

Informe final publicable de proyecto

Compuestos estructurales madera-hormigón a partir de especies de madera de rápido crecimiento

Código de proyecto ANII: FMV_3_2018_1_148906

30/09/2021

CETRANGOLO, GONZALO (Responsable Técnico - Científico)

CABRERA PERDIGON, Gonzalo (Investigador)

DOMENECH AGUIAR, Leandro (Investigador)

GODOY MACHADO, DANIEL (Investigador)

MOYA SILVA, Laura Maria (Investigador)

AULET, Alina (Investigador)

BAÑO GÓMEZ, Vanesa (Investigador)

BÖTHIG GARGIULO, Silvia (Investigador)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE INGENIERÍA (Institución Proponente) \\
UNIVERSIDAD ORT. FACULTAD DE ARQUITECTURA \\
LABORATORIO TECNOLÓGICO DEL URUGUAY. FUNDACIÓN LATITUD

Resumen del proyecto

En la situación actual del mundo, con una creciente concientización del impacto de la industria en general y en especial de la industria de construcción en la generación de gases de efecto invernadero, la construcción en madera es un fenómeno de tendencia mundial. La creciente actividad en el área se basa principalmente en las políticas ambientales y trae aparejado la necesidad de incrementar la productividad de la construcción (Ramage et al. 2017), principalmente usando productos de ingeniería de madera (EWP-Engineered Wood Products), como son la madera laminada encolada (MLE) y los paneles de madera contralaminada (CLT-Cross Laminated Timber), para nuevos sistemas estructurales.

En particular, en nuestro país las propiedades estructurales de la madera de plantaciones uruguayas (*Pinus elliottii*/taeda y *Eucalyptus grandis*) fueron estudiadas por Moya et al. (2017), Baño et al. (2015) y Domenech et al. (2017). Los resultados de estas investigaciones sirvieron como base para la creación del Comité UNIT de “Madera Estructural” en agosto 2017. El comité ha aprobado la norma de clasificación visual estructural de la madera aserrada de pino uruguayo (UNIT 1261:2018) y de eucalipto uruguayo (UNIT 1262:2018). A partir de los resultados obtenidos en el proyecto INNOVAGRO, financiado por la ANII se llevaron adelante varias normas uruguayas sobre madera estructural.

En este contexto se desarrolló el siguiente proyecto, donde se diseñaron y modelaron elementos estructurales madera-hormigón con madera de procedencia uruguaya fabricada en vigas de CLT en Francia. Estos resultados se presentan en este informe. Específicamente el diseño con madera de procedencia uruguaya de compuestos madera-hormigón y su caracterización dinámica.

Ingeniería y Tecnología / Ingeniería Civil / Ingeniería Civil / Madera estructural

Palabras clave: madera estructural / Compuestos / Hormigón /

Introducción

El trabajo de investigación comenzó con el estudio preliminar de pequeñas probetas de madera-hormigón. El objetivo de este estudio fue conocer y analizar el comportamiento a corte de secciones mixtas de madera laminada encolada (MLE) y hormigón, unidas mediante conectores metálicos a corte, y utilizando productos y mano de obra local. Los resultados de este trabajo fueron publicados en el 4to Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera (Domenech et al, 2019).

Los resultados obtenidos fueron luego aplicados al diseño y cálculo de un entrespezo de madera-hormigón, destinado a actividades deportivas. Este trabajo, realizado por dos estudiantes de grado en el marco del Proyecto de Investigación e Innovación en Ingeniería Estructural (Contreres y Durán, 2020), fue de gran utilidad para analizar la potencialidad de los compuestos madera-hormigón fabricados con materia prima nacional.

En particular, en nuestro país las propiedades estructurales de la madera de plantaciones uruguayas (*Pinus elliottii*/taeda y *Eucalyptus grandis*) fueron estudiadas por Moya et al. (2017), Baño et al. (2015) y Domenech et al. (2017). Los resultados de estas investigaciones sirvieron como base para la creación del Comité UNIT de “Madera Estructural” en agosto 2017. El comité ha aprobado la norma de clasificación visual estructural de la madera aserrada de pino uruguayo (UNIT 1261:2018) y de eucalipto uruguayo (UNIT 1262:2018). A partir de los resultados obtenidos en el proyecto INNOVAGRO, financiado por la ANII se llevaron adelante varias normas uruguayas sobre madera estructural.

Es por este motivo que el estudio y desarrollo de nuevas tecnologías vinculadas a la madera es necesario en nuestro medio. Para ello se plantea en el presente trabajo, un estudio de los compuestos madera-hormigón, aprovechando las ventajas comparativas que presentan ambos materiales, especialmente la abundancia de madera en nuestro país.

Metodología/diseño del estudio

El análisis teórico de una sección compuesta trabajando a cortadura simple comprende dos factores fundamentales: la fuerza que es capaz de resistir la unión, y el deslizamiento que se da entre ambos materiales componentes al variar la fuerza aplicada.

Para determinar los desplazamientos entre las superficies de madera y hormigón se modela a la unión mediante un

resorte con una determinada constante elástica, llamada módulo de deslizamiento (K_{ser}). Esta se obtiene de forma experimental, aunque existen diferentes métodos de cálculo teórico, propuestos por varios autores. Este trabajo se centra en la comparación de los resultados experimentales con los obtenidos mediante dos métodos de cálculo, propuestos por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2006) y por Ceccotti (1995).

En cuanto a la fuerza que es capaz de resistir la unión, actualmente no existe una norma que plantee cómo determinar la capacidad resistente en el caso madera-hormigón. Sin embargo, el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2006) sugiere que para su cálculo se utilicen las ecuaciones de Johansen, considerando a el hormigón como una placa de acero gruesa. Esta consideración es correcta si la losa es construida con un hormigón cuya resistencia a compresión es tal que la madera se aplaste antes que la zona de la losa solicitada por el conector plastifique. En este caso, las deformaciones internas en el hormigón pueden asumirse despreciables, por lo que la losa se comporta como una placa de acero gruesa. Este cálculo plantea tres posibles fallas de la unión: i) aplastamiento de la madera; ii) combinación de plastificación de la madera y plastificación simple del conector; y iii) plastificación de la madera y plastificación del conector, generando una doble rótula.

Dado que el proyecto se enfoca en analizar compuestos madera-hormigón, existen en particular tres componentes a definir: el hormigón, la madera y los conectores, o el sistema de conexión para lograr el trabajo en conjunto de ambos materiales. Se presentan a continuación los análisis realizados para elegir cada uno de estos componentes.

Hormigón

En lo que respecta al hormigón de las probetas que serán fabricadas, se buscó definir un material que sea de fácil acceso en el medio local, por lo que se trabajará con un hormigón armado HA-C30, de resistencia cilíndrica característica a los 28 días de 30 MPa.

Se entiende que obtener resistencias mayores puede requerir el empleo de algún cemento especial o no tan convencional al que no se accede directamente en el medio local y dado que el objetivo del trabajo es buscar soluciones que sean fácilmente construibles con los materiales disponibles y obtener resultados representativos que luego se puedan reproducir en obra, no es conveniente realizar los ensayos que se harán posteriormente en la investigación considerando resistencias mayores.

Con respecto a la ejecución del hormigón, se descartó la opción de elaborar el hormigón premoldeado por la dificultad que implica luego establecer la conexión entre ambos materiales. En vista de lo anterior se utilizará entonces hormigón hormigonado in situ.

Por otro lado, para la ejecución de las tareas de modelado, no es necesario trabajar con un único tipo de hormigón armado, dado que no implica mayores dificultades variar la resistencia característica del mismo. Se podrá entonces modelar probetas con diferentes resistencias, que variarán entre 25 MPa y 40 MPa, para no perder de vista el hecho de que sigan siendo valores razonables en el medio local. Esto tiene la ventaja de que permite analizar cómo varían las propiedades resistentes de la sección con el aumento o disminución de la resistencia del hormigón.

Madera

El factor principal que incide en la definición del tipo de madera es uno de los objetivos finales de la investigación: desarrollar compuestos madera-hormigón que puedan ser utilizados como entresijos de edificios, y losas de puentes vehiculares y peatonales.

Dicho esto, es imprescindible que la solución permita generar secciones de tamaño considerable, y si bien esto no es una limitante para el hormigón, sí lo es para la madera. Se contrastó entonces, en vista de lo anterior, las opciones disponibles: en particular, madera laminada encolada (MLE) y madera aserrada.

Comenzando por la madera aserrada, se denomina madera aserrada para uso estructural a la utilizada para fines portantes y que ha sido sometida a un procesado mínimo de transformación que no incluye ni encolados ni ensambles de unión dentada, y que se obtiene mediante aserrado longitudinal del tronco y cepillado.

En cuanto a las dimensiones, las piezas de madera aserrada que se ofrecen en el mercado nacional tienen un canto máximo de 8 pulgadas, que equivale a unos 20 cm aproximadamente. Esta dimensión, luego de secada y cepillada la madera, se reduce a unos 185 o 190 mm, valor bastante limitado para la investigación. La otra gran limitación, si no mayor a la comentada, es el ancho de las secciones. Raramente se consiguen piezas de 4" de ancho, y eso equivale a 90 mm luego de secada y cepillada la pieza.

Por otro lado, además de que la madera aserrada no permite generar secciones considerables, la situación de producción de madera aserrada en el país no está muy desarrollada con respecto a su uso estructural. No es posible hoy en día adquirir madera aserrada certificada para uso estructural en el país; aunque sí existen normas de clasificación visual para madera aserrada de uso estructural tanto de pino (UNIT 1261:2018) como de eucalipto (UNIT 1262:2018), que permiten clasificar la madera de pino en dos clases resistentes y la de eucalipto en una clase resistente, respectivamente. Se puede entonces adquirir la madera, y luego con apoyo en las normas nacionales comentadas clasificarla para su uso manualmente.

Continuando ahora con la MLE, este es un tipo particular de producto de madera encolada. Los productos de madera encolada son aquellos que están formados por la unión, mediante encolado, de piezas de madera aserrada. El encolado suele darse en dos planos de las piezas: en las testas mediante una unión dentada (finger joint), y en las caras.

La MLE es también conocida como glulam (por su nombre en inglés). Los elementos de MLE consisten en piezas de sección rectangular constituidas por láminas de madera aserrada (de un espesor que varía entre 6 y 45 mm) con la dirección de la fibra paralela y encoladas entre sí según la cara con adhesivos durables y resistentes desde el punto de vista estructural y ambiental.

Como ventajas, tiene asociadas el logro de secciones de mayores dimensiones, algo que es particularmente buscado. Para manejar un orden de magnitud se pueden lograr secciones con un ancho hasta de 25 cm y un canto hasta de 2 metros. Se tiene entonces que el canto máximo alcanzable con piezas de MLE es del orden de 10 veces mayor que el alcanzable con madera de tipo aserrada. Además, este tipo de madera admite una relativa flexibilidad en la geometría, permitiendo lograr elementos curvados y de canto variable.

Por contraparte, las desventajas que tiene utilizar este tipo de madera están asociadas a un mayor costo de la solución planteada, a una solución que es menos ecológica por el uso de colas, y que además su construcción consiste en un proceso industrializado, no siendo posible efectuar una construcción in situ.

Con respecto a la producción de la MLE, dado que el proyecto se basa en crear los compuestos TCC con materiales del medio local, se busca que estas piezas se construyan en el país con madera nacional, pero desafortunadamente no existe hoy en día ninguna empresa local que construya este tipo de madera certificada. De hecho, cuando se planificó el proyecto de investigación, se preveía que al día de la fecha existiera operativa alguna empresa con producción certificada de MLE; pero por distintos motivos, este hito se ha demorado. No obstante, esto no impide crear este tipo de compuestos con madera local.

Actualmente, existe una empresa francesa llamada SIMONIN, asociada con la empresa uruguaya URUFOR, que fabrica elementos estructurales de madera laminada encolada utilizando madera nacional de eucalipto Red Grandis (clon de la especie *Eucalyptus Grandis* cultivado en el norte del país). Es posible entonces importar la madera laminada encolada certificada, que es fabricada en Francia con madera nacional de eucalipto, y de esa forma obtener entonces a partir de los ensayos experimentales el desempeño real de nuestra madera. Además la madera ya viene clasificada y con las propiedades resistentes especificadas, algo de relativa importancia para que el modelado sea más exacto y se obtengan resultados más precisos.

Conectores

Este es un componente clave en la sección dado que es el que va a garantizar la unión y el trabajo conjunto entre los materiales, y es sin duda en el que existe mayor arbitrariedad en cuanto a elección y también mayor incertidumbre en cuanto al comportamiento y a las propiedades de los mismos

Existen muchos tipos de sistemas que podrían materializar la unión para este tipo de compuestos, entre los que encontramos distintos grandes grupos. Por un lado existen uniones a través de conectores como son los clavos, tornillos, pasadores de acero, o barras de acero para refuerzo de hormigón. Por otro lado existen uniones generadas a través de muescas en la madera, basadas en la fricción entre ambos materiales. Además, también existen conexiones que combinan el uso de las indentaciones en la madera con el uso de conectores. Por último se pueden mencionar las uniones con adhesivos.

En particular, se busca utilizar uniones que, o bien sean ofrecidas por proveedores disponibles en el medio local, y en este caso no conformen un sistema de unión muy complejo, o bien sean reproducibles manualmente, con materiales fácilmente accesibles y de rápida ejecución.

Se analizarán entonces los sistemas de unión más simples, de relativa fácil ejecución. Entre estos se tienen las uniones realizadas con conectores materializados a través de tornillos roscados o de barras de acero para refuerzo de hormigón fijadas con algún adhesivo estructural tipo epoxi, y las uniones materializadas a través de indentaciones en la madera.

Resultados, análisis y discusión

Se diseñaron tres tipos de probetas con distintos tipos de conectores. Uno con varilla de acero en la unión madera-hormigón, previo perforación de la madera con taladro y fijación con epoxi del acero, otra con tornillos en la madera a 45 grados en la unión madera-hormigón. Y por último con madera con entalladuras y conexión con armadura de acero en dichas entalladuras. El modelado de las uniones mostro comportamiento similar, siendo la que mejor desempeño mostro desde el punto de vista mecánico la unión mediante entalladura y armadura de acero.

El modelado de la probeta con entalladuras se realizó utilizando el programa computacional COMSOL Multiphysics. Este consiste en un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos en 3D para varias aplicaciones físicas y de ingeniería.

Una vez que se inicia el software, se debe seleccionar la dimensión del espacio en la que se modelará el problema. El modelado de la viga se realizó utilizando elementos en tres dimensiones. Luego, se procede a seleccionar la física del problema, la cual en este caso corresponde a la Mecánica del Sólido. Por último resta definir el tipo de estudio a realizar. El estudio que se seleccionó para el análisis es el estudio estacionario, debido a que el principal objetivo del modelado es obtener la rigidez de la viga con este medio de conexión.

Una vez realizada la geometría, se le asignaron los materiales correspondientes a cada bloque. Cabe destacar que el hormigón se modeló como un material isótropo, y se consideraron distintos tipos de hormigón en el modelado, para poder concluir acerca de la influencia que tiene este en la rigidez de la viga. Se presentan entonces en la Tabla 1 los distintos hormigones considerados, junto con las propiedades introducidas en el software.

Tabla 1. Tipos de hormigón utilizados en el modelado con sus propiedades

Hormigón ν E (GPa) ρ (kg/m³)

HA-C25 0.2 31.0 2500

HA-C30 0.2 33.0 2500

HA-C35 0.2 34.0 2500

HA-C40 0.2 35.0 2500

Por otro lado, es sabido que la madera no es un material isótropo, dado que las propiedades físicas y mecánicas de la misma varían en función de la dirección del esfuerzo con relación a la orientación de las fibras. Se dice que la madera en realidad es un material ortótropo, puesto que presenta 3 planos de simetría elástica perpendiculares entre sí.

Se presentan entonces en la Tabla 2 las propiedades de la madera utilizada, que se introdujeron en el modelo para modelar el material. Cabe destacar que los valores correspondientes a los coeficientes de Poisson son empíricos.

Tabla 2. Propiedades elásticas de la madera utilizadas en el modelado

Madera E₀ (GPa) E₉₀ (GPa) G (GPa) ν_{TL} ν_{LR} ν_{TR}

GL-24h 11.500 0.767 0.719 0.033 0.390 0.380

El último paso de importancia previo a realizar el análisis para obtener los resultados buscados fue el modelado de la unión entre ambos materiales. La unión entre los materiales se modeló, utilizando herramientas apropiadas del software, de modo que no exista transferencia de esfuerzos entre los bordes en contacto en las zonas en las que estos tiendan a separarse respectivamente, es decir, se busca que la unión trabaje únicamente a compresión.

A

hora sí, completado el modelo de la probeta, se procede a presentar y a analizar los resultados obtenidos.

Se presenta también en la Tabla 3 los resultados obtenidos en cuanto al desplazamiento máximo para cada modelo realizado; asimismo, se indica la carga que fue aplicada en la cara vertical de la probeta, que fue en todos los modelos la misma. Cabe destacar que tanto la carga como el desplazamiento se consideran positivos en la dirección -z.

Tabla 3. Resultados obtenidos de los modelos realizados

Modelo Hormigón Carga (kN/m²) Desplazamiento (mm)

1 HA-C25 10.0 0.427

2 HA-C30 10.0 0.422

3 HA-C35 10.0 0.419

4 HA-C40 10.0 0.417

Ahora resta obtener la relación teórica que nos da el desplazamiento en función de la rigidez para poder hallar esta última. Como es sabido, estamos en presencia de una viga simplemente apoyada con la acción de una carga uniforme en su cara superior. La carga q aplicada es una carga por unidad de área, debido a que el software trabaja con elementos finitos sólidos en tres dimensiones, no obstante, la misma puede ser fácilmente traducida en una carga lineal equivalente q_l si consideramos el ancho de la cara cargada, que es de 0,5 m. Dicho esto se tiene que para todos los modelos $q_l=0.5m \times q=5kN/m$.

Por otro lado, si asumimos válida la teoría de Navier-Bernoulli, se obtiene que el desplazamiento máximo δ producido por una carga uniformemente distribuida en una viga simplemente apoyada se da en el punto medio de la misma y tiene un valor dado por la ecuación siguiente, de donde se despeja directamente la rigidez efectiva de la viga compuesta.

$$\delta = (5q_l L^4) / (384(EI_{ef}))$$

Cabe destacar que la madera presenta en muchos casos deformaciones por corte apreciables, ajustándose su ley de deflexiones en mejor medida a la teoría de Timoshenko. De todos modos, como en este caso el modelo es compuesto por madera y hormigón, se prefirió trabajar con la teoría de Navier-Bernoulli, de forma más simplificada. Si se quisiera hacer un estudio más detallado, en el que se analice la influencia de la deformación por corte, se podría modelar un ensayo de flexión a cuatro puntos, lo que permite obtener una zona de la viga donde no existe deformación por corte. Este trabajo se realizará más adelante. Se presentan entonces las rigideces efectivas para cada modelo en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados obtenidos de los modelos realizados

Modelo Hormigón Desplazamiento (mm) EI_{ef} (Nmm²)

1 HA-C25 0.908 5.96 $\times 10^{12}$

2 HA-C30 0.900 6.03 $\times 10^{12}$

3 HA-C35 0.895 6.07 $\times 10^{12}$

4 HA-C40 0.892 6.10 $\times 10^{12}$

De lo anterior se desprende, en primer lugar, que si comparamos la rigidez obtenida a través del modelo utilizando el hormigón HA-C30, con la obtenida para la probeta cuya unión es atornillada, se observa que la rigidez de la probeta entallada es superior, indicando que la unión entallada aportaría mayor rigidez al conjunto que la unión atornillada. De todos modos, no hay que perder de vista que los modelos usados para obtener ambas rigideces tienen hipótesis diferentes. Por ejemplo, este modelo en 3D tiene en cuenta la ortotropía de la madera, el ancho colaborante de la losa, etc. Cabe destacar, que una vez que se ensayen las probetas, podrá ser comprobado cuál de ellas presenta una mayor rigidez.

En segundo lugar, con respecto a la influencia del hormigón en la rigidez del conjunto, se observa que si bien la rigidez aumenta con el aumento de la resistencia, el aumento es casi insignificante. De lo anterior se deduce que no es de mayor interés utilizar hormigones resistentes para crear estos compuestos, dado que la rigidez y la capacidad portante estará más gobernada por la madera, puesto que es el material más deformable.

De los trabajos experimentales se desprende que los modelos predicen correctamente el comportamiento modelado, y que la respuesta dinámica es acorde a lo esperado.

Conclusiones y recomendaciones

Desde el punto de vista ingenieril es posible la fabricación de elementos estructurales compuestos madera-hormigón y su desempeño mecánico es el esperado. El comportamiento dinámico muestra una mejora en el desempeño frente a vibraciones al compararlo con elementos fabricados solamente de madera.

De todas formas, hasta que no se fabriquen en el Uruguay vigas de CLT estructurales, no es viable desde el punto de vista económico poder diseñar entresijos o puentes de madera-hormigón. Al momento de tener fabricantes locales, el costo de

la mano de obra para realizar las entalladuras puede hacer que el mejor diseño desde el punto de vista estructural no sea el más económico, entre las otras dos alternativas, resulta más económico la realización de los compuestos con tornillos a 45 grados, siendo su comportamiento desde el punto de vista estructural adecuado.

De los trabajos experimentales se desprende que los modelos predicen correctamente el comportamiento modelado, y que la respuesta dinámica es acorde a lo esperado.

Los elementos estructurales madera-hormigón mostraron un buen desempeño con cargas de servicio, siendo su respuesta dinámica mejor que la esperable en elementos de madera.

Con este proyecto se demostró que es viable la fabricación de elementos estructurales compuestos con materiales nacionales, y se desarrolló una metodología de cálculo, la cual es presentada en los informes de avance. Se concluye que los elementos compuestos tienen buenas prestaciones mecánicas, el único obstáculo que se vislumbra es la aparición de productores locales que fabriquen vigas de CLT en nuestro país para hacer más viable su utilización desde el punto de vista económico.

Referencias bibliográficas

- Baño V., Moya L., O'Neill H., Cardoso A., Cagno M., Cetrangolo G., Domenech L., Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcción con madera, Montevideo, 2016.
- Baño V., Pérez-Gomar C., Vega A., Godoy D., Cardoso A., Moya L. (2019). Relationship between structural properties of sawn timber and glulam beams of Uruguayan Eucalyptus and Pinus species. Universidad de la República y Universidad ORT Uruguay, Montevideo, Uruguay.
- BS-EN 26891:1991, ISO 6891:1983. Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics. BSI, London, United Kingdom.
- BS-EN 1380:2009. Timber structures. Test methods. Load bearing nails, screws, dowels and bolts. BSI, London, United Kingdom.
- Ceccotti, A. (1995). Timber-concrete composite structures (E13). En Blass et al, Timber Engineering STEP 2. Centrum Hout, Almere, Netherlands.
- Contreres Á., Durán M. (2020). Diseño de cancha polideportiva sobre entresuelo de sección mixta madera-hormigón. Tesina de grado (2018-2020). Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- CTE-SE-AE. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación (2019). Ministerio de Fomento, Madrid, España.
- Domenech L., Baño V., O'Neill H., Moya L., Informes técnicos de normalización de madera estructural. N 1. Madera aserrada de Pinus elliottii/taeda, Montevideo, Uruguay, 2017.
- Domenech L., Durán, M., Contreres, Á., Baño, V. (2019). Comportamiento a corte de compuestos madera-hormigón fabricados de madera laminada encolada uruguaya. 4to Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera, Montevideo, Uruguay.
- He G., Xie L., Wang X., Yi J., Peng L., Chen Z., Gustafsson P.J., and Crocetti R. (2016). Shear behavior study on Timber-Concrete Composite Structures with Bolts. BioResources, v. 11, n. 4, p. 9205-9218.
- IRAM 1524 (1982). Hormigón de cemento portland. Preparación y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral. IRAM, Buenos Aires, Argentina.
- Moya L., Domenech L., Cardoso A., Oneill H., Baño V., Proposal of visual strength grading rules for Uruguayan pine timber, Eur. J. Wood Wood Prod. 75 (2017) 1017–1019. doi:10.1007/s00107-017-1208-5.
- Moya L., Pérez-Gomar C., Vega A., Sánchez A., Torino I., Baño V. (2019). Relación entre parámetros de producción y propiedades estructurales de madera laminada encolada de Eucalyptus grandis. Maderas. Ciencia y Tecnología, v. 21, n. 3.
- Ramage M.H., Burrigge H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D.U., Wu G., Yu L., Fleming P., Densley-Tingley D., Allwood J., Dupree P., Linden P.F., Scherman O., The wood from the trees: The use of timber in construction, Renew. Sustain. Energy Rev. 68 (2017) 333–359. doi:10.1016/j.rser.2016.09.107.
- UNE-EN 1991-1-1:2019. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-1: Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios, y sobrecargas de uso en edificios (2019). AENOR, Madrid, España.
- UNE-EN 1995-1-1:2006. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación (2006). AENOR, Madrid, España.
- UNE-EN 338:2016. Madera estructural. Clases resistentes (2016). AENOR, Madrid, España.
- UNIT 1261:2018. Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de pino taeda y pino elliotti (Pinus taeda y Pinus elliottii) (2018). UNIT, Montevideo, Uruguay.
- UNIT 1262:2018. Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de eucalipto (Eucalyptus grandis) (2018). UNIT, Montevideo, Uruguay.
- UNIT 33:1991. Norma para cargas a utilizar en el proyecto de edificios (1991). UNIT, Montevideo, Uruguay.
- UNIT-NM 101:1998. Hormigón. Ensayo de compresión de probetas cilíndricas (1998). UNIT, Montevideo, Uruguay.

Licenciamiento

Reconocimiento 4.0 Internacional. (CC BY)