

Fabricación de madera laminada encolada para uso estructural

CAROLINA PÉREZ-GOMAR
LAURA MOYA

Arquitecta (FARQ-UdelaR, 2010).
Magíster en Construcción en Madera (FarCoDi-Universidad del Bío-Bío, Chile, 2017). Ha impartido clases como docente invitada en el Diploma de Especialización en Diseño, Cálculo y Construcción de Estructuras de Madera (FING-UdelaR y Facultad de Arquitectura-Universidad ORT Uruguay) y en el Diploma y la Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura (FADU-UdelaR). Ha publicado trabajos de investigación en revistas arbitradas y presentado trabajos en congresos.

Arquitecta (FARQ-UdelaR, 1991).
Magíster en Diseño y Construcción en Madera (FarCoDi-Universidad del Bío-Bío, Chile, 2001). PhD en Gestión de Recursos Naturales (Department of Bioproducts and Biosystems Engineering-University of Minnesota, 2008). Profesora Titular de Estructuras 4, investigadora y coordinadora académica del Diploma de Especialización en Diseño, Cálculo y Construcción de Estructuras de Madera (Facultad de Arquitectura-Universidad ORT Uruguay).

Resumen

En Uruguay la tecnología del laminado encolado es utilizada por fabricantes de productos de madera desde la década de los noventa, e inicialmente estaba focalizada en la producción de elementos de carpintería. La disponibilidad de maderas cultivadas en el país llevó a que las empresas fabricantes de madera laminada encolada [MLE] incursionaran en la producción de vigas y pórticos laminados sin adaptar la tecnología para producir materiales estructurales. Al no existir un cuerpo normativo nacional para madera estructural, la producción de madera laminada encolada se realiza sin ningún marco regulador que establezca requisitos de fabricación con el propósito de reglar su calidad física y estructural. El objetivo del trabajo fue establecer los requisitos de fabricación de vigas de madera laminada encolada [VMLE] de *Eucalyptus grandis* y adhesivo poliuretánico estructural en base al cuerpo normativo europeo y a la tecnología disponible en Uruguay. Para ello se involucró a una empresa productora de MLE que, siguiendo instrucciones del equipo investigador, fue optimizando su proceso productivo y fabricó las vigas estructurales analizadas en este trabajo. Varios ajustes fueron realizados en las etapas del proceso de fabricación, incluyendo la clasificación de madera, así como su saneado, endentado, encolado y prensado. El proceso productivo fue validado con ensayos destructivos de flexión y delaminación, realizados sobre láminas y vigas, siguiendo los lineamientos del cuerpo normativo europeo. Las vigas fueron

caracterizadas y asignadas a la clase resistente GL24h de la norma EN 14080 (2013). Los resultados de este trabajo fueron utilizados como insumos para la redacción de la norma UNIT 1264 que establece los requisitos de fabricación para la madera laminada encolada estructural de producción nacional.

Introducción

En Uruguay la madera de *Eucalyptus grandis* proviene de árboles de plantaciones de rápido crecimiento, que usualmente son cosechados a edades tempranas. Generalmente, entre los 15 y 18 años. La madera proveniente de estos árboles presenta altos porcentajes de leño juvenil y, en consecuencia, bajas propiedades físicas y mecánicas que inducen a su rechazo como material estructural. Asimismo, las escuadrías y longitudes de las piezas de madera obtenidas de estos árboles son de dimensiones acotadas que dependen del diámetro, largo del tronco y patrón de aserrado. La tecnología del laminado y encolado permite recuperar la madera rechazada y agregarle valor. El proceso de producción de la MLE permite generar piezas de dimensiones mayores, tanto en sección como en longitud, a las de la madera aserrada, así como fabricar elementos estructurales de grandes luces y curvos.

La calidad estructural de los productos de MLE puede ser controlada por medio de la selección de sus materiales componentes: madera y adhesivo. El proceso de laminado encolado permite el posicionamiento estratégico de láminas de diferentes grados estructurales y/o diferentes especies dentro de una misma pieza y esta característica permite predecir su comportamiento estructural.

La evolución de la cadena forestal maderera en los últimos 30 años, fomentada por la Ley Forestal n° 15939 de 1987, trajo consigo la aparición de empresas dedicadas a la fabricación de productos de MLE. Las primeras empresas, surgidas en la década de 1990, inicialmente focalizaron su producción y tecnología en elementos de carpintería y muebles. A partir de la mayor disponibilidad de madera, varias de ellas comenzaron a fabricar y comercializar vigas y pilares de MLE sin adaptar la tecnología. Amparadas por la inexistencia de un marco normativo que regule la calidad estructural de los productos laminados, estas empresas vuelcan al mercado componentes de MLE no estructurales que son consumidos por los profesionales y técnicos como si lo fueran. Es frecuente observar fallas por rotura frágil en vigas de MLE luego de tres o cuatro años de su puesta en servicio, similares a las descritas en la figura 1 (comunicaciones personales). Estas patologías asociadas al proceso de fabricación impactan negativamente en la opinión de usuarios y profesionales y desprestigian un producto que, de ser fabricado siguiendo los lineamientos para MLE estructural, posibilita infinidad de soluciones estructurales para proyectos de arquitectura e ingeniería civil.



FIGURA 1. VMLE CON FALLA POR ROTURA FRÁGIL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

MADERA ESTRUCTURAL: MARCO NORMATIVO

En 2017 se conformó el Comité de Madera Estructural en el ámbito del Instituto Uruguayo de Normalización [UNIT]. A la fecha, se han aprobado varias normas, destacándose las de clasificación visual estructural de madera aserrada de *Pinus Elliottii* / *Taeda* (UNIT 1261:2018) y la de *Eucalyptus Grandis* (UNIT 1262:2018). Ambas establecen los parámetros de clasificación, la asignación a calidades visuales y la correspondencia de sus propiedades estructurales —es decir, resistencia y rigidez de flexión, y densidad— con las de las clases resistentes del sistema europeo (EN 338).

Actualmente se encuentra en proceso de aprobación la norma de requisitos de fabricación de madera laminada encolada estructural —UNIT 1264:2019— que se basó en parte de los resultados reportados por Moya et al. (2019).

Adicionalmente, en línea con la implementación de las normas UNIT, el Mvotma generó el documento *Especificaciones para madera estructural en proyectos de vivienda* (Mvotma, 2019) que prescribe las condiciones mínimas y criterios de aceptación para la madera aserrada estructural y los productos de ingeniería de madera —MLE y tableros— a utilizar en los proyectos de viviendas de interés social.

A nivel internacional, existen normas que establecen los requisitos de fabricación control de producción, etcétera, para la MLE estructural. En particular, destaca la norma europea EN 14080 (2013) que recoge desde los requisitos de fabricación, las clases resistentes, hasta la metodología de evaluación para la MLE.

MADERA LAMINADA ENCOLADA EN URUGUAY

Si bien la técnica del laminado encolado fue introducida en el país hace más de veinticinco años, la MLE que se produce en Uruguay no es apta para uso estructural, ya que no cumple con los estándares de calidad de fabricación y, por tanto, tampoco cuenta con certificación de calidad estructural (Baño y Moya, 2015). La producción y puesta en obra de componentes —generalmente, vigas y pilares— de MLE es discrecional debido a la falta de un marco normativo

para la fabricación y la determinación de las características estructurales y a la ausencia de reglas para el diseño y cálculo con estos elementos.

El trabajo que se presenta a continuación se enmarca en un proyecto (ANII, 2013) ejecutado por el equipo de investigación LATU-FING-ORT. El objetivo fue establecer los parámetros de fabricación de MLE de *Eucalyptus grandis* en base al cuerpo normativo europeo, adaptando la tecnología disponible en Uruguay y la validación mediante ensayos de caracterización.

Metodología

La etapa inicial del proyecto consistió en visitas a las tres empresas más importantes a nivel nacional dedicadas a la fabricación y comercialización de MLE y el relevamiento de la tecnología de producción. Se constató diversidad en la tecnología empleada y, en los tres casos, la producción de MLE no estructural.

La etapa siguiente se focalizó en una de las tres empresas que, siguiendo instrucciones del equipo investigador, fue ajustando su proceso productivo de acuerdo a los requisitos normativos europeos y fabricó las VMLE estructurales analizadas en este trabajo. Vale señalar que la ausencia de un cuerpo normativo nacional para MLE estructural llevó al equipo investigador a adoptar lineamientos de la EN 14080 (2013). Adicionalmente, debido a la falta de una norma de clasificación visual de madera de *Eucalyptus grandis* uruguayo al momento de la ejecución de este trabajo, y considerando la similitud de las propiedades de esta madera y las de la madera de la misma especie producida en la Mesopotamia argentina (Piter et al., 2004), se resolvió adoptar la norma IRAM 9662-2 (2015).

Finalmente, el proceso de fabricación fue validado mediante un exhaustivo programa experimental que incluyó ensayos destructivos de flexión y delaminación realizados sobre láminas y vigas.

En síntesis, la metodología abarcó las siguientes tareas:

- visitas a fábricas y relevamiento del proceso productivo;
- supervisión y ajustes del proceso productivo de una de las fábricas;
- comprobación experimental del comportamiento estructural de la MLE.

GENERALIDADES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE MADERA LAMINADA ENCOLADA

Los requisitos de fabricación de la MLE se encuentran detallados en normas internacionales cuya consecución garantiza la aptitud estructural de los productos. El proceso de fabricación consta principalmente de cuatro etapas, diferenciadas por áreas de trabajo:

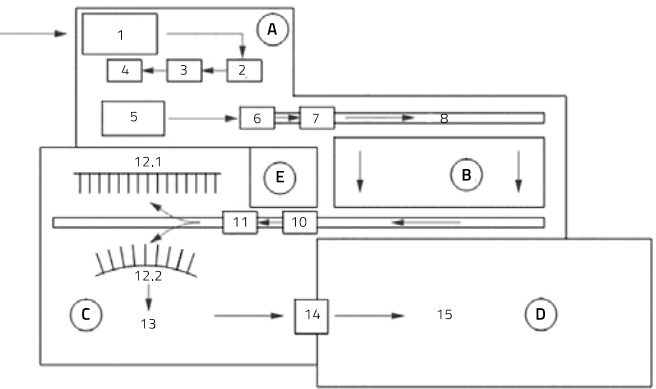
- preparación de las tablas de madera aserrada;
- fabricación de las láminas;

- fabricación de las vigas;
- terminación.

La figura 2 reproduce el *layout* típico de producción de madera laminada encolada.

Las tareas que componen las cuatro etapas se organizan espacialmente según un diagrama lineal y continuo, que permite ordenar el proceso lógico de fabricación y definir áreas de trabajo. Esta distribución admite sectorizar tareas en espacios cerrados que cuenten con condiciones controladas de temperatura y humedad relativa del aire, condiciones cruciales para las tareas de aplicación y curado del adhesivo.

El relevamiento realizado a la fábrica mostró que varias de las tareas no siguen el orden del *layout* típico del proceso productivo de MLE. Se constataron superposiciones, cruces e incompatibilidad de tareas que impiden la sectorización en espacios cerrados y con condiciones controladas de temperatura y humedad relativa del aire, tal como especifica la norma europea EN 14080.



ÁREA A. PREPARACIÓN DE TABLAS

1. Secado de tablas en horno (CH<15 %)
2. Clasificación
3. Control de CH
4. Saneado de defectos
5. Apilado de bloques

ÁREA B. FABRICACIÓN DE LÁMINAS

6. Endentado
7. Presión de endentado
8. Corte de láminas
9. Apilado de láminas, mínimo 8 h. previo a manipular

ÁREA C. ENCOLADO DE VIGAS

10. Cepillado de láminas
11. Colocación del adhesivo en una cara de las láminas
12. Prensado de la viga, mínimo por 6 h. a T=20 °C y HR=65 %
13. Apilado de vigas

ÁREA D. TERMINACIÓN

15. Cepillado de las cuatro caras de las vigas
16. Terminación de las vigas, corte a la medida, perforaciones, etc.

ÁREA E. ZONA DE ALMACENAJE Y PREPARACIÓN DE ADHESIVOS.

FIGURA 2. *LAYOUT* TÍPICO DE FABRICACIÓN DE MLE.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (ADAPTADO DE BLASS ET AL., 1995).

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

LÁMINAS

De la línea de producción de la fábrica se seleccionaron al azar 600 tablas de madera aserrada de *Eucalyptus grandis* de tamaño comercial, de 75 mm x 26 mm x 3300 mm, que habían sido previamente secadas en horno hasta 12% de contenido de humedad [CH]. Las tablas fueron saneadas de acuerdo a los criterios de nudo máximo admisible y a otras singularidades o defectos, siguiendo los lineamientos de la IRAM 9662-2 (2015), para producir los bloques que conforman las láminas. La longitud máxima de los bloques quedó limitada a 70 cm, por la maquinaria empleada para el aserrado y para el fresado del *finger-joint*, mientras que la longitud mínima se fijó en 40 cm (fig. 3).



FIGURA 3. ESQUEMA DE SANEADO DE TABLAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Se tuvo especial precaución en el saneado de rajaduras y nudos cercanos al borde de la pieza para evitar, en caso de manifestarse en las proximidades de un *finger-joint*, su debilitamiento estructural. Para ello se estableció una distancia entre el borde del bloque y el nudo más cercano igual o mayor a 3 veces el diámetro del nudo (fig. 4).

Previo a la fabricación de la unión entre bloques, se verificó que éstos presentaran CH homogéneos o, a lo sumo, con diferencias iguales o menores a 5%, tal como se exige en la EN 14080. La fabricación de la unión se realizó mediante la técnica del endentado y encolado, utilizando una fresadora con perfil

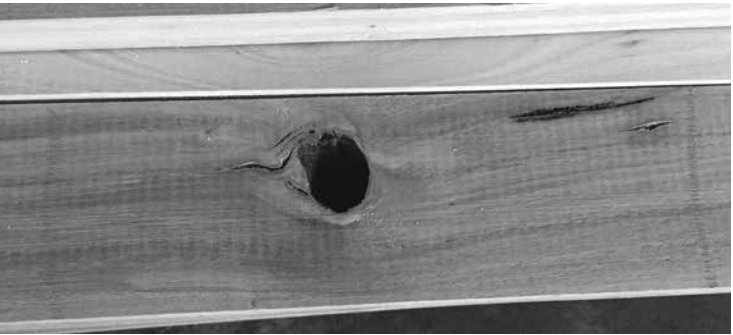


FIGURA 4. MARCADO DE CORTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

pluma para endentado de cara, con diente estructural de 15 mm de longitud. El adhesivo estructural de poliuretano monocomponente [PUR] fue esparcido manualmente sobre la superficie de los dientes de las dos testas de los bloques, para luego conformar las láminas. Sobre las testas de las láminas se aplicó una presión de ensamble de 10 N/mm² durante 1 segundo, cumpliendo con los requisitos de la EN 14080. Luego de ensambladas, las láminas fueron retiradas de la prensa y manipuladas cuidadosamente para evitar su deformación y no afectar la adhesión entre bloques (fig. 5).



FIGURA 5. UNIÓN DENTADA LUEGO DEL PRENSADO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

VIGAS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA

Luego de siete días de curado del adhesivo en las uniones dentadas, las láminas fueron cepilladas en sus caras y empleadas para fabricar 41 vigas con ocho láminas cada una, de sección homogénea de 73 mm x 192 mm y 4200 mm de longitud. Previo al encolado, se verificó que las superficies a encolar estuviesen limpias y libres de polvo, y se procedió a la configuración de las vigas, teniendo en cuenta que el tiempo de poro abierto en las caras de las láminas fuese inferior a 6 horas —entre cepillado de láminas y encolado de viga—.

El encolado fue realizado con aplicador de chorro mecánico, controlando que la distribución del adhesivo fuese uniforme en la cara de la lámina y respetara las cantidades recomendadas por el fabricante —300 gr/cm²—.

Las láminas fueron apiladas manualmente en una prensa hidráulica hasta conformar cada una de las VMLE. La prensa, compuesta por un marco metálico con pistones superiores separados cada 60 cm y dispositivos de sujeción lateral, permitió aplicar una presión uniforme de 1,2 N/mm² sobre las VMLE durante tres horas (fig. 6).

Luego del prensado, las vigas fueron retiradas de la prensa y almacenadas en un recinto sin acondicionar durante siete días para el curado del adhesivo y posteriormente cepilladas hasta sus dimensiones finales de 73 mm x 192 mm x 4200 mm.



FIGURA 6. PRENSADO DE VMLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL

La validación del proceso de fabricación y el desempeño estructural de láminas y vigas se realizó a partir de un programa de ensayos físicos y mecánicos de acuerdo a los lineamientos del cuerpo normativo europeo.

EVALUACIÓN DE LA UNIÓN DENTADA

ENSAYOS DE FLEXIÓN

La evaluación de los empalmes *finger-joint* se realizó sobre cuerpos de prueba de 600 mm de longitud y de sección transversal igual a la de la lámina de la cual fue extraído —73 mm x 24 mm—. Se prepararon dos muestras: una con 40 probetas, conteniendo un *finger-joint* en la mitad de su longitud, y la otra con 40 probetas de madera sólida, sin *finger-joint*. Ambas muestras fueron acondicionadas en cámara climatizada a 20 °C y 65 % de humedad relativa. Los cuerpos de prueba fueron ensayados de cara a flexión en cuatro puntos en máquina universal con una celda de carga de 50 kN, de acuerdo a EN 408 (2012).

Las resistencias características de flexión para cuerpos de prueba con unión dentada y para madera sólida fueron determinadas de acuerdo a las EN 384 (2016) y EN 14358 (2016).

EVALUACIÓN DE LAS VIGAS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA

ENSAYOS DE FLEXIÓN

La evaluación del desempeño mecánico de las VMLE se realizó mediante ensayos de flexión en cuatro puntos en cuerpos de prueba de tamaño estructural en un pórtico con una celda de carga de 200 kN, de acuerdo a la EN 408 (2012).

La resistencia característica de flexión y el módulo de elasticidad medio se determinaron de acuerdo a la EN 384 (2016). El valor característico de la resistencia de flexión fue corregido por altura de la viga y por espesor de láminas, de acuerdo a la EN 14080. Inmediatamente después de la realización de los ensayos de flexión, de cada VMLE se extrajo, cerca de la zona de rotura, una probeta para determinar el CH y la densidad.

ENSAYOS DE INTEGRIDAD DE LA LÍNEA DE ADHESIVO

El desempeño de la línea de cola se evaluó mediante ensayos de delaminación de 40 cuerpos de prueba, de 73 mm x 192 mm x 70 mm, extraídos de las VMLE previamente ensayadas a flexión, siguiendo los lineamientos de la EN 14080 (2013).

Resultados y discusión

PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN

Los parámetros de producción fueron ajustados adaptando la tecnología de la fábrica a los requisitos de la EN 14080, e incluyeron:

- clasificación visual y definición de longitud mínima de bloques —40 cm—;
- empleo de adhesivo poliuretánico estructural en uniones endentadas y de láminas;
- adopción de diente estructural de 15 mm de longitud;
- presión de ensamble de 10 N/mm² y de 1,2 N/mm² en láminas y vigas respectivamente;
- configuración de vigas respetando distancia mínima de uniones —12 cm— entre láminas adyacentes;
- control de cantidad de adhesivo y presión aplicada en endentados y láminas; control de tiempos de prensado y curado.

Los requisitos de temperatura y humedad relativa del aire del recinto de producción para el almacenado de madera y para las etapas de encolado no fueron cumplidos debido a los costos operativos que conllevan para la empresa.

COMPORTAMIENTO DE LA UNIÓN ENDENTADA

Analizados los resultados de los ensayos y habiendo determinado las propiedades de densidad y resistencia a la flexión de cuerpos de prueba de madera

sólida sin unión dentada y cuerpos de prueba con unión dentada (Moya et al., 2019), se desprende que los valores medios y característicos de la resistencia de flexión de las uniones dentadas resultaron inferiores a los correspondientes de la madera y son congruentes con la idea de que la unión dentada constituye un punto crítico de la lámina endentada-encolada. La configuración geométrica de las uniones dentadas posibilita la concentración de tensiones en la zona del endentado, debilitando la pieza e impidiendo alcanzar valores de resistencia similares a los de la madera sólida, aunque exista correcta adherencia entre las partes ensambladas.

DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DE LAS VIGAS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA

Analizados los resultados de los ensayos a flexión de las VMLE y habiendo determinado las propiedades de densidad y resistencia a la flexión y módulo de elasticidad (Moya et al., 2019), se desprende que los valores de las propiedades de flexión y de la densidad de las vigas fabricadas en este estudio pueden ser comparados con los estipulados para la MLE de sección transversal homogénea indicados en el sistema europeo de clases resistentes. De la comparación se desprende que las VMLE de *Eucalyptus grandis* y adhesivo PUR, fabricadas según los parámetros de producción definidos en el presente trabajo, permiten su asignación a la clase resistente GL 24 h de EN 14080 (2013).

Luego de finalizado el ensayo de delaminación se observó un 90 % de probetas delaminadas (Moya et.al, 2019). Este comportamiento deficiente puede ser atribuido al carácter rudimentario del proceso de encolado realizado en condiciones ambientales no controladas que eventualmente afectaron la viscosidad del adhesivo y por ello el caudal de flujo expedido por el aplicador durante el encolado.

Conclusiones

Las condiciones de fabricación de madera laminada encolada presentadas en este trabajo, adaptando la tecnología disponible en Uruguay a los requisitos del cuerpo normativo europeo, permitieron obtener madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* y adhesivo poliuretánico con características estructurales.

Los resultados de los ensayos de flexión sobre las uniones dentadas indicaron un correcto desempeño estructural de las uniones dentadas fabricadas. El procedimiento y los parámetros involucrados en la fabricación de láminas pueden ser considerados como aceptables.

Las vigas de madera laminada encolada fabricadas según los requisitos de la EN 14080, considerando las reglas de la clasificación visual de la IRAM 9662-2, mostraron resultados experimentales de propiedades que permitieron su asignación a la clase resistente GL24h de EN 14080.

Los ensayos de delaminación de las vigas de madera laminada de *Eucalyptus grandis* y adhesivo poliuretánico mostraron un comportamiento deficiente del sistema adhesivo-adherente en el plano de encolado entre dos láminas adyacentes. A efectos de mejorar el desempeño de las vigas, se sugiere mejorar las condiciones climáticas del recinto de fabricación en las etapas de encolado y prensado de las vigas.

Los resultados de este trabajo y la metodología de fabricación adoptada sirvieron de insumos para la redacción de una norma UNIT para productos estructurales de madera laminada encolada.

Bibliografía

Aenor. UNE-EN 408+A1. (2012). *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

Aenor. UNE-EN 14080 (2013). *Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

Aenor. UNE-EN 338 (2016). *Madera estructural. Clases resistentes*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

Aenor. UNE-EN 384. (2016). *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Ciudad: Madrid. Asociación Española de Normalización y Certificación.

Aenor. UNE-EN 14358 (2016). *Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

ANII. (2013). *Estudio de las propiedades estructurales de vigas de madera laminada encolada de Eucalyptus grandis producidas en Uruguay para su asignación a clases resistentes*. PR FSA_1_2013_1_12987. Montevideo: Agencia Nacional de Investigación e Innovación.

Baño, V. y Moya, L. (2015). *Pliego de condiciones técnicas para la madera estructural en la edificación en Uruguay*. Documento de investigación n° 4, Facultad de Arquitectura, Universidad ORT, Montevideo. Disponible en: <https://dspace.ort.edu.uy/bitstream/item/2845/documentodeinvestigacion4.pdf>

Blass, H.J., Aune, P., Choo, B.S., Görlacher, R., Griffiths, D.R., Hilson, B.O., Racher, P. y Steck, G. (1995). *Timber Engineering STEP 1. First Edition, Centrum Hout, The Netherlands, A8/1-A8/8*.

IRAM 9662-2. (2015). *Madera laminada encolada estructural. Clasificación de tablas por resistencia, Parte 2: Tablas de Eucalyptus grandis*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

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*, 21(3), pp. 327-340. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000305>

Mvotma. (2019). *Especificaciones para madera estructural. Programas de vivienda*. Resolución ministerial RM 1094/2019.