

FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE PUENTE VEHICULAR A PARTIR DEL DESARROLLO DE PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA DE PINO URUGUAYO

MANUFACTURING A PROTOTYPE OF A VEHICULAR BRIDGE FROM WOOD-PINE ENGINEERED PRODUCTS DEVELOPED IN URUGUAY

Vanesa Baño ⁽¹⁾ (P), Carlos Mazzey ⁽²⁾, Abel Vega ⁽³⁾, Daniel Godoy ⁽⁴⁾, Laura Moya ⁽⁵⁾

- (1) Dr. Ing. Montes, Profesor Adjunto, IET. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay
(2) Estudiante Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay
(3) Dr. Ing. Montes, Becario Postdoctoral, IET. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay
(4) MSc. Arq., Profesor Adjunto, IEM. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay
(5) PhD. Arq., Profesor Adjunto, Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay, Montevideo, Uruguay
Dirección de contacto: vanesab@fing.edu.uy; (P) Presentadora

Código de identificación: T7-23

Resumen

La disponibilidad actual de madera de pino (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) en Uruguay redundará en un interés por parte del gobierno en desarrollar productos de alto valor agregado. Su uso en ingeniería civil (grandes edificaciones y puentes), además de incrementar este valor, supondría un consumo elevado de volumen de madera. En base a investigaciones recientes, las propiedades mecánicas de la madera aserrada de esta especie de rápido crecimiento se corresponderían con una clase resistente C14. Con el objetivo de usarla en el diseño de puentes para el paso de vehículos de hasta 36 t y con luces de hasta 15 m, fue necesario desarrollar productos de ingeniería de la madera para su uso en clase de servicio 3. Dado que en Uruguay no existe normativa que regule la fabricación de estos productos estructurales, se plantearon unos requisitos de fabricación de vigas de madera laminada encolada y de paneles de madera contralaminada, basados en la normativa europea, y adaptados a las condiciones locales. Para tener una primera aproximación de la resistencia de las vigas y del proceso de fabricación, se realizaron ensayos de flexión sobre las vigas encoladas con adhesivo Resorcinol. En base a estos resultados, se diseñó y fabricó un prototipo de puente de 8 m de luz para el paso de vehículos de hasta 18 t. Se presenta como resultado del presente trabajo el proceso de fabricación del puente, modular y prefabricado, para su rápida instalación en los predios de las explotaciones forestales y agrícolas.

Palabras clave: productos de ingeniería de madera; puente vehicular

Abstract

*The availability of pine wood in Uruguay (*Pinus taeda* and *Pinus elliottii* mainly) results in a government interest in the development of high added value products. Its use in civil engineering (buildings and bridges), would increase this added value and would imply a high wood consumption. Based on recent research, the mechanical properties of the sawn timber of these fast growing species would correspond to a strength class C14. Engineered wood products in service class 3 were used for the design of vehicular bridges up to 36 t and with span up to 15 m. Since there are no national regulations for the manufacture of wood structural products, the requirements for the fabrication of glued laminated beams and cross laminated timber panels based on European standards, adapted to local conditions. Bending tests were made on 8 specimens of glulam beams (using resorcinol adhesive) to have a first approximation of the bending strength of the beams. Based on the results, a prototype of 8 m long bridge was designed and manufactured for passing of vehicles up to 18 t. As the result of the present work, the modular and prefabricated bridge manufacturing process is presented for its fast location in agro-forestry fields.*

Keywords: engineered wood products; *Pinus taeda/elliottii*; vehicular bridge

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay existe un déficit de infraestructura vial ligada al sector agrícola y forestal debido al aumento de la producción de granos en los últimos años y al incremento de la extracción forestal, que en 2011 superó los 10 millones de m³ (MGAP, 2010). Se considera que dicha infraestructura vial debería contemplar los requisitos para el paso de la maquinaria involucrada en la explotación y de los camiones que transportan los productos, dentro y fuera de los predios agroforestales.

Actualmente, en Uruguay, son habituales las soluciones temporales construidas con madera, para paso de camiones que transportan madera o grano, normalmente ejecutadas sin ningún tipo de comprobación estructural ni de previsión de su vida útil.

La madera y los productos de ingeniería de madera son escasamente empleados como materiales estructurales en Uruguay debido, entre otros factores, al desconocimiento del material por parte de profesionales y usuarios, a la ausencia de una normativa de madera estructural y, hasta hace poco tiempo, la escasa disponibilidad del recurso forestal-maderero de procedencia local.

En el mercado local es posible encontrar madera aserrada de pino (*Pinus taeda/elliottii*, principalmente) y eucalipto (*Eucalyptus grandis*), procedente de plantaciones locales. Dicha madera carece de especificaciones técnicas sobre su aptitud estructural, valores de sus propiedades mecánicas, durabilidad y calidad geométrica. Se está trabajando en la actualidad en la caracterización estructural de estas especies y los primeros resultados para el pino han sido recientemente publicados [1], pudiendo asignar la madera clasificada estructuralmente de esta especie a una clase resistente C14 [2].

Aunque se comercializa madera laminada encolada, las condiciones de fabricación no cumplen con los requisitos mínimos establecidos a nivel internacional para considerarlo un producto estructural. Además, dichos productos no están caracterizados, por lo que se desconocen sus propiedades mecánicas.

En cuanto al cálculo estructural, en Uruguay no existe reglamento ni normativa UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas) de cálculo estructural con madera. En base al análisis de la normativa internacional para el cálculo estructural con madera [1] analizada en el proyecto financiado por el Fondo Industrial-DNI (2013), se ha decidido emplear la normativa europea para cálculo estructural con madera recogida en el Eurocódigo 5 [3 y 4].

El problema que se pretende resolver es el de salvar accidentes geográficos (arroyos, canales, zanjas, etc.) que permitan el acceso y paso de maquinaria y de vehículos pesados durante las labores de explotación a los predios agrícolas y forestales. Este trabajo se presenta como el resultado final, de elaboración de un prototipo de puente, dentro del proyecto de investigación “Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal” en Uruguay, financiado por el Fondo FPTA-INIA (2012).

Es, por lo tanto, objetivo del presente trabajo presentar el proceso de fabricación de un prototipo del puente vehicular de 8 m de luz, prefabricado, para el paso de vehículos de hasta 18 t, realizado con productos de ingeniería de madera desarrollados en Uruguay a partir de madera de *Pinus elliottii/taeda*. Para ello, se presenta el proceso de fabricación de dichos productos de ingeniería de madera (madera laminada encolada y madera contralaminada), así como del proceso constructivo y de montaje del puente.

2. DISEÑO DEL PUENTE

2.1 Requisitos para el diseño del puente

Debido al tipo de maquinaria y vehículos implicados en los procesos productivos (cosecha de grano y extracción de madera), el puente deberá soportar elevadas sobrecargas de uso, además de

tener en cuenta la geometría acorde con las dimensiones de la maquinaria. Se resumen a continuación los requisitos tenidos en cuenta para el diseño del puente:

- La anchura mínima debe ser de 4,00 m, teniendo en cuenta que la distancia entre la cara exterior de los neumáticos, en la mayoría de los casos, no supera los 3,00 m.
- El puente no podrá tener barandas ni ningún elemento que sobrepase la cota de la cara superior de la rasante, para poder permitir el paso de vehículos cuyo ancho total, exterior a las ruedas, supere el del puente.
- Se ha adoptado, como sobrecarga de uso, el tren de cargas correspondiente al antiguo Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad [5] con carga total 36 toneladas distribuidas en tres ejes.
- Debido a las limitantes económicas del proyecto de investigación que financia la fabricación del puente, el prototipo se ha limitado a una carga máxima de 18 t distribuidas en dos ejes y a una longitud total de 8 m.
- Para su configuración, se fabricarán vigas de madera laminada encolada (MLE) y paneles de madera contralaminada (CLT) usando madera de pino nacional y adhesivo estructural Resorcinol, apto para clase de servicio 3. Los requisitos de fabricación a aplicar se basarán en las normas EN 14080 [6] (y EN 16351 [7]).

2.2 Diseño del prototipo de puente

Un objetivo primordial para el diseño del prototipo de puente fue la posibilidad de prefabricación y la facilidad de construcción y montaje, debido a la escasa accesibilidad que poseen los caminos rurales para los cuales se proyecta. Por tal motivo, se optó para la superestructura diseñar una tipología modular que pudiese ser construida en taller y transportadas al sitio en un camión-grúa para su posterior montaje.

En la definición de la geometría del puente se tuvieron en cuenta aspectos como son el peso, el tamaño de los camiones que lo transportaría, la viabilidad de fabricación de los elementos estructurales de ingeniería de madera, la facilidad de construcción en taller y la facilidad de montaje, entre otras cosas.

Así, la superestructura del puente consta de dos “huellas” por donde circulan los neumáticos de los vehículos y de la maquinaria involucrada en las labores agrícolas y forestales, separadas de acuerdo con las distancias transversales mínimas entre neumáticos. Cada huella está constituida de 4 vigas longitudinales de MLE pareadas, y un tablero superior de CLT trabajando en sentido transversal y colaborante con las vigas principales en sentido longitudinal, tal como muestra la figura 1.

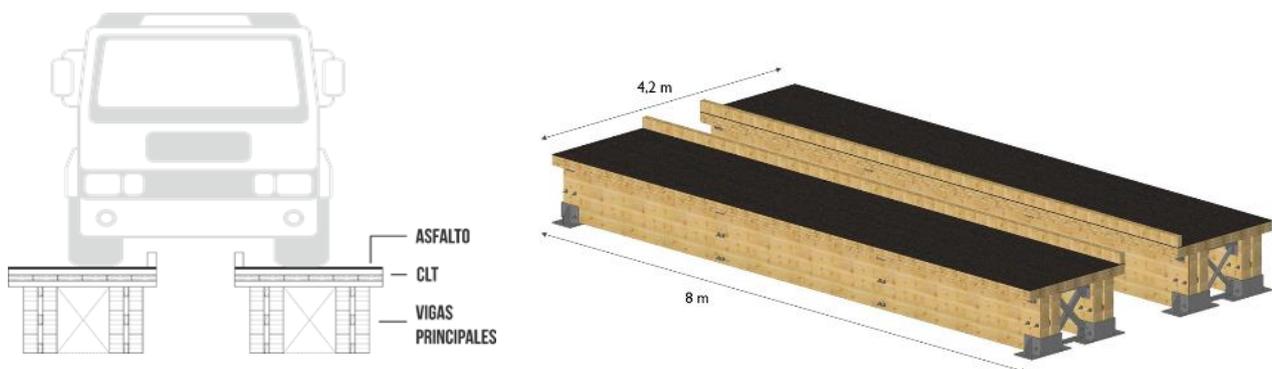


Figura 1: Diseño del prototipo de puente

Las vigas principales son de MLE y tiene una longitud de 8 m de longitud. Un problema durante el proceso de fabricación de las mismas, obligó a reducir el canto y, por lo tanto, la carga máxima que soporta el puente a unas 14 t. El tablero de cada huella está formado por 8 paneles CLT de 1 m en sentido longitudinal por 1.6 m en sentido transversal, de 3 capas de 40 mm (120 mm), donde las exteriores se encuentran orientadas en el sentido transversal. La unión entre los paneles CLT y las vigas principales se realiza mediante tornillos que aseguran la colaboración del tablero en la flexión longitudinal. Tanto en los extremos, como en los tercios centrales se disponen arriostramientos metálicos en forma de cruces de San Andrés, Figura 2.

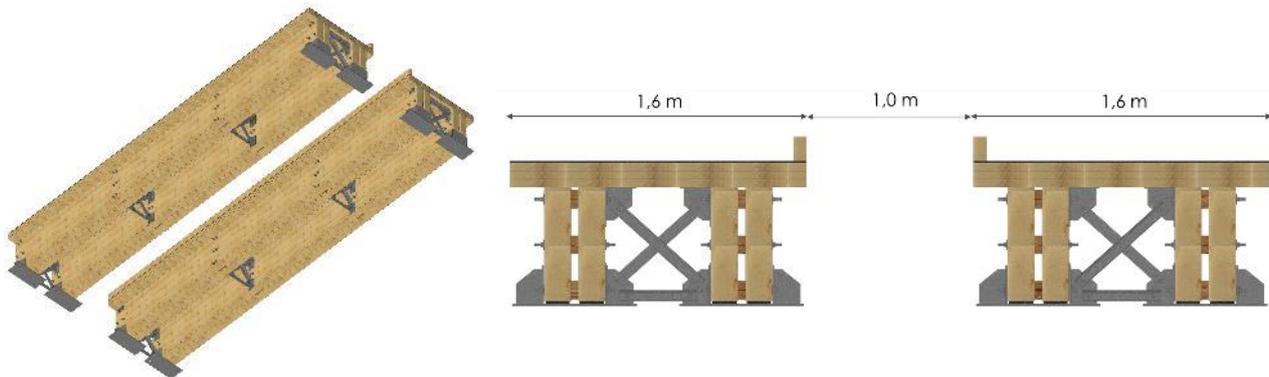


Figura 2: Detalle de arriostramiento

2.3 Cálculo estructural del puente

El cálculo estructural se realizó de acuerdo al Eurocódigo 5 [3 y 4] para las vigas de MLE. El cálculo de los paneles CLT se realizó de acuerdo al método de cálculo propuesto en el manual pro:Holz [8], basado, a su vez, en el Eurocódigo 5. Esto es, se consideraron, para las verificaciones en estado límite último, solamente aquellas láminas con la dirección paralela a la solicitación y, para estado límite de servicio, las láminas transversales como conectores.

La colaboración del tablero CLT en la flexión longitudinal de las vigas se tuvo en cuenta solamente para las verificaciones de estado límite último, estando de la seguridad en el caso del estado límite de servicio. Esto se debe a que el tablero de rodadura está formado por 8 paneles CLT, cuyas juntas deberían entrar en contacto y trabajar en conjunto comprimiéndose, y dicho estado se puede asegurar sólo cuando ocurren grandes deformaciones.

3. FABRICACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA

3.1 Fabricación de las vigas de MLE

La fabricación de las vigas de madera laminada encolada (MLE) implicó dos etapas de trabajo. La primera fue la clasificación visual de la madera de pino para uso estructural utilizando la propuesta de norma de clasificación visual estructural [1], Figura 3a). La segunda se correspondió con el proceso de laminado en sí, Figura 3b).

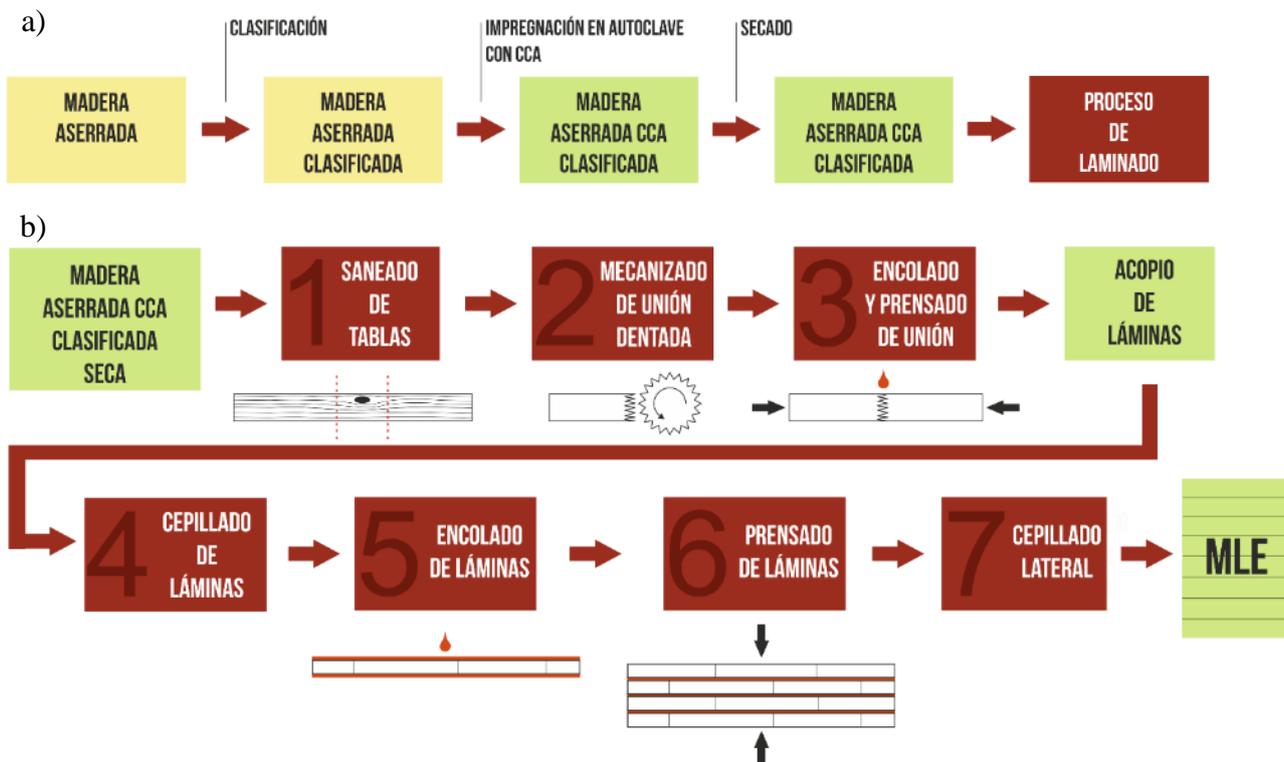


Figura 3: Esquema del proceso de fabricación de MLE

Los requisitos de fabricación de las vigas de MLE se basaron en la norma EN 14080, adaptados a las posibilidades de la industria local. En cada etapa del proceso se verificó el cumplimiento de los requisitos establecidos.

Las vigas principales del puente se elaboraron a partir de láminas de 31 mm de espesor (t) y 140 mm de ancho (b). Las láminas fueron elaboradas a partir de bloques de madera aserrada de 400 a 1000 mm de longitud de pino impregnado con sales CCA (Cobre-Cromo –Arsénico), unido mediante uniones *finger*. Aunque la longitud de diente habitual en la industria uruguaya es de 11 o 13 mm, ésta se cambió a 15 mm para conseguir mayor superficie de contacto en la unión, tal y como recomienda la norma EN 14080. La presión aplicada en la unión *finger* debería haber sido de 10 MPa durante un tiempo de 2 segundos, aunque esta presión no siempre fue controlada en el proceso de fabricación de las ocho vigas que conforman el prototipo de puente y se detectó alguna rotura de diente debido, probablemente, a una excesiva presión.

Dado que se consideró una clase de servicio 3 para las piezas de MLE, el adhesivo utilizado, tanto en la unión *finger* como en el encolado de caras de las láminas, fue Resorcinol. Debido a que la industria no tenía implementado, en la línea de fabricación, la posibilidad de aplicar un adhesivo bi-componente, éste se aplicó de forma manual en las uniones *finger*. En las láminas se aplicó de forma automática mediante rodillos incluidos en la línea de producción (Figura 4), controlando la apertura de paso del adhesivo de modo que consumiese 85 gr de adhesivo por lámina (lo correspondiente a una dosis de 450 gr/m²).



Figura 4: Encolado de lámina, prensado y vigas finalizadas

3.2 Fabricación de los paneles CLT

El proceso de fabricación de los paneles CLT se realizó de forma análoga al de las piezas de MLE, guiado por los requisitos de la norma EN 16531, adaptándose a la disponibilidad de fabricación local. Dado que no fue posible encontrar una empresa nacional con la capacidad de prensar paneles de gran tamaño, se optó por realizar paneles pequeños de 1 m de longitud y 1,6 m de ancho, que fueron utilizados para la ejecución del tablero de rodadura del puente. La prensa utilizada fue una destinada, principalmente, a la fabricación de puertas, con dimensiones máximas de prensado de 1.3 x 3.5 m².

Los paneles CLT se fabricaron a partir de piezas de madera aserrada de pino impregnado, sin uniones *finger joint* y las tablas no fueron encoladas de canto. El espesor de lámina fue de 40 mm y se utilizó el mismo adhesivo resorcinol que para la fabricación de las vigas laminadas. Éste se aplicó de forma manual en la misma dosis teórica que en las vigas. El número total de láminas o capas fue de 3. La Figura 5 muestra el proceso de fabricación artesanal de los paneles CLT.



Figura 5: Proceso de fabricación de los paneles CLT

3.3 Propiedades mecánicas de las vigas de MLE

Se fabricaron 8 vigas de madera laminada encolada utilizando tablas de madera aserrada clasificadas como EC7 según la propuesta de norma de clasificación visual estructural [1]. La anchura nominal (b) fue de 70 mm, la altura nominal (h) de 128 mm, y la longitud total (L) de 2400 mm. Las piezas se cargaron en flexión sobre una luz libre ($l=18 \cdot h$) de 2300 mm, tal y como indica la norma EN 408 [9] y las dos cargas puntuales se aplicaron sobre el tercio central a una distancia entre ejes de 768 mm.

Los valores de módulo de elasticidad y resistencia a flexión se determinaron según la misma norma europea EN 408. El módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) se calculó para un tramo elástico de comportamiento comprendido entre $0.1 \cdot F_{max}$ y $0.4 \cdot F_{max}$, siendo F_{max} la carga de rotura de la viga. Con el valor de la carga máxima se determinó la resistencia a flexión (f_m).

El contenido de humedad de la madera en el momento del ensayo se determinó mediante xilohigrómetro según lo establecido en la norma EN 13183-2 [10].

Los valores de las propiedades mecánicas de la madera se referenciaron a un 12% de contenido de humedad, realizando las correcciones de las mismas en base al contenido de humedad de cada probeta en el momento del ensayo, según la norma EN 384 [11].

Los valores medios de los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión de las 8 vigas ensayadas, corregidos al 12% de contenido de humedad, fueron de 8.820 N/mm² y 18,6 N/mm², respectivamente.

Aunque el número de ensayos es pequeño para poder determinar el valor característico de la resistencia a flexión, el valor mínimo obtenido fue de 23,8 N/mm². Éste superó al de la madera aserrada de las láminas que configuraron la viga ($f_{m,k}=14$ N/mm²).

4. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PUENTE

El prototipo de puente se colocó en un predio agrícola de cultivo de trigo orgánico en Los Cerrillos, Canelones (Uruguay).

4.1. Movimiento de tierras y cimentación

Para la implantación del prototipo se realizó en primera instancia una limpieza del cauce y de los accesos y posteriormente se construyeron estribos flotantes de hormigón armado “in situ”, Figura 6.



Figura 6: Movimiento de tierras y construcción de estribos de hormigón armado

4.2 Proceso constructivo del prototipo de puente

Aunque el puente estaba diseñado para su prefabricación en taller, la empresa adjudicataria decidió fabricarlo en el mismo predio de implantación debido a un problema de espacio en taller.

En el cálculo estructural, las vigas principales fallaban por compresión perpendicular a la fibra en los apoyos. Para solucionar este problema se colocaron cuatro tornillos roscados de 200 mm de longitud de la casa Rothoblaas en la superficie de contacto entre la viga y el herraje metálico de apoyo, de modo que se disminuyese la compresión perpendicular sobre la madera, Figura 7. Entre las vigas madera y el herraje de apoyo sobre la cimentación, se colocaron tacos de goma con el objetivo de evitar el contacto directo de la madera con el suelo.

El armado de las huellas se pensó de forma simple, de modo que sólo fue necesario colocar los herrajes metálicos de arriostramiento de las vigas principales y unir éstas con los paneles CLT de rodadura, Figura 8. La unión entre estos elementos se realizó con tornillos Rothoblaas, en número y disposición que soportase el esfuerzo rasante producido entre ambos elementos cuando el puente entra en flexión con la sobrecarga de uso.



Figura 7: Tornillos de refuerzo de resistencia perpendicular a la fibra y herrajes de apoyo



Figura 8: Arriostramiento metálico y unión de paneles CLT y vigas MLE

4.3 Montaje del puente

Una vez construidas las huellas, se izaron de forma independiente utilizando un camión grúa y se colocaron sobre los estribos, siendo el peso de cada huella menor a 2000 Kg. El tiempo de colocación de cada huella fue de 5 minutos. Los herrajes de apoyo se anclaron a los estribos realizando perforaciones y colocando varillas roscada con anclaje químico. La Figura 9 muestra el proceso de colocación de las huellas sobre los estribos de hormigón y el puente puesto en carga.



Figura 9: Colocación del puente y prueba de carga

5. CONCLUSIONES

Se demostró que la madera de pino uruguayo, aunque de propiedades mecánicas bajas, es apta para su uso estructural, incluso en estructuras sometidas a sollicitaciones elevadas, como es el caso de los puentes vehiculares, respondiendo a las mismas exigencias normativas en cuanto a cargas que puentes realizados con otros materiales, como pueden ser el hormigón o el acero.

El puente se diseñó en dos huellas de 1,6 x 8 m de longitud, separadas entre ejes a 2,1 m y dejando un hueco libre de 1 m de anchura entre las huellas, permitiendo así el paso de diferentes tipos de vehículos involucrados en las tareas agroforestales.

La gran ventaja del prototipo de puente diseñado es la posibilidad de prefabricación, la modularidad y rapidez de montaje. La ventaja de la ligereza de la madera repercute en la viabilidad de transportar el puente prefabricado sobre un camión-grúa, ahorrando en tiempo y costos de fabricación “in situ”. El montaje del puente sobre el arroyo en un predio agrícola de Los Cerrillos (Canelones) se realizó mediante un camión-grúa y el tiempo de colocación de cada huella fue de 5 minutos.

Aunque fue posible la realización del puente a partir de productos de ingeniería de madera producidos en Uruguay, actualmente la industria uruguaya no está desarrollada para la fabricación de estos productos estructurales. Esto implicó un seguimiento y control de cada paso de la cadena de producción de estos productos. Aun así, no siempre fue posible cumplir con los requisitos de fabricación de las normativas internacionales, principalmente en el control de la humedad y temperatura ambiental y en las tareas que dependen de los controles de los operarios de planta. Aunque se considera viable el desarrollo de una industria de estos productos estructurales en Uruguay, a partir de la madera disponible en el país.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue posible gracias al desarrollo del proyecto de investigación en curso “Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal en Uruguay”, financiado por el Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) del Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas, INIA. Proyecto No. FPTA-306.

Agradecemos, además, a los demás integrantes del proyecto de investigación (Ing. Sebastián Dieste e Ing. Daniela de Souza de RDA Ingeniería, Ing. Antonio Dieste de CyD Ingenieros, MSc. Ing. Agr. Santiago Díaz y Forestal Caja Bancaria), así como a las personas y empresas que hicieron posible el buen desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Baño V., Moya L., O’Neill H., Cardoso A., Cagno M, Cetrangolo G., Domenech L. Informe Técnico: Documentos Técnicos para la normalización de estructuras y construcción con madera. 2015. Fondo Industrial PR n°: 3823/013. Dirección Nacional de Industria. Ministerio de Industria, Energía y Minería. ISBN: 978-9974-0-1344-5.
- [2] EN 338:2016. Estructuras de madera. Clases resistentes. CEN/TC 124
- [3] EN 1991-1-1:2006/A1:2010. Eurocódigo 5 - Proyecto de estructuras de madera - Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- [4] EN 1995-2:2004).
- [5] DNV. Pliego de condiciones de la Dirección Nacional de Vialidad para la construcción de puentes y carreteras. 1989. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Montevideo, Uruguay.
- [6] EN 14080:2013. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos. CEN/TC 124
- [7] EN 16351:2015. Estructuras de madera. Madera contralaminada. Requerimientos. CEN/TC 124
- [8] pro:Holz. Cross-Laminated Timber Structural Design - Basic design and engineering principles according to Eurocode, 2014

- [9] EN 408:2010+A1:2012. Estructuras de madera. Madera estructural y madera laminada encolada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. CEN/TC 124
- [10] EN 13183-2:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.
- [11] EN 384. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. CEN/TC 124