

SUBMETIDO 01/03/2021

APROVADO 09/06/2021

PUBLICADO ON-LINE 22/08/2021

PUBLICADO 30/12/2022

EDITOR ASSOCIADO
José Carlos de Lima Júnior

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5478>

ARTIGO ORIGINAL

Densidade aparente e frequência de vibração como estimadores das propriedades de resistência e de rigidez à flexão de painéis OSSB

 João Vítor Felipe Silva ^{[1]*}

 Maria Fernanda Felipe Silva ^[2]

 Bruno Santos Ferreira ^[3]

 André Luis Christoforo ^[4]

 Cristiane Inácio de Campos ^[5]

[1] jvf.silva@unesp.br

Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá / Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Brasil

[2] mff.silva@unesp.br

[3] bs.ferreira@unesp.br

[5] cristiane.campos@unesp.br

Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Campus Experimental de Itapeva, Brasil

[4] christoforoal@yahoo.com.br

Universidade Federal de São Carlos
(UFSCar), Brasil

RESUMO: A caracterização não destrutiva é uma das opções para determinar as propriedades dos materiais sem que estes sejam inutilizados posteriormente, geralmente determinando suas propriedades dinâmicas. Para que essas propriedades sejam relacionadas com as estáticas, faz-se necessário o uso de modelos matemáticos de predição. Contudo, a calibração desses modelos varia de acordo com o material considerado e requer a realização de ambos os tipos de ensaio: destrutivo e não destrutivo. O presente trabalho teve como objetivo propor modelos de correlação entre resistência e rigidez na flexão estática de compósitos do tipo OSSB (*Oriented Structural Straw Board*) a partir de sua densidade aparente e frequência de vibração, sendo esta obtida com a técnica de excitação por impulso. Foram caracterizadas placas de OSSB fabricadas com palha de soja e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona em quatro porcentagens de adesivo, sendo estas: 6%, 9%, 12% e 15%. Os modelos de regressão múltipla propostos apresentaram boa precisão ($R^2 > 80\%$) em prever as propriedades mecânicas na flexão, sendo que o estimador da densidade foi o mais significativo. Observou-se também que o aumento do teor de adesivo nas chapas provocou melhora significativa no desempenho mecânico do material.

Palavras-chave: flexão estática; painéis OSSB; regressão múltipla; vibração transversal.

Apparent density and vibration frequency as estimators of strength and flexural stiffness properties of OSSB panels

ABSTRACT: *Non-destructive testing is one option to determine the properties of materials, usually through their dynamic properties, without causing permanent damage. To correlate dynamic properties to the static ones, it is necessary to use mathematical prediction models. However, the calibration of these models varies according to the material and requires the performance of destructive and*

*Autor para correspondência.

non-destructive tests. The present research aimed at proposing models of correlation between static bending strength and stiffness of OSSB (Oriented Structural Straw Board) based on their apparent density and frequency of vibration, obtained through the impulse excitation technique. OSSB panels were fabricated with soybean straw and castor oil in four different percentages of adhesive: 6%, 9%, 12% and 15%. The proposed multiple regression models showed good precision ($R^2 > 80\%$) in predicting the mechanical properties in bending; density was the most significant estimator. The increase in the adhesive content in the panels' composition caused a significant improvement in the mechanical performance of the material.

Keywords: *multiple regression model; OSSB panels; static bending; transverse vibration.*

1 Introdução

OSSB (*Oriented Structural Straw Board*) são materiais compósitos fabricados com resíduos agrícolas em formato de placa, com aplicação na construção civil e na indústria de mobiliário.

Para garantir o controle de qualidade desse compósito, faz-se necessária sua caracterização física e mecânica que, geralmente, é realizada de forma destrutiva, ou seja, após os ensaios, o produto não pode mais ser utilizado e é descartado.

Uma das maneiras alternativas de avaliar as propriedades de materiais é o uso de técnicas não destrutivas, pelas quais são caracterizadas suas propriedades dinâmicas. A partir de modelos matemáticos calibrados é possível correlacionar as propriedades dinâmicas (*i.e.*, frequência de vibração) com as mecânicas estáticas, desde que haja validação com dados experimentais.

Este trabalho teve como objetivo a investigação das propriedades mecânicas do OSSB, fabricado com quatro teores de adesivo diferentes, avaliando a precisão de modelos que fazem suas estimativas a partir da densidade aparente e da frequência de vibração.

2 Referencial teórico

A crescente demanda global por painéis à base de madeira, o aumento do preço e a baixa disponibilidade de matéria-prima indicam a necessidade da aplicação de resíduos e materiais alternativos na fabricação desses compósitos (WEBER *et al.*, 2017). Nesse contexto, Barbu, Reh e Çavdar (2017) sugerem o uso de outros recursos renováveis, tais como resíduos de origem agrícola, na produção de compósitos em forma de placas, sendo tal prática atraente do ponto de vista econômico e ambiental.

Este tipo de uso de resíduos agrícolas é prática comum em determinadas indústrias, sendo uma solução efetiva no que toca ao desenvolvimento sustentável (YU *et al.*, 2018).

Akpınar *et al.* (2012) indica que o uso de palha, nesse contexto, tem recebido interesse por parte das empresas devido ao baixo custo, à ampla disponibilidade e à presença de polímeros naturais e renováveis em sua composição.

Oliveira, Potiguara e Lobato (2006) descrevem a palha como o revestimento externo da haste caulinar, constituído por fibras impregnadas de lignina, com composição química semelhante à madeira.

Os painéis OSSB são produzidos com a palha e adesivo livre de formaldeído, sendo aplicados principalmente na indústria do mobiliário (Figura 1) e como elementos de fechamento de estruturas. A primeira planta industrial de OSSB foi implantada na China e encontra-se em operação desde outubro de 2009 (HAN *et al.*, 2012).

Figura 1 ▶

Móveis fabricados com OSSB de palha de trigo.
Fonte: Novofibre (2022)



No presente trabalho foram caracterizados painéis OSSB produzidos com palha de soja e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. A escolha da palha de soja na fabricação das chapas se justifica pelo fato de o Brasil ser um dos maiores produtores mundiais do grão (CONAB, 2021). Em relação ao adesivo poliuretano, este não possui formaldeído em sua composição, apresenta alto desempenho mecânico e grande abundância neste país (BIANCHE *et al.*, 2017). A mamona, matéria-prima do óleo, é uma cultura da região semiárida do Brasil e possui grande relevância socioeconômica (COSTA *et al.*, 2006).

A caracterização dos painéis, etapa importante na garantia de qualidade do produto, é geralmente realizada de forma destrutiva, ou seja, o elemento deve ser descartado. Lima Junior *et al.* (2018) ressaltam que a caracterização mecânica de materiais pode ser dividida em categorias destrutivas e não destrutivas.

Gholizadeh (2016) afirma que o uso de testes não destrutivos permite a avaliação e inspeção de materiais sem alterar os atributos originais ou prejudicar o objeto que está sendo testado. Além disso, Pizzol, Mantilla e Carrasco (2017) argumentam que esse método de ensaio ainda é rápido e preciso.

Ensaaios não destrutivos podem ser aplicados tanto na verificação da qualidade do processo produtivo como durante o uso do material para verificar sua integridade (LINS; SILVA, 2015).

O ensaio não destrutivo realizado no presente estudo foi o de excitação por impulso. Conforme Otani e Pereira (2013), através da frequência natural de vibração do material, é possível determinar seu módulo de elasticidade.

Ridley-Ellis, Libeau e Mignerat (2018) indicam que o método de excitação por impulso é uma técnica bem estabelecida e útil na caracterização e classificação de peças de madeira a nível industrial. No entanto, não se têm, na literatura, resultados sobre o uso dessa técnica em painéis OSSB.

Portanto, a realização deste estudo se justifica pela aplicação desses resultados na modelagem e predição das propriedades elásticas dos painéis OSSB sem que estes sejam destruídos em sua caracterização.

3 Método da pesquisa

As matérias-primas utilizadas na fabricação das chapas foram palha de soja (*Glycine Max L.*) e adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona. O adesivo, da marca KEHL®, continha 100% de teor de sólidos, sendo o componente A o polioli à base de óleo de mamona e o componente B um isocianato polifuncional.

As placas de OSSB foram produzidas com quatro diferentes porcentagens de adesivo: 6%, 9%, 12% e 15%, com base na massa seca de palha. Os detalhes da fabricação foram apresentados em Silva *et al.* (2021).

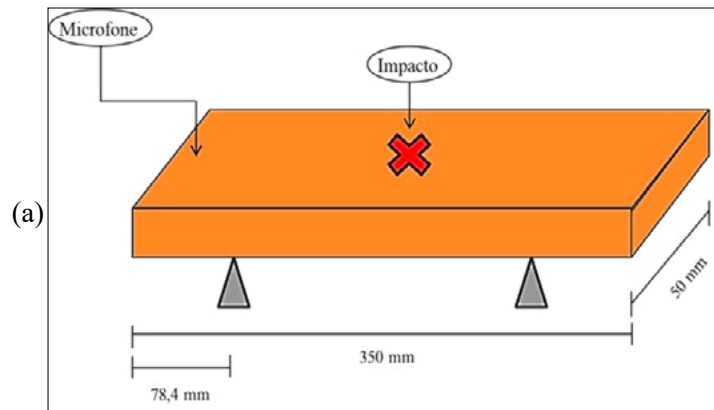
O ensaio não destrutivo foi baseado na metodologia proposta pela ASTM E1876 (ASTM, 2015), na qual foi determinado módulo de elasticidade dinâmico “fora-do-plano” dos painéis OSSB produzidos, na direção paralela às fibras da camada externa.

Foram usinados corpos de prova retangulares de 350 mm por 50 mm, sendo a maior dimensão retirada no sentido paralelo em relação ao sentido da palha da camada externa da chapa. Cada corpo de prova teve sua massa, largura, espessura e comprimento determinados antes dos ensaios.

Para a realização do ensaio, utilizou-se o sistema SONELASTIC®, em que cada amostra foi biapoada sobre um suporte metálico rígido próximo ao dispositivo de detecção (microfone) acoplado a um computador (conforme indicado na Figura 2). A amostra foi impactada por uma haste polimérica flexível com ponta metálica na parte superior central do corpo de prova e a aquisição ocorreu na superfície superior próxima da borda do corpo de prova.

Figura 2 ▶

- (a) Esquema do ensaio não destrutivo e sistema de medição.
 (b) Aquisição da frequência de vibração
 Fonte: (a) elaborada pelos autores;
 (b) arquivo dos autores



Os dados de frequência natural de vibração foram processados pelo software ATCP Sonelastic 3.0. A frequência natural de vibração foi determinada pela média de dez medidas consecutivas, sendo determinados ao todo 280 valores de frequência média. O tempo de aquisição utilizado foi de 0,683 segundos com uso de filtro de detecção padrão (até 20 kHz).

A Equação 1 apresenta o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico.

$$MOE_d = 0,9465 \times \left(\frac{m \times f_f^2}{l_2}\right) \times \left(\frac{l_1^3}{e^3}\right) \times T_1 \times 10^{-6} \quad (1)$$

onde: MOE_d é o módulo de elasticidade dinâmico fora do plano, em megapascal; m é a massa da amostra, em gramas; f_f é a frequência natural de oscilação do corpo de prova na flexão, em hertz; l_2 é a largura do corpo de prova, em milímetros; l_1 é o comprimento do corpo de prova, em milímetros; t é a espessura do corpo de prova, em milímetros; T_1 é o fator de correção para o modo de flexão fundamental, adimensional, calculado por:

$$T_1 = \left[1,000 + 6,585 \times \left(\frac{t}{L}\right)^2 \right] \quad (2)$$

com L sendo o comprimento total do corpo de prova, em milímetros.

Após os ensaios de excitação por impulso, foram realizados os ensaios de flexão estática, sendo estes baseados na norma BS EN 310 (BSI, 1993), que é utilizada na caracterização de rigidez e resistência na flexão estática de painéis à base de madeira. Cada amostra foi apoiada entre dois suportes cilíndricos com vão de 300 mm, e a carga foi aplicada com um cutelo no centro do vão. A taxa de carregamento foi tal que a ruptura da amostra ocorreu no intervalo de 60 ± 30 s, sendo de 150 N/min.

Na Figura 3, foi indicada uma das amostras durante o ensaio de flexão estática na máquina universal de ensaios EMIC 300 kN da Instron.

Figura 3 ▶
Ensaio de flexão estática em
uma amostra de OSSB.
Fonte: arquivo dos autores



A aquisição dos dados foi realizada com o software Tesc versão 3.04, a partir da qual foi feito o cálculo da elasticidade e da resistência à flexão para cada uma das amostras. A Equação 3 apresenta o cálculo do módulo de elasticidade e a Equação 4, do módulo de ruptura.

$$MOE = \frac{l^3 \times (F_{40\%} - F_{10\%})}{4 \times l_2 \times e^3 \times (a_{40\%} - a_{10\%})} \quad (3)$$

onde: *MOE* é o módulo de elasticidade na flexão estática, em megapascal; *l* é o vão entre apoios, em milímetros; $(F_{40\%} - F_{10\%})$ é o incremento de força no trecho elástico da curva força *versus* deslocamento, cujas porcentagens são em relação à carga máxima, em N; *l*₂ é a largura média da amostra, em mm; *e* é a espessura média da amostra, em milímetros; $(a_{40\%} - a_{10\%})$ é o incremento da flecha no centro do vão, devido ao incremento da força $(F_{40\%} - F_{10\%})$, em milímetros.

$$MOR = \frac{3 \times F_{m\acute{a}x} \times l}{2 \times l_2 \times e^2} \quad (4)$$

onde: *MOR* é o módulo de ruptura na flexão estática, em MPa; *F*_{máx} é a carga máxima aplicada no corpo de prova antes da ruptura, em N.

A análise dos dados foi realizada a partir dos resultados obtidos na fabricação de três placas por tratamento, das quais se retirou sete amostras de cada.

O teste de Tukey (5% de significância) foi utilizado para verificar a influência do fator teor de adesivo (TA – 6%, 9%, 12%, 15%) na densidade aparente (*De*), no módulo de elasticidade (*MOE*) e no módulo de resistência (*MOR*) provenientes do ensaio de flexão estática, assim como no módulo de elasticidade dinâmico (*MOEd*). Do teste de Tukey, A denota o grupo de maior valor médio da propriedade, B o de segundo maior valor médio e assim sucessivamente. Aqui, interessa dizer que letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si.

O teste de Anderson-Darling e o teste de Comparações Múltiplas, ambos ao nível de 5% de significância, foram utilizados para verificar a normalidade e a homogeneidade dos resíduos. Pela formulação dos testes, valor-*p* (probabilidade *P*) maior ou igual a 0,05 implica na normalidade e na homogeneidade dos resíduos, o que valida os resultados do teste de contraste de médias de Tukey.

O modelo quadrático de regressão múltipla (Equação 5), dependente da densidade aparente (*De*) e da frequência (*Fr*) de vibração proveniente do ensaio de vibração transversal, foi utilizado para estimar os valores do módulo de elasticidade (*MOE*) assim como os valores do módulo de resistência (*MOR*), oriundos do ensaio de flexão estática.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times Fr + \beta_2 \times De + \beta_3 \times Fr^2 + \beta_4 \times vDe^2 + \beta_5 \times Fr \times De + \varepsilon \quad (5)$$

Na Equação 5, *Y* denota ora os valores do *MOE*, ora os valores do *MOR*, *β*_{*i*} consistem nos coeficientes obtidos pelo método dos mínimos quadrados e *ε* é o erro aleatório, sendo a precisão dos ajustes avaliada por meio do coeficiente de determinação (*R*²).

A análise de variância (ANOVA – 5% de significância) foi utilizada para verificar a significância e a ordem de significância dos termos presentes na Equação 5, consistindo em uma ferramenta de análise de sensibilidade. Valor- p maior ou igual a 0,05 (5%) implica que o modelo ou os coeficientes não são significativos, e significativos em caso contrário (Valor- $p < 0,05$). A interpretação dos resultados da ANOVA foi feita com o auxílio do gráfico de Pareto.

Para validação da ANOVA do modelo de regressão, foi verificada a normalidade na distribuição dos resíduos gerados pela Equação 5 com o auxílio do teste de normalidade de Anderson-Darling; e a homogeneidade dos resíduos foi avaliada com o auxílio do gráfico de resíduos *versus* valores ajustados. Pela formulação do teste de Anderson-Darling, também ao nível de 5% de significância, valor- p maior ou igual ao nível de significância implica na normalidade da distribuição dos resíduos, e a simetria na amplitude do espalhamento dos resíduos em torno de 0 indica homogeneidade (gráfico de resíduos *versus* valores ajustados), o que valida o modelo da ANOVA.

Além de se verificar a precisão (viabilidade) em estimar o MOE e o MOR com base na frequência de vibração e na densidade aparente, que consiste em uma abordagem alternativa útil na pré-classificação de painéis OSSB fabricados com o adesivo e com os respectivos resíduos considerados na presente pesquisa, o módulo de elasticidade dinâmico ($MOEd$) foi relacionado com o módulo de elasticidade estático por meio dos modelos de regressão a uma variável e a dois parâmetros (β_0 e β_1), expressos nas Equações de 6 a 9.

$$MOE = \beta_0 + \beta_1 \cdot MOEd + \varepsilon \quad [\text{linear}] \quad (6)$$

$$MOE = \beta_0 + MOEd^{\beta_1} + \varepsilon \quad [\text{geométrico}] \quad (7)$$

$$MOE = \beta_0 + e^{\beta_1 \cdot MOEd} + \varepsilon \quad [\text{exponencial}] \quad (8)$$

$$MOE = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(MOEd) + \varepsilon \quad [\text{logaritmico}] \quad (9)$$

O coeficiente de determinação (R^2) também foi utilizado para verificar a precisão dos ajustes fornecidos pelas Equações de 6 a 9, possibilitando eleger o de melhor representatividade. Em estruturas de madeira, em que o ensaio de vibração transversal tem sido utilizado na obtenção da rigidez, é comum a busca pela relação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico, pois, se conhecido o módulo de elasticidade dinâmico (ensaio não destrutivo), é possível estimar o MOE do ensaio de flexão estática (SEGUNDINHO *et al.*, 2016).

4 Resultados da pesquisa

Nas Figuras 4 e 5, são apresentados os valores médios, os intervalos de confiança da média (95% de confiabilidade), os valores extremos dos coeficientes de variação (*CV*) e os resultados do teste de Tukey (5% de significância) das propriedades densidade aparente (*De*), módulos de elasticidade (*MOE*) e de resistência (*MOR*) na flexão estática, frequência de vibração (*Fr*) e módulo de elasticidade dinâmico (*MOEd*) dos painéis OSSB fabricados em função dos teores de adesivo (*TA*), cabendo destacar que os valores-*p* do teste de normalidade de Anderson-Darling e do teste de comparações múltiplas para avaliação da homogeneidade dos resíduos variam nos intervalos de [0.089; 0.456] e [0.154; 0.622], respectivamente, o que valida os resultados obtidos no teste de Tukey.

Figura 4 ►

Resultados obtidos para a *De* (a), *MOE* (b) e *MOR* (c) em função dos teores de adesivo considerados na fabricação dos painéis OSSB.
Fonte: dados da pesquisa

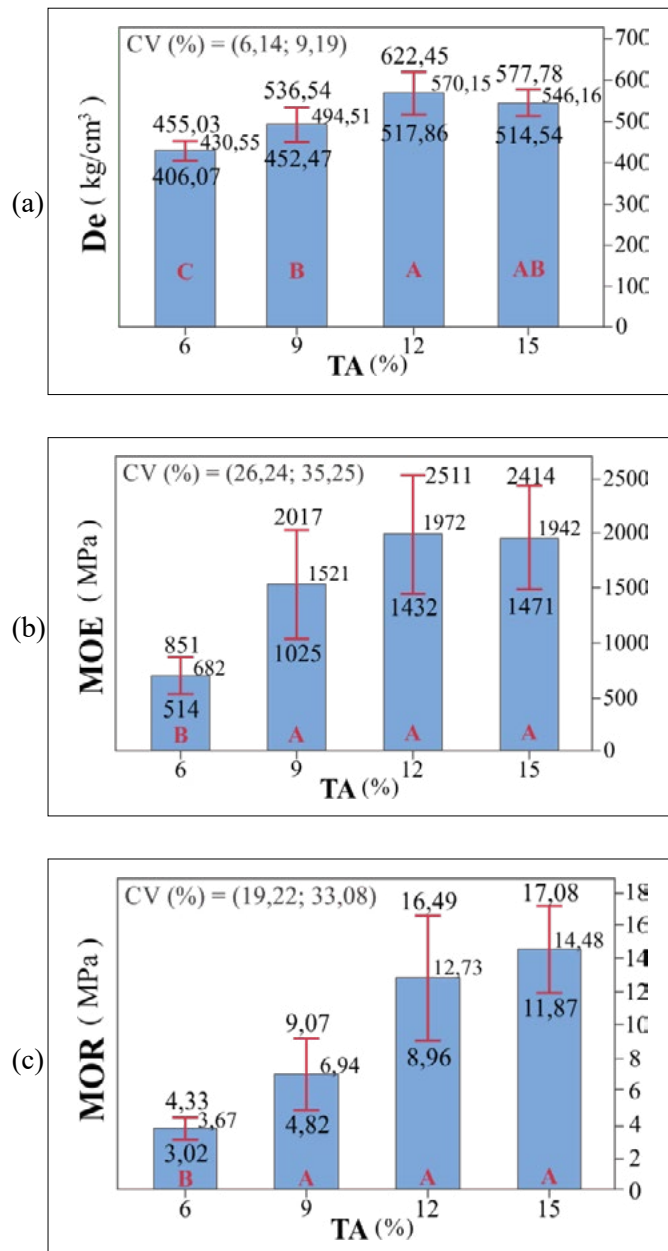
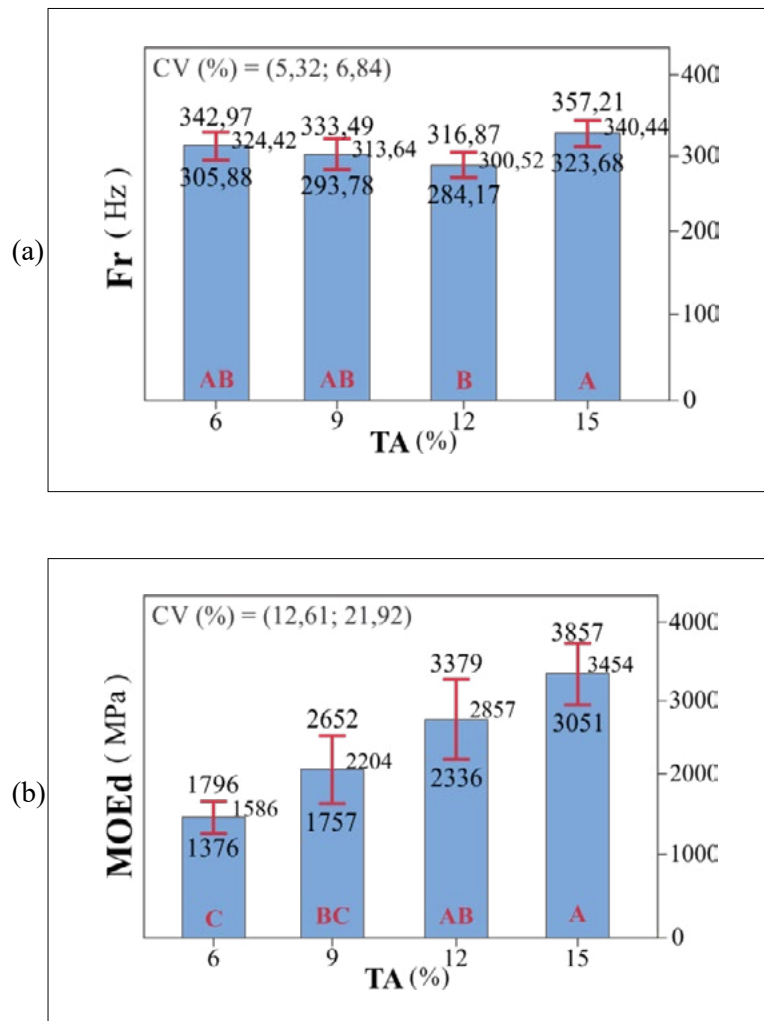


Figura 5 ►

Resultados obtidos para a *Fr* (a) e para o *MOEd* (b) em função dos teores de adesivo considerados na fabricação dos painéis OSSB.

Fonte: dados da pesquisa



A partir da Figura 4, foi possível notar uma tendência de maior densidade e maior rigidez com o aumento do teor de adesivo na composição das chapas de OSSB.

Bianche *et al.* (2017) e Weber *et al.* (2017) também observaram o efeito de diferentes traços de adesivo nas propriedades mecânicas de compósitos à base de madeira.

Na Figura 5, notou-se a proximidade dos resultados de frequência de vibração das amostras e o aumento progressivo do módulo de elasticidade dinâmico do material com o aumento da porcentagem de adesivo poliuretano em sua composição.

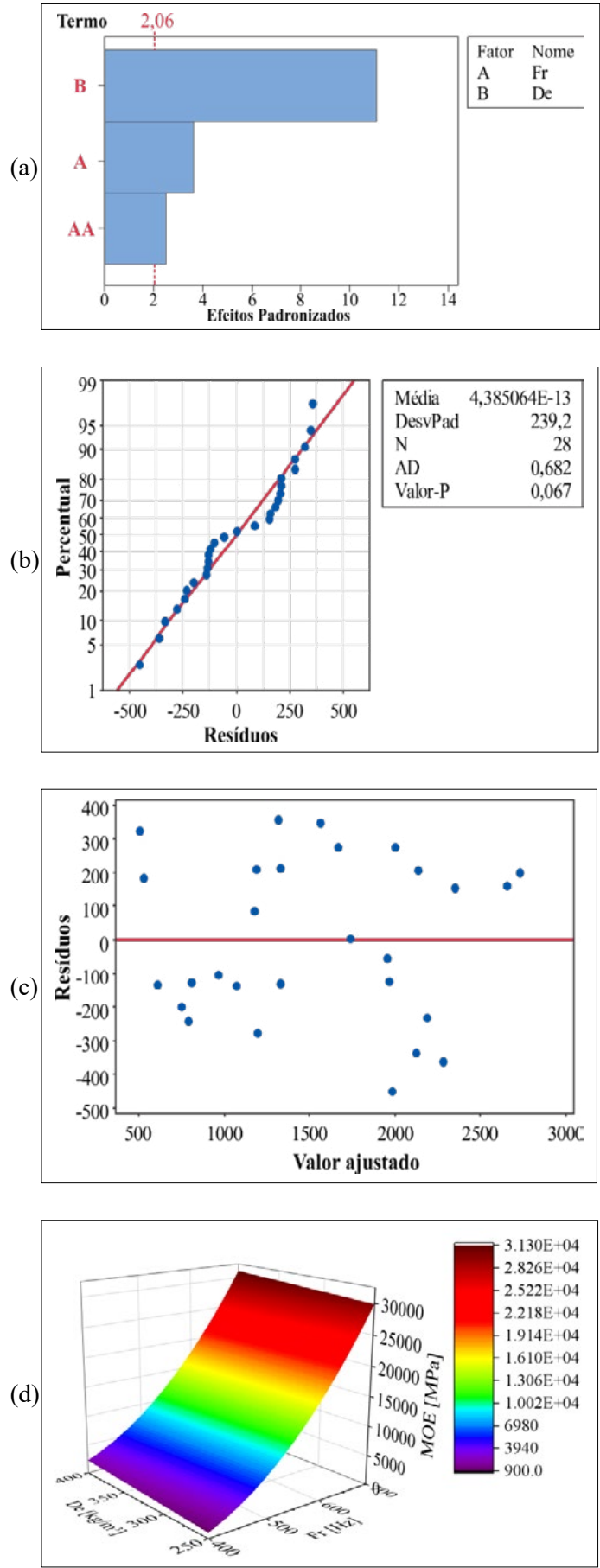
O modelo para a estimativa do *MOE* (composto apenas pelos termos considerados significativos pela ANOVA) em função da *Fr* e da *De* é expresso na Equação 10 juntamente com respectivo coeficiente de determinação (R^2). Já na Figura 6, são apresentados os resultados da ANOVA, a validação da ANOVA e da superfície obtida com o uso da Equação 10.

$$MOE = 14285 - 116,4 \times Fr + 8,922 \times De + 0,1936 \times Fr^2 \quad (10)$$

$$[R^2 = 88,22\%]$$

Figura 6 ▶

Resultados do modelo de regressão para a estimativa do MOE – gráfico de Pareto (a), gráfico de normalidade (b), gráfico de resíduos × valores ajustados (c) e gráfico da superfície gerada com a Equação 10 (d).
 Fonte: dados da pesquisa



O modelo de regressão da Equação 10 consiste em uma superfície quadrática (Figura 6d) em razão do termo Fr estar elevado ao quadrado. Nesse modelo, o termo mais significativo consistiu na densidade aparente, seguido pela frequência de vibração (Figura 6a), ficando a validade da ANOVA do modelo de regressão constatada nas Figuras 6b e 6c. A precisão ($R^2 = 88.22\%$) obtida com o uso da Equação 10 evidencia que essa pode ser utilizada na estimativa do MOE para densidades situadas entre a mínima (389.90 kg/m^3) e a máxima (644.07 kg/m^3) e para frequências compreendidas entre a mínima ($269,45 \text{ Hz}$) e a máxima ($374,80 \text{ Hz}$), obtidas experimentalmente.

O coeficiente de correlação entre a densidade e a elasticidade encontrado foi superior ao determinado por Ridley-Ellis (2019), que estudou espécies de madeira europeias livres de defeitos. Isto se deve ao uso do modelo de regressão múltipla, com emprego da densidade e da frequência natural de vibração.

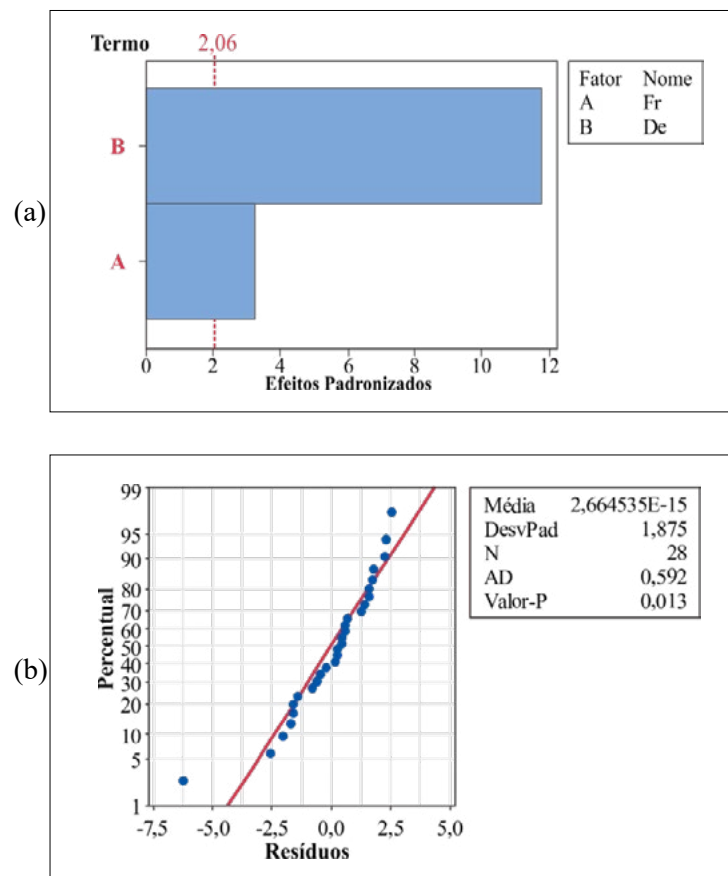
O modelo para a estimativa do MOR (composto apenas pelos termos considerados significativos pela ANOVA) em função da Fr e da De é expresso na Equação 11 juntamente com o respectivo coeficiente de determinação (R^2); e na Figura 7 são apresentados os resultados da ANOVA, a validação da ANOVA e da superfície obtida com o uso da Equação 11.

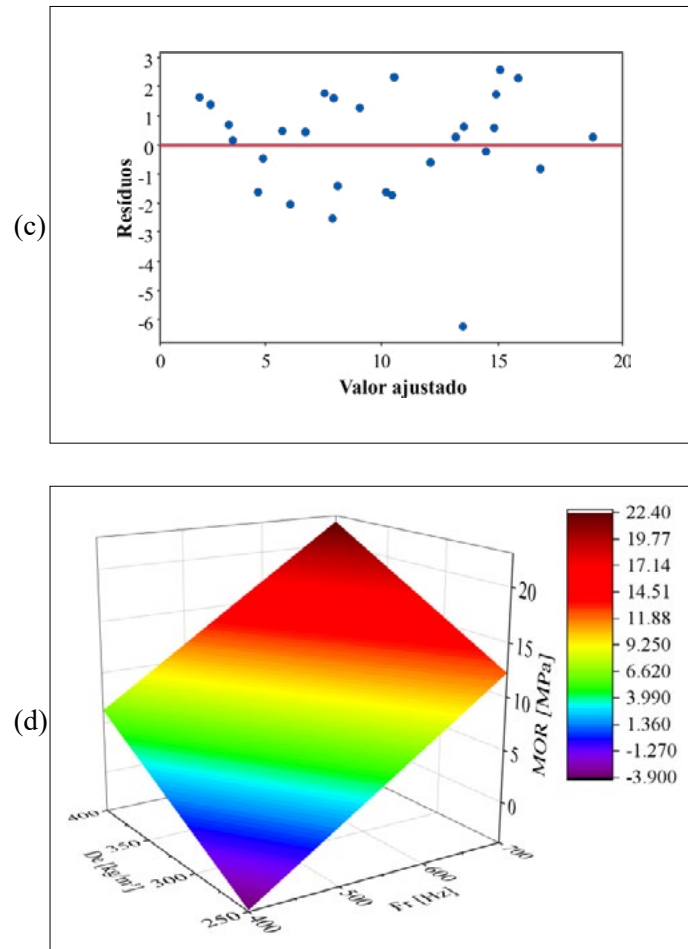
$$MOR = -42,30 + 0,0537 \times Fr + 0,06776 \times De \quad (11)$$

$$[R^2 = 86,65\%]$$

Figura 7 ►

Resultados do modelo de regressão para a estimativa do MOR – gráfico de Pareto (a), gráfico de normalidade (b), gráfico de resíduos \times valores ajustados (c) e gráfico da superfície gerada com a Equação 11 (d).
Fonte: dados da pesquisa





Na Figura 7, observa-se que, assim como no MOE, no MOR, o termo mais significativo consistiu na densidade aparente, seguido pela frequência de vibração (Figura 7a). A validade da ANOVA do modelo de regressão (Equação 11) é evidenciada pelas Figuras 7b e 7c. A precisão da Equação 11 ($R^2 = 86.65\%$) é próxima à precisão obtida com a equação para estimativa do *MOE* e pode ser utilizada na estimativa do *MOR* para valores de densidade aparente e frequência de vibração compreendidas pelos valores obtidos experimentalmente. Ainda da Equação 11, nota-se que aumentos na densidade e na frequência de vibração promovem aumentos no *MOR*. No caso da predição do *MOR*, o modelo linear foi o que obteve o melhor ajuste.

A Equação 12 apresenta o modelo de melhor ajuste (modelo linear), entre os quatro (Equações 6 a 9) considerados juntamente com o respectivo coeficiente de determinação. Na Figura 8, é ilustrado o ajuste ao conjunto de pontos obtido com o uso dessa equação.

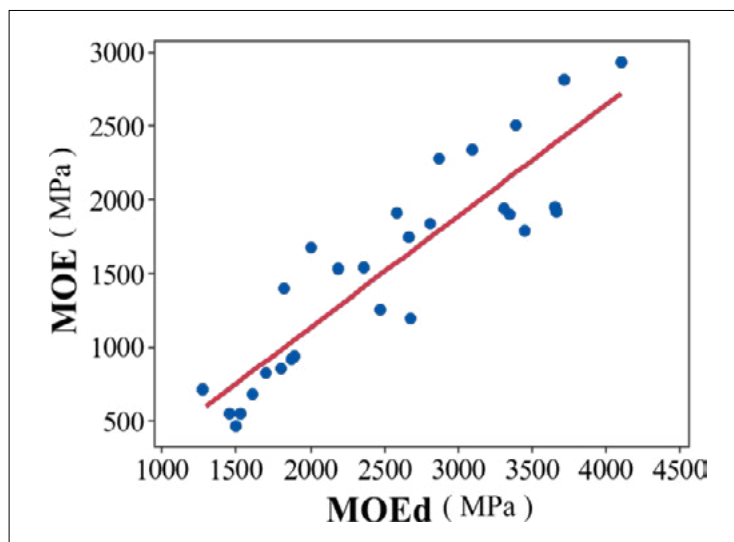
$$MOE = -380,9 + 0,7564 \cdot MOEd \quad (12)$$

$$[R^2 = 80,57\%]$$

Figura 8 ►

Gráfico do melhor ajuste (relação linear) entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico.

Fonte: dados da pesquisa



Os valores de R^2 determinados nas Equações 10, 11 e 12 foram próximos aos encontrados por Lima Junior *et al.* (2018), para corpos de prova de madeira de *Eucalyptus grandis*.

A partir da Equação 12 e da Figura 8, verificou-se que existe uma correlação linear entre o módulo de elasticidade dinâmico e a rigidez à flexão dos painéis OSSB, independentemente da quantidade de adesivo em sua composição.

5 Conclusões

Os modelos matemáticos de regressão múltipla propostos possuem boa precisão (R^2 superior a 80%) em determinar propriedades de rigidez e resistência à flexão estática a partir da frequência de vibração e da densidade, sendo esta última a mais significativa.

O aumento do teor de adesivo presente na composição dos painéis OSSB aumentou significativamente a densidade e o desempenho mecânico das chapas. Os valores de *MOR* em painéis com 15% de teor de adesivo foram mais de três vezes superiores em relação aos fabricados com 6%.

Em linhas gerais, pela boa precisão alcançada com o uso dos modelos para a estimativa das propriedades obtidas no ensaio de flexão estática, faz-se necessário que essa estimativa seja aplicada considerando uma classe de painéis OSSB com maior abrangência de parâmetros (tipos de adesivos, pressão e temperatura de prensagem, tipos de resíduos, características geométricas desses resíduos) para resultados ainda mais abrangentes, o que deve ser o foco de pesquisas futuras.

Financiamento

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processo nº 2018/00801-7), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo nº 131765/2018-3) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Código de Financiamento 001).

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

AKPINAR, O.; SABANCI, S.; LEVENT, O.; SAYASLAN, A. Evaluation of antioxidant activity of dilute acid hydrolysate of wheat straw during xylose production. **Industrial Crops and Products**, v. 40, p. 39-44, Nov. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.035>.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876-15**: standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. West Conshohocken: ASTM International, 2015. 17 p.

BARBU, M. C.; REH, R.; ÇAVDAR, A. D. Non-wood lignocellulosic composites. In: AGUILERA, A.; DAVIM, J. P. (ed.). **Research developments in wood engineering and technology**. Pennsylvania: IGI Global, 2017. p. 281-319. DOI: <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-4666-4554-7.ch008>.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-9, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.077114>.

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **EN 310**: wood-based panels: determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. Brussels: BSI, 1993. 14 p.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim da safra de grãos**: Safra 2020/21. Brasília: Conab, 2021. 8 v., 86 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 14 maio 2021.

COSTA, F. X.; BELTRÃO, N. E. M.; OLIVEIRA, E. M.; PEIXOTO, M. S. R. M. Plantio da mamoneira em solo compactado adubado com torta de mamona. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 14, p. 61-67, 2006. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/277/235>. Acesso em: 21 jun. 2022.

GHOLIZADEH, S. A review of non-destructive testing methods of composite materials. **Procedia Structural Integrity**, v. 1, p. 50-57, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008>.

HAN, G.; CHENG, W.; MANNING, M.; ELOY, P. Performance of zinc borate-treated oriented structural straw board against mold fungi, decay fungi, and termites: a preliminary trial. **BioResources**, Raleigh, v. 7, n. 3, p. 2986-2995, 2012. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/performance-of-zinc-borate-treated-oriented-structural-straw-board-against-mold-fungi-decay-fungi-and-termites-a-preliminary-trial/>. Acesso em: 21 jun. 2022.

LINS, R. S. A. T.; SILVA, E. M. Metodologia de um ensaio não destrutivo, baseado em medidas de tensão Hall, para determinação de descontinuidades em aços ao carbono. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 26, p. 100-105, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n26p100-105>.

LIMA JUNIOR, M. P.; BIAZZON, J. C.; ARAUJO, V. A.; MUNIS, R. A.; MARTINS, J. C.; CORTEZ-BARBOSA, J.; GAVA, M.; VALARELLI, I. D.; MORALES, E. A. M. Mechanical properties evaluation of *Eucalyptus grandis* wood at three different heights by impulse excitation technique (IET). **BioResources**, Raleigh, v. 13, n. 2, p. 3377-3385, 2018. Disponível em: <https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/12804>. Acesso em: 21 jun. 2022.

NOVOFIBRE. **Todos os produtos da Novofibre**. Beijing: Novofibre, 2022. Disponível em: <https://www.archiexpo.com/pt/prod/novofibre-124809.html>. Acesso em: 23 out. 2022.

OLIVEIRA, J.; POTIGUARA, R. C. V.; LOBATO, L. C. B. Fibras vegetais utilizadas na pesca artesanal na microrregião do Salgado, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, Belém, v. 1, n. 2, p. 113-127, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1981-81222006000200009>.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. **Guia de caracterização dos módulos elásticos e do amortecimento de madeiras e derivados utilizando as soluções Sonelastic®**. 3. ed. Ribeirão Preto: ATCP Engenharia Física, 2013. Disponível em: <https://azdoc.tips/preview/guia-de-caracterizaao-modulos-elasticos-de-madeiras-v-03-5c18da9389eac>. Acesso em: 21 jun. 2022.

PIZZOL, V. D.; MANTILLA, J. N. R.; CARRASCO, E. V. M. Caracterização elástica de compensados de madeira utilizados e reutilizados em fôrmas através de excitação por impulso. **Matéria**, v. 22, n. 1, p. 1-12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0264>.

RIDLEY-ELLIS, D. The mechanical and resonance assessment of large clear samples of UK-grown beech wood. **Pro Ligno**, v. 15, n. 4, p. 32-39, 2019. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20203177380>. Acesso em: 21 jun. 2022.

RIDLEY-ELLIS, D.; LIBEAU, M.; MIGNERAT, D. Impulse excitation measurement of small changes in elastic moduli and damping using R. **International Wood Products Journal**, v. 9, n. 2, p. 74-79, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/20426445.2018.1475928>.

SEGUNDINHO, P. G. A.; CARREIRA, M. R.; CALIL NETO, C.; REGAZZI, A. J.; DIAS, A. A.; CALIL JUNIOR, C. Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 7-14, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200002>.

SILVA, J. V. F.; SILVA, M. F. F.; FERREIRA, B. S.; FIORELLI, J.; CHRISTOFORO, A. L.; CAMPOS, C. I. Castor oil based polyurethane adhesive content on OSSB produced with soybean straw. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 23-36, jan.-mar. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100491>.

WEBER, A. M.; CECHIN, L.; TOKARSKI, R. B.; MATOSKI, A. Análise da influência do traço nas propriedades do compósito cimento-madeira. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 36, p. 50-59, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n36p50-59>.

YU, M.; 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, 5101937, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2018/5101937>.