

Comportamiento de la tasa de absorción de humedad en el bambú (*bambusa oldhamii*) utilizando correlaciones matemáticas



Colaboración

Luis Eduardo Fernández Ramírez; Sergio Aurelio Zamora Castro; Lorena del Carmen Santos Cortés; Rolando Salgado Estrada; Margarita Díaz Olalde, Universidad Veracruzana

Fecha de recepción: 22 de agosto de 2025

Fecha de aceptación: 13 de noviembre de 2025

RESUMEN: El bambú es un material de construcción sustentable con buenas propiedades mecánicas. El contenido de humedad (CH) modifica el comportamiento del bambú y la caracterización de su tasa de absorción es necesaria para el análisis de sus propiedades físicas y mecánicas. En esta investigación se obtuvieron modelos matemáticos lineales, polinomiales y exponenciales que describen la absorción de humedad en la especie *Bambusa Oldhamii* mediante un método de inmersión que controla el contenido de agua través del tiempo. Se obtuvieron correlaciones R^2 alrededor de 0.99 en los modelos polinomiales de tercer grado y se determinó que conforme avanza el tiempo las probetas pierden homogeneidad en el ritmo de absorción de agua, además se comprobaron las diferencias significativas en la tasa de las probetas mediante un análisis ANOVA de 2 factores. En conjunto, los resultados fortalecen el conocimiento sobre la dinámica de absorción del bambú y proporcionan un punto de partida para estudios orientados a correlacionar el contenido de humedad con su desempeño estructural.

PALABRAS CLAVE: Bambú, *Bambusa Oldhamii*, Construcción sustentable, Contenido de humedad, Ajuste matemático.

ABSTRACT: Bamboo is a sustainable building material with good mechanical properties. Moisture content modifies the behavior of bamboo, and characterization of its absorption rate is necessary for the analysis of its physical and mechanical properties. In this research, linear, polynomial, and exponential mathematical models were obtained that describe moisture absorption in the *Bambusa Oldhamii* species using an immersion method over time that controls water content. R^2 correlations of around 0.99 were obtained in the third-degree polynomial models, and it was determined that as time progresses, the samples lose homogeneity in the rate of water absorption. In addition, significant differences in the rate of the samples were verified using a two-factor ANOVA analysis. Taken together, the results strengthen our understanding of the absorption dynamics of bamboo and provide a starting point for studies aimed at correlating moisture content with structural performance.

KEYWORDS: Bamboo, *Bambusa Oldhamii*, Sustainable construction, Moisture content, Mathematical adjustment.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial en la población incrementa la demanda de materiales de construcción convencionales, los cuales se asocian con gasto energético excesivo y contaminación ambiental [1][2], según Musonda, et al. Cerca del 50% de recursos y energía global se utilizan en el sector de infraestructura [3]. El bambú como material alternativo de construcción tiene ventajas como alta resistencia, bajo costo, crecimiento rápido y captura el dióxido de carbono [4]. La resistencia del culmo es variable en función de sus propiedades físicas [5] como la pérdida o ganancia de CH [6]. Como las condiciones climatológicas alteran el CH en el bambú, sus propiedades mecánicas se ven comprometidas [7]. El punto de saturación de la fibra para el bambú se aproxima a 30% [8], y en porcentajes superiores aún se esperan alteraciones mínimas [9]. Para determinar la influencia del CH en el bambú se utiliza una técnica de inmersión controlada que consiste en pesajes periódicos de probetas sumergidas en agua hasta

obtener un porcentaje de CH deseado, esta metodología fue utilizada por Gutiérrez et al y Wang et al [10][11], sin embargo, este método puede optimizarse con un ajuste matemático que prediga el tiempo de inmersión para obtener un CH deseado. Los modelos matemáticos son utilizados en el sector de la construcción para predecir comportamientos y optimizar parámetros como desempeño estructural, calidad de materiales o rendimiento económico [12] [13], la regresión polinomial es una herramienta que permite comprender comportamientos complejos que no presentan una relación lineal entre variables [14], ideal para el análisis en materiales poco homogéneos. El bambusa oldhamii es una especie originaria de China que puede alcanzar una altura de 25 metros con entrenudos de hasta 55 cm y diámetros de hasta 10 cm [15], esta especie se puede encontrar de forma nativa en el estado de Veracruz y por su potencial aplicación estructural [16] es la especie de análisis para esta investigación. El objetivo de la investigación es evaluar el comportamiento higroscópico del bambusa oldhamii a través del tiempo mediante una metodología de inmersión controlada con la finalidad de predecir la tasa de absorción, siendo un parámetro esencial para conocer las propiedades del bambú en función de su CH. Se espera encontrar un ajuste que describa el comportamiento real en la tasa de absorción del bambusa oldhamii, sin embargo, dada la variabilidad del material es posible que se presente un comportamiento heterogéneo entre los especímenes.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para la ejecución de los ensayos se utilizaron 5 probetas de bambusa oldhamii Figura 1 con edad de 5 años recolectadas en Huatusco, localidad en Veracruz, México. Las probetas fueron secadas en horno a una temperatura de 100 ± 3 °C hasta alcanzar un CH de 0%, siendo verificado mediante pesajes periódicos en una báscula CAMRY con precisión de 9.8×10^{-3} N hasta no obtener disminución de peso. El tiempo de secado para todos los casos no superó las 24 horas.



Figura 1: Pesaje de probetas de bambú con 0% de CH, A) 2.01 N, B) 2.40 N, C) 2.48 N, D) 2.70 N, E) 2.66 N.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente las probetas fueron sumergidas en agua corriente Figura 2 para tomar lecturas del incremento en peso periódicamente durante 114 horas. El CH fue determinado mediante la ecuación 1.

$$\omega = \frac{P_H - P_S}{P_S} \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde

ω = Contenido de humedad interno, %

P_H = Peso húmedo de la probeta, N

P_S = Peso seco de la probeta, N



Figura 2. Metodología de inmersión.

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados experimentales obtenidos se elaboraron ajustes matemáticos lineales, polinomiales y exponenciales en el software Microsoft Excel [17] empleando la herramienta de línea de tendencia del módulo de gráficos, la cual implementa el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios. Este método estima los coeficientes de los modelos al minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. Además, se evaluó si hubiera diferencias significativas entre los resultados de las probetas y la variable dependiente CH mediante un análisis de varianza ANOVA, realizado también en Excel.

RESULTADOS

Los datos obtenidos demuestran que durante las primeras 12 horas de inmersión los incrementos de humedad son poco variables, posteriormente se aprecia un umbral con dispersión media entre las horas 12 y 36, pero posterior a la hora 40 se tiene una dispersión mayor entre resultados como se observa en la Figura 3.

Se realizaron ajustes matemáticos, lineales, polinomiales de grado 2 y 3 así como potenciales para un análisis de las probetas en conjunto e individuales. Para el análisis de datos en conjunto se obtuvieron correlaciones R^2 de 0.8248, 0.9055, 0.9204 y 0.9117 en el modelo lineal, polinomial de segundo grado, tercer grado y potencial respectivamente, cuya representación matemática se muestra en las ecuaciones 2,3,4 y 5, además los ajustes se aprecian en la Figura 4.

$$y = 0.3733x + 12.6930 \quad \text{Ec. (2)}$$

$$y = -0.0041x^2 + 0.7979x + 8.0047 \quad \text{Ec. (3)}$$

$$y = 6E - 05x^3 - 0.0135x^2 + 1.1756x + 5.8 \quad \text{Ec. (4)}$$

$$y = 5.4546x^{0.479} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$y = 0.4087x + 12.7070$$

$$R^2=0.8959$$

Ec. (6)

$$y = -0.0043x^2 + 0.8592x + 7.7341$$

$$R^2=0.9782$$

Ec. (7)

$$y = 7E - 05x^3 - 0.0153x^2 + 1.2960x + 5.1845$$

$$R^2=0.9962$$

Ec. (8)

$$y = 5.1019x^{0.5143}$$

$$R^2=0.9845$$

Ec. (9)

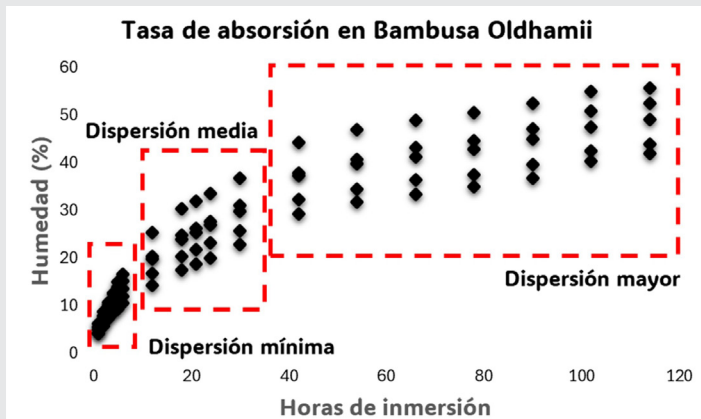


Figura 3. Dispersión en la absorción de humedad de probetas.
Fuente: Elaboración propia.

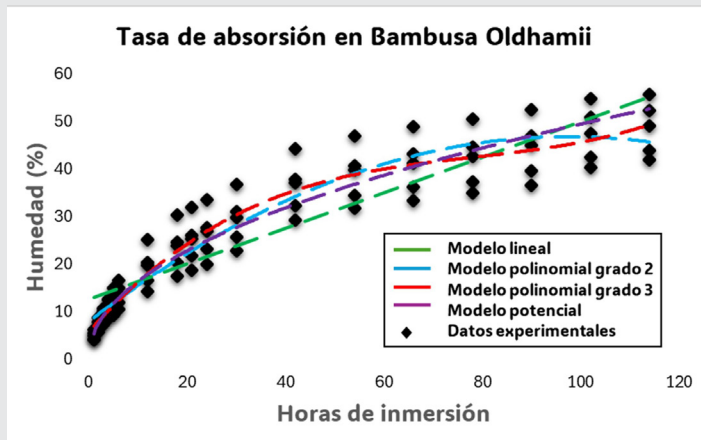


Figura 4: Modelos matemáticos para la dispersión de todas las probetas.
Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis individual los ajustes polinomiales de grado 3 obtuvieron las mejores correlaciones R^2 y los grados superiores no representan mejoras significativas de correlación, en las Figuras 5-9 se muestran los ajustes con sus respectivos modelos matemáticos y correlaciones.

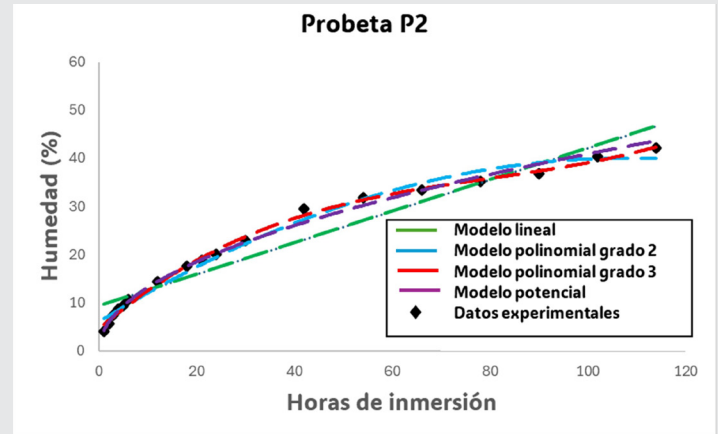


Figura 6: Ajustes en P2.
Fuente: Elaboración propia.

$$y = 0.3273x + 9.3440$$

$$R^2=0.9276$$

Ec. (10)

$$y = -0.0029x^2 + 0.6284x + 6.0200$$

$$R^2=0.9870$$

Ec. (11)

$$y = 4E - 05x^3 - 0.0092x^2 + 0.8784x + 4.5608 \quad \text{Ec. (12)}$$

$$R^2=0.9965$$

$$y = 4.2262x^{0.4928}$$

$$R^2=0.9937$$

Ec. (13)

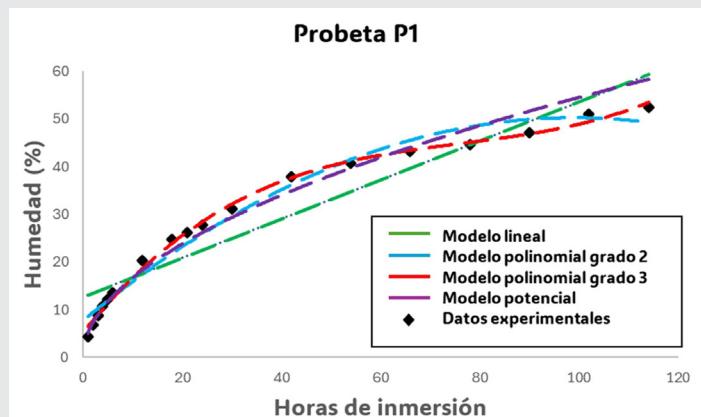


Figura 5: Ajustes en P1.
Fuente: Elaboración propia.

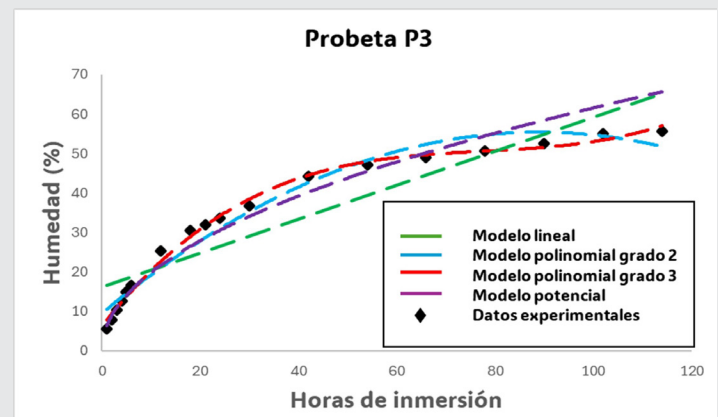


Figura 7: Ajustes en P3.
Fuente: Elaboración propia.

$$y = 0.4297x + 16.1940$$

$$R^2=0.8446$$

Ec. (14)

$$y = -0.0058x^2 + 1.3090x + 9.5569$$

$$R^2=0.9697$$

Ec. (15)

$$y = 8E - 05x^3 - 0.0196x^2 + 1.5815x + 6.3422$$

$$R^2=0.9941$$

Ec. (16)

$$y = 6.4136x^{0.4910}$$

$$R^2=0.9653$$

Ec. (17)

$$y = 0.3648x + 13.9740$$

$$R^2=0.8955$$

Ec. (22)

$$y = -0.0040x^2 + 0.7772x + 9.42$$

$$R^2=0.9820$$

Ec. (23)

$$y = 5E - 05x^3 - 0.0124x^2 + 1.1148x + 7.4503$$

$$R^2=0.9955$$

Ec. (24)

$$y = 6.7433x^{0.4325}$$

$$R^2=0.9909$$

Ec. (25)

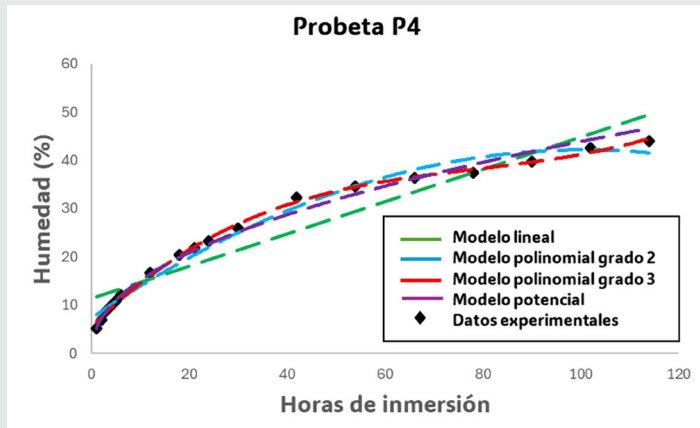


Figura 8: Ajustes en P4.

Fuente: Elaboración propia.

$$y = 0.3352x + 11.2860$$

$$R^2=0.9059$$

Ec. (18)

$$y = -0.0034x^2 + 0.6918x + 7.34$$

$$R^2=0.9836$$

Ec. (19)

$$y = 5E - 05x^3 - 0.0112x^2 + 1.0025x + 5.5345$$

$$R^2=0.9972$$

Ec. (20)

$$y = 5.2203x^{0.4622}$$

$$R^2=0.9916$$

Ec. (21)

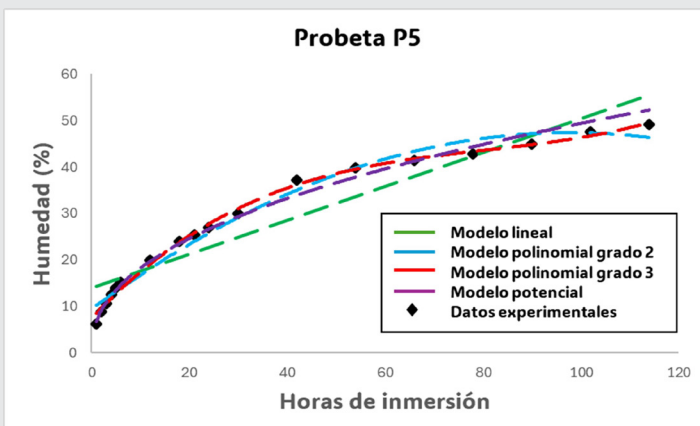


Figura 9: Ajustes en P5.

Fuente: Elaboración propia.

También se realizó un análisis ANOVA de 2 factores con 95% de confianza para cada uno de los umbrales obtenidos y otro para los datos en conjunto, obteniendo en todos los casos valores-p menores a 0.05, lo que significa que existe diferencia significativa entre los resultados de absorción de cada probeta a través del tiempo.

Discusión

Se han empleado modelos matemáticos para determinar el comportamiento mecánico del bambú [18], la influencia de sus propiedades físicas se ha estudiado como variables independientes, por ejemplo, la geometría del culmo [19], pero tras una revisión exhaustiva no se encontraron modelos que consideren la tasa de absorción de agua para medir el CH. El entendimiento de la tasa de absorción del bambú es necesario, existen procesos que requieren un porcentaje de CH específico, por ejemplo, en la fabricación de elementos curvos [20], o para el control en pruebas de resistencia mecánica [21],[22],[23]. Actualmente la metodología propuesta por [10] y [11] es aceptada en la literatura y parte de sus procesos respaldados por la normativa internacional ISO22157-1 [24]. Las correlaciones encontradas son alentadoras para la obtención de un modelo general, pero el análisis de varianza indica resultados dispersos, esto puede deberse a diferencias entre distintas muestras del material o a la necesidad de optimizar la metodología de control de humedad.

CONCLUSIONES

De la investigación podemos determinar las siguientes conclusiones.

- 1.- El incremento en el CH no es lineal y aunque todos los modelos generados tienen una buena correlación, los polinómicos de tercer grado fueron los que presentaron los valores de R^2 más altos debido a la complejidad en el comportamiento de la tasa de absorción en la especie bambusa oldhamii.
- 2.- Los modelos matemáticos creados a partir de los datos de las probetas como un conjunto expusieron correlaciones R^2 más bajas, lo que sugiere poca homogeneidad en el material.

3.- En las primeras horas de inmersión el CH fue poco variable entre las probetas, sin embargo, en todos los umbrales se obtuvieron valores- p menores a 0.05, concluyendo que existe diferencia significativa en la tasa de absorción de cada probeta.

4.- Se concluye que la especie bambusa oldhamii presenta heterogeneidad en la tasa de absorción de humedad, esto sugiere un análisis individualizado para mayor precisión.

5.- Para futuras investigaciones se recomienda el uso de un mayor número de probetas para confirmar la tendencia en la disminución de correlaciones R_2 para los modelos matemáticos.

6.- Se recomienda revisar más especies de bambú para conocer la variación en la tasa de absorción de humedad entre especies.

AGRADECIMIENTOS

El autor LEFR desea agradecer a SECIHTI por la beca otorgada para la realización de estudios de doctorado en ingeniería aplicada en la Universidad Veracruzana.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Md. A. Uddin et al., "Sustainable construction practices in urban areas: innovative materials, technologies, and policies to address environmental challenges," *Energy and Buildings*, vol. 341, p. 115831, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115831.

[2] P. Xu, V. W. Y. Tam, H. Li, J. Zhu, and X. Xu, "A critical review of bamboo construction materials for sustainability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 210, p. 115230, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.115230.

[3] J. Musonda, L. Ma, T. Y. Liu, M. Shahzad, and A. Ali, "Megaprojects' environmental impact mitigation by sustainable construction mediated by sustainable practices and regulations," *Cleaner and Responsible Consumption*, vol. 18, p. 100281, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.clrc.2025.100281.

[4] J. F. Correal, F. Ramirez, and F. O. Peña, "Behavior of bamboo properties as a construction material under artificial aging and weathering acceleration factors," *Construction and Building Materials*, vol. 464, p. 140058, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140058.

[5] P. Ramaani, S. Rajan, and G. bouse S, "Eco-Innovations in Construction: Experimental study on bamboo reinforcement for sustainable building solutions," *Results in Engineering*, p. 105217, May 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105217.

[6] T. Hone, L. Cahill, A. Robinson, C. Korde, and D. Taylor, "The splitting of bamboo in response to changes in humidity and temperature," *Journal of*

the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, vol. 111, p. 103990, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jmbm.2020.103990.

[7] Q. Chen et al., "Real-time flexural fracture behaviors and toughening mechanisms of bamboo slivers with different fiber content and moisture content," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 288, p. 109244, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.engfracmech.2023.109244.

[8] M. Wang, K. A. Harries, Y. Zhao, Q. Xu, Z. Wang, and Y. Leng, "Variation of mechanical properties of *P. edulis* (Moso) bamboo with moisture content," *Construction and Building Materials*, vol. 324, p. 126629, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126629.

[9] X. Wei, Z. Chen, L. Li, Z. Qin, and G. Wang, "Bamboo as a substitute for plastic: Effects of moisture content on the flexibility and flexural toughness of bamboo with cellulose fibers at multiple scales," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 305, p. 141193, May 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.141193.

[10] M. Gutiérrez-González and C. P. Takeuchi-Tam, "Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú *Guadua Angustifolia Kunth*," *Scientia Et Technica [en línea]*, vol. 3, no. 19, pp. 245–250, 2014.

[11] H. Wang, R. Liu, R. An, X. Liu, S. Zhao, and Z. Zhu, "Optimization of the mechanical and structural performance of bamboo by microwave-compression as a function of moisture content," *Materials*, vol. 18, no. 11, p. 2551, May 2025, doi: 10.3390/ma18112551.

[12] A. N. Koshev and V. V. Kuzina, "Mathematical models in tasks of construction," *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 1874–1878, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.726.

[13] G. Ngowtanasuwan, "Mathematical model for optimization of construction contracting in housing development project," *Procedia Social and Behavioral Sciences*, vol. 105, pp. 94–105, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.011.

[14] J. Liu et al., "Intelligence modeling of pharmaceutical solubility in supercritical CO₂: Polynomial regression, extra trees, and Huber regression models and validation," *Chinese Journal of Physics*, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.cjph.2025.07.037.

[15] N. Lárraga-Sánchez et al., "Vegetative propagation of three species of bamboo," *Ra Ximhai*, vol. 7, no. 2, pp. 205–218, 2011.

- [16] R. Lorenzo and L. Mimendi, "Digitisation of bamboo culms for structural applications," *Journal of Building Engineering*, vol. 29, p. 101193, May 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101193.
- [17] Microsoft Corporation, "Microsoft Excel," 2025, 2508.
- [18] Z. Qiu and H. Fan, "Nonlinear modeling of bamboo fiber reinforced composite materials," *Composite Structures*, vol. 238, p. 111976, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111976.
- [19] P. Liu, P. Xiang, Q. Zhou, H. Zhang, J. Tian, and M. Demis Argaw, "Prediction of mechanical properties of structural bamboo and its relationship with growth parameters," *Journal of Renewable Materials*, vol. 9, no. 12, pp. 2223–2239, 2021, doi: 10.32604/jrm.2021.015544.
- [20] J. Shi et al., "Tunable bending characteristics of bamboo by regulating moisture content for bamboo curved component manufacturing," *Industrial Crops and Products*, vol. 221, p. 119365, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.indcrop.2024.119365.
- [21] Q. Chen et al., "Real-time flexural fracture behaviors and toughening mechanisms of bamboo slivers with different fiber content and moisture content," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 288, p. 109244, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.engfrac-mech.2023.109244.
- [22] Q. Chen et al., "Effect of moisture content on bamboo's mode I interlaminar fracture toughness: The competition between promoting and impeding crack growth," *Construction and Building Materials*, vol. 341, p. 127822, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127822.
- [23] H. Peng, J. Jiang, T. Zhan, and J. Lyu, "Moisture-dependent asymmetric flexural performance of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*)," *Construction and Building Materials*, vol. 461, p. 139930, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.139930.
- [24] International Organization for Standardization, *Bamboo structures – Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms – Test methods*. <https://www.iso.org/standard/65950.html>, 2019.

