






Análise do efeito da incorporação de nanopartículas de ZnO nas propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF

Analysis of the effect of incorporation of ZnO nanoparticles on the physical and mechanical properties of MDF panels

Cristiane Inácio Campos 
Ana Paula Santos Silva 
Vinicius Borges de Moura Aquino 
André Luis Christoforo 
Francisco Antonio Rocco Lahr 

Resumo

O painel MDF pode sofrer mudanças dimensionais, o que compromete seu desempenho. Uma forma de melhorar o desempenho do painel é incorporar nanopartículas. A presente pesquisa estudou o efeito do uso de nanopartículas de óxido de zinco em diferentes teores (0%, 0,5% e 1,0%) em painéis MDF fabricados com resina ureia-formaldeído (UF), resina melamina-formaldeído (MF) e fibras de *Eucalyptus grandis*. Também avaliou o uso de modelos de regressão para estimar propriedades físicas e mecânicas em função do adesivo utilizado e do teor de ZnO incorporado. Os tratamentos com resina MF apresentaram melhor desempenho quando comparados com os tratamentos que utilizaram adesivo UF. O teor ótimo para adição de nanopartículas foi o de 0,5%. O teor de 1,0% levou ao aumento no teor de umidade, ao inchamento e à diminuição dos valores de MOR e MOE, o que pode ser justificado pela cura acelerada e pelo superaquecimento das camadas externas, prejudicando a cura das camadas interiores. O modelo com maior precisão foi o estimador da densidade aparente, sendo os fatores resina, ZnO e interação significativos.

Palavras-chave: Nanocompósitos. Propriedades mecânicas. Painéis de madeira. Melamina-formaldeído. Ureia-formaldeído.

Abstract

MDF panels can undergo dimensional changes, compromising their performance. One way to improve the performance of the panel is to incorporate nanoparticles. This study analysed the effect of using zinc oxide nanoparticles at different levels (0%, 0.5% and 1.0%) in MDF panels manufactured with urea-formaldehyde (UF) resin, melamine-formaldehyde resin (MF) and Eucalyptus grandis fibres. It also evaluated the use of regression models to estimate physical and mechanical properties as a function of the adhesive used and the content of incorporated ZnO. Treatments using MF resin presented a better performance than treatments using UF adhesive. The optimal content of nanoparticles addition was 0.5%. The 1.0% content led to an increase in moisture content, swelling and a decrease in MOR and MOE values, possibly caused by an accelerated curing and overheating of the outer layers, affecting the curing of the inner layers. The most accurate model was the bulk density estimator, with resin, ZnO and interaction factors being the most significant.

Keywords: Nanocomposites. Mechanical properties. Wood panels. Melamine-formaldehyde. Urea-formaldehyde.

¹Cristiane Inácio Campos
¹Instituto de Ciência e Engenharia
Itapeva - SP - Brasil

²Ana Paula Santos Silva
²Instituto de Ciência e Engenharia
Itapeva - SP - Brasil

³Vinicius Borges de Moura Aquino
³Universidade Federal do Sul e Sudeste
do Pará
Santana do Araguaia - PA - Brasil

⁴André Luis Christoforo
⁴Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

⁵Francisco Antonio Rocco Lahr
⁵Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 30/08/21
Aceito em 02/05/22

Introdução

O uso de produtos engenheirados à base de madeira ganhou força com o incremento nas aplicações na indústria da construção civil, moveleira e de embalagens, sendo uma alternativa ao uso de madeira serrada, com destaque ao painel de fibras de média densidade (MDF) (AKGÜL *et al.*, 2017; BERTOLINI *et al.*, 2014; CHIROMITO *et al.*, 2016; NASCIMENTO *et al.*, 2016; PINCHEVSKA *et al.*, 2021; PUGAZHENTHI; ANAND, 2021).

Segundo Alabduljabbar *et al.* (2020), o uso de fibras em compósitos apresenta muitas vantagens, como baixo custo, alta qualidade, melhores propriedades, benefícios ao meio ambiente e menos consumo de energia.

O painel de fibras é composto de fibras de madeira unidas ao adesivo por prensagem a quente (AKGÜL; ÇAMLIBEL, 2008; PIEKARSKI *et al.*, 2017). Os adesivos utilizados na confecção desses painéis são ureia-formaldeído e melamina-formaldeído (SILVA, A. *et al.*, 2019). Verifica-se também que novos adesivos e aditivos estão sendo estudados visando à maior competitividade do produto ou mesmo a outras aplicações na construção civil (PUGAZHENTHI; ANAND, 2021).

Ao longo do processo produtivo, mudanças dimensionais podem ocorrer, o que pode reduzir o desempenho dos painéis sob ação de intemperismo, com exposição ao sol e à umidade, bem como das cargas ao longo de sua vida útil.

Assim, com o intuito de aprimorar as propriedades físicas e mecânicas, estudos analisaram a incorporação de nanopartículas a fim de reduzir o inchamento em espessura e o ganho de massa quando em contato com água. Segundo Martins (2015), as propriedades das nanopartículas podem variar dependendo de sua forma, tamanho (de 1 nm a 100 nm), estado, meio e superfície.

Valle *et al.* (2020) verificaram que a adição de nanopartículas de óxido de silício em painéis MDP reduziu o inchamento e melhorou a estabilidade dimensional dos painéis. Alabduljabbar *et al.* (2020) estudaram os efeitos da adição de nanopartículas de alumina em painéis MDF e verificaram melhora nas propriedades físicas. Com base nos estudos recentes, não se verifica prejuízo no processo produtivo pela adição de nanopartículas, tendo em vista que em todos os estudos a mistura ocorre na etapa de preparação dos aditivos para a colagem (VALLE *et al.*, 2020; PUGAZHENTHI; ANAND, 2021; CHIROMITO *et al.*, 2016).

Kumar *et al.* (2013) analisaram a influência da incorporação de micropartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3), também conhecido como alumina, nas propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF feitos com ureia-formaldeído (UF), adicionando teores de 1,0%, 2,5% e 5,0% de óxido em relação à massa de adesivo UF. Ao longo do processo de prensagem, a temperatura da parte central do painel se elevou com a adição das nanopartículas. Também se observou redução da emissão do gás formaldeído, tóxico para o ser humano, com o aumento do teor de nanopartículas. As propriedades mecânicas (MOR e tração perpendicular) tiveram aumento significativo com a inclusão do Al_2O_3 .

Silva *et al.* (2019) avaliaram o uso de óxido de zinco (ZnO) em painéis MDF utilizando resina ureia-formaldeído e melamina-formaldeído em teores de 0,5% e 1,0%, considerando os efeitos nas propriedades físicas. Do ponto de vista estatístico, não foi encontrada diferença entre as resinas. Um teor maior de nanopartículas de ZnO (1,0%) levou a uma maior densidade aparente e ao inchamento. O melhor tratamento foi aquele que utilizou melamina-formaldeído com teor de 0,5% de ZnO.

Alabduljabbar *et al.* (2020) estudaram o efeito do uso de nanopartículas de Al_2O_3 em painéis MDF de fibras de *Populus deltoides* e de *Euamericana* e resina UF. Os teores de alumina utilizados foram 1,5%, 3,0% e 4,5% em relação à massa de adesivo utilizado. Análises térmicas mostraram que a adição de Al_2O_3 elevou a temperatura dos painéis. A adição de alumina melhorou as propriedades mecânicas (MOR, MOE e tração perpendicular) de forma significativa.

Gul *et al.* (2020) analisaram a influência do óxido férrico (Fe_2O_3) em nanopartículas nas propriedades físicas de painéis MDF feitos com resina UF. Os teores de óxido foram 0,5%, 1,0% e 2,5% da massa de adesivo utilizado. Os painéis foram executados seguindo as normas europeias. Com o teor de 2,5%, houve melhora de até 50% no inchamento e na absorção de água. A inclusão de óxido melhorou a estabilidade térmica dos painéis durante o processo de prensagem.

Gul e Alrobei (2021) avaliaram a incorporação de nanopartículas de óxido de grafeno (GO) em teores de 2%, 4% e 6% em relação à massa de adesivo UF e sua influência nas propriedades físicas e mecânicas. Os painéis foram elaborados conforme as prescrições da norma europeia. Os autores observaram melhora de até 38,8% nas propriedades mecânicas (MOR, MOE e tração perpendicular) e de até 50% nas propriedades físicas (inchamento e absorção de água). A adição de GO melhorou a estabilidade térmica do painel e afetou o tempo de cura após a prensagem.

Estudo realizado por Silva, L. *et al.* (2019) revela ainda que a adição de nanopartículas nos painéis pode auxiliar na transferência de calor durante o processo de prensagem, o que melhora a cura do adesivo devido ao aumento da velocidade de transferência de calor, verificado com o uso de termopares inseridos no colchão de partículas durante a prensagem, melhorando consequentemente, as propriedades físico-mecânicas do painel.

Observando os dados apresentados, não se observa na literatura a influência do uso de ZnO em painéis MDF nas propriedades mecânicas, bem como o uso de modelos de regressão a fim de estimar as propriedades físicas e mecânicas em função do adesivo utilizado e do teor de ZnO incorporado ao painel.

Ressalta-se ainda que o ZnO foi escolhido para a presente pesquisa devido a sua capacidade de produção por método menos agressivo (sol-gel-proteico), além de sua alta condutividade térmica, se comparada aos demais óxidos, o que pode trazer benefícios durante o processo de prensagem dos painéis particulados (SILVA, L. *et al.*, 2019).

Dessa forma, objetivou-se avaliar a influência do uso de ZnO, como nanopartículas adicionadas em diferentes teores (0,5% e 1,0%), na produção de painéis MDF com fibras de *Eucalyptus grandis*, resinas ureia-formaldeído e melamina-formaldeído, nas propriedades físicas e mecânicas. Também foi avaliada a possibilidade do uso de modelos de regressão como estimadores das propriedades físicas e mecânicas em função do adesivo, do teor de ZnO incorporado e da interação entre os dois fatores.

Materiais e métodos

As fibras utilizadas na produção dos painéis foram provenientes de *Eucalyptus grandis* (híbrido H103), doado por uma empresa do setor (Salto, São Paulo, Brasil). As resinas utilizadas foram a melamina-formaldeído (teor de sólidos de 65,9%) e a ureia-formaldeído (teor de sólidos de 66%). Além disso, também foram utilizados catalisador sulfato de amônia (teor de sólidos de 13,1%), emulsão de parafina (teor de sólidos de 57,2%) e água.

A nanopartícula de ZnO foi produzida em parceria com outros pesquisadores, a partir do método sol-gel-proteico, com síntese do nitrato de zinco e gelatina na razão 1:1 (percentual p/p). A caracterização foi feita por difração de raios X e MEV, em que se verificaram as reflexões características da fase e a presença de estruturas menores que 100 nm, confirmando a formação de ZnO em tamanho nanométrico (FAVARIM; LEITE, 2018).

As fibras foram inicialmente colocadas em estufa a $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingirem o teor de umidade de 3%. Em cada painel foram utilizados 1.800 g de fibras, densidade nominal de $0,79 \text{ g/cm}^3$, com dimensões 43 cm x 43 cm x 1,3 cm, e teor de adesivo igual a 10% da massa de fibras. As fibras e o adesivo foram homogeneizados, e depois foi feito o colchão de fibras. Esse colchão foi pré-prensado em prensa manual a 0,02 MPa durante 5 min a fim de reduzir o volume do colchão. Depois o colchão foi levado para prensa a quente a 4 MPa e $180 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ por 10 min, divididos em três ciclos de 3 min de pressão a quente com duas pausas de 30 segundos entre os ciclos (CAMPOS; LAHR, 2004).

Nesta pesquisa foram produzidos 6 painéis por tratamento, dos quais foram retirados espécimes para avaliação das propriedades físicas e mecânicas, como densidade aparente, absorção de água e inchamento em espessura, módulo de resistência (MOR), módulo de elasticidade (MOE) na flexão estática e tração perpendicular (IB). As propriedades foram avaliadas conforme a norma brasileira NBR 15316 (ABNT, 2019). Para cada propriedade, em cada tratamento foram utilizados 20 corpos de provas, totalizando 720 determinações experimentais.

O teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, foi utilizado para avaliar a influência do tipo de resina [Re] e do teor de nanopartículas de ZnO nos valores das propriedades físicas (ρ - densidade; teor de umidade (TU); inchamento em espessura após 24 h de imersão em água (IE-24h) e mecânicas (MOE – módulo de elasticidade na flexão estática; MOR – módulo de ruptura na flexão estática) dos painéis fabricados. Do teste de Tukey, A denota o nível do fator de maior valor médio, B o nível do fator associado ao segundo maior valor médio, e assim sucessivamente, e letras iguais implicam tratamentos com médias estatisticamente equivalentes.

A definição das porcentagens de ZnO foi baseada em estudos realizados por Lima (2018). Assim, a combinação dos níveis dos fatores resultou em seis tratamentos experimentais distintos (Tr), explicitados na Tabela 1.

Para cada tratamento e para cada propriedade física ou mecânica foram fabricadas e testadas 10 amostras, o que resultou na obtenção de 300 determinações experimentais.

Compreendidos os efeitos isolados dos fatores nas propriedades físicas e mecânicas pelo teste de Tukey, um modelo de regressão multivariável fundamentado em análise de variância (Equação 1), ao nível de 5% de

significância, foi utilizado com o propósito de investigar também o efeito da interação entre os fatores (Re-ZnO), assim como determinar os extremos das propriedades físicas e mecânicas.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * Re + \beta_2 * ZnO + \beta_3 * Re * ZnO + \varepsilon \tag{Eq. 1}$$

Na Equação 1, Y é a propriedade física ou mecânica estimada pelo modelo, β_i consiste nos coeficientes obtidos pelo método dos mínimos quadrados, e ε é o erro aleatório.

Resultados e discussão

As Figuras 1 e 2 ilustram os valores médios, os intervalos de confiança da média (ao nível de 5% de significância) e os intervalos de variação dos coeficientes de variação (CV) das propriedades físicas e mecânicas dos painéis respectivamente, sendo Tr o tratamento delineado, e UF e MF as resinas ureia-formaldeído e melamina-formaldeído.

Observando os dados apresentados na Figura 1, houve redução da densidade aparente nos tratamentos que utilizaram resina UF. Apenas o tratamento 3 não foi enquadrado como painel MDF, conforme a NBR 15316 (ABNT, 2019).

Tabela 1 - Tratamentos experimentais delineados

Tr	Re	ZnO	Tr	Re	ZnO
1	UF	0%	4	MF	0%
2	UF	0,5%	5	MF	0,5%
3	UF	1,0%	6	MF	1,0%

Figura 1 - Resultados das propriedades físicas dos painéis

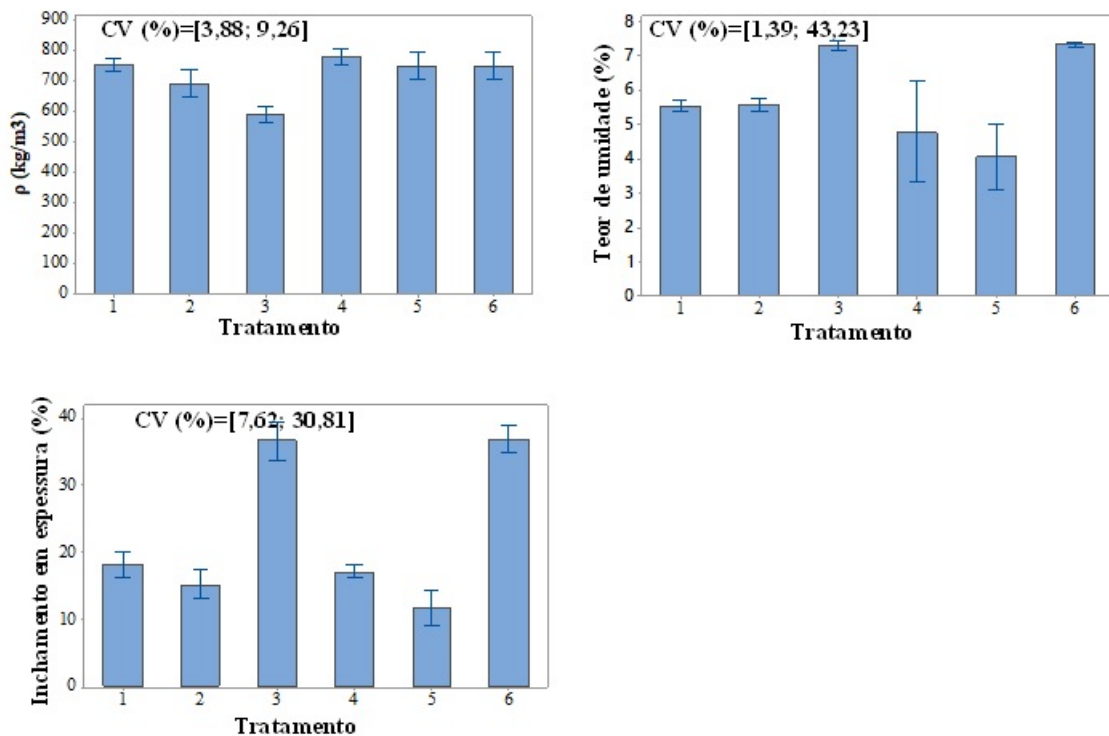
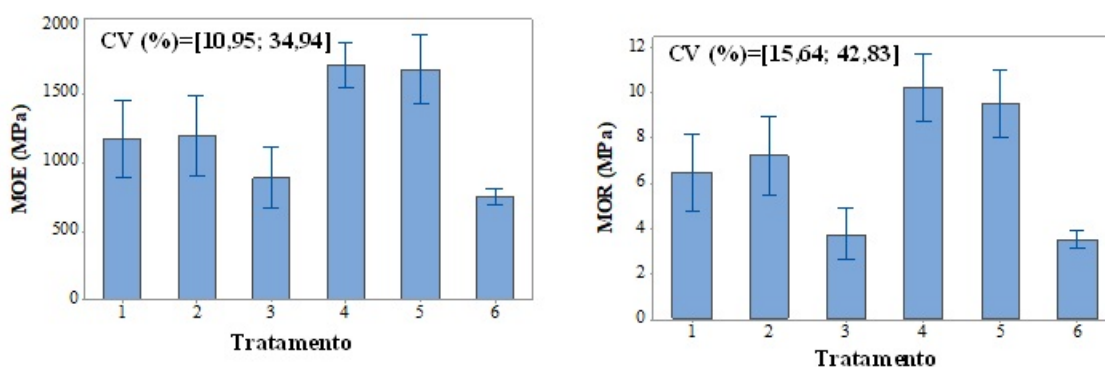


Figura 2 - Resultados das propriedades mecânicas dos painéis



Tal comportamento pode estar relacionado a uma má interação entre adesivo e madeira, que acaba prejudicando a compactação do painel e, conseqüentemente, reduzindo a densidade dele, principalmente em maiores teores de nanopartículas, como já verificado por Silva, A. *et al.* (2019). Entretanto, Gul *et al.* (2021) observaram manutenção da densidade aparente para teores de 1%, 2% e 3% de OG em painel MDF com resina UF. Essa diferença pode estar associada ao tipo de nanopartícula utilizada, que ocasionou melhor interação com o adesivo.

Já para o inchamento, no estudo realizado por Silva *et al.* (2019) verificou-se uma progressiva redução com o aumento do teor de nanopartículas de ZnO. Esse comportamento pode ser explicado pela cura acelerada devido ao aumento no teor de ZnO (SILVA, L. *et al.*, 2019). Para os tratamentos com MF, comportamento semelhante foi observado. Considerando o limite de 12% para inchamento, conforme a NBR 15316 (ABNT, 2019), nenhum tratamento atingiu o requisito normativo.

Para os dados apresentados na Figura 2, houve aumento de MOE e de MOR para os tratamentos com UF com teor de 0,5%, o que não ocorreu para os tratamentos com MF. Nestes tratamentos, houve redução progressiva com o aumento do teor de ZnO. Tal comportamento pode ter ocorrido devido a um maior teor de umidade e falhas na cura, não sendo a umidade uniforme ao longo da seção do painel, comprometendo seu desempenho. Com isso, nenhum tratamento atingiu os requisitos de 22 MPa para MOR e de 2.200 MPa para MOE (ABNT, 2019). Alabduljabbar *et al.* (2020) obtiveram crescimentos significativos em MOR e MOE com o aumento do teor de nanopartículas de Fe₂O₃, com valor máximo de 26%, para um ciclo de prensagem de 4 min. Gul e Alrobei (2021) encontraram aumentos significativos no MOE e MOR com maiores incrementos de nanopartículas de GO, para painéis prensados em 4 min e 2 min. Taghiyari e Norton (2014) avaliaram o desempenho mecânico de painéis MDF produzidos com nanopartículas de prata prensados em 6 min, 8 min e 10 min, e verificaram que a propriedade piorou com o aumento do tempo de prensagem, devido à despolimerização da resina. Sendo assim, verifica-se que o tempo de prensagem de 10 min adotado no presente estudo pode ter prejudicado a cura da resina, provocando degradação molecular dela e prejudicando o desempenho final do painel.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados do teste de Tukey (ao nível de 5% de significância) das propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Com base nos dados apresentados na Tabela 2, observa-se um melhor desempenho da resina MF em comparação com a resina UF, com resultados superiores para as propriedades mecânicas e maior densidade com a resina UF. Considerando a incorporação de nanopartículas de ZnO, o teor com os melhores resultados foi o de 0,5%, com os menores valores para o teor de umidade e inchamento e maiores valores para as propriedades mecânicas de resistência à flexão e rigidez. Segundo Silva, A. P. S. *et al.* (2019), as nanopartículas auxiliam na transferência de calor até a região mais interna do painel, melhorando a cura do adesivo e, conseqüentemente, aprimorando as propriedades do painel. Entretanto, como já sinalizado por Lima *et al.* (2018), maiores porcentagens de nanopartículas podem proporcionar uma má interação entre adesivo e madeira, o que não permite um melhor aproveitamento de tais propriedades.

Outro fator que pode ter interferido na redução do desempenho dos painéis está relacionado ao tempo de prensagem, como mencionado anteriormente, em estudo realizado por Taghiyari e Norton (2014), para avaliar a dureza de painéis MDF produzidos com nanopartículas de prata. Os autores obtiveram melhores propriedades físicas e mecânicas em menor tempo de prensagem, pois, com o aumento do tempo, se verificou a despolimerização da resina. Lima *et al.* (2018) estudaram diferentes tempos de prensagem em painéis MDP produzidos com UF e concluíram que painéis prensados com 5 min apresentaram bons resultados.

O modelo de regressão e o respectivo coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa da densidade são expressos na Equação 2 e ilustrados pela Figura 3. Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os gráficos de Pareto (fatores e interação significativos pela ANOVA) e o gráfico da interação entre os fatores respectivamente.

$$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) = 750,1 + 25,9 * Re - 171,60 * ZnO + 125,2 * Re * ZnO; R^2 = 80,77\% \quad \text{Eq. 2}$$

Tabela 2 - Resultados do teste de Tukey das propriedades físicas e mecânicas dos painéis

Propriedade	Tipo de Resina		ZnO (%)		
	UF	MF	0	0,5	1,0
ρ	B	A	A	AB	B
TU	A	A	B	C	A
IE-24h	A	A	B	C	A
MOE	B	A	A	A	B
MOR	B	A	A	A	B

Figura 3 - Curvas de nível da densidade em função dos fatores Re e ZnO

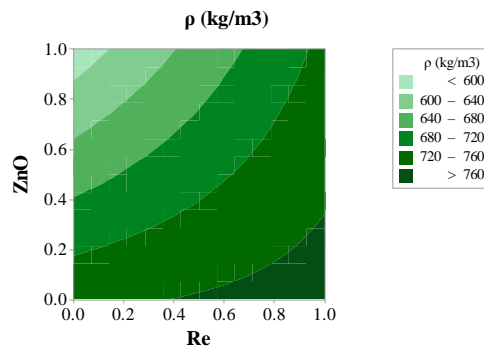


Figura 4 - Gráfico de Pareto (5% de significância) para a densidade (ρ)

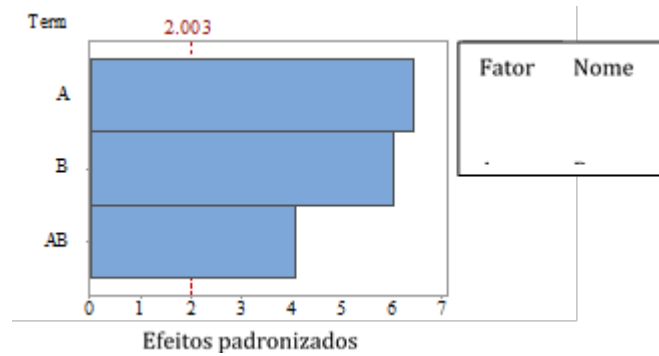
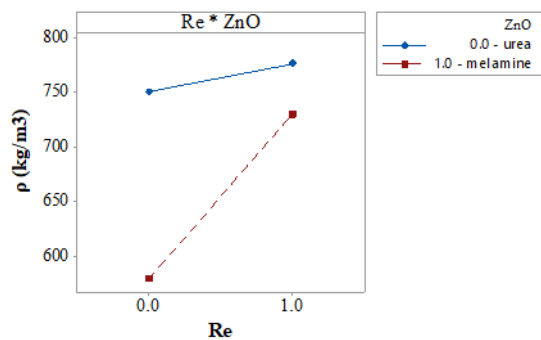


Figura 5 - Gráfico de interação entre os fatores (Re·ZnO) para a densidade dos painéis



O uso da resina MF contribuiu para o aumento na densidade dos painéis em relação à resina UF. O aumento nos teores de ZnO proporcionou redução nos valores da densidade, e a combinação dos níveis dos fatores Re=0 (ureia-formaldeído) e ZnO=1% resultou no valor mínimo (578,51 kg/m³) da densidade, sendo o maior valor (775,96 kg/m³) proveniente de Re=1 (melamina-formaldeído) e de ZnO=0%, como notado na Figura 5.

O modelo de regressão e o respectivo coeficiente de determinação (R²) para a estimativa do teor de umidade são expressos na Equação 3 e ilustrados na Figura 6, sendo o gráfico de Pareto apresentado na Figura 7.

$$TU (\%) = 5,243 - 1,145 * Re + 1,767 * ZnO + 0,794 * Re * ZnO; R^2 = 41,26\% \quad \text{Eq. 3}$$

Na Figura 7, constata-se apenas a significância dos fatores isolados na estimativa do teor de umidade, não sendo significativa a influência da interação desses fatores.

O uso da resina MF contribuiu para a redução no teor de umidade dos painéis em relação à resina UF, e aumento nos teores de ZnO proporcionou aumentos nos valores dessa propriedade. A combinação dos níveis dos fatores Re=1 (melamina-formaldeído) e ZnO=0% resultou no valor mínimo (4,10%) do teor de umidade, sendo o maior valor (7,00%) proveniente de Re=0 (ureia-formaldeído) e ZnO=1%.

O modelo de regressão e o respectivo coeficiente de determinação (R²) para a estimativa do inchamento em espessura após 24 h de imersão em água são expressos na Equação 4 e ilustrados na Figura 8, sendo o gráfico de Pareto apresentado na Figura 9.

$$IE - 24h (\%) = 14,17 - 2,10 * Re + 18,46 * ZnO + 1,30 * Re * ZnO; R^2 = 54,77\% \quad \text{Eq. 4}$$

Na Figura 9, apenas o fator teor de nanopartículas de ZnO é que afetou de forma significativa os valores do inchamento em espessura após 24 h de imersão dos painéis em água.

O modelo de regressão e o respectivo coeficiente de determinação (R²) para a estimativa do módulo de elasticidade na flexão estática são expressos na Equação 5 e ilustrados na Figura 10, sendo o gráfico de Pareto apresentado na Figura 11.

Figura 6 - Curvas de nível do teor de umidade em função dos fatores Re e ZnO

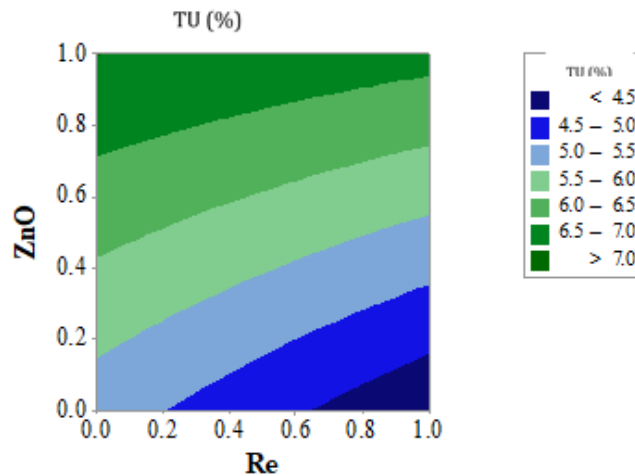


Figura 7 - Gráfico de Pareto (5% de significância) para o teor de umidade (TU)

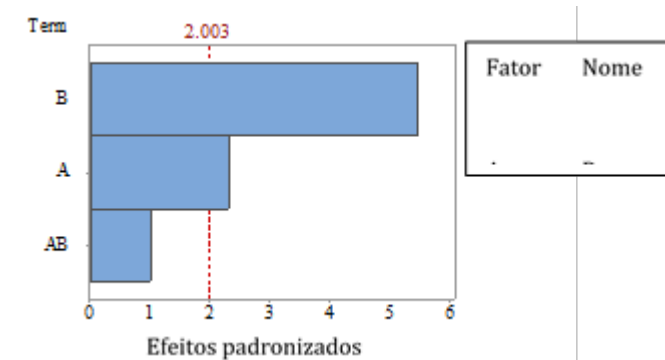


Figura 8 - Curvas de nível do inchamento em espessura após 24 h de imersão em água em função dos fatores Re e ZnO

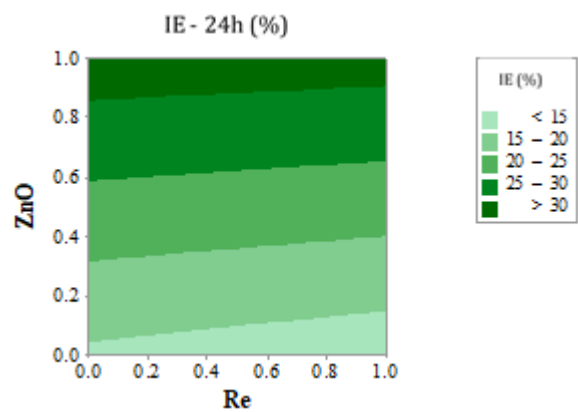


Figura 9 - Gráfico de Pareto para o inchamento em espessura após 24 h de imersão em água

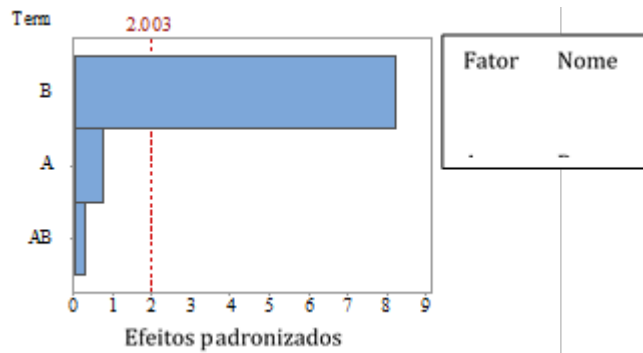


Figura 10 - Curvas de nível módulo de elasticidade na flexão estática em função dos fatores Re e ZnO

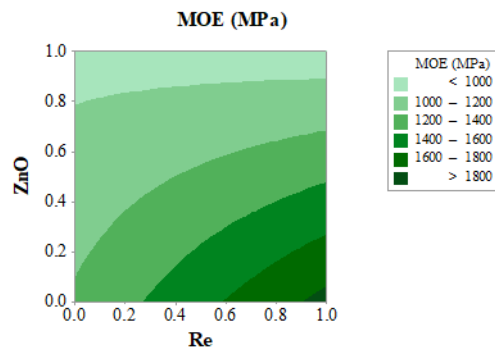
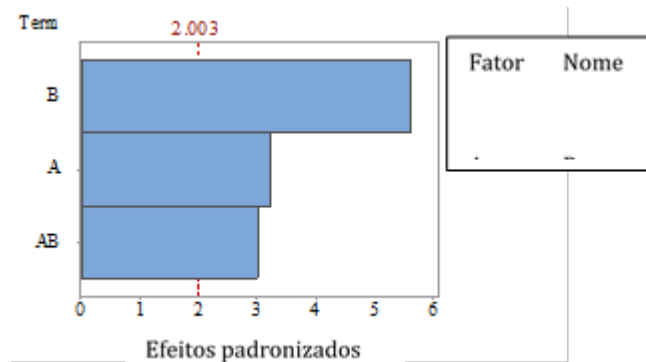


Figura 11 - Gráfico de Pareto para o módulo de elasticidade na flexão estática



$$MOE (MPa) = 1228 + 629 * Re - 290 * ZnO - 671 * Re * ZnO; R^2 = 47,81\% \quad \text{Eq. 5}$$

Na Figura 11, nota-se que os dois fatores e a interação de ambos foram significativos no módulo de elasticidade dos painéis. A Figura 12 ilustra o gráfico de interação entre os fatores.

Na Equação 5, a resina MF (1) apresentou desempenho superior ao desempenho da resina UF (0); o aumento no teor de nanopartículas de ZnO proporcionou redução nos valores do MOE; e a interação entre a resina MF com 1% de nanopartículas de ZnO resultou em redução dessa propriedade (Figura 12). O valor mínimo (896 MPa) do MOE dos painéis foi obtido do uso da resina MF com a inclusão de 1% de nanopartículas de ZnO, e o valor máximo (1.857 MPa) foi proveniente do uso da resina MF sem a inclusão de nanopartículas de ZnO.

Na Figura 14, nota-se que os dois fatores e a interação de ambos foram significativos no módulo de resistência dos painéis. A Figura 15 ilustra o gráfico de interação entre os fatores.

O modelo de regressão e o respectivo coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa do módulo de resistência na flexão estática são expressos na Equação 6 e ilustrados na Figura 13, sendo o gráfico de Pareto apresentado na Figura 14.

$$MOR (MPa) = 7,186 + 3,893 * Re - 2,74 * ZnO - 3,94 * Re * ZnO; R^2 = 52,53\% \quad \text{Eq. 6}$$

Figura 12 - Gráfico de interação entre os fatores do módulo de elasticidade na flexão estática

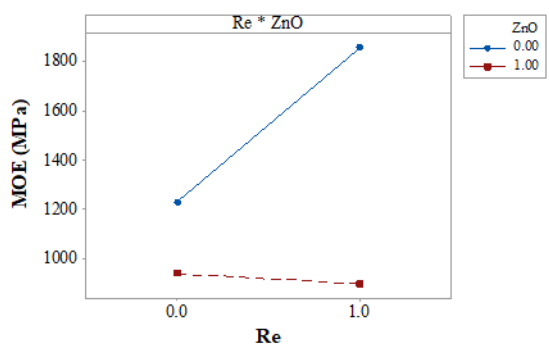


Figura 13 - Curvas de nível módulo de resistência na flexão estática em função dos fatores Re e ZnO

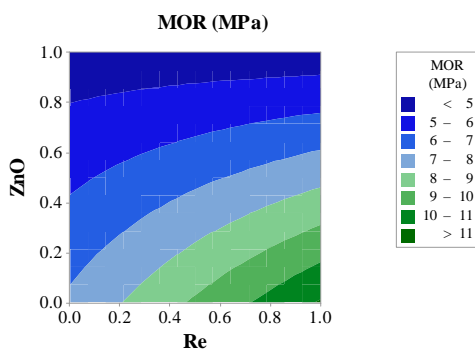


Figura 14 - Gráfico de Pareto para o módulo de resistência na flexão estática

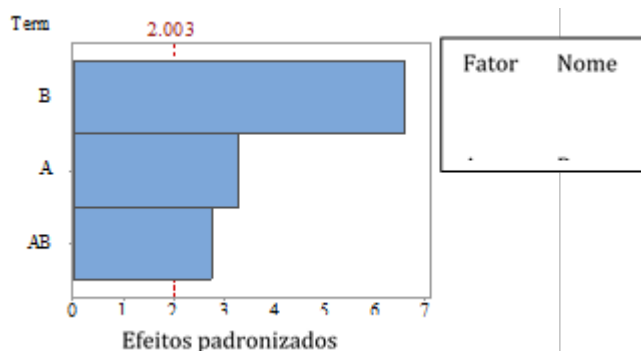
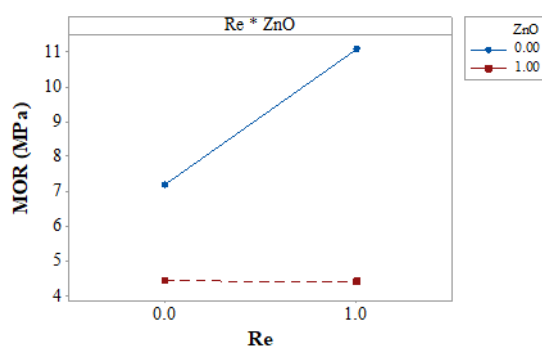


Figura 15 - Gráfico de interação entre fatores do módulo de resistência na flexão estática



Na Equação 6, a resina MF (1) apresentou desempenho superior ao desempenho da resina UF (0); o aumento no teor de nanopartículas de ZnO proporcionou redução nos valores do MOR; e a interação entre a resina MF com 1% de nanopartículas de ZnO resultou em redução dessa propriedade (Figura 15). O valor mínimo (4,4 MPa) do MOR dos painéis foi obtido do uso da resina MF com a inclusão de 1% de nanopartículas de ZnO, e o valor máximo (11,08 MPa) foi proveniente do uso da resina MF sem a inclusão de nanopartículas de ZnO.

De forma geral, o modelo que apresentou maior precisão foi o modelo estimando a densidade aparente. Todos os fatores foram significativos para sua estimativa. Para as demais propriedades físicas, os modelos apresentaram correlação moderada (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012), com baixa qualidade no ajuste, impossibilitando seu uso como estimador. Para as propriedades mecânicas, os modelos também apresentaram correlação mediana, com baixa qualidade no ajuste (DANCEY; REIDY, 2006; MONTGOMERY, 2012), não habilitando seu uso como estimadores. Todos os fatores (Re, ZnO e interação) foram significativos nos modelos.

Conclusões

Os resultados da presente pesquisa possibilitam concluir que:

- conforme dados apresentados, o melhor teor de nanopartículas de óxido de zinco é 0,5%, configurando-se como a melhor opção, visto que as propriedades de inchamento e teor de umidade foram reduzidas da condição de referência (0% de ZnO) e que as propriedades mecânicas foram equivalentes às propriedades dos compósitos sem ZnO, visto que 1% de ZnO reduziu o MOE e o MOR dos painéis;
- o adesivo que apresentou melhor performance foi a melamina-formaldeído (MF) adicionada de 0,5% de ZnO, com valores inferiores para as propriedades físicas e valores superiores para as propriedades mecânicas quando comparados com o valor de referência;
- um maior teor de nanopartículas não levou a melhorias nas propriedades físicas e mecânicas, conforme visto em outros trabalhos na literatura. Questões relativas ao processo de cura, como superaquecimento das camadas externas quando adicionado ZnO, devem ser avaliadas em novas pesquisas, a fim de melhorar o processo de cura e, assim, as propriedades físicas e mecânicas e seu desempenho. Outro aspecto relevante a ser considerado se refere ao tempo de prensagem, pois estudos indicam que tempos excessivos podem provocar despolimerização da resina, o que também pode comprometer as propriedades finais do painel, como observado em outros trabalhos encontrados na literatura; e
- o modelo que estima a densidade aparente foi o que apresentou maior precisão, com todos os fatores (Re, ZnO e interação) sendo significativos, possibilitando seu uso como estimador. Os demais modelos apresentaram baixa precisão na estimativa, o que inviabiliza seu uso como estimadores.

Referências

- AKGÜL, M. *et al.* Manufacture of medium density fiberboard (MDF) panels from agribased lignocellulosic biomass. **Wood Research**, v. 62, n. 4, p. 615-624, 2017.
- AKGÜL, M.; ÇAMLIBEL, O. Manufacture of medium density fiberboard (MDF) panels from rhododendron (*R. ponticum* L.) biomass. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 438-443, abr. 2008.
- ALABDULJABBAR, H. *et al.* Effect of alumina nano-particles on physical and mechanical properties of medium density fiberboard. **Materials**, v. 13, n. 18, 2020.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15316**: painéis de fibra de média densidade. Rio de Janeiro, 2019.
- BERTOLINI, M. S. *et al.* Painéis de partículas provenientes de rejeitos de Pinus sp. tratado com preservante cca e resina derivada de biomassa. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 339-346, abr. 2014.
- CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. Production and characterization of MDF using eucalyptus fibers and castor oil-based polyurethane resin. **Materials Research**, v. 7, n. 3, p. 421-425, 2004.
- CHIROMITO, E. M. S. *et al.* Propriedades mecânicas de painéis produzidos com lascas de madeira em três diferentes comprimentos. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 175-180, mar. 2016.
- DANCEY, C. P.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- FAVARIM, H. R.; LEITE, L. O. Performance of ZnO nanoparticles for fire retardant and UV protection of pine wood. **BioResources**, v. 13, n. 3, p. 6963-6969, 2018.
- GUL, W. *et al.* Characterization of zinc oxide-urea formaldehyde nano resin and its impact on the physical performance of medium-density fiberboard. **Polymers**, v. 13, n. 3, p. 1-12, 2021.
- GUL, W. *et al.* Effect of iron oxide nanoparticles on the physical properties of medium density fiberboard. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 1-18, 2020.
- GUL, W.; ALROBEI, H. Effect of graphene oxide nanoparticles on the physical and mechanical properties of medium density fiberboard. **Polymers**, v. 13, n. 11, 2021.
- KUMAR, A. *et al.* Influence of aluminum oxide nanoparticles on the physical and mechanical properties of wood composites. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 6231-6241, 2013.
- LIMA, F. O. *et al.* Pressing time influence on physical and mechanical properties of MDP panels. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 119, p. 387-393, 2018.
- MARTINS, L. M. F. **Toxicologia de nanomateriais**. Almada, 2015. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Curso de Ciências, Instituto Superior de Egas Moniz, Almada, 2015.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley and Sons, 2012.
- NASCIMENTO, M. F. *et al.* Painéis de partículas homogêneas fabricados com resíduos lignocelulósicos e resina alternativa para aplicação em pisos. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 112, p. 1001-1007, 21 dez. 2016.
- PIEKARSKI, C. M. *et al.* Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 103-111, 2017.
- PINCHEVSKA, O. *et al.* Durability of kitchen furniture made from medium density fibreboard (MDF). **Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen**, v. 63, n. 1, p. 119-130, 2021.
- PUGAZHENTHI, N.; ANAND, P. Mechanical and thermal behavior of hybrid composite medium density fiberboard reinforced with phenol formaldehyde. **Heliyon**, v. 7, n. 12, 2021.
- SILVA, A. P. S. *et al.* Physical properties of medium density fiberboard produced with the addition of ZnO nanoparticles. **BioResources**, v. 14, n. 1, p. 1618-1625, 14 jan. 2019.
- SILVA, L. C. L. *et al.* Heat transfer and physical-mechanical properties analysis of particleboard produced with ZnO nanoparticles addition. **BioResources**, v. 14, n. 4, p. 9904-9915, 2019.
- TAGHIYARI, H. R.; NORTON, J. Effect of silver nanoparticles on hardness in medium-density fiberboard (MDF). **iForest – Biogeosciences and Forestry**, v. 8, p. 677-680, 2014.
- VALLE, A. C. M. *et al.* Physical and mechanical properties of particleboard from Eucalyptus grandis produced by urea formaldehyde resin with SiO₂ nanoparticles. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 3, p. 289-293, 2020.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio no desenvolvimento das pesquisas realizadas.

Cristiane Inácio Campos

Conceitualização, Curadoria de dados, Pesquisa, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Instituto de Ciência e Engenharia | Rua Geraldo Alckmin, 519, Campus de Itapeva | Itapeva - SP - Brasil | CEP 18409-010 | Tel.: (15) 3524-9100 Ramal 9131 | E-mail: cristiane.campos@unesp.br

Ana Paula Santos Silva

Conceitualização, Curadoria de dados, Pesquisa, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Instituto de Ciência e Engenharia | E-mail: ana.paula1@outlook.com

Vinicius Borges de Moura Aquino

Conceitualização, Curadoria de dados, Pesquisa, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Instituto de Engenharia do Araguaia | Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará | Rua Geraldo Ramalho, 33, Centro | Santana do Araguaia - PA - Brasil | CEP 68560-000 | Tel.: (94) 2101-5936 | E-mail: aquino.vini@hotmail.com

André Luis Christoforo

Conceitualização, Curadoria de dados, Pesquisa, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Rod. Washington Luís, km 235, SP-310, Jardim Guanabara | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13565-905 | Tel.: (16) 3306-6828 | E-mail: christoforoal@yahoo.com.br

Francisco Antonio Rocco Lahr

Conceitualização, Curadoria de dados, Pesquisa, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia de Estruturas | Universidade de São Paulo | Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13566-590 | Tel.: (16) 3373-8206 | E-mail: frocco@sc.usp.br

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.