

ESTUDIO COMPARATIVO DE PRODUCTOS DE MADERA LAMINADA UNIDOS CON DISTINTOS TIPOS DE CLAVIJAS*

COMPARATIVE STUDY OF LAMINATED TIMBER PRODUCTS JOINED WITH DIFFERENT TYPES OF DOWELS

Gastón Bruzzone^{1,}*

<https://orcid.org/0009-0001-3920-863X>

Daniel Godoy²

<https://orcid.org/0000-0002-5250-6965>

Stephany Arrejuría³

<https://orcid.org/0009-0007-7700-173X>

Sebastián Quagliotti⁴

<https://orcid.org/0009-0000-0366-3406>

Silvia Böthig³

<https://orcid.org/0009-0002-2683-1622>

Laura Moya⁵

<https://orcid.org/0000-0002-4309-3847>



RESUMEN

La búsqueda de soluciones constructivas sostenibles ha impulsado el uso de productos de madera masiva como alternativa a componentes estructurales de hormigón armado y acero. En este contexto, el presente trabajo informa sobre el comportamiento estructural de productos de madera laminada contruidos sin adhesivos y con madera de pino uruguayo (*Pinus taeda*) de rápido crecimiento. Para la fabricación, se utilizaron lamelas C14, unidas mediante tarugos de madera de 20 mm de diámetro, clavos de madera y clavos de acero colocados neumáticamente, de 5,3 y 3,2 mm de diámetro, respectivamente. Se evaluaron dos patrones de clavado, en línea recta horizontal y zigzag, y tres espaciamientos entre clavijas, 300 mm, 250 mm y 150 mm. Se realizaron ensayos de corte perpendicular a las fibras en conexiones de madera y ensayos de flexión en cuatro puntos en paneles de tamaño estructural, y se obtuvieron el módulo de deslizamiento y las propiedades de flexión, respectivamente. Las conexiones con clavos de madera presentaron valores de módulo de deslizamiento significati-

¹Universidad de la República. Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay.

²Universidad de la República. Facultad de Ingeniería. Montevideo, Uruguay.

³Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Fundación Latitud. Montevideo, Uruguay.

⁴Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Departamento de Materiales y Productos Forestales. Montevideo, Uruguay.

⁵Universidad ORT Uruguay. Facultad de Arquitectura. Montevideo, Uruguay.

* Este artículo es una versión ampliada y revisada por pares del trabajo presentado previamente en el III Congreso Ibero-Latinoamericano de la Madera en la Construcción (CIMAD), celebrado en Madrid, España en junio 2024. Editora Asociada Eva Hermoso.

*Autor de correspondencia: gbruzzone@fagro.edu.uy

Recibido: 16.09.2024 Aceptado: 31.03.2025

vamente superiores (2,54 kN/mm) a las conexiones con tarugos de madera (1,47 kN/mm) y con clavos de acero (1,25 kN/mm). Los resultados de flexión indicaron que la resistencia (16,8-31,6 MPa) y la rigidez (6213-8103 MPa) de los paneles con tarugos de madera, clavos de madera y clavos de acero no mostraron diferencias significativas y son similares a los valores de las piezas individuales que los conforman. Los hallazgos encontrados sugieren que la madera laminada fabricada con pino de rápido crecimiento unida mediante clavijas de madera en configuraciones superficiales aparece como una solución estructural viable para entresijos y techos en el contexto de sistemas constructivos sostenibles.

Palabras clave: Clavijas de madera, conexiones de madera, ensayos de flexión, madera laminada, madera masiva, *Pinus taeda*, sistemas constructivos sostenibles.

ABSTRACT

The search for sustainable building construction has driven the use of mass timber products as an alternative to reinforced concrete and steel structural components. In this context, the present work reports on the structural behavior of adhesive-free laminated timber products made of fast-growing Uruguayan pine (*Pinus taeda*). For manufacturing, C14 timbers were used. The lamellas were joined by 20 mm diameter wooden dowels, wooden nails, and steel nails pneumatically driven of 5,3 and 3,2 mm diameter, respectively. Two nailing patterns, horizontal straight line, and zigzag, and three dowel spacings, 300 mm, 250 mm, and 150 mm, were evaluated. Shear tests perpendicular to the grain on timber connections and four-point bending tests on structural-sized panels were performed. The slip modulus and bending properties, respectively, were obtained. Wooden nail connections presented slip modulus values significantly higher (2,54 kN/mm) compared to those of wooden dowel (1.47 kN/mm) and steel nail (1.25 kN/mm) connections. Bending results indicated that the strength (16,8-31,6 MPa) and the stiffness (6213-8103 MPa) of the wooden dowel, wooden nail and steel nail panels did not show significant differences and are comparable to the values of their individual components. The findings suggest that laminated timber made from fast-growing pine joined by wooden nails or dowels in panel configurations appears as a feasible structural solution for floors and roofs in the context of sustainable construction systems.

Keywords: Wooden dowels, timber connections, bending test, laminated timber, mass timber, *Pinus taeda*, sustainable construction systems.

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir el uso de recursos no renovables ha llevado a que la industria de la construcción sea considerada un actor crucial en la implementación de estrategias sostenibles. Este sector, responsable de aproximadamente el 40 % de las emisiones globales de CO₂, debe abordar con prioridad la reducción de su impacto ambiental (Abergel *et al.* 2017). En este contexto, la construcción con madera se presenta como una alternativa sostenible, al emplear un material renovable con baja huella de carbono y capacidad para actuar como sumidero de carbono durante su vida útil. Además de mitigar las emisiones asociadas al proceso constructivo, el uso intensivo de madera favorece una economía circular mediante la reutilización y el reciclaje de componentes al final de la vida útil de una edificación. En respuesta a estos desafíos, la adopción de madera como material estructural ha crecido significativamente gracias al desarrollo tecnológico que conllevó al surgimiento de los sistemas constructivos de madera masiva. La madera masiva o “mass timber” refiere a una familia de productos caracterizados por tablas o lamelas de madera unidas mediante adhesivos, clavijas de acero o de madera, que, según su diseño, pueden funcionar estructuralmente como vigas, pilares, losas y muros. Los productos mass timber libre de adhesivos, como la madera laminada con tarugos de madera (DLT), madera laminada con clavos de madera (WNLT) y madera laminada con clavos de acero (NLT), ofrecen ventajas estructurales y estéticas, y están ganando aceptación en la industria de la construcción debido a la rapidez y facilidad en la ejecución de obras, y a los beneficios ambientales que su empleo conlleva (Ahmed y Arocho 2020). El diseño y la fabricación de paneles DLT y WNLT no están establecidos en normas internacionales. En EE. UU. y Canadá existen especificaciones de fabricación para NLT descritas en el International Building Code (ICC 2024) y en el Nail-Laminated Timber - Design and Construction Guide (CWC 2024) que además incluye propiedades estructurales. En el caso del DLT existen

documentos técnicos desarrollados por las empresas productoras que incluyen detalles de fabricación y propiedades físicas y mecánicas. En Europa la ausencia de reglas de diseño lleva a los profesionales a usar los diferentes métodos de cálculo publicados en los Documentos de Evaluación Técnica Europea (ETA) para cada tipo de producto, e integrar los resultados adecuadamente a la reglamentación local de cada país (Han *et al.* 2023).

La literatura sobre madera masiva libre de adhesivos se ha centrado principalmente en productos que emplean clavos de acero, destacando su capacidad portante y su eficiente transferencia de cargas entre láminas, aspectos que respaldan su aplicación en sistemas constructivos (Haller y Pannke 1998, Derikvand *et al.* 2019, Li *et al.* 2023, Feng *et al.* 2025). En los últimos años, en respuesta a la creciente preocupación ambiental, numerosos estudios han explorado el uso de productos laminados con clavijas de madera como alternativa a los productos NLT, debido a que los conectores metálicos limitan la reutilización y el reciclado de la madera al final de su vida útil. En este contexto, se han desarrollado investigaciones sobre el diseño y el comportamiento mecánico de productos laminados con tarugos de madera, mediante ensayos experimentales y simulaciones numéricas. Estos trabajos han permitido analizar su desempeño en distintas aplicaciones estructurales, como paneles dispuestos horizontalmente (Plowas *et al.* 2016, Bell 2018, Ogunrinde 2019, Pereira *et al.* 2019, Bruzzone *et al.* 2023, Giordano *et al.* 2023), muros portantes (Sandhaas *et al.* 2018) y vigas (El-Houjeiry *et al.* 2019, Sotayo *et al.* 2020, Derikvand *et al.* 2021, Yeh y Yeh 2024). En conjunto, estos estudios han contribuido a consolidar el conocimiento sobre el rendimiento mecánico de los productos DLT y su viabilidad como alternativa sostenible en sistemas constructivos de madera masiva libres de adhesivos y elementos metálicos. En cuanto a los productos WNLT, los estudios disponibles son escasos, destacándose los trabajos publicados por Riggio *et al.* (2013) y Riggio *et al.* (2016), quienes evaluaron las propiedades mecánicas de clavos de madera densificada, demostrando su aptitud en uniones de madera de densidad media. Recientemente, se han desarrollado nuevos estudios realizados por Ruan *et al.* (2021), Ruan *et al.* (2022) y Zhu *et al.* (2023), quienes analizaron el efecto de las dimensiones, la orientación y el diseño geométrico de los clavos de madera sobre su comportamiento a corte y flexión, destacando su potencial como elementos de unión en conexiones madera-madera a pequeña escala. Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales que evalúen su comportamiento mecánico de estos elementos en aplicaciones estructurales reales, como paneles y vigas laminadas ensambladas con clavos de madera utilizados en sistemas constructivos de madera.

En Uruguay, las proyecciones forestales al año 2030 indican la disponibilidad de un mínimo de 3 millones de m³/año de slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.) y loblolly pine (*Pinus taeda* L.) para transformación mecánica (Uruguay XXI 2023). Esta disponibilidad presenta una oportunidad para incrementar el uso de la capacidad instalada y agregar valor a la madera destinada a aplicaciones estructurales, particularmente en programas de viviendas tal como fue priorizado por el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT). En ese sentido, la madera de pino nacional, con propiedades físicas y mecánicas que permiten su uso estructural (Moya *et al.* 2015) puede ser empleada intensivamente en componentes y sistemas constructivos, y así responder al déficit de aproximadamente cien mil viviendas que existe en Uruguay (Ugarte *et al.* 2022). Las políticas gubernamentales que están impulsando el uso de sistemas constructivos sostenibles, particularmente en madera, junto a la disponibilidad en el mercado de madera de pino nacional clasificada por resistencia (UNIT 2018) posiblemente dinamicen el mercado y contribuyan al uso intensivo de madera y EWP.

Desde la década pasada, en Uruguay se ha iniciado una serie de proyectos de investigación y desarrollo de productos de madera masiva, en particular focalizada en madera laminada encolada (GLT) y madera laminada cruzada (CLT). Recientemente se ha comenzado a estudiar productos de madera laminada libre de adhesivos, es decir paneles que emplean clavos de madera como medio de unión (Bruzzone *et al.* 2023). La fabricación de estos productos libre de adhesivos y su posterior empleo en la construcción están en línea con los principios de sostenibilidad ambiental y reciclaje de materiales, y ofrecen una oportunidad para diversificar los sistemas constructivos disponibles en el país.

Este trabajo tiene como objetivo principal fabricar y evaluar el comportamiento estructural de conexiones y paneles de madera laminada contruidos con tablas de pino uruguayo de rápido crecimiento y clavijas de madera, con el propósito de contribuir al desarrollo de soluciones constructivas adaptadas al contexto local y orientadas a reducir el impacto ambiental del sector de la construcción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

La madera utilizada en este estudio provino de una plantación comercial y aserradero dedicados al procesamiento de *Pinus taeda*, ubicados en el departamento de Tacuarembó (31°44'54" S, 56°02'16" W) en el noreste de Uruguay. Se seleccionaron 128 tablas que previamente habían sido secadas en horno convencional y cepilladas en sus cuatro caras hasta las dimensiones de 36 x 147 x 2850 mm³. Las lamelas correspondieron a la clase C14 de EN 338 (2016). Todas las lamelas fueron equilibradas a un contenido de humedad (CH) del 16 % (±1 %).

Las clavijas utilizadas para las conexiones y los paneles fueron seleccionadas en distintos materiales y diámetros: a) pasadores, de aquí en adelante denominados “tarugos” de madera de *Eucalyptus grandis* de origen nacional de 20 mm de diámetro y 120 mm a 350 mm de longitud, b) clavos de madera densificada de *Fagus sylvatica* L. de origen europeo marca LIGNOLOC de 5,3 mm de diámetro y 90 mm de longitud, y c) clavos de acero espiralados de origen brasileño de 3,1 mm de diámetro y 100 mm de longitud. Los tarugos fueron almacenados en cámara climatizada hasta alcanzar 7 % (±1 %) de CH.

La selección de las clavijas fue determinada por diversos factores. En el caso de los tarugos de madera, la especie y el diámetro fueron definidos en función de su disponibilidad en el mercado nacional. En los clavos de madera y de acero, las dimensiones fueron consideradas como criterio principal, debido a su capacidad para unir longitudes significativas en productos estructurales. Los clavos fueron seleccionados por su facilidad de aplicación mediante clavadoras neumáticas y fueron suministrados desde el exterior debido a su inexistencia en Uruguay.

Las series de ensayos de corte en conexiones de madera se resumen en la Tabla 1. Los cuerpos de prueba, cargados perpendicularmente a la dirección de la fibra, fueron preparados de acuerdo a la configuración geométrica descrita por Sandberg *et al.* (2000), como se muestra en la Figura 1. Todas las muestras fueron acondicionadas en una cámara de humedad controlada a (20 ± 2) °C y (65 ± 5) % de humedad relativa hasta alcanzar valores cercanos al 12 % CH.

Tabla 1: Descripción de conexiones de madera.

Denominación	Tipo de clavija	Patrón de clavado	Número de clavijas	Distancia entre clavijas	Número de muestras
DLT	Tarugos	en línea recta	1	-	12
WNLT-250	Clavos de madera	zig-zag	4	250 mm	9
WNLT-150			4	150 mm	9
NLT-250	Clavos de acero	zig-zag	4	250 mm	11
NLT-150			4	150 mm	9

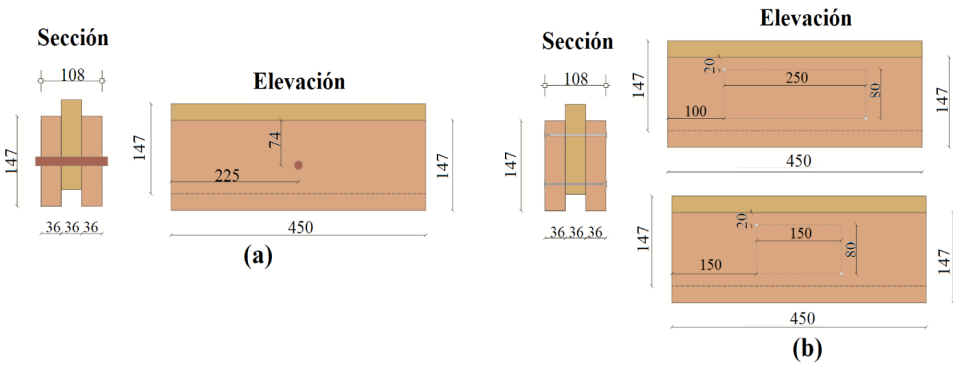


Figura 1: Configuración de cuerpos de prueba en ensayo de corte cargados perpendicularmente a la fibra. (a) DLT. (b) WNLT y NLT.

Previo a la fabricación de los paneles, todas las lamelas fueron sometidas a ensayos no destructivos (NDT) para la evaluación del módulo de elasticidad dinámico (E_d), mediante el método de onda de impacto utilizando un equipo Fakopp (Microsecond Timer). Los valores promedio de E_d y densidad de las 128 lamelas fueron de 10.700 MPa (COV = 12 %) y 450 kg/m³ (COV = 9 %), respectivamente. Las lamelas fueron clasificadas en cuatro grupos según su módulo de elasticidad, y los paneles fueron fabricados de manera que cada uno contuviera lamelas de todos los grupos. Se fabricaron seis series de paneles de tamaño estructural con dimensiones de 252 x 147 x 2850 mm³.

Cada panel se construyó con siete lamelas unidas mediante clavijas de madera o acero. En los paneles DLT, los tarugos fueron insertados manualmente con un martillo de goma en orificios de 19 mm de diámetro previamente perforados con taladro convencional, y dispuestos según dos patrones de clavado: en línea recta y en zig-zag, separados cada 300 mm entre sí. En los paneles WNLT y NLT, las clavijas fueron clavadas mecánicamente mediante clavadoras neumáticas, siguiendo un patrón en zigzag, con separaciones de 250 mm y 150 mm, respectivamente. Las series de ensayos de flexión se resumen en la Tabla 2. La configuración de los paneles y el proceso de fabricación se muestran en las Figura 2 y Figura 3, respectivamente.

Tabla 2: Descripción de paneles laminados de tamaño estructural.

Denominación	Tipo de clavija	Patrón de clavado	Distancia entre clavijas	Número de muestras
DLT-lineal	Tarugos	en línea recta	300 mm	3
DLT-zig-zag		zig-zag		3
WNLT-250	Clavos de madera	zig-zag	250 mm	3
WNLT-150			150 mm	3
NLT-250	Clavos de acero	zig-zag	250 mm	3
NLT-150			150 mm	3

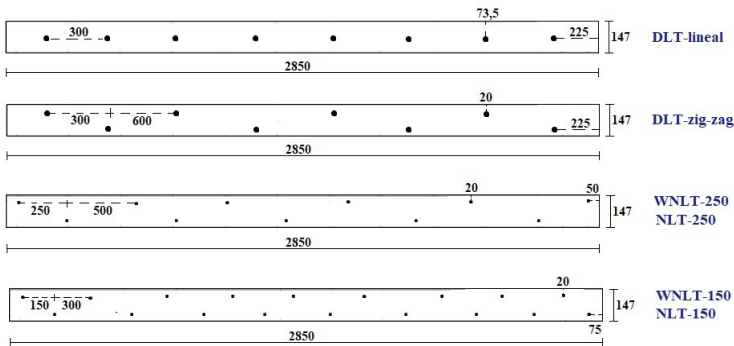


Figura 2: Configuración de paneles laminados de tamaño estructural.

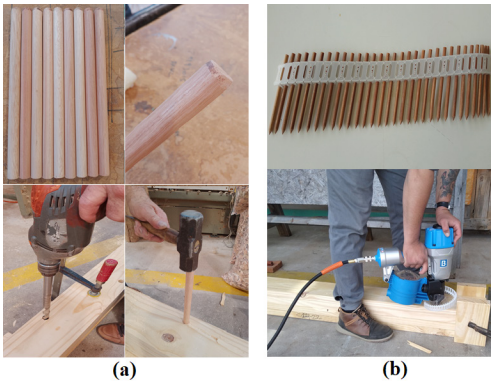


Figura 3: Fabricación de paneles laminados de tamaño estructural. (a) Panel DLT. (b) Panel WNLT.

METODOLOGÍA

Ensayos de corte

Los ensayos de doble cizalladura en las conexiones fueron realizados una máquina universal Controls con una celda de carga de 300 kN, y de acuerdo a EN 26891 (1991). La configuración experimental para los ensayos de corte perpendicular a la fibra se muestra en la Figura 4. Se utilizaron cuatro extensómetros para medir el desplazamiento relativo de la unión: dos ubicados en las piezas laterales y dos en la pieza central de la probeta. El procedimiento de carga se basó en la fuerza máxima estimada ($F_{max,est}$), calculada a partir de ensayos destructivos realizados en tres muestras por serie. El ensayo comprendió dos fases: la primera, de precarga hasta alcanzar el 40 % de $F_{max,est}$, seguida por una reducción de la carga al 10 % de $F_{max,est}$, y la segunda, la aplicación de una carga final a una velocidad constante de desplazamiento, específica para cada serie, comprendida entre 0,4 y 1,2 mm/min. La capacidad de corte (F_s) fue determinada como la carga máxima registrada durante los ensayos. El módulo de deslizamiento (K_s) fue calculado de acuerdo a la Ecuación (1) de EN 26891 (1991), a partir de la pendiente de la línea definida entre los puntos correspondientes al 10 % y 40 % de $F_{max,est}$ en la curva carga-deslizamiento.

$$Ks = \frac{3}{4} + \frac{F04}{\left(\frac{v04}{v01}\right)} \tag{1}$$

donde v_{01} es el deslizamiento equivalente a la carga $0,1 F_{max,est}$; v_{04} es el deslizamiento equivalente a la carga $0,4 F_{max,est}$.

Posteriormente, de cada cuerpo de prueba ensayado se extrajo una muestra (que incluyó las tres piezas que conformaron la conexión) próxima a la zona de falla para determinar el contenido de humedad (CH) y la densidad, de acuerdo a EN 13183-1 (2002).

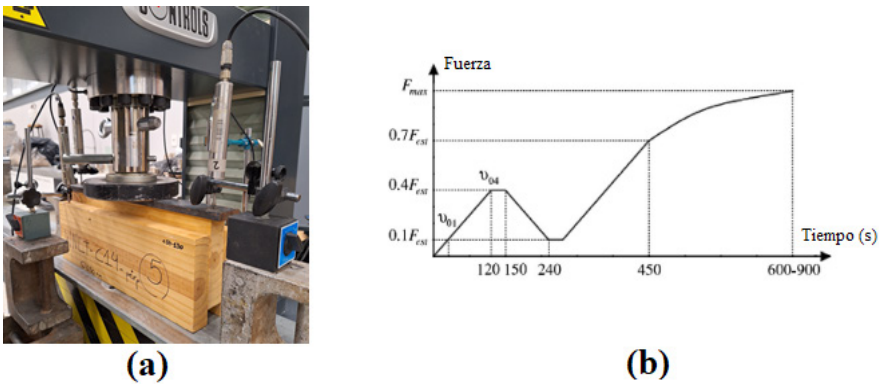


Figura 4: Configuración de ensayo de corte perpendicular a la fibra (a) y procedimiento de carga de acuerdo a EN 26891 (b).

Ensayos de flexión

Los paneles de tamaño estructural fueron ensayados a flexión en cuatro puntos para determinar la resistencia a flexión (f_m), el módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$) y el módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) de acuerdo a EN 408 (2012). Los paneles fueron orientados para representar el comportamiento de una losa horizontal, y las cargas fueron aplicadas a lo largo del ancho total del panel hasta producir la rotura. Los ensayos fueron realizados en una máquina universal con una celda de carga de 250 kN. La carga fue aplicada a una velocidad constante de 0,167 mm/s. Las deformaciones fueron registradas mediante extensómetros ubicados en la parte inferior del panel, hasta que el panel alcanzó el 40 % de la carga máxima estimada, asegurando que el ciclo de carga y la deforma-

ción correspondiente permanecieran en el rango elástico. En ese momento, los extensómetros fueron retirados y la carga continuó aplicándose hasta la rotura. La carga máxima fue registrada mediante el desplazamiento del cabezal de carga. La configuración del ensayo se muestra en la Figura 5. Posteriormente, un trozo de 25 mm de longitud y del ancho total del panel fue extraído en una zona próxima al fallo, para determinar el CH y la densidad de cada una de las láminas de acuerdo a EN 13183-1 (2002).

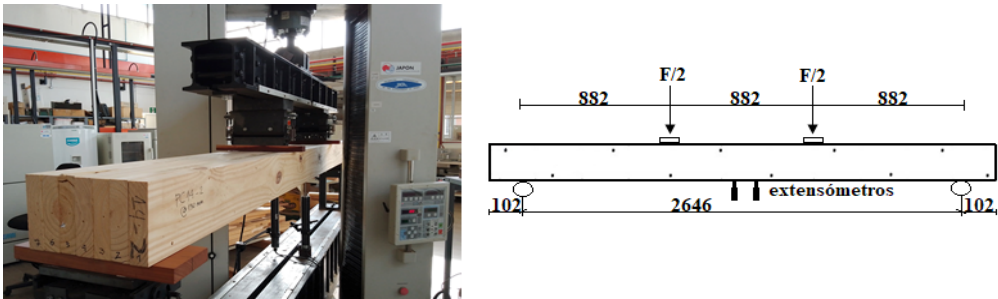


Figura 5: Configuración de ensayo de flexión estática en cuatro puntos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos de corte

Los resultados de los ensayos de corte perpendicular a la fibra en conexiones de madera se presentan en la Tabla 3. Los valores de resistencia y módulo de deslizamiento fueron calculados para representar el comportamiento global de cada tipo de conexión evaluada (i.e., un tarugo o cuatro clavos), considerando la interacción conjunta entre los conectores y la madera base.

Tabla 3: Resultados de ensayos de corte perpendicular a la fibra. Valores medios y DE.

Series	DLT	WNLT-250	WNLT-150	NLT-250	NLT-150
n	12	9	9	11	9
Densidad (kg/m ³)	450 (6,1)	444 (11,4)	438 (6,1)	443 (7,8)	430 (37,3)
F _s (kN)	7,99 (1,13)	6,01 (0,68)	6,28 (0,58)	14,93 (1,38)	14,16 (0,78)
K _s (kN/mm)	1,47 (0,10)	2,29 (0,32)	2,79 (0,72)	1,13 (0,32)	1,37 (0,23)

En el análisis de varianza (ANOVA) de las conexiones DLT, WNLT y NLT se observó diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los tres tipos de uniones, independientemente del número y distanciamiento entre clavijas. En las conexiones NLT, los valores de resistencia fueron significativamente superiores a los observados en las conexiones DLT y WNLT. Este resultado puede ser atribuido a la mayor capacidad del acero para resistir fuerzas de corte y soportar una deformación plástica considerable antes de alcanzar el fallo total. Con respecto al módulo de deslizamiento (K_s), los valores fueron significativamente mayores en las conexiones con clavos de madera (WNLT), en comparación con las conexiones con tarugos (DLT) y con clavos de acero (NLT). Esta diferencia puede haber sido causada por la mayor fricción interna y el mejor ajuste de los clavos de madera en la conexión, lo que incrementa la resistencia al deslizamiento bajo carga inicial. La prueba t-student fue aplicada para comparar los cuerpos de prueba WNLT y NLT, separados a 250 mm y 150 mm respectivamente, no encontrándose diferencias significativas con respecto a los valores medios de resistencia y rigidez.

La Figura 6 muestra las curvas de carga-deslizamiento de conexiones de madera ensambladas con diferentes tipos de clavijas (tarugos, clavos de madera y acero) en ensayos de corte perpendicular a la fibra.

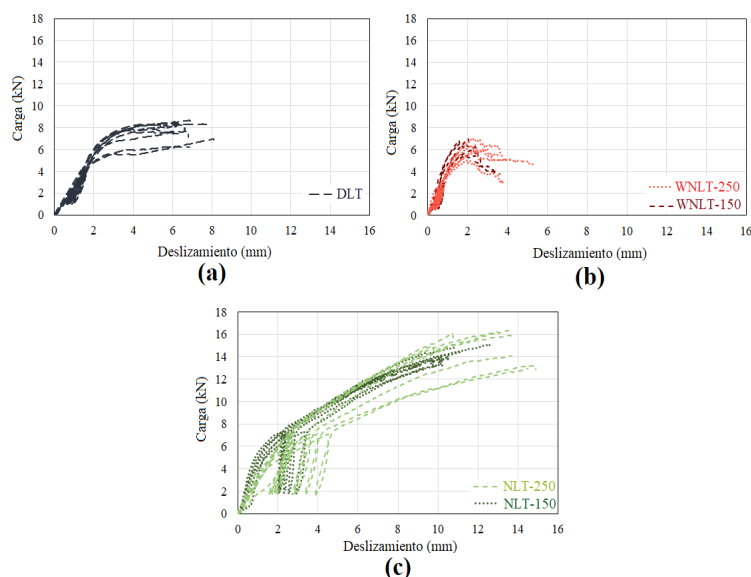


Figura 6: Curvas de carga-deslizamiento de cuerpos de prueba de corte. (a) Conexiones DLT. (b) Conexiones WNLT. (c) Conexiones NLT.

En general, se observó una ligera disminución de la carga en los cuerpos de prueba de corte DLT (Figura 6a) tras la transición elástico-plástica, seguida de una meseta prolongada, que culminó en el fallo total de la conexión. Este comportamiento fue consistente con los hallazgos reportados por Ceraldi *et al.* (2018). En las conexiones WNLT (Figura 6b), se visualizó una respuesta escalonada pronunciada después de alcanzado el punto de fluencia, caracterizada por una rápida pérdida de carga seguida por una rápida recuperación, repetida sucesivamente hasta que se alcanzó el fallo total de la conexión. Este comportamiento podría haber estado asociado al aplastamiento local en las zonas de contacto y a la redistribución de esfuerzos de los clavos de madera en la conexión (Ruan *et al.* 2022).

En las conexiones NLT (Figura 6c), se observó un incremento de la carga después de alcanzado el punto de fluencia, posiblemente atribuido a la formación de rótulas plásticas que facilitaron la redistribución de esfuerzos y contribuyeron al mantenimiento de la capacidad de carga, en concordancia con los hallazgos de Sosa Zito *et al.* (2013) y Zhu *et al.* (2021). Adicionalmente, se observó que todos los cuerpos de prueba ensayados para los tres tipos de conexiones fallaron dentro del rango de los 15 minutos establecidos, y en ningún caso se alcanzó el deslizamiento de 15 mm permitido por la norma EN 26891 (1991).

La Figura 7 ilustra los modos de fallo típicos observados en los tres tipos de conexiones evaluadas. Durante los ensayos, se registraron fallas principalmente por fracturas y rupturas de los elementos de unión en las conexiones con tarugos y clavos de madera. En contraste, en las conexiones con clavos de acero, los fallos fueron asociados a la presencia de nudos en las lamelas de madera, sin que se observaran rupturas en los clavos de acero.

En las conexiones DLT (Figura 7a), el fallo típico de los tarugos fue atribuido principalmente a una combinación de cizallamiento, flexión y fluencia en el elemento de unión, en concordancia con los hallazgos reportados por Ceraldi *et al.* (2018) para ensayos de corte doble en conexiones tarugadas de madera de coníferas. En las probetas ensayadas, distintos grados de deformación fueron observados en los tarugos, siendo la densidad uno de los factores más influyentes en las propiedades mecánicas de los tarugos. Bruzzzone (2023) reportó un valor de densidad promedio de 524 kg/m^3 (mín. = 426 kg/m^3 ; máx. = 590 kg/m^3) en tarugos de rose gum (*Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden) de 20 mm de origen nacional. Adicionalmente, un grado de endurecimiento en la conexión fue observado en los tarugos de madera, atribuible a la compresión del propio conector. El endurecimiento observado pudo ser atribuido a una combinación de aplastamiento e incrustación del tarugo en las lamelas, similar a lo reportado por Bell (2018). En la mayor parte de las probetas ensayadas, las fallas por división de los elementos perpendiculares a la fibra fueron clasificadas en dos modos de fallo: i) modo de fallo IV según EN 1995-1-1 (2016), donde dos rótulas plásticas fueron formadas en las interfaces derecha e izquierda del tarugo; y ii) modo de fallo V, descrito por Schmidt y Daniels (1999), donde el tarugo quedó confinado

entre los elementos de madera, lo que provocó una falla por corte transversal a la fibra.

En las conexiones WNL (Figura 7b), una falla frágil de los clavos de madera fue observada después de alcanzarse cierto grado de flexión. Tres modos de fallo fueron identificados en los clavos de madera, consistente a lo reportado por Ruan *et al.* (2022) en ensayos de corte. En la mayor parte de las probetas, las rupturas en los clavos de madera fueron detectadas en dos puntos a lo largo de su longitud, generalmente simétricos respecto al plano de corte. En algunos cuerpos de prueba, la fractura de los clavos de madera fue evidenciada en un solo punto, próximo al plano de corte. En ambos casos, las fracturas fueron acompañadas por aplastamientos en los clavos. Adicionalmente, algunos clavos de madera fueron extraídos directamente de las probetas ensayadas, sin exhibir fracturas visibles a simple vista.

En las conexiones NL (Figura 7c), dos modos de fallo fueron observados: (1) Deformación significativa de los clavos de acero, sin presencia de fisuras ni roturas visibles. Adicionalmente, la formación de rótulas plásticas en la pieza central y las laterales fue evidenciada, correspondiendo a los modos de fallo III y IV según la norma EN 1995-1-1 (2016b). (2) Fisuras, aplastamiento y roturas en las lamelas de madera fueron identificados. En los orificios de clavado, aplastamientos significativos fueron detectados, atribuibles tanto al proceso de fabricación como a la deformación de los clavos durante los ensayos. En las zonas cercanas al plano de corte, roturas asociadas a la presencia de nudosidades en las lamelas fueron observadas. Estas observaciones fueron consistentes con los resultados reportados por Zhu *et al.* (2021), quienes realizaron ensayos de corte en doble cizalladura sobre conexiones de madera unidas con conectores de acero.

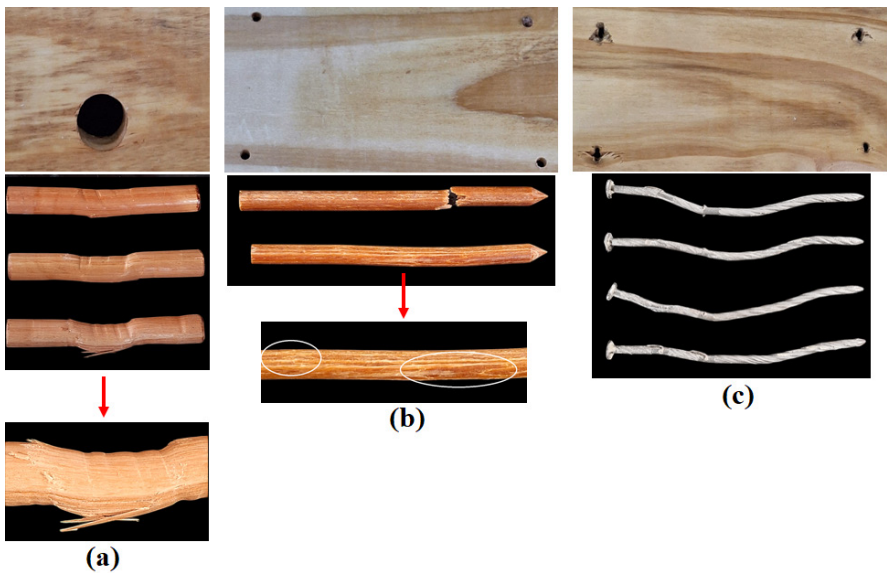


Figura 7: Modos de fallo típicos en elementos de unión. (a) Tarugos de madera. (b) Clavos de madera. (c) Clavos de acero.

Ensayos de flexión

En las Tabla 4 y Tabla 5 se resumen los resultados de las propiedades estructurales y el análisis estadístico de los paneles de tamaño estructural. Los valores experimentales de resistencia, rigidez y densidad fueron ajustados al 12 % CH.

Tabla 4: Resultados de pruebas de flexión en paneles laminados. Valores medios y DE.

Series	DLT- lineal	DLT- zig-zag	WNLT- 250	WNLT- 150	NLT- 250	NLT- 150
N	3	3	3	3	3	3
Densidad (kg/m ³)	444 (32,6)	451 (25,7)	450 (24,2)	439 (25,7)	439 (33,0)	443 (27,1)
Resistencia (MPa)	23,3 (6,55)	20,7 (2,05)	25,6 (5,3)	22,6 (4,06)	18,1 (0,75)	24,9 (1,06)
MOE global (MPa)	7772 (442)	6908 (218)	7110 (223)	7320 (274)	6356 (230)	7045 (289)
MOE local (MPa)	8150 (463)	7244 (229)	7456 (234)	7676 (287)	6665 (241)	7388 (303)

Tabla 5: Pruebas estadísticas entre grupos de paneles de tamaño estructural.

Pruebas estadísticas	Comparación entre grupos	Variables dependientes	Variables independientes	Nivel de significancia (α)	p-valor
ANOVA	DLT vs WNLT vs NLT	MOE	Tipo de clavija	0,05	0,10
		MOR			0,55
t-student	DLT-lineal vs DLT-zig-zag	MOE	Patrón de clavado	0,05	0,04
		MOR			0,55
t-student	WNLT-250 vs WNLT-150	MOE	Distanciamiento entre clavijas	0,05	0,36
		MOR			0,48
t-student	NLT-250 vs NLT-150	MOE	Distanciamiento entre clavijas	0,05	0,03
		MOR			8×10 ⁻⁴
t-student	WNLT-250 vs NLT-250	MOE	Tipo de clavija	0,05	0,02
		MOR			0,04
t-student	WNLT-150 vs NLT-150	MOE	Tipo de clavija	0,05	0,30
		MOR			0,40

El Análisis de Varianza (ANOVA) aplicado a los paneles DLT, WNLT y NLT indicó que los valores de las propiedades de flexión fueron similares ($p > 0,05$) en los tres tipos de paneles, independientemente del patrón de clavado y del distanciamiento entre clavijas. No se detectó influencia significativa del tipo de material (madera o acero) ni del diámetro de la clavija sobre la capacidad portante de los paneles. En la prueba t de Student, se observó que los valores del módulo de rotura (MOR) fueron similares ($p > 0,05$) en los paneles DLT con patrón de clavado lineal y en los paneles con clavado en zigzag. Sin embargo, los valores del módulo de elasticidad (MOE) fueron significativamente superiores ($p \leq 0,05$) en los paneles con patrón lineal respecto a los paneles con patrón en zigzag. En los paneles NLT, se observaron valores de resistencia y rigidez a flexión significativamente superiores en aquellos con clavos separados cada 150 mm en comparación con los paneles con clavos cada 250 mm. En el caso de los paneles WNLT, no se evidenció influencia sustancial de la separación de los clavos sobre las propiedades de flexión.

Para analizar el efecto del material de la clavija (madera o acero) en función del distanciamiento entre clavos (250 mm y 150 mm), se realizaron pruebas t-student en los paneles WNLT y NLT. Se observaron valores superiores de resistencia y rigidez (41 % y 12 %, respectivamente) en los paneles WNLT-250 en comparación con los NLT-250. Por otro lado, no se registraron diferencias significativas entre los paneles WNLT-150 y NLT-150 en cuanto a las propiedades mecánicas en flexión.

El comportamiento carga-deformación de los paneles DLT, WNLT y NLT se muestra en la Figura 8. Un comportamiento similar fue observado en todos los paneles: lineal hasta el límite de proporcionalidad, seguido por un tramo no lineal hasta alcanzar la carga máxima y la rotura final. El patrón de falla fue similar en las seis series, esto es, roturas sucesivas de las lamelas, seguido por una recuperación parcial de carga hasta alcanzar la falla total del panel. Este comportamiento fue consistente con los trabajos de Tannert (2002), Plowas *et al.* (2016) y Bell (2018), que, en paneles laminados unidos con clavos de acero o tarugos de madera, observaron

patrones de rotura secuencial con redistribución de esfuerzos entre las láminas. Se infiere que este comportamiento se debió a la configuración del panel, en la cual se utilizaron lamelas con propiedades mecánicas de distintos rangos de resistencia y rigidez. La tensión fue transferida entre las lamelas contiguas mediante las clavijas; al agotarse la capacidad resistente de una lamela, los esfuerzos fueron progresivamente transmitidos a las adyacentes hasta que se produjo la falla total.

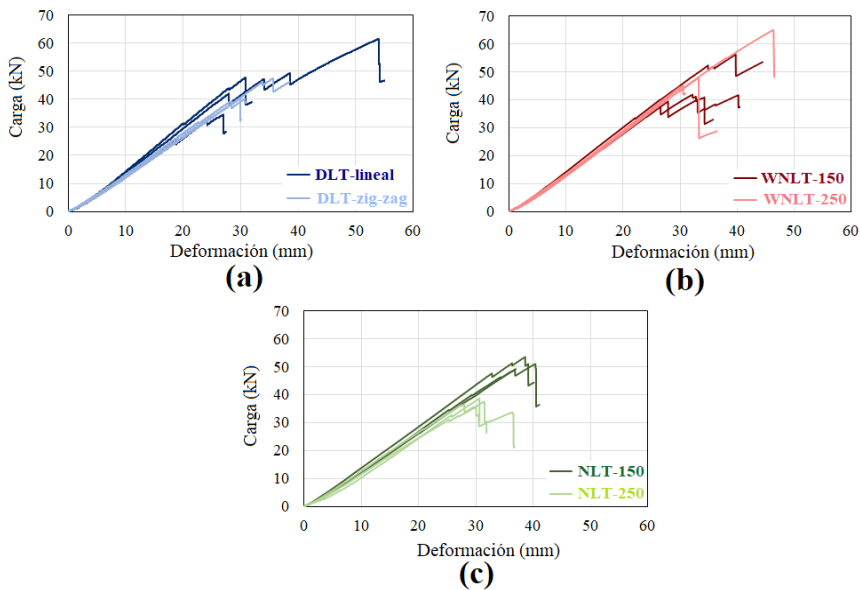


Figura 8: Gráficos carga-deformación de paneles de tamaño estructural. (a) Panel DLT. (b) Panel WNLT. (c) Panel NLT.

El patrón de falla en las seis series de paneles fue secuencial y se produjo en la zona traccionada –posiblemente debido a la presencia de nudos o desviación de la fibra. En los paneles WNLT, se observó delaminación y rotura de los clavos en concordancia con Zhu *et al.* (2023). En los paneles DLT, se visualizó que la mayor parte de las rupturas se propagó a lo largo de la línea de la conexión tarugada, consistente con Pereira *et al.* (2019) y Bruzzone *et al.* (2023). Adicionalmente, no se observaron fracturas en los tarugos a simple vista. En los paneles NLT, no se detectaron arrancamientos ni desplazamientos de clavos, observación consistente con el trabajo de Casaravilla (2021), sobre las propiedades de flexión de paneles NLT de slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.) de procedencia uruguaya. En la Figura 9 se presenta un fallo típico de paneles DLT, WNLT y NLT en flexión.

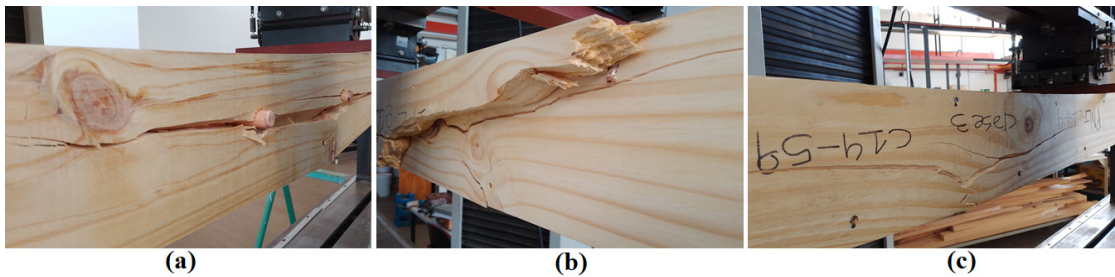


Figura 9: Patrón de falla en paneles de tamaño estructural en flexión. (a) Panel DLT. (b) Panel WNLT. (c) Panel NLT.

CONCLUSIONES

Los resultados y observaciones experimentales permiten establecer las siguientes conclusiones:

Los valores de resistencia al corte de las uniones fueron significativamente superiores en las conexiones con clavos de acero (NLT) que en las conexiones con tarugos (DLT) y clavos de madera (WNLT).

Los valores de rigidez de las uniones fueron significativamente superiores en las conexiones WNLT en comparación con los respectivos valores en DLT y NLT.

El patrón de distanciamiento (250 mm y 150 mm) entre clavijas (clavos de madera y acero) no mostró influencia significativa en las propiedades mecánicas de las conexiones WNLT y NLT.

Las propiedades de flexión de los paneles DLT, WNLT y NLT indicaron que el material y el diámetro de la clavija (madera o acero) no afectaron significativamente la capacidad portante del panel. Se determinó que la rigidez estuvo más relacionada con la disposición geométrica del patrón de clavado que con el tipo de conector utilizado, lo que sugiere que, en el diseño de conexiones de paneles, la configuración geométrica podría tener un impacto más significativo sobre la rigidez que el material del conector. Adicionalmente, las propiedades mecánicas de las lamelas influyen de manera determinante en el comportamiento estructural del panel, por lo que su consideración resulta esencial en el proceso de diseño.

Los modos de falla de los paneles fueron atribuidos a fallas por tracción, originadas principalmente por desviaciones pronunciadas de las fibras y por desviaciones debido a la presencia de nudos, especialmente en la zona central de carga. Estas características anatómicas de la madera, como son los nudos y la orientación de las fibras, influyen de manera significativa en el comportamiento estructural de los paneles, lo que subraya la importancia de considerar estos factores al evaluar la resistencia y rigidez de los paneles.

Los resultados de este estudio indican que los productos de madera laminada con clavijas de madera, fabricados con pino *Pinus taeda*, constituyen una alternativa viable para pisos de viviendas, a la vez que favorecen el empleo de sistemas constructivos sostenibles y de menor impacto ambiental.

Se sugiere que en futuros estudios se utilice madera de *Pinus taeda* (pino nacional) de calidad estructural superior a la empleada en este trabajo.

Contribuciones de los autores

G. B.: Conceptualización, metodología, investigación, redacción: preparación del borrador original, y revisión y edición. D. G.: Conceptualización, metodología, investigación, supervisión. S. A.: Metodología, investigación. S. Q.: Metodología, investigación. S. B.: Investigación. L. M.: Conceptualización, metodología, investigación, preparación del borrador original y revisión, supervisión, administración del proyecto, adquisición de financiación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por los fondos para este proyecto (PR_FMV_2019_1_156162), y a la empresa Enkel Group por la colaboración en la fabricación de los paneles WNLT de tamaño estructural.

REFERENCIAS

Abergel, T.; Dean, B.; Dulac, J. 2017. Global Status Report 2017: Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya. <https://globalabc.org/resources/publications/2017-global-status-report-buildings-and-construction>

Ahmed, S.; Arocho, I. 2020. Mass timber building material in the U.S. construction industry: determining the existing awareness level, construction-related challenges, and recommendations to increase its current acceptance level. *Cleaner Engineering and Technology* 1: e100007. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100007>

Bell, T.A. 2018. A detailed investigation into the engineering properties and challenges affecting the potential introduction of a UK grown dowel-laminated timber floor panel into the domestic construction market. Thesis Doctor of Architecture, University of Strathclyde, Faculty of Engineering. Glasgow, United Kingdom. <https://doi.org/10.48730/yt00-d987>

Bruzzone, G. 2023. Evaluación experimental de placas de madera laminada tarugada para la construcción de entresijos y techos de viviendas en Uruguay. Tesis de Maestría, Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/36902>

Bruzzone, G.; Godoy, D.; Quagliotti, S.; Arrejuría, S.; Böthig, S.; Moya, L. 2023. Experimental investigation on dowel laminated timber made of Uruguayan fast-grown species. *Forests* 14(11): e2215. <https://doi.org/10.3390/f14112215>

Casaravilla, J. 2021. Propiedades de flexión de paneles de madera laminada clavada de pino para uso en viviendas construidas por el sistema cooperativo de ayuda mutua en Uruguay. Tesis Magister en Construcción en Madera, Universidad del Bío-Bío, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño. Concepción, Chile. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/4304>

Ceraldi, C.; Lippiello, M.; D'ambra, C.; Prota, A. 2018. The Influence of Dowel-Bearing Strength in Designing Timber Pegged Timber Joints. *International Journal of Architectural Heritage* 12(3): 362-375. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1323249>

CWC. 2024. Nail-Laminated Timber: Canadian Design and Construction Guide. Canadian Wood Council. Ottawa, Canada. <https://www.naturallywood.com/wp-content/uploads/NLT-Guide-Version2-2024-1.pdf>

Derikvand, M.; Jiao, H.; Kotlarewski, N.; Lee, M.; Chan, A.; Nolan, G. 2019. Bending performance of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt. *European Journal of Wood and Wood Products* 77: 421-437. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01408-9>

Derikvand, M.; Serveh, H.; Fink, G. 2021. Mechanical properties of dowel laminated timber beams with connectors made of salvaged wooden materials. *Journal of Architectural Engineering* 27(4): e04021035. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000513)

EN. 1991. Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics. EN 26891. CEN: Brussels, Belgium.

EN. 2002. Moisture Content of a Piece of Sawn Timber-Part 1: Determination by Oven Dry Method. EN 13183-1. CEN: Brussels, Belgium.

EN. 2012. Timber Structures. Structural Timber and Glued Laminated Timber. Determination of Some Physical and Mechanical Properties. EN 408:2011+A1:2012. CEN: Brussels, Belgium.

EN. 2016. Structural timber - Strength classes. EN 338. CEN: Brussels, Belgium.

EN. 2016. Eurocode 5. Design of Timber Structures-Part 1-1: General-Common Rules and Rules for Buildings. EN 1995-1-1. CEN: Brussels, Belgium.

El-Houjeiry, I.; Thi, V.D.; Oudjene, M.; Khelifa, M.; Rogaume, Y.; Sotayo, A.; Guan, Z. 2019. Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels. *Construction and Building Materials* 222: 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.163>

Feng, W.; He, M.; Ou, J.; Li, Z. 2025. Bending performance of nail laminated timber (NLT): Experiments and probabilistic modelling based on Monte Carlo simulation. *Engineering Structures* 323 (B): e119317. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119317>

Giordano, L.; Derikvand, M.; Fink, G. 2023. Bending properties and vibration characteristics of dowel-laminated timber panels made with short salvaged timber elements. *Buildings* 13(1): e199. <https://doi.org/10.3390/buildings13010199>

Haller, P.; Pannke, K. 1998. Structural and physical behaviour of nailed laminated timber elements. In: Proceedings of World Conference of Timber Engineering (WCTE 1998). August 17-20, 1998. Switzerland, 2: 230-237.

Han, L.; Kutnar, A.; Sandak, J.; Sustersic, I.; Sandberg, D. 2023. Adhesive-and metal-free assembly techniques for prefabricated multi-layered wood products: a review on wooden connectors. *Forests* 14(2): e311. <https://doi.org/10.3390/f14020311>

ICC. 2024. International Building Code. International Code Council. Washington, D.C., United States. <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2024P1>

Li, Z.; Feng, W.; He, M.; Chen, F.; Sun, X. 2023. Bending performance of nail laminated timber: Experimental, analytical and numerical analyses. *Construction and Building Materials* 389: e131766. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131766>

Moya, L.; Cardoso, A.; Cagno, M.; O'Neill, H. 2015. Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17(3): 597-612. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000053>

Ogunrinde, O. 2019. Evaluation of bending performance of nail laminated and dowel laminated timber. Thesis Master of Science in Forest Engineering, University of New Brunswick, Faculty of Forestry and Environmental Management. New Brunswick, Canada. <https://unbscholar.lib.unb.ca/handle/1882/14045>

Pereira, M.; Minari, V.; Sohler, L.; Descamps, T.; Calil, C. 2019. Comparativo da rigidez e ruptura de dois painéis estruturais de madeira macica lamelar unida por cavilhas. En Actas del 4º Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas (CLEM 2019). 18-20 de setiembre, 2019. Uruguay, 9 p. https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/202103/Proceedings_CLEM2019_ISBN_parte_1.pdf

Plowas W.; Bell, T.; Hairstans, R.; Williamson, J. 2016. Understanding the compatibility of UK resource for dowel laminated timber construction. *TH Building Construction*, 12 p. <http://researchrepository.napier.ac.uk/id/eprint/10195>

Riggio, M.; Pauliny, D.; Sandak, J.; Sandak, A. 2013. Novel Nail-like Wood Connectors. *Advanced Materials Research* 778: 647-654. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.647>

Riggio, M.; Sandak, J.; Sandak, A. 2016. Densified Wooden Nails for New Timber Assemblies and Restoration Works: A Pilot Research. *Construction and Building Materials* 102(2): 1084-1092. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.045>

Ruan, G.; Filz, G.H.; Fink, G. 2021. An integrated architectural and structural design concept by using local, salvaged timber. In: *Proceedings of the Annual Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) and the 7th International Conference on Spatial Structures: Inspiring the Next Generation*. 23-27 September, 2021. United Kingdom, 12 p. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-2021112410391>

Ruan, G.; Filz, G.H.; Fink, G. 2022. Shear capacity of timber-to-timber connections using wooden nails. *Wood Material Science & Engineering* 17(1): 20-29. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1964595>

Sandberg, L.; Bulleit, W. M.; Reid, E. 2000. Strength and stiffness of oak pegs in traditional timber-frame joints. *J Struct Eng* 126(6): 717-723. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:6\(717\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:6(717))

Sandhaas, C.; Schädle, P.; Ceccotti, A. 2018. Innovative timber building systems: Comparative testing and modelling of earthquake behaviour. *Bulletin of Earthquake Engineering* 16: 1961-1985. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0264-x>

Schmidt, R. J.; Daniels, C. E. 1999. Design considerations for mortise and tenon connections. Report for Timber Framers Guild. Massachusetts, United States.

Sosa-Zitto, M.; Köhler, J.; Piter, J. 2013. Load-carrying capacity of timber-to-timber joints of fast-growing Argentinean Eucalyptus grandis with nails of small diameter laterally loaded in double shear: Analysis according to the criterion adopted by European standards. *European Journal of Wood and Wood Products* 72(1): 21-31. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0748-6>

Sotayo, A.; Bradley, D.; Bather, M.; Sareh, P.; Oudjene, M.; El-Houjeiry, I.; Harte, A.M.; Mehra, S.; O’Ceallaigh, C.; Haller, P.; Namari, S.; Makradi, A.; Belouettar, S.; Bouhala, L.; Deneufbourg, F.; Guan, Z. 2020. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Developments in the Built Environment* 1: e100004. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>

Tannert, T. 2002. Estudio de elementos laminados clavados para la construcción de viviendas de madera en Chile. Tesis Magister en Ciencia y Tecnología de la Madera, Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2002000200013>

UNIT. 2018. Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de pino taeda y pino elliotti (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). UNIT 1261. UNIT: Montevideo, Uruguay.

Ugarte, J.; Sierra, A.; Codriansky, K. 2022. Hoja de ruta para la construcción de vivienda social en madera en Uruguay. Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial: Montevideo, Uruguay. <https://www.gub.uy/ministerio-vivienda-ordenamiento-territorial/comunicacion/publicaciones/hoja-ruta-construccion-vivienda-social-madera-uruguay>

Uruguay XXI. 2023. Sector forestal en Uruguay. Promoción de inversiones, exportaciones e imagen país. Montevideo, Uruguay. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/sector-forestal-en-uruguay/>

Yeh, Y.H.; Yeh, Y.C. 2024. Bending behaviour and failure modes of non-glue-laminated timber beams composed of wooden dowels and self-tapping screws. *Buildings* 14(2): e394. <https://doi.org/10.3390/buildings14020394>

Zhu, W.; Gong, M.; Chui, Y.H., Li, L. 2021. Improved fastening designs for bridge decks made of mechanically-laminated timber. *Construction and Building Materials* 266 (B): e121166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121166>

Zhu, X.; Xue, Y.; Qi, P.; Lan, Q.; Qian, L.; Shen, J.; Gao, Y.; Li, J.; Mei, C.; Li, S. 2023. Flexural properties of wooden nail friction welding of laminated timber. *BioResources* 18(1): 1166-1176. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.1166-1176>