

Caracterización mecánica de vigas de madera laminada encolada (MLE) de pino producido en Ecuador

Mechanical characterization of pine glued laminated timber (MLE) beams produced in Ecuador

EÍDOS N°23
Revista Científica de Arquitectura y Urbanismo
ISSN: 1390-5007
revistas.ute.edu.ec/index.php/eidos

¹Luisa Paulina Viera Arroba, ²Edisson Javier Maliza Castro, ³Richard Darío Mejía Espinosa

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Central del Ecuador.
lviera@uce.edu.ec. ORCID: 0000-0003-0434-7979

²Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Central del Ecuador.
ejmaliza@uce.edu.ec. ORCID: 0009-0005-2524-8963

³Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Central del Ecuador.
rdmejiae@uce.edu.ec. ORCID: 0009-0003-9118-182X

Resumen:

Este estudio investiga la evolución histórica y los En Ecuador, para uso estructural se dispone de madera maciza como es el pino, con el cual ya se fabrican elementos de MLE (Madera Laminada Encolada). En el laboratorio del Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) de la Escuela Politécnica Nacional, se realizaron ensayos acordes a la norma ASTM D198 (Métodos de prueba estándar estáticas de madera en tamaños estructurales) de 4 vigas de MLE fabricadas con pino, cuyas dimensiones son de 0.14x0.32x4.10 m, siendo tamaños de carácter estructural. Estas probetas fueron fabricadas íntegramente en Madebú, que es una industria de madera laminada ubicada en Quito. El ensayo a flexión en vigas que tienen dimensiones de carácter estructural, proporciona información más cercana al comportamiento real de estos elementos cuando forman parte de una estructura. Es importante conocer las propiedades mecánicas de este tipo de piezas (módulo de elasticidad, resistencia a flexión) y compararlas con resultados obtenidos con otras investigaciones similares, ya que el conocer las capacidades que ofrece este material permite continuar con el desarrollo y la implementación en la industria de la construcción ecuatoriana. Entre los resultados obtenidos, se llega a evidenciar que existe una disminución de aproximadamente el 49 % de las propiedades de la madera maciza de pino, al conformar elementos laminados. Además, se llega a observar que la curva carga vs. deformación obtenida en el ensayo a flexión tiene un comportamiento lineal hasta llegar a la rotura, dando como resultado una falla frágil y explosiva, lo que indica que el MLE solo podría actuar en el rango lineal.

Palabras clave: madera laminada encolada, madera contra laminada, Ecuador, pino, características, mecánicas.

Abstract:

In Ecuador, solid wood such as pine is available for structural use and with which MLE (Glued Laminated Wood) elements are already manufactured. In the laboratory of the Housing Research Center (CIV) of the National Polytechnic School, tests were carried out according to the ASTM D198 standard (Standard Static Test Methods for Wood in Structural Sizes) on 4 MLE beams made of pine, the dimensions are 0.14x0.32x4.10 m, being structural dimensions. These probes were manufactured entirely in MADEBÚ, which is a laminated wood industry located in Quito. The bending test on beams that have dimensions of a structural nature provides information that is closer to the real behavior of these elements when they are part of a structure. It is important to know the mechanical properties of this type of parts (elastic modulus, bending resistance) and compare them with results obtained with other similar research since knowing the capabilities offered by this material allows us to continue with the development and implementation in manufacturing industry. Ecuadorian construction. Among the results obtained, it is evident that there is a decrease of approximately 49% in the properties of solid pine wood when forming laminated elements. Furthermore, it is observed that the load vs. deformation curve obtained in the bending test has a linear behavior until reaching breakage, resulting in a brittle and explosive failure, which indicates that the MLE could only act in the linear range.

Keywords: Glued laminated timber, Counter-laminated timber, Ecuador, pine, characteristics, mechanics.

1. INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico en la industria de la madera y en el campo de la construcción, ha desarrollado productos como la madera laminada encolada (MLE), lo cual ha permitido que este material sea una alternativa para la fabricación de edificaciones de mediana y gran altura. La MLE es una composición de láminas de madera maciza, pegadas en sus caras mediante adhesivos (Aghayere y Vigil, 2017).

Es necesario conocer las propiedades mecánicas de la MLE para garantizar la seguridad de las estructuras construidas con este material, y también maximizar su eficiencia y durabilidad. (ASCE, 2019). Por lo tanto, es importante realizar ensayos de laboratorio para obtener sus resistencias, así como realizar una correcta aplicación en el diseño y construcción de estructuras (Moya et al., 2019).

Las propiedades mecánicas, como la resistencia y rigidez de la MLE, pueden variar significativamente, debido a varios factores tales como, el contenido de humedad (CH), temperatura, orientación de las fibras, uniones entre láminas, tipo de adhesivo, densidad, nudos e imperfecciones de las láminas que conforman el elemento laminado (Aghayere y Vigil, 2017; Claudio y Emilio, 2008; Zhang y Sc, 2019) (Gao et al., 2022). En general, estos factores deben considerarse de manera cuidadosa al diseñar y construir edificaciones con MLE.

La densidad de la madera que se utiliza para fabricar la MLE es un factor que influye en la cantidad de adhesivo que se utiliza (Khoo et al., 2021). Asimismo, el tipo de adhesivo utilizado influye en la resistencia y rigidez del elemento fabricado (Wei et al., 2013). También la orientación de las fibras puede influir en la resistencia de la MLE, ya que la madera tiene una mayor resistencia cuando las solicitaciones actúan de manera paralela a la fibra (Wdowiak Postulak, 2022).

En Ecuador la industria de MLE tiene como principales empresas a Made-

bú, que ofrece MLE con longitud de 13 m, secciones de 14x80 cm y fabricados con madera de pino.

También se encuentra Aglomerados Cotopaxi, que tiene en su catálogo elementos de 6 m de longitud y sección de 7.5x18.5 cm. Finalmente, se encuentra Indumadera, la cual dispone de productos con longitud de 12 m y secciones de 15x60 cm (Madebú, 2021; Aglomerados Cotopaxi, 2021; Indumadera, 2023).

Diferentes investigaciones detallan las propiedades físicas y mecánicas del pino en Ecuador. Los valores de las propiedades de estas investigaciones se resumen en la tabla 1. (Arpi et al., 2018), (Ecuador Forestal, 2021; Nugra, 2019).

Tabla 1
Propiedades del pino ecuatoriano como madera maciza por diferentes autores

	U. Azuay.	E. Forestal.	D. Nugra.	Unidad
ρ	614.29	390	473.31	kg/m ³
E_0	15 202.11	11 020	13780	MPa
$F_{b,0}$	30.01	55.50	32.93	MPa

Nota: ρ Densidad, E_0 Modulo elasticidad, $F_{b,0}$ Resistencia a flexión paralela

Fuente: Arpi et al., 2018; Ecuador Forestal, 2021; Nugra, 2019.

Otros autores han realizado ensayos en vigas de MLE, bajo condiciones similares de normativa y con madera perteneciente a la familia Pinaceae (tabla 2).

Estos investigadores diseñaron y fabricaron sus probetas. Entre ellos se encuentra Recalde (2015) de la Universidad Central del Ecuador, quien trabajó con muestras pequeñas y, García y Muñoz, (2015) de la Universidad del Azuay, con trabajos con muestras grandes.

No se ha encontrado publicaciones sobre propiedades mecánicas de vigas de MLE que sean producidas por la industria ecuatoriana. Por eso la importancia de la caracterización de la MLE que se comercializa en Ecuador.

Tabla 2
Propiedades del pino ecuatoriano como MLE por diferentes autores

	F. Recalde	García y Muñoz	Unidad
ρ	550.00	581.00	kg/m ³
E_0	5000.00	10 450.00	MPa
$F_{b,0}$	34.90	7.73	MPa

Nota: ρ Densidad, E_0 Modulo elasticidad, $F_{b,0}$ Resistencia a flexión paralela

Fuente: Recalde, 2015; García y Muñoz, 2015.

2. OBJETIVOS

Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de vigas de madera laminada encolada MLE, sobre la base de madera maciza producida en Ecuador mediante ensayos de laboratorio.

Obtener mediante ensayos de laboratorio las propiedades físicas y mecánicas de elementos MLE, fabricados en la industria ecuatoriana.

3. METODOLOGÍA

Se adquirió 4 probetas de MLE en la empresa Madebú ubicada en Quito, las cuales están fabricadas a partir de pino producido en Ecuador. Las dimensiones y ensayos se realizaron con base a la normativa (ASTM D198, 2015).

Las dimensiones de las probetas (VF-01, VF-02, VF-03, VF-04) se detallan en la tabla 3. Las láminas tienen un espesor aproximado de 4 cm y las secciones un total de 8 láminas. Además, la unión longitudinal entre láminas es de tipo *finger joint*, la cual tiene por base la realización de un dentado en los extremos de la madera, para aumentar la superficie de encolado y por tanto su resistencia (Corma, 2015).

Los ensayos se realizaron en el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV), perteneciente a la Escuela Politécnica Nacional localizada en Quito. Se utilizó una máquina universal (capacidad de 100 toneladas) y la deformación se midió

a través de un transductor de desplazamiento lineal variable LVDT (apreciación 0.001 mm).

Tabla 3
Dimensiones de probetas de MLE

Probeta	Dimensiones		
	b(m)	d(m)	Lo(m)
VF-01	0.141	0.321	4.099
VF-02	0.140	0.320	4.100
VF-03	0.141	0.321	4.099
VF-04	0.140	0.321	4.100

Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

Procedimiento. Según la norma NCh 2165, los nodos e imperfecciones mayores a 6 mm pueden afectar la resistencia del material. (NCh 2165, 2015). Por lo cual se marcaron en las 4 caras de las probetas. Esto se indica en la figura 1.



Figura 1. Marcación de nodos
Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

Se midió el contenido de humedad mediante un higrómetro electrónico (EcuadorGPS, 2022) y el peso de cada una de las probetas antes de realizar el ensayo, como se observa en la figura 2.

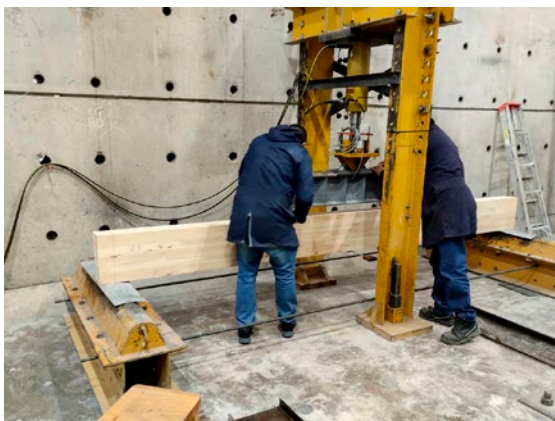
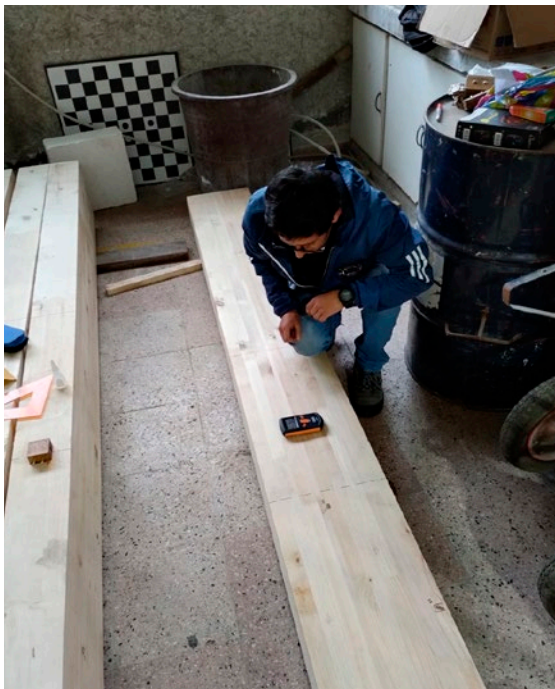


Figura 2. Medición de contenido de humedad e instrumentación de los equipos.
Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

La carga puntual aplicada por la máquina universal se transfirió por una viga y rodillos de acero, colocados a un tercio de la luz, como se aprecia en la figura 3. Además, se colocó el deformímetro LVDT en el centro de la luz en su parte inferior. Posteriormente se inició el ensayo.

Para la ejecución del ensayo a flexión se realizó siguiendo las especificaciones de la norma ASTM D198, donde indica que los momentos flectores, cuando se aplican dos cargas puntuales, cada una a los tercios de la luz, son similares a los obtenidos por una carga uniformemente distribuida sobre toda la viga. Por esta razón se eligió dicha disposición de cargas.

La distancia entre puntos de carga (a) se encuentra principalmente en función del peralte de la viga (d). Para obtener las propiedades de resistencia a flexión y mó-

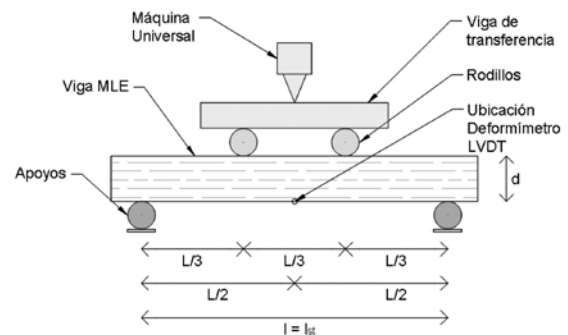


Figura 3. Colocación de viga MLE en posición de ensayo a flexión.

Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

dulo de elasticidad, debe cumplirse que la relación a/d se encuentre entre 4 y 6 (figura 3).

La norma ASTM D198 establece las ecuaciones 1 y 2 para obtener el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión respectivamente.

$$E = \frac{3Pa l_{st}^2}{4bd^3 \Delta_{st}} \quad (1)$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad

P : Carga puntual aplicada por la máquina universal

a : Distancia entre cargas puntuales

l_{st} : Longitud entre apoyos extremos

b : Base de la probeta

d : Peralte de la probeta

Δ_{st} : Deflexión libre de cortante (en el centro de la luz de la probeta)

$$f_b = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (2)$$

Donde:

f_b : Esfuerzo resistente a flexión

P : Carga puntual aplicada por la máquina universal

a : Distancia entre cargas puntuales

b : Base de la probeta

d : Peralte de la probeta

La madera es un material higroscópico, ya que cambia de masa y volu-

men según su contenido de humedad. Por lo tanto, es importante expresar las condiciones bajo las cuales se obtiene la densidad (Corma, 2015). La densidad de la MLE correspondiente a su contenido de humedad se obtuvo mediante el peso y el volumen de la probeta a ensayar.

$$\rho_{CH} = \frac{P}{V} \quad (3)$$

Donde:

ρ_{CH} : Densidad de la madera ($\frac{kg}{m^3}$)

P: Peso de la probeta al momento de ensayar (Kg)

V: Volumen de la probeta (m^3)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 4 se detallan los resultados de: contenido de humedad, peso, volumen y densidad de cada probeta. Estas mediciones se realizaron antes de realizar los ensayos, principalmente por el contenido de humedad (CH), ya que este puede variar según la humedad del lugar de almacenamiento.

Tabla 4
Propiedades de probetas de MLE

Probeta	Propiedades probeta			
	C.H. (%)	Peso (kg)	Volumen (m^3)	Densidad (kg/m^3)
VF-01	9920	93 000	0.186	501 281
VF-02	9250	88 000	0.184	479 094
VF-03	10 250	85 500	0.186	460 855
VF-04	9080	87 000	0.184	472 174

Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

Los resultados de los ensayos a flexión se muestran en la tabla 5, donde se detalla las resistencias a flexión en el límite elástico (L.E.) y rotura (ROT.), también se muestra el módulo de elasticidad y el de rotura.

Tabla 5
Resultados de ensayos a flexión

	VF-01	VF-02	VF-03	VF-04	Promedio
P (L.E)	62.2	62.9	56.7	73.2	63.7
Δ (L.E)	26.0	26.8	23.5	29.8	26.5
Fb (L.E)	16.9	17.1	15.4	19.9	17.3
E	7728.6	7596.8	7793.4	7957.0	7768.9
P (ROT)	109.8	71.5	93.6	99.6	93.6
Δ (ROT)	45.0	29.8	36.3	39.0	37.5
Fb (ROT)	29.9	19.4	25.5	27.1	25.5
E (ROT)	7888.3	7766.5	8349.8	8259.0	8065.9

Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

En la figura 4 se observa una relación lineal entre la aplicación de carga y su deformación hasta casi llegar a la falla. Los resultados se presentan en la siguiente figura:

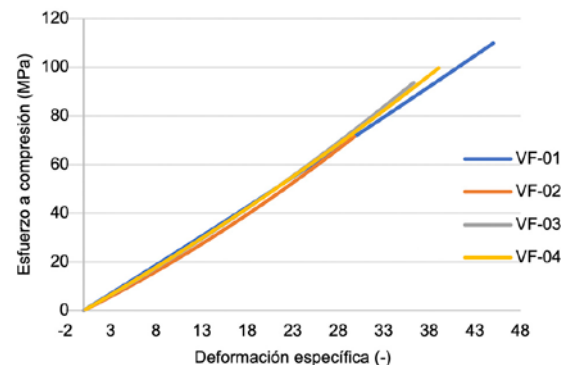


Figura 4. Diagrama de carga vs deformación del ensayo a flexión

Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

Las fallas que presentaron las probetas se indican en la figura 5, donde se visualiza que la falla inicia en la parte inferior y de manera inclinada hacia arriba. Particularmente en una de las probetas esta falla se produjo en una unión finger joint de la última lámina de la probeta. Además, las fallas que se produjeron, se pueden catalogar como de tipo frágil, ya que no presentó una zona de fluencia del material.

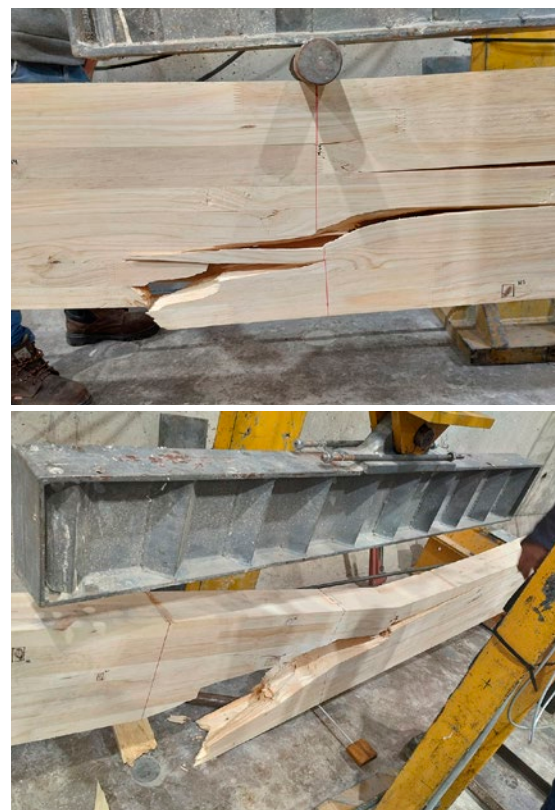


Figura 5. Falla en la viga de MLE

Fuente: Maliza y Mejía, 2023.

Contenido de Humedad. Los valores obtenidos se encuentran entre el 9 y 10 %. Según la norma (NDS, 2018), el CH para el uso de MLE como elementos estructurales es de máximo 16 %, en la norma ecuatoriana (NEC SE MD, 2015) "Diseño de estructuras de madera", indica que el CH es 19 %, por lo cual, los valores de las probetas ensayadas se encuentran dentro de los límites permitidos por las normativas.

Densidad. El contenido de humedad y la densidad están relacionados directamente, ya que, el agua que contiene la madera varía la densidad del elemento. En las investigaciones resumidas en la tabla 2, la densidad de la MLE está entre 550 kg/m³ y 580 kg/m³, mientras que en las probetas ensayadas se tiene un promedio de 478 kg/m³ (con un CH promedio de 9.5 %), lo cual es cercano a los valores de otras investigaciones.

Módulo de elasticidad. El módulo de elasticidad de la madera maciza, según otras investigaciones, se encuentra entre 11 000 y 15 000 MPa, mientras que la MLE entre 5000 y 10 000 MPa. Según los resultados de los ensayos el módulo de elasticidad es de 7768.94 MPa, similares a los valores descritos en la tabla 1. Sin embargo, este es menor a las propiedades originales de la madera maciza, con una reducción de aproximadamente 49 %, lo que indica una disminución de la rigidez de la madera maciza al conformar elementos laminados.

El valor de módulo de elasticidad de los ensayos refleja que el material es relativamente elástico, por lo cual, al momento de utilizarse en la fabricación de edificaciones, se debe proveer de otros elementos o materiales que aporten la rigidez necesaria a la estructura.

Módulo de rotura. Como se puede apreciar en la figura 4, se tiene una deformación lineal prácticamente hasta llegar a la rotura, por esto el módulo de elasticidad y rotura son similares, siendo $E = 7768.94$ MPa y $E_{rot} = 8065.89$ MPa. Por lo cual la MLE no presenta una zona de deformación plástica que pueda advertir su falla. Debido a esto, el material puede utilizarse para diseños estructurales únicamente en el rango lineal. Además, en la normativa

(NEC-SE-MD, 2015) se menciona que las estructuras fabricadas sobre la base de madera maciza o laminada únicamente trabajarán en el rango elástico.

Resistencia a la flexión. La resistencia a flexión de la madera maciza según otras fuentes se encuentra entre 30 y 33 MPa (tabla 1); en cambio, en MLE se tiene entre 7 y 35 MPa (tabla 2). En los resultados de los ensayos se tiene una resistencia a flexión hasta el límite elástico de 17.34 MPa y a la rotura de 25.47 MPa (tabla 5). Por ende, también se presenta una disminución entre los valores de madera maciza a MLE de aproximadamente 42 %. Esto se debe a la estructura de la madera maciza, que tiene una dirección de grano continuo, que permite a la madera soportar mejor las cargas de flexión sin fracturarse. Por otro lado, la MLE está compuesta por varias capas, determinando que la MLE sea más propensa a la delaminación o a la separación de las capas bajo cargas de flexión, lo que reduce su resistencia, además dependerá de la calidad de adhesión de las vigas (Parra, 2019).

5. CONCLUSIONES

El contenido de humedad de la madera es un factor importante en la construcción de edificaciones. Según normas americanas y latinoamericanas el límite de CH para elementos estructurales es entre 12 y 16 %. En el caso de las probetas ensayadas (CH 9 a 10 %), se encuentran dentro de este límite, por lo cual, sus resultados son representativos para elementos estructurales.

La disminución del módulo de elasticidad y resistencia a flexión entre madera maciza y MLE se puede presentar, debido a que los elementos de MLE están fabricados a partir de pequeñas láminas encoladas entre sí y no forman un elemento sólido en su totalidad, además, la presencia de nudos, imperfecciones y ubicación de uniones *finger joint* afectan a la resistencia del elemento.

Los valores obtenidos de módulo de elasticidad y resistencia a flexión son similares a otros autores, sin embargo, las propiedades mecánicas de la MLE dependerán de factores como son el tipo de

uniones, su ubicación, el contenido de humedad, entre otros.

La falla de los elementos se puede considerar frágil, ya que no llega a desarrollar una zona de deformación plástica grande, así que, para la construcción de edificaciones se necesita de elementos que produzcan una falla dúctil en la edificación, como pueden ser conexiones metálicas.

Las fallas en de vigas de MLE pueden ocurrir en la unión de las láminas debido a la debilidad del adhesivo utilizado, a la falta de uniformidad en la densidad de la madera o a la presencia de defectos como nudos o grietas en la madera. Estos factores pueden afectar la capacidad de la viga.

La principal ventaja de la MLE en comparación con la madera maciza es la posibilidad de obtener secciones de gran tamaño y grandes longitudes, ya que en la madera maciza estas se encuentran limitadas al diámetro y longitud del árbol, además del tiempo que demora en crecer el mismo.

6. REFERENCIAS

Aghayere, A., y Vigil, J. (2017). *Structural Wood Design* (segunda edición).

Aglomerados Cotopaxi. (2021). *Aglomerados Cotopaxi*. <https://www.cotopaxi.com.ec/>

Arpi, E., Espinosa, P., Proaño, D., y Crespo, A. (2018). *Maderas estructurales del Ecuador*. <https://arquitecturapanamericana.com/maderas-estructurales-del-ecuador/>

ASCE. (2019). Civil engineering body of knowledge: Preparing the future civil engineer. In *Civil Engineering Body of Knowledge: Preparing the Future Civil Engineer, 3th ed.* American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784415221>

ASTM D198. (2015). *Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*. <https://doi.org/10.1520/D0198-15>

Claudio, R., & Emilio, V. (2008). *Propiedades físicas y mecánicas de la madera de Pinus canariensis crecido en el secano de la Región del Maule, Chile*. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/bosque/v29n3/art02.pdf>

Corma. (2015). *La construcción de viviendas en madera* (1ª. ed.). Vol. 1. <https://www.madera21.cl/wp-content/uploads/2016/11/Cap%C3%ADtulo-1.La-construccion-de-viviendas-en-madera-completo-sin-introducci%C3%B3n-5.pdf>

Ecuador Forestal. (2021). *Ficha técnica pino ecuador*. <https://ecuadorforestal.org/informacion-s-f-e/fichas-tecnicas-para-la-repoblacion-forestal/>

EcuadorGPS. (2022). *Medidor de Humedad de madera Dr. Meter Compacto Modelo MD918*. <https://ecuadorgps.com/producto/medidor-de-humedad-de-madera-dr-meter-compacto-modelo-md918/>

Gao, X., Zhu, D., Fan, S., Rahman, M. Z., Guo, S., y Chen, F. (2022). Structural and mechanical properties of bamboo fiber bundle and fiber/bundle reinforced composites: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 19: 1162–1190. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.077>

García, R., y Muñoz, B. (2015). *Diseño y evaluación de miembros estructurales en Madera Laminada Encolada (M.L.E.) con uniones dentadas (finger joint), en Pino Radiata*. [Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4880/1/11321.pdf>

Indumadera. (25 de enero de 2023). *Vigas Laminadas*. <https://www.indumadera.com/about-3>

Khoo, P. S., Chin, K. L., Lee, C. L., H'ng, P. S., & Hafizuddin, M. S. (2021). Effect of glue spreads on the structural properties of laminated veneer lumber from spindleless rotary veneers recovered from short rotation hevea plantation logs. *Polymers*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/polym13213799>

Madebú. (2021). *Madebú*. <https://madebu.ec/>

- Moya, L., Pérez Gomar, C., Vega, A., Sánchez, A., Torino, I., y Baño, V. (2019). Relación entre parámetros de producción y propiedades estructurales de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis*. *Maderas. Ciencia y Tecnología, ahead*, 0–0. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2019005000305>
- NDS. (2018). *National Design Specification*. www.awc.org.
- NEC SE MD. (2015). *Norma ecuatoriana de la construcción - Estructuras de madera*. <https://web.archive.org/web/20220619081230/https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-MD-Estructuras-Madera.pdf>
- Nugra, D. (2019). *Alternativas del uso de maderas en fortificación minera, mediante la caracterización de Resistencia a la Flexión*. Universidad del Azuay. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8931/1/14579.pdf>
- Parra, O. (2019). *Evaluación de la calidad de adhesión en la madera laminada encolada (MLE) de tres especies forestales para la fabricación de vigas de madera*. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3898/parra-barreda-oscar-angel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Recalde, F. (2015). *Diseño de elementos estructurales utilizando madera laminada*. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4507/1/T-UCE-0011-179.pdf>
- Wdowiak Postulak, A. (2022). Strengthening of Structural Flexural Glued Laminated Beams of Ashlar with Cords and Carbon Laminates. *Materials*, 15(23), 8303. <https://doi.org/10.3390/ma15238303>
- Wei, P., Wang, B. J., Zhou, D., Dai, C., Wang, Q., & Huang, S. (2013). Mechanical properties of poplar Laminated Veneer Lumber modified by carbon fiber reinforced polymer. *BioResources*, 8(4), 4883–4898. <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.4883-4898>
- Zhang, J., & Sc, B. (2019). *Bonding Process and Performance of Structural Bamboo-wood Laminates* (The faculty of graduate and postdoctoral studies).