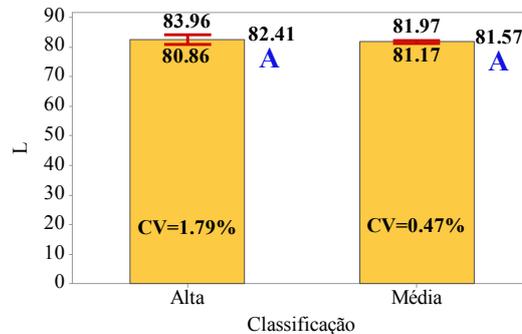
Para a tração perpendicular (Figura 4a), é verificada a superioridade dos painéis de média densidade frente aos de alta densidade; o mesmo ocorreu com a resistência ao arrancamento de parafuso de topo (Figura 4c). A tendência de superioridade dos painéis de média densidade na TP e na APt, frente aos de alta densidade, pode ser explicada pelos menores valores do inchamento em espessura associados aos painéis de média densidade, o que implica em materiais menos porosos do que os compostos de alta densidade. Com relação à resistência ao arrancamento de parafuso de face, os valores médios de ambos os painéis foram considerados equivalentes. Tal resultado pode ser explicado pela não consideração de limitadores laterais confinando lateralmente os painéis, associado ainda à pequena diferença nos valores das densidades.

Dos requisitos normativos, pelos resultados da tração perpendicular, os painéis de alta densidade são considerados pertencentes à classe P7 (painéis estruturais em condições severas de cargas) da norma brasileira – cabendo destacar que as classes variam de P2 a P7 –, e os de média densidade apresentaram valor médio 50% superior ao limite da classe P7.

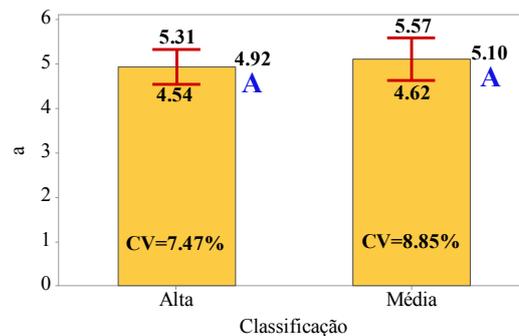
Com base no documento normativo internacional, os painéis de alta densidade apresentaram valor médio inferior, mas muito próximo do valor de referência (classe M-S) para a resistência ao arrancamento de face. Para a resistência ao arrancamento de parafuso de topo, os painéis de alta densidade são classificados como LD-2, e os de média densidade como M-S.

Na Figura 5, são apresentados os resultados do ensaio de colorimetria para os dois tipos de painéis, em que *L* representa o índice de luminosidade; *a* representa a coordenada no eixo vermelho-verde – sendo que valores positivos indicam um deslocamento em direção ao vermelho, e valores negativos em direção à cor verde –; e *b* representa a coordenada no eixo azul-amarelo, em que valores positivos indicam deslocamento no eixo em direção ao amarelo, e valores negativos em direção ao azul.

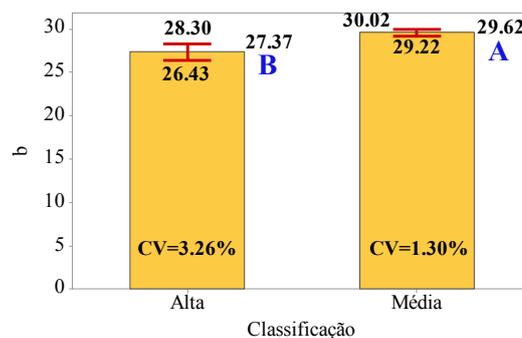
Figura 5 ►
Resultados das
propriedades colorimétricas:
L (a), *a* (b) e *b* (c).
Fonte: dados da pesquisa



(a)



(b)



(c)

O teste de Tukey acusou significância apenas no parâmetro b (coordenada no eixo azul-amarelo; $-60 \leq b \leq 60$), ou seja, a densidade dos painéis não afetou de forma significativa as medidas L e a . Por ser b maior do que zero, isso indica deslocamento no eixo em direção ao amarelo, sendo a coloração amarelada característica das madeiras de *Pinus* sp.

Como referência aos parâmetros colorimétricos aqui obtidos, Marini (2019) encontrou valores de 75,22; 6,34 e 25,81 das medidas L , a e b , respectivamente, para a madeira de *Pinus* sp., que são próximos dos resultados apresentados na Figura 6. As diferenças encontradas são justificadas pela variabilidade intrínseca aos materiais (madeira sólida e painéis), assim como pela adição da resina necessária à fabricação dos painéis.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das correlações (coeficiente r de Pearson) entre todas as propriedades avaliadas nesta pesquisa, juntamente com os respectivos p -valores (probabilidade p) da ANOVA (5% de significância), encontrando-se em negrito as correlações consideradas significativas (p -valor $< 0,05$).

Tabela 1 ▼

Resultados da análise de correlação linear entre as propriedades dos painéis (parte 1).

Fonte: dados da pesquisa

| PROP. | ESTAT. | P | IE2H | IE24H | Λ | RA | MOE | MOR | TP | APF | APT | L |
|-----------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| IE2H | R | 0,696 | | | | | | | | | | |
| | P | 0,012 | | | | | | | | | | |
| IE24H | R | 0,732 | 0,938 | | | | | | | | | |
| | P | 0,007 | 0,000 | | | | | | | | | |
| Λ | R | 0,605 | 0,674 | 0,644 | | | | | | | | |
| | P | 0,037 | 0,016 | 0,024 | | | | | | | | |
| RA | R | 0,097 | 0,223 | 0,105 | 0,172 | | | | | | | |
| | P | 0,765 | 0,486 | 0,745 | 0,592 | | | | | | | |
| MOE | R | 0,227 | -0,101 | -0,058 | -0,314 | -0,477 | | | | | | |
| | P | 0,479 | 0,755 | 0,859 | 0,321 | 0,117 | | | | | | |
| MOR | R | 0,137 | -0,230 | -0,120 | -0,234 | -0,672 | 0,888 | | | | | |
| | P | 0,671 | 0,471 | 0,710 | 0,463 | 0,017 | 0,000 | | | | | |
| TP | R | -0,547 | -0,624 | -0,592 | -0,470 | -0,099 | 0,406 | 0,301 | | | | |
| | P | 0,066 | 0,030 | 0,042 | 0,124 | 0,759 | 0,190 | 0,341 | | | | |
| APF | R | 0,005 | 0,222 | 0,302 | 0,034 | -0,770 | 0,050 | 0,169 | -0,317 | | | |
| | P | 0,988 | 0,488 | 0,340 | 0,917 | 0,003 | 0,877 | 0,599 | 0,316 | | | |
| APT | R | -0,335 | -0,419 | -0,491 | -0,676 | -0,322 | 0,528 | 0,296 | 0,565 | 0,120 | | |
| | P | 0,288 | 0,175 | 0,105 | 0,016 | 0,308 | 0,078 | 0,349 | 0,055 | 0,710 | | |
| L | R | -0,060 | 0,352 | 0,386 | 0,514 | 0,189 | -0,522 | -0,288 | -0,355 | 0,085 | -0,796 | |
| | P | 0,852 | 0,262 | 0,215 | 0,087 | 0,556 | 0,082 | 0,365 | 0,257 | 0,793 | 0,002 | |
| A | R | 0,153 | -0,238 | -0,142 | -0,422 | -0,587 | 0,761 | 0,713 | 0,288 | 0,219 | 0,617 | -0,769 |
| | P | 0,635 | 0,456 | 0,660 | 0,172 | 0,045 | 0,004 | 0,009 | 0,364 | 0,494 | 0,033 | 0,003 |
| B | R | -0,395 | -0,519 | -0,584 | -0,810 | 0,029 | 0,529 | 0,263 | 0,682 | -0,310 | 0,825 | 0,693 |
| | P | 0,204 | 0,084 | 0,046 | 0,001 | 0,928 | 0,077 | 0,409 | 0,015 | 0,326 | 0,001 | 0,012 |

Desconsiderando as correlações entre as medidas determinadas pela colorimetria (L , a e b), entre todas as demais correlações testadas, 21 foram consideradas significativas pela ANOVA. Considerando a facilidade e agilidade na execução dos ensaios, a densidade considerada como estimador foi capaz de explicar três outras propriedades, enquanto os parâmetros colorimétricos foram capazes de explicar sete outras variáveis. Ainda das propriedades colorimétricas, cabe destacar que ambas foram significativamente correlacionadas com a resistência ao arrancamento de parafuso de topo.

Determinadas as correlações significativas, na Tabela 2 são apresentados os modelos de regressão linear juntamente com os respectivos coeficientes de determinação e p -valores da ANOVA.

Tabela 2 ▶
Modelos de regressão linear referentes às correlações significativas pela ANOVA.
Fonte: dados da pesquisa

| MODELOS | R ² (%) | P-VALOR (ANOVA) |
|---|--------------------|-----------------|
| $IE2h = -68,88 + 100,1 \cdot \rho$ | 48,40 | 0,012 |
| $IE24h = -107,0 + 158,5 \cdot \rho$ | 53,53 | 0,007 |
| $IE24h = 3,409 + 1,412 \cdot IE2h$ | 88,00 | 0,000 |
| $\lambda = 0,05049 + 0,1411 \cdot \rho$ | 36,57 | 0,037 |
| $\lambda = 0,1501 + 0,001093 \cdot IE2h$ | 45,42 | 0,016 |
| $\lambda = 0,1486 + 0,000694 \cdot IE24h$ | 41,50 | 0,016 |
| $\lambda = 0,1767 - 0,000025 \cdot APt$ | 45,68 | 0,016 |
| $\lambda = 0,2865 - 0,004486 \cdot b$ | 65,63 | 0,001 |
| $TP = 1,237 - 0,04245 \cdot IE2h$ | 38,91 | 0,030 |
| $TP = 1,292 - 0,02679 \cdot IE24h$ | 35,10 | 0,042 |
| $TP = -3,615 + 0,1586 \cdot b$ | 46,54 | 0,015 |
| $Ra = 4,304 - 0,1778 \cdot MOR$ | 45,11 | 0,017 |
| $Ra = 2,842 - 0,001790 \cdot APf$ | 59,36 | 0,003 |
| $Ra = 5,963 - 0,8753 \cdot a$ | 34,42 | 0,045 |
| $MOE = 329,5 + 82,68 \cdot MOR$ | 78,78 | 0,000 |
| $MOE = -405,0 + 399,7 \cdot a$ | 57,93 | 0,004 |
| $MOR = -4,811 + 4,021 \cdot a$ | 50,88 | 0,009 |
| $APt = 12396 - 142,4 L$ | 63,35 | 0,002 |
| $APt = -820,9 + 307,2 \cdot a$ | 38,02 | 0,033 |
| $APt = -2779 + 122,7 \cdot b$ | 68,02 | 0,001 |

Dos vinte modelos obtidos, todos foram considerados significativos pela ANOVA, o que implica que variações nas variáveis consideradas independentes explicam as variações sofridas pelas variáveis dependentes. Apenas quatro modelos apresentaram coeficiente de determinação próximo (inferior ou superior) de 70%, o que indica a pouca precisão alcançada com as demais equações.

A maior precisão foi proveniente da estimativa do inchamento em espessura após 24 horas (IE24h) de imersão em água, em função do IE2h ($R^2 = 88\%$), seguido da estimativa do MOE, em função do MOR ($R^2 = 78,78\%$), da resistência ao arrancamento de parafuso de topo, em função da medida colorimétrica b ($R^2 = 68,02\%$) e, posteriormente, pela

condutividade térmica, em função da medida b ($R^2 = 65,63\%$). Notadamente, variações na medida b explicam, com precisão satisfatória, variações na APt e na λ . O uso de um número maior de corpos de prova permitirá chegar a conclusões mais contundentes, pois todos os modelos foram significativos, e isso implica que, se reduzida a variabilidade com o aumento do número de amostras, é possível que os coeficientes de determinação aumentem, devendo ser objetivo de pesquisas futuras.

4 Conclusão

Os resultados obtidos da presente pesquisa possibilitam concluir que:

- Das sete propriedades (ρ , IE2h, IE24h, λ , TP, APt, b) afetadas significativamente pela densidade dos painéis, entre as treze avaliadas, apenas duas são mecânicas (TP, APf);
- Foi notado desempenho físico e mecânico superior dos painéis de média densidade frente aos de alta densidade;
- Em geral, os painéis para ambas as densidades podem ser enquadrados na classe P2 da norma brasileira, cabendo destacar para os painéis de média densidade que o IE24h é compatível com a classe P7, o MOR é compatível com a classe P3 e a TP foi 50% superior ao requisito exigido para a classe P7;
- Dos vinte modelos de regressão gerados, apenas quatro apresentaram precisão suficiente, entretanto todos foram considerados significativos pela análise de variância, requerendo assim estudos posteriores com o objetivo de verificar as relações considerando um maior número de amostras e de condições experimentais.

Em síntese, nota-se que os painéis aqui produzidos, classificados como pertencentes à classe P2 (painéis não estruturais para uso interno em condições secas) da norma brasileira ABNT NBR 41.810-2:2018, são adequados para aplicações em edificações e também para receberem a aplicação de outros materiais sobre suas superfícies, evidenciando, assim, a viabilidade na produção de painéis de madeira feitos com maravalha integral de *Pinus*, a 12% de umidade, e adesivo ureia-formaldeído.

Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.810**: Painéis de partículas de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- BUZO, A. L. S. C. **Painéis aglomerados produzidos com partículas de pinus e bagaço de cana empregando-se ureia formaldeído e poliuretano à base de mamona**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/157188>. Acesso em: 25 ago. 2022.
- CABRAL, M. R.; FIORELLI, J.; CRAVO, J. C. M.; SAVASTANO, H. Painéis de partículas com maravalha de *Pinus* spp. e fibra de sisal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 114, p. 353-362, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n114.11>.

DACOSTA, L. P. E.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; SCHNEIDER, P. R.; CALEGARI, L. Qualidade das chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos do processamento mecânico da madeira de *Pinus elliottii* (Engelm.). **Ciência Florestal**, v. 15, n. 3, p. 311-322, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050981869>.

FAGUNDES, H. A. V. **Diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/4567>. Acesso em: 25 ago. 2022.

FERRO, F. S.; SOUZA, A. M.; ARAÚJO, I. I.; ALMEIDA, M. M. V. D. N.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Effect of alternative wood species and first thinning wood on oriented strand board performance. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, article ID 4603710, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4603710>.

HAZRATI-BEHNAGH, M.; ZAREA-HOSSEINABADI, H.; DALIRI-SOSEFI, M.; ABGINEHCHI, Z.; HEMMATI, A. Mechanical and insulating performances of ultralight thick particleboard from sugarcane residues and wood planer shavings. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, p. 161-168, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0989-7>.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2017**. Brasília, DF: Indústria Brasileira de Árvores, 2017. Disponível em: https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 19 fev. 2018.

IWAKIRI, S.; SILVA, J. R. M.; MATOSKI, S. L. S.; LEONHADT, G.; CARON, J. Produção de chapas de madeira aglomerada de cinco espécies de pinus tropicais. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 137-142, 2001. Disponível em: <https://www.floram.org/article/588e21f9e710ab87018b45c7>. Acesso em: 25 ago. 2022.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G. Produção de painéis aglomerados homogêneos e multicamadas de *Melia azedarach* (Cinamomo) e *Pinus taeda* com diferentes teores de resina. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 465-470, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000300014>.

MACEDO, L. B.; SILVA, M. R.; CÉSAR, A. A. S.; PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Painéis OSB de madeira *Pinus sp.* e adição de partículas de polipropileno biorientado (BOPP). **Scientia Forestalis (IPEF)**, v. 44, n. 112, p. 887-894, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n112.10>.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Backbeat Books, 1977. 672 p.

MARINI, L. J. **Estimativa de propriedades físicas e mecânicas de *Pinus sp.* por colorimetria**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-14032019-102959>.

MIN, Y.; MAO, H.; HUANG, R.; GE, Z.; TIAN, P.; SUN, L.; WU, Q.; SUN, K. Mechanical and thermal properties of r-high density polyethylene composites reinforced

with wheat straw particleboard dust and basalt fiber. **International Journal of Polymer Science**, v. 2018, article ID 5101937, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/5101937>.

MOUBARIK, A.; PIZZI, A.; ALLAL, A.; CHARRIER, F.; KHOUKH, A.; CHARRIER, B. Cornstarch–mimoso tannin–urea formaldehyde resins as adhesives in the particleboard production. **Starch - Stärke**, v. 62, n. 3□4, p. 131-138, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.200900228>.

NASCIMENTO, M. F.; CHRISTOFORO, A. L.; CAMPOS, C. I.; ALMEIDA, D. H.; LAHR, F. A. R. Efeitos das intempéries na rugosidade de painéis de partículas de *Pinus sp.* **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 227-238, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300278>.

POLETO, S. F. S.; AQUINO, V. B. M.; CHAHUD, E.; PINHEIRO, R. V.; BRANCO, L. A. M. N.; SILVA, D. A. L.; CAMPOS, C. I.; MOLINA, J. C.; CARVALHO, C. M.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Evaluation of CCB-preserved medium density particleboards under natural weathering. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 3678-3687, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.15.2.3678-3687>.

SANTOS, M. F. N.; BATTISTELLE, R. A. G.; BEZERRA, B. S.; VARUM, H. S. A. Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (*Saccharum spp.*) and pine wood shavings (*Pinus elliottii*). **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 345-355, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.039>.

TRIANOSKI, R.; PICCARDI, A. B. R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; BONDUELLE, G. M. Incorporação de *Grevillea robusta* na Produção de Painéis Aglomerados de *Pinus*. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 278-285, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.141515>.

VARANDA, L. D.; NASCIMENTO, M. F.; CHRISTOFORO, A. L.; SILVA, D. A. L.; LAHR, F. A. R. Oat Hulls as addition to high density panels production. **Materials Research (São Carlos. Impresso)**, v. 16, n. 6, p. 1355-1361, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000131>.