



REVISIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES DE PUENTES DE MADERA DE PEQUEÑAS LUCES PARA EL PASO DE VEHÍCULOS PESADOS

REVIEW OF STRUCTURAL TYPOLOGIES OF SHORT-SPAN TIMBER BRIDGES FOR THE TRANSIT OF HEAVY VEHICLES

Vanesa Baño (1) (P); Sebastián Dieste (2); Carlito Calil Junior (3); Gian Mario Giuliano (4);
Laura Moya (5)

(1) Dr. Prof. Adjunto, IET, Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay.

(2) Ing., Director RDA Ingeniería, Montevideo, Uruguay.

(3) Dr. Prof. Dpto. Ingeniería Estructural, Escuela de Ingeniería de Sao Carlos, Universidad de Sao Paulo, Brasil

(4) Prof. Asociado Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile

(5) Dr. Prof. Adjunto, Facultad de Arquitectura, Universidad ORT, Montevideo, Uruguay.

Dirección para correspondencia: vanesab@fing.edu.uy; (P) Presentador

Resumen

Actualmente en Uruguay existe un déficit en la infraestructura de carreteras y puentes, ligado al aumento de la producción de grano y a la extracción forestal, que en 2011 superó los 10 millones de m³. El presente trabajo se concentra en el estudio de las necesidades de pasos para salvar pequeñas luces (<10m) y soportar elevadas sobrecargas de uso que permitan el paso de la maquinaria pesada implicada y de los vehículos de transporte en los accesos a los terrenos agrícolas y/o forestales.

Dado que existe madera en abundancia en Uruguay, potencialmente válida para usos estructurales en la ingeniería civil, se plantea el estudio del diseño de puentes realizados con diferentes sistemas estructurales: sistema de vigas (rollizos de madera, madera aserrada y madera laminada encolada), celosías y sistema de placas (madera tensada, madera-hormigón, etc.). Para ello, se tuvieron en cuenta las características del material disponible, la necesidad de protección de la madera, los costos, la vida útil estimada, el tiempo de ejecución y la normativa de diseño y cálculo disponible, realizando una revisión de las soluciones constructivas en madera adoptadas en Sudamérica y en otros países frente a problemas similares.

Palabras-clave: puentes, madera, vehículos pesados, tipologías estructurales, Uruguay

Abstract

Currently in Uruguay, highway and bridge infrastructure is deficient due to an increase in crop and forestry production, which in 2011 surpassed 10 million m³. This work focuses on the study of short span (<10m) timber bridges to allow the access of heavy equipments and vehicles to agricultural and forestry lands.

There is a considerable amount of timber in Uruguay potentially suitable for structural applications that could be used in civil engineering. This work aims to study the design of bridges with different structural systems: beams (logs, sawn lumber and glulam), trussed and plates (pre-stressed laminated timber, timber-concrete, etc.). Aspects such as characteristics of wood material, durability, costs, service life, time of construction and design codes and structural standards were analyzed. A review of constructive solutions adopted in South America and other countries is conducted to learn how similar problems were addressed.

Keywords: bridges, timber, heavy vehicles, structural typologies, Uruguay

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Uruguay existe un déficit de infraestructura vial debido al aumento de la producción de granos en los últimos años (Errea et al., 2011) y al incremento de la extracción forestal, que en 2011 superó los 10 millones de m³ (MGAP, 2012). Uno de los problemas más comunes en estas explotaciones es la falta de puentes que salven accidentes geográficos de pequeña envergadura, como son arroyos, canales o zanjas, y que permitan el acceso de maquinaria y camiones a los predios agrícolas y forestales. La infraestructura vial debería contemplar los requisitos para el paso de la maquinaria involucrada en la explotación, así como el de vehículos que transportan los productos.

Dada la elevada disponibilidad de madera en Uruguay con potencial uso estructural, se plantea la realización de los puentes con este material. Del 45% de superficie forestada con uso industrial, un 60% corresponde a especies del género *Eucalyptus* (*E. globulus*, *E. grandis*, *E. dunnii* y *E. saligna*), un 25% de especies del género *Pinus* (*P. elliottii*, *P. taeda* y *P. pinaster*) y el 15% restante de mezcla de especies naturales y exóticas (Uruguay XXI, 2014). El destino de las especies con uso industrial es principalmente la obtención de celulosa, aunque la madera de pino y de parte de la madera de *E. grandis* tienen como destino la transformación mecánica (Dieste, 2012). En la actualidad 1,7 millones de m³ de trozas de pino (principalmente *P. elliottii* y *P. taeda*) y 0,4 millones de m³ de eucalipto (principalmente *E. grandis*) no tienen destino (Dieste, 2014).

Las ventajas ambientales del uso de la madera en la construcción pasan por ser un material disponible en abundancia en la naturaleza, renovable, reciclable y biodegradable, por lo que su disposición final no presenta un problema. A modo de ejemplo, se considera que la construcción de una casa tipo de madera presenta unas emisiones de unos 30 Kg CO₂/m³ frente a los 400 Kg CO₂/m³ de una casa de hormigón de las mismas características (Beyer et al., 2011). La resistencia de la madera, el bajo peso propio y el bajo consumo energético necesario para su producción y procesado son ventajas desde el punto de vista estructural y económico. Desde el punto de vista constructivo, su bajo peso permite el transporte y montaje de elementos estructurales de elevadas dimensiones, lo que favorece la prefabricación parcial o total de los puentes, reduciendo los plazos de ejecución y el montaje "in situ".

2. ANTECEDENTES

2.1. Cargas vehiculares y dimensiones

En los pasos de uso público en Uruguay, las condiciones para la elaboración de un proyecto de puentes está reglamentada por el Pliego de Condiciones de la Dirección Nacional de Vialidad (D.N.V.) para la Construcción de Puentes y Carreteras (D.N.V., 1989), y por las Especificaciones Técnicas Complementarias y/o Modificaciones del Pliego de Condiciones de la D.N.V. para la Construcción de Puentes y Carreteras (ADNV, 2003). A su vez, la Dirección Nacional de Transporte (D.N.T.), en el Boletín de Divulgación Técnica 1, define las dimensiones y pesos máximos brutos por ejes y totales, de los vehículos que pueden circular por la red nacional de carreteras. El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) exige una carga total de 45, correspondientes a 15 t por eje.

En cuanto al ancho mínimo, es necesario considerar que este tipo de puentes, situados generalmente en el ámbito rural, tienen una única senda, con anchos que varían entre 3,50m y

4,00m, suficientes para el paso de todo tipo de camiones. Sin embargo, actualmente existen equipos agrícolas, por ejemplo cosechadoras, que sobrepasan los 5,00m de ancho.

2.2. Propiedades físico-mecánicas de la madera de procedencia uruguaya

La clase resistente asignada a la madera de *P. taeda* y *P. elliottii* de 50x50x760mm obtenidas de árboles de 25 años de edad referidos a un contenido de humedad del 12%, es de una C14 de acuerdo a la norma europea EN 338 (CEN, 2010), limitada por el valor de módulo de elasticidad medio (Moya et al., 2013). Los datos de las propiedades mecánicas de *E. grandis* disponibles no están presentados como valores característicos según la norma EN 384 (CEN, 2010). A modo de ejemplo, los valores medios para 257 tablas de 50x150mm de sección y 2.8 m de longitud procedentes del centro de Uruguay, con un contenido de humedad medio del 11.7%, son: $E=11.588 \text{ N/mm}^2$, $f_m=46 \text{ N/mm}^2$ y $\rho=504 \text{ Kg/m}^3$ (GT2, 2006). En cuanto a la madera laminada encolada, en Uruguay sólo se fabrican vigas de *E. grandis* y su aptitud estructural en clase de uso 3 o superior no está validada y se desconocen sus propiedades mecánicas.

2.3. Normativa de cálculo en madera

En Uruguay no existe reglamento ni normativa UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas) de cálculo estructural con madera. El único documento publicado que hace referencia a una metodología de cálculo es el elaborado por el Instituto de Estructuras y Transporte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en el año 1950 (IE4-50), en base al método de las tensiones admisibles. El documento incluye las propiedades mecánicas de diferentes especies de madera, aunque ninguna de ellas se basa en datos provenientes de ensayos sobre madera de procedencia uruguaya y se desconoce el nombre científico y si los datos presentados se corresponden con valores medios o característicos.

2.4. Puentes para paso de vehículos agroforestales en Uruguay

2.4.1. Puentes de hormigón

La mayor parte de los puentes existentes en Uruguay están resueltos utilizando hormigón estructural, armado y/o pretensado. El pliego de la D.N.V. prescribe el uso de este material y habilita, de forma excepcional, el uso de tableros metálicos o mixtos. Con respecto a los puentes de luces pequeñas, se presentan a continuación las soluciones que se observan con mayor frecuencia. La infraestructura suele estar resuelta mediante estribos de hormigón, en general con muro frontal y aletas, y apoyos intermedios a modo de pórticos, formados por dos pilares, viga dintel y viga riostra, o por pilas apantalladas. La cimentación de estos elementos se resuelve habitualmente mediante: pozos de hormigón construidos con el sistema de 'havage', zapatas aisladas (apoyos intermedios), zapatas corridas (estribos) o pilotes (utilizados con menor frecuencia, dado el coste de traslado de equipos para un volumen de obra pequeño). La superestructura suele estar ejecutada mediante losas de hormigón armado, losas de viguetas de hormigón armado y pretensado o mediante vigas metálicas, normalmente perfiles laminados, con losa superior de hormigón armado o entablado transversal de madera.

2.4.2. Puentes de madera

El uso más habitual de la madera en los puentes se da en la formación de la superficie de rodadura, mediante entablado de madera dispuesto en el sentido transversal del puente, apoyado sobre vigas metálicas o de madera, Figura 1-izda y centro. Son habituales las soluciones

temporales construidas con madera para paso de camiones que transportan madera, normalmente ejecutadas sin ningún tipo de comprobación estructural ni de previsión de su vida útil. En la Figura 1-dcha., se muestra un ejemplo de puente realizado con rollizos de *E. grandis* en el Camino de los Carros en el Departamento de Rocha (Bernasconi, 2013). Si bien no son de uso frecuente, pueden verse estribos y pórticos intermedios de madera, tal como puede observarse en la Figura 2, en puentes ubicados en el departamento de Tacuarembó.



Figura 1. Vigas de madera resueltas con rollizos y entablado de madera



Figura 2. Estribos de madera y pórticos intermedios de madera formados por pilares y dinteles

La problemática habitual en este tipo de soluciones es la siguiente: no existe cálculo estructural que garantice el paso de vehículos y que evite el riesgo de accidentes; se desconocen las propiedades mecánicas de la madera empleada, muchas veces utilizada verde (sin secado previo), lo que reduce considerablemente las propiedades mecánicas de la misma; empleo de madera no durable y sin protección por diseño ni mediante tratamiento químico, redundando en riesgo de pudriciones de la madera, lo que reduce considerablemente la vida útil del puente.

Existen algunos antecedentes de puentes de madera diseñados y calculados para el paso de vehículos pesados en Uruguay, algunos de ellos con muchos años de antigüedad, como son el puente del Río Yi en Durazno, diseñado por el Ing. Federico Campurro en el año 1903 y el puente mixto madera-metal en el arroyo Fray Bentos para el paso de vehículos ligeros. Recientemente se ha construido un puente pilotado de madera para el paso de camiones que transportan madera, con vanos de 5 m de luz, construidos por la empresa uruguaya UPM y la brasileira BS-Pontes, en Cerro Largo, Figura 3.

La especie de madera utilizada para su construcción fue *Eucalyptus tereticornis* (Eucalipto colorado), que tiene la ventaja de presentar una elevada durabilidad natural, por lo que no se requiere de tratamiento protector y la protección por diseño no se hace tan exigente. Esta especie, que además tiene elevadas propiedades mecánicas, está poco disponible en Uruguay, lo que limita su uso continuo.



Figura 3. Puente Arévalo para paso de camiones, Cerro Largo (www.tiempo.com.uy, 2012)

2.4.3. Especies de madera utilizadas en otros países de Sudamérica

En Brasil existen muchas especies nativas tropicales, con propiedades mecánicas elevadas, alta densidad y buena durabilidad natural aptas para la ingeniería civil. En los últimos años se ha promovido el uso estructural de la madera de reforestación del género *Pinus* y *Eucalyptus* como una alternativa natural a las especies tropicales. A partir de 1966, el gobierno implantó un programa de incentivos fiscales para aumentar el área plantada en el país. Entre estas especies se encuentran algunas de las existentes en Uruguay, como son el *P.elliotti*, el *P. taeda* y el *E. grandis*, con densidades de 560, 645 y 640 kg/m³ respectivamente, además del *E. citriodora*, con una densidad mucho más elevada (999 kg/m³). El cálculo estructural está regulado por la norma NBR 7190.

En Chile se han utilizado especies frondosas nativas desde hace mucho tiempo, como el *Nothofagus dombeyi* (coihue), el *N. obliqua* (roble) y el *E. globulus* para la construcción de puentes de madera. Estas especies pueden o no ser tratadas con preservantes (generalmente creosota) y son clasificadas visualmente para determinar sus propiedades mecánicas según la norma NCh 1970/1. El diseño de puentes menores está regulado por el Manual de carretera del Ministerio de Obras Públicas, y actualmente se está implementado la construcción de puentes con vigas longitudinales de acero y tablero post tensado de madera de *Pinus radiata*. Éste se clasifica estructuralmente de acuerdo a las normas NCh1207 y EN 519 y es preservada superficialmente con creosota o en profundidad con CCA (cobre, cromo y arsénico).

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera regula el cálculo estructural según el método de las tensiones admisibles para las siguientes especies de madera argentinas: *Eucalyptus grandis*, *Pinus elliottii/taeda* y *Araucaria angustifolia*, coincidiendo las dos primeras con las plantaciones más abundantes en Uruguay. Los formatos que recoge son rollizos de madera, madera aserrada y madera laminada encolada.

A nivel europeo, la tendencia a la hora de la construcción de puentes para el paso de vehículos es la de diseñar puentes que puedan salvar grandes luces, sin necesidad de cimentaciones intermedias, uso de madera laminada encolada, alto grado de prefabricación y protección por diseño, pues el uso de protectores químicos están limitado debido a su toxicidad.

3. OBJETIVOS

En base a las necesidades y a los antecedentes descritos se detallan a continuación los objetivos del presente trabajo: i) Estudiar la posibilidad del uso en la ingeniería civil de la madera de procedencia uruguaya que actualmente no tiene destino; ii) Evaluar las tipologías de puentes

de madera para el paso de vehículos pesados existentes internacionalmente; iii) Analizar las posibilidades de diseño, cálculo y ejecución de este tipo de puentes en Uruguay.

4. TIPOLOGÍAS DE PUENTES DE MADERA PARA EL PASO DE VEHÍCULOS

4.1. Sistema de vigas

4.1.1. Troncos y madera aserrada

La forma más simple y antigua de solucionar la construcción de un puente es la utilización de troncos de madera colocados en la dirección longitudinal del puente para que funcionen como vigas principales y una plataforma o tablero transversal. El número de vigas y el tipo de tablero depende de la luz a salvar y de la carga a soportar. En determinadas situaciones el tablero puede obviarse y la generación de la cubierta horizontal (deck) se realiza colocando los troncos paralelos y unidos entre sí con cables de acero, y rellenando con suelo y grava los intersticios entre troncos y formando una carpeta superior. Esta configuración puede ser complementada con troncos transversales situados por debajo de los troncos longitudinales y unidos a éstos, normalmente ubicados en la mitad o a los tercios de la luz del puente. La longitud del puente está limitada por el diámetro y el largo de los troncos disponibles, pero es usual salvar luces de 6 a 18 m, dependiendo de la especie empleada.

En Estados Unidos y Canadá cientos de estos puentes son actualmente utilizados en caminos secundarios, fundamentalmente para el transporte de vehículos con cargas de talas forestales (Ritter, 1990). Son construidos con maderas no tratadas (sin preservantes), y su vida útil varía entre 10 a 20 años, dependiendo de la especie utilizada y las condiciones de uso.

La Figura 4 muestra un puente de 6 m de longitud y 5 m de anchura construido en Brasil para soportar cargas de 30 t. Las vigas principales son solventadas con rollizos de madera de *Eucalyptus citriodora*, sobre los cuales, y en la dirección transversal, se colocan las tablas de madera aserrada, fijadas mediante tirafondos para formar el tablero de paso de los vehículos (Calil, 2002). En el estado de New South Wales, Australia, se repite una tipología de puente de carretera desde hace más de 50 años, construido con vigas de rollizos de *Eucalyptus spp.* de alta densidad y alta durabilidad natural, validados estructuralmente mediante análisis de vibraciones (Crews et al., 2002). Las longitudes son variables y los vanos suelen rondar los 10 m. Cada vano suele estar compuesto por 4 ó 5 vigas longitudinales que configuran un ancho de 4-4,5m.



Figura 4. Puente Floresta en Brasil (izqda.) (Calil, 2002); Puente nuevo en Australia (centro) y puente de 50 años Australia (dcha.)

Avanzando en complejidad tecnológica a la hora de presentar las tipologías, siguen a los troncos las escuadrías de madera aserrada, que pueden ser simples o compuestas, Figura 5. En los puentes de vigas simples, en general, las vigas principales van separadas a distancias reducidas y

conectadas entre sí con pequeños bloques de madera que reducen el vuelco lateral y permiten su alineación. Las secciones de las vigas varían entre 100-200 mm de ancho y 300-450 de alto. Por encima de éstas va el tablero o *deck* de tablas de madera aserrada u otro material. La luz del puente queda limitada por las dimensiones (sección transversal y longitud) de las vigas, siendo común en Estados Unidos y Canadá salvar luces libres entre 4,50 y 7,50 m (Ritter, 1990).

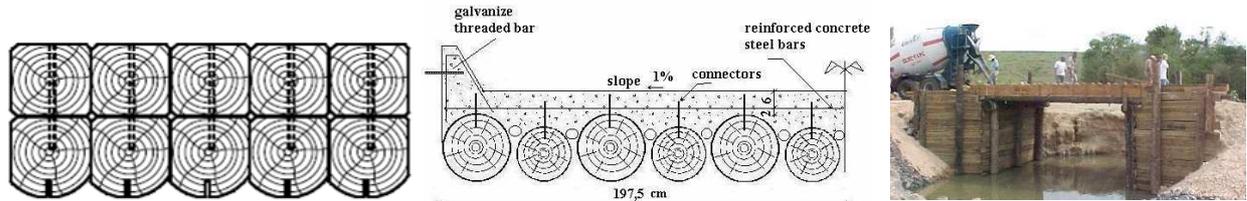


Figura 5. Vigas compuestas de madera maciza (izqda.) (Flach, 2010); tablero de rollizo-hormigón (centro) (Pigozzo et al., 2004) y puente en Brasil (dcha.) (Calil, 2002)

Cabe señalar que los tableros transversales empleados, tanto en puentes con vigas principales de troncos como de madera aserrada, pueden tener distintas configuraciones, y ser construidos con madera (rollizos o tablas) u otros materiales. En San Pablo, Brasil, Pigozzo et al. (2004) desarrollaron y construyeron el primer puente compuesto rollizo-hormigón. El sistema está constituido por: i) troncos de *Eucalyptus citriadora*, colocados uno al lado del otro en forma paralela y en la dirección longitudinal del puente; ii) una carpeta superior de hormigón armado que además rellena los intersticios entre troncos; y iii) conectores metálicos en forma de "X" embebidos en adhesivo epoxi, que contribuyen a conformar un único elemento estructural. La Figura 5, Fig. 5-dcha., muestra la sección transversal del puente y una imagen de la construcción del puente Capela en Brasil (Calil, 2002), de 7 m de longitud y 5 m de anchura diseñado para cargas de 45 t. En dicho puente la conexión entre el hormigón y los troncos de *E. citriadora* se realiza a través de varillas verticales de 19 mm de diámetro. En forma similar, Benitez (2006) reporta una tipología de puentes utilizada en Australia, que consiste en un sistema de vigas principales de troncos separados cada 1 m, y plataforma de hormigón, unidos con conectores metálicos.

4.1.2. Madera laminada encolada (MLE)

Los productos de ingeniería de madera más empleados en la actualidad a la hora de diseñar puentes en Europa es la madera laminada encolada, pues permite fabricar vigas de grandes longitudes y secciones imposibles de conseguir a partir de madera maciza, además de permitir el curvado y el diseño de la geometría de las vigas.

El empleo de cinco vigas rectas de madera laminada permite salvar una luz de 24 m para el paso de vehículos de 30t en un puente en Huesca, España, Figura 6. El puente tiene un ancho de 4,0 m y fue diseñado y fabricado por la empresa Media Madera (www.mediamadera.com). Las vigas son de madera de *Pinus sylvestris* impregnado en profundidad con sales libres de arsénico que garantizan una exposición a una clase de uso 4 según las definiciones de la norma europea EN 335 (CEN, 2007).

“Estructuras para el Desarrollo, la Integración Regional, y el Bienestar Social”



Figura 6. Puente en España con vigas rectas de MLE de 24 m de longitud

4.2. Compuestas o en celosía

4.2.1. Celosías de madera aserrada

Una forma de conseguir grandes salvar grandes sin necesidad de utilizar productos de ingeniería en madera es la realización de celosías formadas por elementos de madera de pequeñas o medianas secciones y longitudes. Estas soluciones son muy empleadas en Europa y EEUU, siendo muy conocidos los puentes cubiertos de Suiza y de Madison (EEUU). La Figura 7 muestra un puente de 200 años en Suiza, realizado con elementos de madera aserrada de abeto, el cual fue rehabilitado en el año 2007. La estructura de celosía que forma el puente permite, además de garantizar la resistencia y estabilidad estructural, la colocación de una cubierta que protege a los elementos de madera y evita la necesidad de aplicación de tratamiento químico protector.



Figura 7. Puente cubierto Thurbrücke (año 1815), Suiza

Otro ejemplo de solución en celosía, en este caso formando las vigas principales del puente, es el Puente Pyrmont en Sydney, Australia. El puente fue construido entre los años 1889 y 1902 para el paso de carruajes de caballos y actualmente soporta la carga de un mono-rail para el transporte público. La madera empleada son secciones de gran escuadría de *Eucalyptus spp.* de alta durabilidad natural y gran densidad y se utiliza tanto en la configuración de las vigas principales como en los pilares, Figura 8.



Figura 8. Puente Pyrmont en Darling Harbour, Sydney (1900)

4.1.3.1. Celosías de MLE

La disponibilidad en muchos países de MLE validada estructuralmente lleva a que los puentes en celosía más modernos se ejecuten con estos elementos. En la Figura 9 se presenta otro puente cubierto en Suiza, puente Bauherrschaft, contruido en el año 1992 con elementos de madera laminada encolada de *Picea abies*. Esta especie tiene unas propiedades mecánicas y durabilidad natural similares a algunos pinos, pero se diferencia de estos en que esta especie no es impregnable, por lo que su protección se realizó por diseño dotándolo de cubierta. El tablero de rodadura se remató con una capa asfáltica para el paso de vehículos.

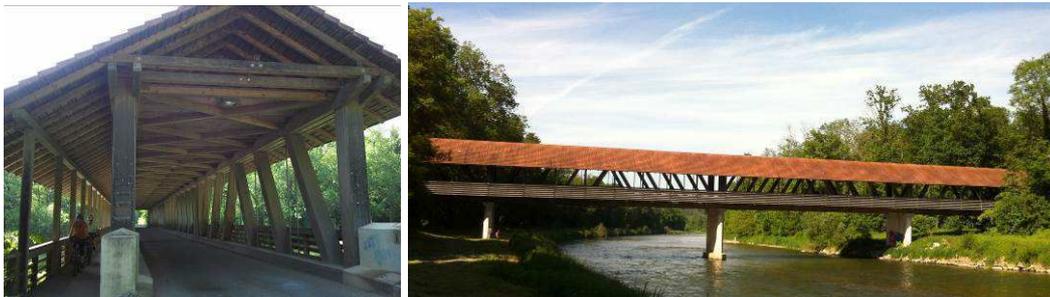


Figura 9. Puente cubierto Bauherrschaft (año 1992) con elementos de MLE de *Picea abies*.

El puente Kjollsaeterbrua, Figura 10, tiene una longitud total de 158 m y fue construido en el año 2005 para el paso de un convoy de camiones militares, considerando una carga de cada tráiler 65t, más la carga permanente de un tablero de hormigón de 310 mm de espesor. Está formado por dos vigas principales ejecutadas a modo de celosía con elementos de MLE de conífera impregnada con sales de cobre y posteriormente se aplicó creosota para asegurar una durabilidad de 100 años (Abrahamsen, R. B., 2010). El vano mayor y central tiene una longitud de 45 m y se apoya en pilares de hormigón mientras que los vanos que apoyan sobre pilares de madera tienen una longitud de 15 y 19 m. Para su construcción se emplearon 250m³ de madera y el tablero de rodadura se realizó con hormigón armado. Otro tipo de solución muy común es la realización de una celosía con elementos de MLE de la que cuelga el tablero de paso, Figura 10-dcha.



Figura 10. Puente Kjollsaeterbrua (2005) sobre el río Rena (izqda.) y un puente de tablero suspendido de celosía (dcha.), en Noruega

4.3. Sistema de placas

4.3.1. Tensadas

El uso de madera aserrada de secciones comerciales unidas por la cara y tensadas mediante cable de acero es una solución simple y económica que permite salvar luces de entre 5 y 10 m sin necesidad de vigas inferiores portantes. Esta solución se repite en varios países, como son Australia, Brasil, Figura 13, y Chile, Figura 14. Estos tableros suelen estar recubiertos por una capa asfáltica de rodadura, con una membrana impermeable entre ésta y la madera para evitar la acumulación de agua y con ello la pudrición de la madera. Esta superficie funciona como protectora de la madera frente a las inclemencias meteorológicas, lo que permite el uso de especies no durables sin necesidad de tratamiento protector.



Figura 13. Puente en Australia (izqda.) y en Brasil (centro y dcha.) (Fonte, 2004)

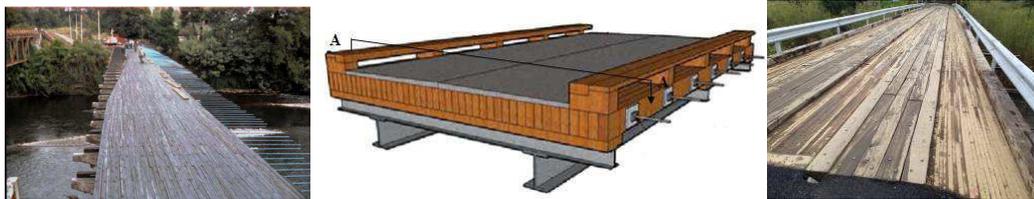


Figura 14. Tablero de madera tensada en Concepción, Chile (Giuliano, 2011)

En algunos casos en los que el tráfico esperado es bajo, como los puentes Los Aromos construidos en Chile en 2010, la superficie de rodadura se realiza mediante tablero de sacrificio con tablas de pino impregnado con sales CCA (Cobre, Cromo, Arsénico) o mediante huella de sacrificio, como es el caso del puente Formio, Figura. 14 – dcha.

4.1.4. Otros sistemas estructurales

Algunos tableros de puentes son solucionados con tableros de madera contralaminada (CLT- cross laminated timber), apoyados sobre vigas principales portantes, como es el caso del puente en la autopista A89 en Noruega, Figura 15-izqda. Otras soluciones posibles, aunque no muy habituales, es la fabricación de vigas portantes mediante la disposición vertical de varios tableros contrachapados unidos con piezas de madera aserrada. La Figura 15-dcha. muestra un puente de 12 m de longitud y 10 m de anchura para soportar cargas de 45 t utilizando tableros contrachapados de madera de Cupiuba tensados con cables de 15mm de diámetro.



Figura 15. Puente con tablero de madera contralaminada (izqda.) (Flach, 2011) y puente con vigas de tablero contrachapado (dcha.) (Calil, 2006)



5. ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE URUGUAY

Este trabajo de carácter tecnológico presenta algunas recomendaciones para el proyecto, construcción, y dimensionado de puentes de madera utilizando sistemas estructurales y constructivos simples y de bajo costo, para salvar luces pequeñas y medias. Las tipologías y los sistemas estructurales deberán diseñarse en función de los siguientes condicionantes específicos para Uruguay.

5.1. Material disponible

La madera aserrada disponible para su uso en construcción proviene de forestación con especies exóticas de rápido crecimiento: *Pinus elliottii* y *P. taeda* y de *Eucalyptus ssp.*, fundamentalmente *E. grandis*.

La madera laminada encolada disponible en Uruguay tiene longitudes de hasta 16 m y alturas máximas de 1,00 m y se fabrica únicamente con madera de *E. grandis*. Como se citó anteriormente, esta especie no permite su tratamiento protector en profundidad, lo que exige una protección por diseño de los puentes. Los adhesivos utilizados en la mayoría de las industrias uruguayas no son aptos para su uso al exterior y tampoco para uso estructural según las exigencias de la normas europeas EN 302-1 (CEN, 2005) y de EN 14080 (CEN, 2013). Los adhesivos que actualmente se emplean en la producción de MLE en Uruguay pueden propiciar delaminaciones, y/o redundar en una baja resistencia del adhesivo frente a las pesadas cargas de diseño de los puentes propuestos. Las características de ambos componentes (madera y adhesivo) limitan el uso de MLE para puentes expuestos a la intemperie, y pueden ser estas características las responsables de la escasa existencia de puentes con elementos de MLE en Sudamérica.

5.2. Necesidad de protección de la madera

La norma europea EN 350-2 (CEN, 1995) presenta la madera de *P. Elliottii* y *P.taeda* procedente de Centro-América y de América del Norte como no durable frente al ataque de hongos e insectos. El *Eucalyptus grandis* no aparece entre las especies citadas en la norma europea, pero existen datos de ensayos realizados en Uruguay en madera proveniente de plantaciones de 16 años de edad que lo clasifican como moderadamente durable en albura y durable en duramen frente a la descomposición fúngica y moderada y seriamente atacable por termitas (Böthig, 2008). Según esta clasificación, y en base a experiencias realizadas en el país los resultados de la impregnación de *E. grandis* no son satisfactorios.

Existen ejemplos en Uruguay de puentes construidos con madera de *E. tereticornis*, especie de mayor durabilidad que las antes mencionadas y que ha demostrado un mejor comportamiento frente a los agentes destructores de la madera. En el pasado, esas maderas se encontraban en los márgenes de las rutas, pero actualmente es difícil de encontrar, y sólo existe una cantidad reducida de hectáreas plantadas. La Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, por su parte, promueve desde el año 2011 la diversificación de especies mediante la exoneración o rebaja de cargas impositivas, por lo cual podría inferirse que en el futuro se pueda contar con cierta cantidad de madera de esta especie.

En el caso de utilizar madera de *E. grandis* la protección por diseño pasa a ser un requisito imprescindible para garantizar su durabilidad. Esta protección está normalmente

enfocada a evitar la acumulación de agua en la madera, tanto proveniente de la lluvia como de la acumulada en el suelo, aunque en el diseño de estos puentes agroforestales entra en juego también la posibilidad de inundación de los mismos durante algún período anual. El uso de la madera de pino podría ser una solución válida a la hora de solventar la durabilidad de la madera, pues ésta es impregnable y un tratamiento en profundidad garantizaría su uso en las clases más exigentes, 4 y 5 de la norma europea EN 335.

5.3. Propiedades mecánicas y secado

Las propiedades mecánicas de la madera pueden influir también en la elección de la especie, pues son poco conocidas. Tal y como se hacía referencia en los antecedentes, la madera de *E. grandis* presenta propiedades mecánicas mayores que la madera de pino, por lo que permitiría salvar luces mayores, aunque también son más imprecisos los valores de propiedades de esta especie, lo que supondría, en muchos casos, la necesidad de ensayos de resistencia previos a la ejecución del puente.

A esto se suma la dificultad del secado de la madera de eucalipto y la baja disponibilidad de secaderos para piezas de gran escuadría en Uruguay, por lo que conseguir secciones grandes de madera con un contenido de humedad óptimo entre el 15-18% para su uso a la intemperie se hace muy difícil. Se debería, por lo tanto, tener también en cuenta en el diseño y cálculo de los puentes la disminución de las propiedades mecánicas de la madera con el incremento del contenido de humedad de la misma.

5.4. Costos

Otro condicionante son los costos de la materia prima, que influyen de manera directa en el costo final del puente. Dado que la ejecución de puentes de madera compite con otros materiales con más tradición de uso en Uruguay, como pueden ser el hormigón o el acero, el costo de la madera pasa a ser un factor determinante. Una estimación global lleva a plantear la madera de *P. elliotii*/*P. taeda* como la más económica y la más disponible, seguida de la de *E. grandis*.

5.5. Vida útil estimada

La selección de la especie y el diseño del puente pueden variar en función de la condición de transitoriedad o permanencia de la construcción, es decir, si se considera que deban tener una vida útil mayor a 10 años o simplemente es necesario que cumplan su función durante el período de zafra. Esto también varía en función del tipo de cultivo, dado que los cultivos agrícolas se realizan anualmente, una o dos veces al año, mientras que los forestales tienen turnos de corta que varían entre 8 y 15 años para las especies más comúnmente plantadas en Uruguay.

5.6. Tiempo de ejecución

La utilización de elementos prefabricados en la construcción de puentes reduce significativamente el plazo de ejecución de los mismos. En Uruguay, la prefabricación de elementos de hormigón se utiliza habitualmente para la construcción de la superestructura de puentes, lo que implica contar con grúas para el montaje. En el caso de los puentes de pequeñas luces no se justifica el traslado de equipos pesados para su construcción, pero sí es habitual



contar con equipos más ligeros, como retro-excavadoras combinadas, que pueden utilizarse para montar piezas prefabricadas del tablero, construidas con madera. La ligereza de la madera frente al hormigón podría permitir incluso el transporte del puente completo o en dos mitades desde la nave de montaje hasta su ubicación final.

5.7. Diseño y cálculo

La mayoría de los puentes de pequeñas luces existentes en Uruguay para el paso de vehículos agroforestales se encuentran situados dentro de la red vial gestionada por las Intendencias Departamentales. Estos puentes se ven sometidos al paso de los vehículos con las dimensiones y cargas habilitados por la D.N.T., pero es frecuente que sobre ellos circulen camiones con cargas aún mayores, ya que se trata de carreteras o caminos secundarios, sin controles respecto a las cargas máximas de los vehículos. En carreteras y caminos públicos corresponde utilizar las acciones definidas en el Pliego de la D.N.V. Cabe señalar que dicho pliego considera un tren de cargas teórico, que no se corresponde a un vehículo real, sino que busca reproducir, de forma simplificada y del lado de la seguridad, las sollicitaciones a las que podrían verse sometidos los distintos elementos estructurales de un puente. Por esta razón, se podría discutir la posibilidad de considerar cargas más bajas en el diseño de estos puentes, aunque parece recomendable utilizar las establecidas por la DNV, de forma de unificar las cargas de diseño de todos los puentes de la red de carreteras.

Las dimensiones de los vehículos especiales no sólo condicionarán la distribución de las cargas, sino también la geometría y la tipología del puente. Un ejemplo claro son las cosechadoras más modernas, con ruedas dobles con distancia exterior entre ellas de 5 m. Una posible solución, intentando homogeneizar los anchos para todo tipo de vehículos, sería considerar que las ruedas interiores pueden circular apoyadas sobre el tablero y las exteriores pasar por fuera del ámbito del mismo. Esto implicaría que no existan barandas o que éstas se puedan eliminar temporalmente, lo que condiciona el diseño. Cabe señalar la importancia económica de este hecho, ya que la posibilidad de acceder a un determinado predio con cosechadoras u otros equipos, hacen que la producción en el mismo sea o no viable.

Todos estos condicionantes llevan al diseño de una tipología de puente, que será necesario calcular estructuralmente en base a normativa internacional, pues las referencias de cálculo estructural con madera en Uruguay (IE4:50, 1950) no aportan datos ni metodología de cálculo válidos para el cálculo de estos puentes. Además, dado que las propiedades mecánicas de las especies de madera de procedencia uruguaya no son muy conocidas, será necesario la realización de prototipos que se puedan validar experimentalmente.

6. CONCLUSIONES

La ejecución de puentes de madera para el paso de vehículos pesados supondría el consumo de un elevado volumen de madera, lo que podría significar una salida a los 2,1 millones de m³ de madera sin destino actual en Uruguay y se concluye a continuación las disponibilidades y exigencias básicas para el diseño de los puentes.

Antecedentes de construcción de puentes de madera en todo el mundo para el paso de vehículos pesados y con luces elevadas respalda la propuesta de utilizar dicho material en Uruguay para el diseño de puentes de pequeña longitud para el paso de vehículos agroforestales.



Las especies de madera disponibles en abundancia en Uruguay con potencial uso estructural se limitan a *P. elliotii*, *P. taeda* y *E. grandis*.

La tipología de puentes dependerá de la disponibilidad de madera en Uruguay con formatos aptos para uso estructural en exterior, lo que se limita al uso de elementos sólidos que no requieran de adhesivos, pues la madera laminada encolada fabricada actualmente en Uruguay no responden a las exigencias de normativa internacional de productos estructurales ni para uso exterior.

Será necesario tener en cuenta la protección de la madera para conseguir una elevada vida útil de los puentes, que dependerá de la especie seleccionada y de si la protección se realiza por diseño o mediante tratamiento protector.

Con el fin competir económicamente con otros materiales más comúnmente utilizados en la construcción de puentes en Uruguay, será necesario incidir en la posibilidad de prefabricación y en la disponibilidad de especies y formatos de madera estandarizados y/o comunes.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto de investigación titulado “Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal”. Convocatoria FPTA-INIA 2012. Montevideo, Uruguay.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrahamsen, R. B. (2010). *Bridge across Rena River - “World's strongest timber bridge*. Proceedings of ICTB 2010. International Conference on Timber Bridges. Lillehammer, Norway.

Benítez, M. F. (2000). *Development and testing of timber/concrete shear connectors*. Industrial construction, Vol. 2: 3-10.

Bernasconi, M. (2013). *Puentes de madera en caminos de bajo volumen de tránsito, la situación actual en el Uruguay*. Asociación de Ingenieros del Uruguay. INGENIERÍA, Vol. 70.

Beyer G, Defays M, Fischer M, Fletcher J, de Munck E, de Jaeger F. (2011). *Frente al cambio climático: utiliza madera*. CEI Bois; 2011 p. 86 p. Bruselas, Bélgica.

Böthig, S.; Sánchez, A.; Doldàn, J. (2008). *Durabilidad natural de la de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden de plantaciones de rápido crecimiento*. INNOTEK-7, No.3. Publicación anual del Laboratorio Tecnológico del Uruguay, LATU.

Calil Jr C. (2002). *Emerging Timber Bridge Program to São Paulo State. – Report numbers 1 and 2*. Laboratory of Wood and Timber Structures of Department of Structures of School of Engineering of São Carlos of São Paulo University, 456 p.

Calil Jr C.; Alves A.; Nunes de Góes J. L.; Cheung A.B.; Corrêa G.; Pigozzo J.C.; Okimoto F. S.; Barros N.; Brazolin S.; Lacerda E. (2006). *Manual de projeto e construo de pontes de madeira*. Suprema, 252 p. Sao Carlos. ISBN 85-98156-19-1

Dieste, A. (2014). *Plan de inversiones en maquinaria y equipos. Informe nº3*. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industrias, Energía y Minería. Consejo Sectorial Forestal-Madera. Montevideo, Uruguay



- Dieste, A. (2012). *Programa de promoción de exportaciones de productos de madera. Informe n°1*. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industrias, Energía y Minería. Consejo Sectorial Forestal-Madera. Montevideo, Uruguay
- DNV (1989). *Pliego de Condiciones de la Dirección Nacional de Vialidad para la construcción de puentes y carreteras*. Capítulos D y E del Pliego de Condiciones del Proyecto de Puentes de la Dirección Nacional de Vialidad. Montevideo, Uruguay.
- DNV (2003). *Especificaciones Técnicas complementarias y/o modificativas del Pliego de Condiciones para la construcción de puentes y carreteras*. Dirección Nacional de Vialidad. Montevideo, Uruguay.
- Errea, E.; Peyrou, J.; Secco, J.; Souto, G. (2011). *Transformaciones en el agro uruguayo. Nuevas instituciones y modelos de organización empresarial*. Universidad Católica, Montevideo, Uruguay.
- Flach, M. (2010). *How to design timber bridges*. Proceedings of ICTB 2010. International Conference on Timber Bridges. Lillehammer, Norway.
- Fernandes da Fonte, T. (2004). *Pontes protendidas de eucalipto citriodora*. Tesis de maestría. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- Giuliano, M.; Dechent, P.; Silva, R. (2011). *Manual de diseño, construcción, mantención y monitoreo de tableros de madera tensado*. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Civil, Dpto. de Ingeniería Civil. Concepción, Chile
- GT2 (2006). “*Propiedades mecánicas de Eucalyptus grandis Maiden del Centro de Uruguay*”. Informe n° 6. Grupo Técnico de Madera Aserrada de Eucalipto “GT2”.
- IE4-50 (1950). *Norma para proyectos de estructuras de madera para edificios*. Facultad de Ingeniería. Instituto de Estructuras y Transporte. Montevideo, Uruguay.
- INN (1988). NCh1970/1.Of88. *Maderas - Parte 1: Especies latifoliadas– Clasificación visual para uso estructural*
- INN (2005). NCh1207.Of2005. *Pino radiata - Clasificación visual para uso estructural - Especificaciones de los grados de calidad*
- Moya, L.; Laguarda, M.F.; Cagno, M.; Cardoso, A.; Gatto, F.; O’Neill, H. (2013). *Physical and mechanical properties of Loblolly and Slash pine Wood from Uruguayan plantations*. Forest Products Journal. Vol. 63, No. 2
- Oliveira, B. (2010). *Sistemas de treliças modulares para pontes de madeira: uma boa alternativa para o Estado do Pará*. Tesis de Maestría. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- Pigozzo, J. C., Calil, C. J., & Lahr, F. A. R. (2004). *The first composed log-concrete deck bridge in Brazil*. In *Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, Finland*.
- Ritter, M. A. (1990). *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*. Series: US Forest Service Publication, Washington DC: 944 pp.
- Uruguay XXI (2014). *Sector Forestal*. Uruguay XXI. Promoción de Inversiones y Exportaciones. Montevideo, Uruguay