

USO DE PRODUCTOS DE INGENIERÍA DE MADERA URUGUAYA PARA EL DISEÑO DE PUENTES PREFABRICADOS VEHICULARES DE PEQUEÑAS LUCES

Vanesa Baño¹, Sebastián Dieste², Carlos Mazzey¹, Daniela de Souza², Laura Moya³

¹Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. vanesab@fing.edu.uy / cmazzey@fing.edu.uy

²RDA Ingeniería. Montevideo, Uruguay. sdieste@rdaingenieria.com / ddesouza@rdaingenieria.com

³ Facultad de Arquitectura. Universidad ORT Uruguay. Montevideo, Uruguay. moya@ort.edu.uy

RESUMEN

Este trabajo se enmarca 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”, y presenta el diseño y análisis de tres tipologías de puentes de madera nacional.

El objetivo principal del trabajo fue diseñar tipologías simples y prefabricadas de puentes de madera para salvar pequeñas luces (<10m) y soportar sobrecargas de uso elevadas tales como las correspondientes a maquinaria pesada y vehículos de transporte en los accesos a terrenos agrícolas y/o forestales en Uruguay.

Los tres prototipos que se presentan fueron diseñados adaptando la tecnología existente a nivel internacional a las condiciones nacionales, considerando la disponibilidad de madera y productos de ingeniería de madera (del inglés “EWP”- Engineered Wood Products) en el país, los costos comparativos frente a otros materiales, y los tiempos de ejecución, cumpliendo con los requisitos estructurales y de durabilidad de las normas europeas. Estos prototipos incluyen: i) tablero aserrado pretensado, ii) puente tradicional, compuesto por vigas riostras y diagonales de madera laminada encolada, y iii) puente en dos huellas compuesto por vigas de madera laminada encolada y tablero de madera contralaminada.

Actualmente en Uruguay no se produce ni comercializa madera laminada encolada estructural y tampoco madera contralaminada estructural. Sin embargo, ambos productos viabilizan el desarrollo de estructuras de mediano y gran porte, y por ello son fabricados para este trabajo y para ser empleados como componentes estructurales de las tipologías de puentes propuestos. Los requisitos de fabricación así como los primeros resultados de ensayos experimentales de acuerdo a las exigencias europeas se presentan en este artículo.

Finalmente, se analizan las ventajas e inconvenientes de cada tipología y se propone desarrollar con fines comerciales aquella con mejor relación resistencia-costo para salvar pequeñas luces. Adicionalmente, se presentan, posibles diseños de puentes vehiculares para salvar grandes luces.

PALABRAS CLAVE: Puentes vehiculares, madera, sector agroforestal, *Pinus elliottii/taeda*, Eurocódigo 5

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente 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 (Errea et al., 2011) 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, así como el de vehículos que transportan el producto, dentro y fuera de los predios agroforestales.

1.1. Motivación para el estudio

El problema a resolver con el presente trabajo es 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. Muchos de los pasos existentes son de carácter temporal, construidos en la

mayoría de los casos en base a la experiencia personal del constructor y sin el respaldo de un aval técnico que garantice su integridad estructural, pudiendo redundar en el riesgo de accidentes.

1.2. Madera estructural y productos de ingeniería de madera disponibles en Uruguay

El empleo de madera en lugar de otros materiales comúnmente utilizados en la construcción civil, tales como el acero o el hormigón armado, se presenta como una alternativa válida en el marco de un desarrollo sustentable, por las ventajas comparativas que resultan de los procesos en las etapas de producción, procesamiento, uso y disposición final (Astori et al, 2006). Sin embargo en Uruguay, la madera y los productos de ingeniería de madera son escasamente empleados como materiales estructurales debido, entre otros factores, al desconocimiento del material por parte de profesionales y usuarios, a la falta de materiales con especificaciones técnicas conocidas, a la ausencia de un cuerpo normativo consistente y coherente que respalde el empleo de los productos de madera, y hasta hace poco tiempo, escasa disponibilidad del recurso forestal-maderero de procedencia local. Si bien en la última década ha habido un incremento significativo de madera de procedencia local, y en la actualidad el país cuenta con una masa forestal de aproximadamente 1 millón de ha de especies exóticas de rápido crecimiento, fundamentalmente de pinos y eucaliptos (MGAP 2010), la información sobre sus propiedades estructurales y las de algunos productos de ingeniería de madera, es aún limitada y requiere de más investigación.

Actualmente es posible encontrar en el mercado local madera aserrada de pino y eucalipto sin especificaciones técnicas sobre su aptitud estructural, durabilidad y calidad geométrica. Algunas empresas productoras clasifican la madera según sus requisitos productivos, pero esta clasificación es interna y no responde necesariamente a los requisitos que debe cumplir una pieza de madera para uso estructural. Además, es posible encontrar en el mercado local, madera aserrada de pino y rolos de eucalipto impregnados en sales CCA (Cobre, Cromo y Arsénico), generalmente carente de información sobre el grado de penetración y retención del preservante. En contraposición a la producción local, existe también en el mercado uruguayo madera aserrada certificada de pinos del sur (*P. echinata*, *P. elliotii*, *P. palustris* y *P. taeda*) importada de Estados Unidos. Las principales ventajas de esta madera con respecto a la comercializada y de producción local, es que se trata de piezas cepilladas en sus cuatro caras, con sección transversal rectangular o cuadrada constante a lo largo de su eje, y con especificaciones técnicas conocidas: propiedades estructurales, contenido de humedad, y tratamiento preservante, si fuera el caso. El tipo de preservante y las características del proceso de impregnación también son especificados. En particular, es posible encontrar en Uruguay, madera preservada con Azoles de Cobre-Micronizado (MCA) para prevenir el ataque de insectos y hongos, y el proceso de tratamiento (tecnología MicroPro) también cuenta con certificación de calidad.

Dentro de los productos de ingeniería de madera disponibles en el mercado uruguayo y de potencial aplicación en puentes, destaca la madera laminada encolada (MLE) de producción nacional que, al igual que la madera aserrada nacional, se comercializa en el país sin certificación de calidad. Más aún, su producción se realiza sin ningún marco normativo que establezca requisitos mínimos de fabricación, ni que regulen su calidad física y estructural, así como las condiciones de comercialización, diseño y construcción. La madera laminada encolada disponible en Uruguay tiene longitudes de hasta 16 m y altura máximas de 1,00 m y se fabrica únicamente con madera de *Eucalyptus grandis* (Baño et al, 2014).

En cuanto al cálculo estructural, 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 uruguayana y se

desconoce el nombre científico y si los datos presentados se corresponden con valores medios o característicos.

A la fecha existe información preliminar sobre las propiedades estructurales de madera de pino nacional (FONDO MARÍA VIÑAS-ANII, 2010), así como una serie de proyectos en ejecución que brindan respaldo técnico para el desarrollo del presente proyecto de puentes de madera (FONDO FPTA-INIA, 2012; FONDO INNOVAGRO-ANII, 2013; FONDO INDUSTRIAL-DNI, 2012; FONDO INDUSTRIAL-DNI, 2013; BECA INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN-ANII, 2013-a; BECA INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN-ANII, 2013-b; DESARROLLO DE PROTOTIPOS-FUNDACIÓN RICARDONI, 2014).

En base al análisis de la normativa internacional para el cálculo estructural con madera 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 para todos los proyectos vigentes (UNE-EN 1991-1-1:2006/A1, 2010; UNE-EN 1995-2, 2010).

1.3. Antecedentes sobre las tipologías de puentes vehiculares en madera

Dentro del amplio espectro de tipologías de puentes de madera destacan, por la simplicidad del diseño, los puentes de tablero de madera tensada. Los tableros de madera tensada son constituidos con piezas de madera aserrada o laminada colocadas de canto, unidas entre sí por sus caras laterales mediante tensores de acero. Utilizando un gato hidráulico, y a través de los tensores de acero, se aplica una compresión tal que logra el funcionamiento en conjunto del tablero debido al rozamiento existente entre piezas consecutivas.

El sistema de madera tensada tiene como ventaja principal que, utilizando piezas de madera de pequeñas dimensiones, se logra cubrir superficies considerablemente grandes. El sistema correctamente tensado logra un funcionamiento de placa, especialmente útil para el uso en tableros de puentes. Es una solución económica que permite salvar luces de entre 5 y 10 m sin necesidad de vigas inferiores portantes. Los 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 por ello la pudrición de la madera. En algunos casos en los que el tráfico esperado es bajo, la superficie de rodadura se realiza mediante tablero de sacrificio con tablas de pino impregnado o mediante huella de sacrificio. Ejemplos de este tipo existen en Australia, Brasil (Fernandes Fonte, 2004) y Chile (Guiliano, 2011), Figura 1.

La tipología de vigas rectas de madera laminada encolada y plataforma destaca dentro de los sistemas de vigas. La madera laminada encolada permite fabricar elementos 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. Como ejemplo cabe señalar el puente para el paso de vehículos de 30 t y que salva 24 m de luz en Huesca, España (Media Madera, 2004), Figura 1. Otra tipología de interés, dentro de los sistemas de vigas, es la de puente de tablero de madera contralaminada (CLT- cross laminated timber) y apoyado en vigas portantes. La madera contralaminada, producto de relativa reciente aparición (su desarrollo comenzó en la década del 70), consiste en un tablero estructural formado por al menos tres capas de tablas de madera encoladas generalmente por sus cantos, de forma que las tablas de capas sucesivas sean ortogonales entre sí. El tablero apoya sobre vigas principales portantes. Como ejemplo se presenta en la Figura 1 el puente en la autopista A89 en Noruega (Flach, 2010).



Figura 1. Imágenes de puentes: a) tablero de madera tensada; b) sistema vigas y riostras de MLE y c) tablero de madera contralaminada (Baño et al., 2014)

Otras tipologías de puentes vehiculares muy comunes a nivel internacional son las que se resuelven con celosías o reticulados de MLE, como son los ejemplos del puente Kjollsaeterbrua (2005) sobre el río Rena (Abrahamsen, R. B., 2010), el puente de tablero suspendido de celosía en Noruega, el puente cubierto Bauherrschaft (año 1992) con elementos de MLE de Picea abies en Suiza y el puente cubierto Thurbrücke (año 1815) con piezas de madera aserrada de conífera, también en Suiza, Figura 2.



Figura 2. Puentes vehiculares en celosía (Baño et al., 2014)

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo es el diseño de tipologías simples y prefabricadas de puentes de madera de procedencia uruguaya para salvar pequeñas luces para soportar sobrecargas de uso elevadas tales como las correspondientes a maquinaria pesada y vehículos de transporte en los accesos a terrenos agrícolas y/o forestales. Asimismo, se busca analizar la tipología óptima desde el punto de vista de comportamiento estructural, costo y viabilidad de fabricación y conservación.

3. METODOLOGÍA

3.1. Requisitos base para el diseño del puente

Debido al tipo de maquinaria implicada en los procesos productivos, los puentes tendrán que soportar elevadas sobrecargas de uso y, además, tener en cuenta la geometría acorde con el las dimensiones de la maquinaria. Se han estudiado los vehículos que están implicados en los diferentes procesos productivos y se han planteado una serie de requisitos base a tener en cuenta para el diseño del puente:

- El ancho del puente tendrá un mínimo de 4,00 m, solucionando así la posibilidad de paso de gran parte de los vehículos y maquinaria implicados. 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.
- Debido a las propias actividades productivas, el uso del puente será intenso en un breve lapso de tiempo, justamente en los períodos de cosecha agrícola y extracción forestal.
- Se han estudiado los pesos de los equipos y camiones implicados en los procesos productivos, y se ha adoptado como sobrecarga de uso, el tren de cargas correspondiente al antiguo Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV, 1989) con carga total 36 toneladas distribuidas en tres ejes, tal y como se indica en la Figura 3. Teniendo en cuenta el tipo de vehículos que transitan por el puente,

no se estima necesario adoptar las cargas de las especificaciones técnicas complementarias al pliego de condiciones (DNV, 2003), que considera un tren de cargas de 45 toneladas distribuidos en tres ejes.

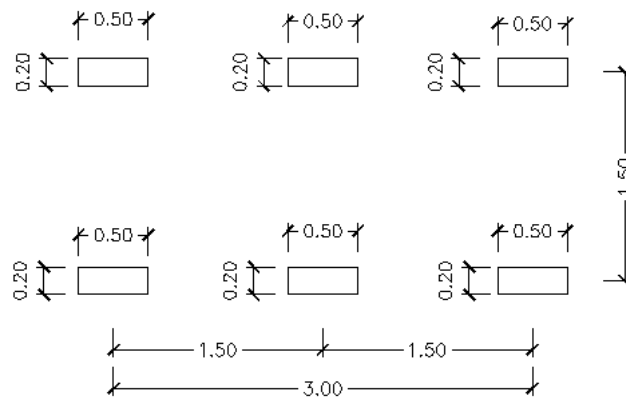


Figura 3. Tren de cargas de 36 t (DNV, 1989)

- A efectos de los cálculos se considerarán las cargas como instantáneas.
- Dada la geometría del puente a diseñar y su uso, la velocidad de paso de los vehículos no será elevada, por lo que se decide adoptar un coeficiente de impacto de valor 1,00. Esta hipótesis está en etapa de evaluación y discusión.
- El diseño contempla la posibilidad de reutilización del puente en varios lugares, es decir que pueda ser trasladado a otro predio una vez terminada la actividad productiva.
- El puente se diseñará considerando la menor altura posible, de manera de reducir la realización de obra complementaria como son terraplenes para dar acceso al puente.
- El diseño de las fundaciones se elaborará con hormigón armado, desarrollando diseños sencillos que no requieran recursos ni mano de obra especializada.
- La clase resistente considerada para el cálculo estructural con madera aserrada de *Pinus elliotii/taeda* es la C14 (Baño y Moya, 2015). Para la MLE se ha decidido adoptar las mismas propiedades físico-mecánicas de la madera aserrada, con una clase resistente C14, dado que no se tienen datos en la actualidad de la clase correspondiente a la MLE de pino fabricado en Uruguay.
- El caudal del cauce es suficiente para inundar el puente algunos días al año.
- Se considera que el puente está sometido a una clase de servicio 3, según el Eurocódigo 5.
- Los requisitos de fabricación de vigas de MLE de pino impregnado serán los descritos en la norma europea UNE-EN 14080 (2013).
- Para la comprobación de todos los elementos estructurales de madera se realizarán las verificaciones de resistencia de las piezas y se consideran verificaciones de servicio, según lo establecido en el Eurocódigo 5.
- Para el prediseño del puente se considerará la flecha del puente debida a la sobrecarga de uso, limitando su valor a $L/250$.

Se ha adoptado un criterio diferente a las recomendaciones del Eurocódigo 5 ya que el control de deformaciones según la normativa resulta determinante en gran parte de los diseños. La limitación de deformaciones tiene como principales objetivos: la integridad de elementos constructivos frágiles que puedan existir sobre la estructura, que en este caso no aplica; el confort de los usuarios; y cuidar la apariencia de la estructura. Dado el uso que tendrán los puentes, se considera razonable no ser tan exigente con estos últimos tres aspectos y controlar la flecha con valores menos rigurosos.

Debido a que las principales cargas que soporta el puente son sobrecargas de uso instantáneas, siendo las cargas permanentes muy inferiores respecto de estas últimas (únicamente el peso propio de la estructura) no se verificará la flecha total diferida.

3.2. Tipologías de puentes estudiadas

Se enumeran a continuación las diferentes tipologías de puentes estudiadas para el diseño final del puente.

3.2.1. Puente de tablero de madera tensada

Una de las alternativas consideradas para el diseño del tablero fue la utilización de tablas de madera aserrada dispuestas de canto una al lado de la otra. Se consideraron medidas estandarizadas de las tablas de madera aserrada, con canto máximo de 200 mm en base a la disponibilidad de madera de pino uruguayo, siendo ésta la principal limitación en el diseño. Para las cargas y el rango de luces para el que se diseña el puente, esta altura no es suficiente, por lo que se descartó el diseño según esta alternativa.

Para solventar el problema de la limitante en el canto de los tableros, se propone una configuración que consiste en un tablero formado por vigas de madera laminada encolada tensadas, pues tanto la sección como la longitud de éstas tienen un rango de medidas amplio que permite una mayor flexibilidad en el diseño. La geometría de cada pieza de MLE considerada fue de 150 mm de ancho, canto a definir según el cálculo estructural y longitud igual a la luz total del puente. La Figura 5 presenta un esquema de tablero de madera laminada encolada tensada.



Figura 4. Puente de tablero de madera M.L.E. tensado

Si bien la construcción del tablero no presenta mayores inconvenientes, todos los tableros de madera tensada requieren de un mantenimiento riguroso para que no pierda sus características, que se traduce en un tensado inicial, otro al mes de su colocación, otro al año y un seguimiento anual. Este sistema de mantenimiento hace que el presente diseño pierda practicidad debido, principalmente, a que estos puentes se ubicarán en lugares de difícil acceso. El mantenimiento en este modelo de puente se vuelve algo sumamente crítico, dada la responsabilidad estructural que presenta.

3.2.2. Puente de vigas y viguetas de madera laminada encolada

Una de las configuraciones más simples, desde el punto de vista de los elementos constructivos, es la utilización de vigas, viguetas, riostras y diagonales de piezas de sección rectangular de MLE. Las uniones entre dichos elementos se consiguen mediante herrajes metálicos. La Figura 5 presenta un diseño de 4 m de anchura con un sistema estructural formado por 5 vigas principales, vigas riostras perpendiculares a éstas colocadas en la zona comprimida y en la traccionada de la viga principal, arriostramiento mediante diagonales de MLE y viguetas que apoyan sobre las riostras y sirven para la colocación de las tablas de rodadura del puente.

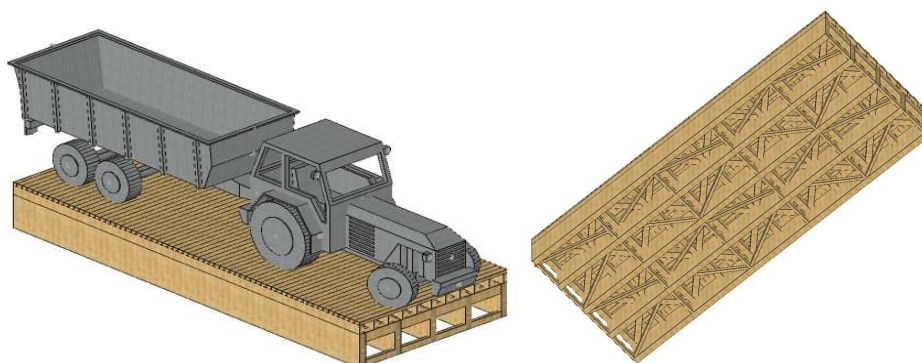


Figura 5. Axonometría superior e inferior de un puente formado por vigas, riostras y viguetas de MLE

3.2.3. Puente de dos huellas con vigas de MLE y tablero de madera contralaminada

El objetivo principal de los prototipos presentados a continuación es el ahorro del volumen de madera, con respecto a un puente tradicional constituido por vigas, viguetas, riostras y tablero, y al tablero tensado.

El modelo presenta dos diferencias sustanciales respecto los puentes tradicionales: la primera es la eliminación de la zona central del puente ubicada entre las ruedas de los vehículos; la segunda se trata de la sustitución de todo el sistema de viguetas y riostras superiores por un tablero de madera contralaminada (CLT) el cual se supondrá colaborante a efectos de la resistencia última de la pieza. La unión entre el tablero y las vigas se piensa materializar mediante conectores metálicos diseñados especialmente para piezas de madera. Dadas las dudas sobre la rigidez de este tipo de conexiones, y a falta de ensayos en la etapa actual del proyecto, se adoptó el criterio de considerar la conexión tablero-vigas solamente para el cálculo de la resistencia última del conjunto. Para las verificaciones correspondientes a estados límites de servicio, únicamente se considera a las vigas como elemento resistente, sin tener en cuenta la conexión de estas con el tablero, lo que claramente es una hipótesis del lado de la seguridad. Esta hipótesis está abierta a discusión y depende principalmente de la rigidez de la conexión y de la posible modificación de la misma con los cambios volumétricos de la madera.

Para determinar las dimensiones del ancho total del puente, así como el ancho y separación entre huellas, se tuvieron en cuenta las dimensiones máximas de la maquinaria. Se consideró un ancho total del puente de 4,00 m, un ancho de cada huella de 1,50 m y una separación entre huellas de 1,00m, tal y como se muestra en la Figura 6.

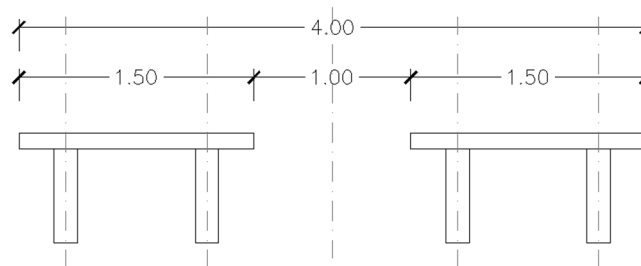


Figura 6. Geometría del puente en dos huellas

Sobre las vigas principales se consideró la colocación de un tablero de madera contralaminada formado por 5 láminas de 33 mm de espesor (165 mm en total) en madera de *P. elliottii/taeda* impregnado en profundidad dispuestas de la siguiente manera: La lámina central y las dos láminas extremas (un total de 3 láminas) se dispusieron con las fibras orientadas favorablemente a la flexión transversal (orientación perpendicular al eje de las vigas), mientras que las dos láminas restantes se dispusieron con las fibras orientadas en el sentido del eje de las vigas. Dado que el tablero se considera colaborante en la flexión de las vigas principales para las verificaciones de estado límite último, las láminas con las fibras en sentido paralelo al eje de las vigas colaborarán con las vigas principales comprimiéndose.

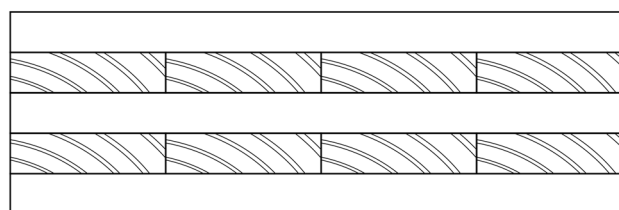


Figura 7. Esquema de disposición de las tablas en el tablero CLT

Se realizó un estudio de la cantidad y configuración de vigas de MLE óptima y se estudió el volumen de madera involucrado en cada diseño, según cómo se distribuye la carga entre las vigas que conforman el diseño. Se han considerado cuatro configuraciones diferentes, considerando vigas principales de MLE de *Pinus elliottii/taeda* impregnado en profundidad, según se detalla a continuación:

3.2.3.1. Configuración 1: Dos vigas

La disposición de las vigas se traduce en un esquema transversal isostático, cuyo caso más desfavorable es cuando las cargas puntuales se aplican exactamente sobre una de las vigas, considerándose que ésta se lleva el 100% de la carga.

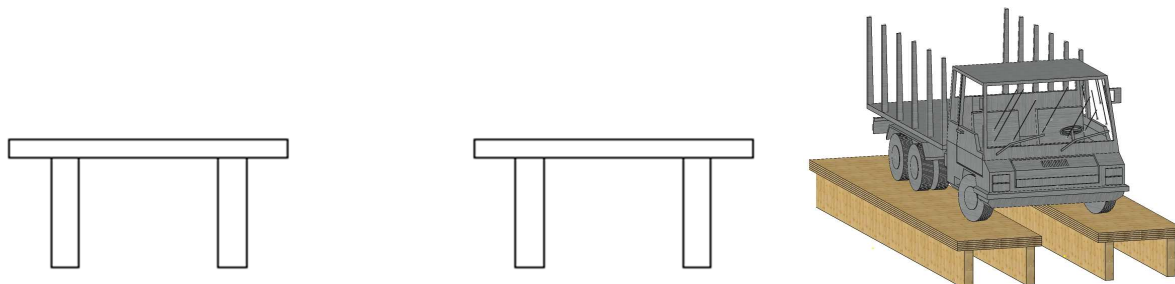


Figura 8. Puente en dos huellas: Configuración 1

3.2.3.2. Configuración 2: Dos pares de vigas

Esta configuración es similar a la anterior, pero aplicando las cargas puntuales sobre un par de vigas pareadas, de modo que la carga se distribuye entre las mismas llevando cada una el 50% de la carga total.

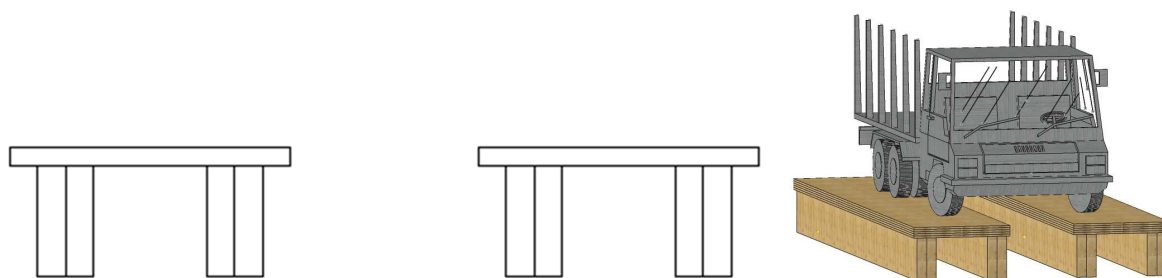


Figura 9. Puente en dos huellas: Configuración 2

3.2.3.3. Configuración 3: Tres vigas

La disposición de las vigas se traduce en un esquema transversal hiperestático, cuyo caso más desfavorable es cuando las cargas puntuales se aplican exactamente sobre una de las vigas externas. En este caso la distribución de esfuerzos involucra a las tres vigas, generando compresión sobre la viga externa donde se aplica la carga y sobre la viga central, y tracción en la viga externa opuesta. La viga donde se aplica la carga se lleva aproximadamente 85% de la carga total aplicada sobre la huella. El hecho de que una de las vigas quede traccionada no es conveniente ya que es difícil garantizar el correcto funcionamiento de la unión entre el tablero y la viga a tracción.

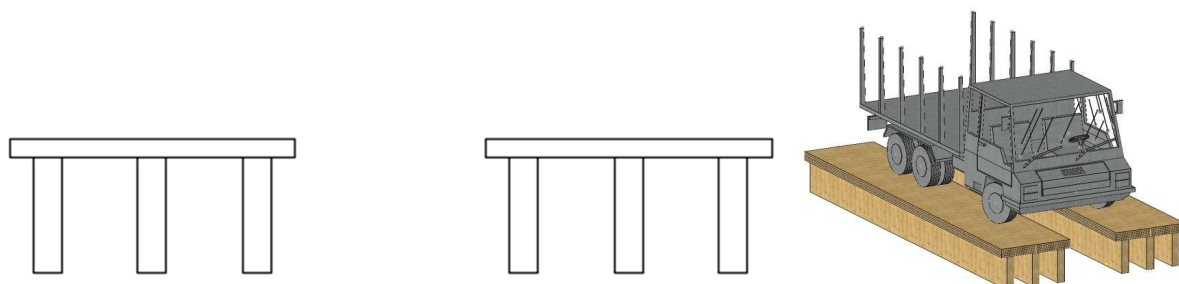


Figura 10. Puente en dos huellas: Configuración 3

3.2.3.4. Configuración 4: Dos vigas simples en los extremos y dos vigas pareadas centrales

La disposición de vigas es similar a la del esquema anterior, con la diferencia de que el apoyo del centro, conformado por dos vigas pareadas, es más rígido y, por lo tanto, la distribución de cargas se modifica. Considerando el caso más desfavorable en que las cargas puntales se aplican exactamente sobre una de las vigas externas, resulta que la misma se lleva aproximadamente el 80% de la carga total aplicada. Presenta las mismas desventajas que el diseño anterior en cuanto a que una de las vigas trabaja a tracción.

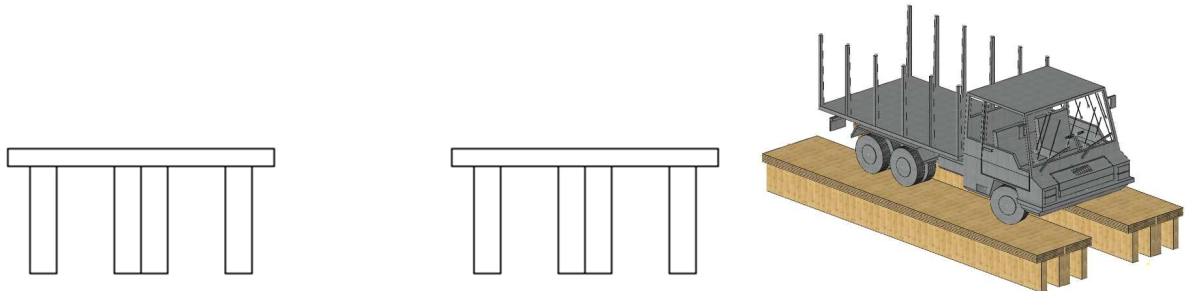


Figura 11. Puente en dos huellas: Configuración 4

4. RESULTADOS

4.1. Cuadro comparativo entre las diferentes tipologías

A efectos de obtener resultados comparables, en la Tabla 1 se muestran las ventajas y desventajas de cada diseño propuesto, así como el dimensionado y volumen de madera involucrado en cada uno.

Tabla 1. Cuadro comparativo de los diferentes diseños de puente

| TIPOLOGÍA DE PUENTE | ESQUEMA TRANSVERSAL | VENTAJAS | DESVENTAJAS | DISEÑO(*) |
|---|---------------------|---|--|---|
| Tablero tensado | | Puede prefabricarse en taller No se requiere de estructura portante principal, el tablero resiste por sí mismo los esfuerzos Se reduce la altura total del puente Facilidad de reutilizarse en otros sitios | Volumen de madera elevado Extremos de madera dura tropical para evitar aplastamiento de la madera encarecen el diseño Sistema de pretensado encarece el diseño Requieren de un mantenimiento riguroso del tensado de cables | Volumen de madera (m ³): 16,00 Altura total puente (m): 0,50 Verificación que limita el diseño: flexión |
| Vigas y viguetas | | Empleo de elementos simples de MLE de sección rectangular | Volumen de madera elevado Altura total del puente y canto de viga elevados Elevado número de herrajes y complejidad de fabricación Difícil de transportar por la anchura total del puente | Tipología en fase de dimensionamiento Volumen estimado de madera (m ³): 18,00 Altura total puente estimada (m): 1,30 |
| Dos huellas: configuración 1 <i>Dos vigas separadas</i> | | Ahorro de volumen de madera debido a la eliminación de la zona central Mano de obra reducida No se requiere mantenimiento riguroso Disminuye el volumen respecto a las configuraciones anteriores | Altura total del puente elevada Canto de viga elevada El aumento de la altura del puente implica un aumento de los costos de la obra del terraplén de acceso Tablero sometido a elevada flexión transversal y cortante | Volumen de madera (m ³): 9,24 Altura viga (m): 1,10 Altura tablero (m): 0,165 Altura total puente (m): 1,26 Verificación que limita el diseño: cortante |
| Dos huellas: configuración 2 <i>Dos pares de vigas apareadas</i> | | Ahorro de volumen de madera debido a la eliminación de la zona central Mano de obra reducida No se requiere mantenimiento riguroso Volumen de madera reducido Disminuye el canto de viga con respecto a la configuración Buena distribución de los esfuerzos sobre las vigas | Altura total del puente elevada El aumento de la altura del puente implica un aumento de los costos de la obra del terraplén de acceso Tablero sometido a elevada flexión transversal y cortante | Volumen de madera (m ³): 11,16 Altura viga (m): 0,75 Altura tablero (m): 0,165 Altura total puente (m): 0,915 Verificación que limita el diseño: flecha |
| Dos huellas: configuración 3 <i>Tres vigas separadas</i> | | Ahorro de volumen de madera debido a la eliminación de la zona central Mano de obra reducida No se requiere mantenimiento riguroso Disminuye el volumen de madera con respecto a configuración Disminuye el canto de viga con respecto a la configuración | Aumenta el canto de la viga y la altura total del puente con respecto a la configuración anterior | Volumen de madera (m ³): 10,80 Altura viga (m): 0,95 Altura tablero (m): 0,165 Altura total puente (m): 1,065 Verificación que limita el diseño: cortante/flexión |
| Dos huellas: configuración 4 <i>Dos vigas simples laterales y dos pareadas en el centro</i> | | Ahorro de volumen de madera debido a la eliminación de la zona central Mano de obra reducida No se requiere mantenimiento riguroso Volumen de madera reducido. Disminuye ligeramente la altura total del puente con respecto a la configuración anterior | Aumenta el volumen de madera con respecto a la configuración anterior | Volumen de madera (m ³): 12,60 Altura viga (m): 0,90 Altura tablero (m): 0,165 Altura total puente (m): 1,015 Verificación que limita el diseño: cortante/flexión |

(*) Los datos que aparecen en el cuadro responden a las hipótesis de partida descritas en la metodología.

4.2. Tipología adoptada

Como puede observarse en la Tabla 1, la Configuración 2 del puente de dos huellas combina la ventaja de tener un volumen reducido de madera con una altura total del puente aceptable, por lo que se decide

adoptar el mismo como diseño óptimo y estudiar su comportamiento para distintas luces dentro del rango manejado para este proyecto.

Como se ha mencionado anteriormente, se ha diseñado en estado límite último para cortante y momento flector. Por otra parte se ha limitado el valor de la flecha debido a la sobrecarga en estado límite de servicio. En la Figura 12 se muestra la altura de viga de MLE mínima diseñada para resistir el cortante y el momento flector, así como para verificar la flecha debido a la sobrecarga para diferentes luces. Se han manejado luces de entre 4,00 m y 13,00 m.



Figura 11. Relación entre el canto de viga y la luz del puente para las comprobaciones de resistencia a flexión, a cortante y a flecha para la configuración 2 del puente de dos huellas

Como puede observarse en la Figura 11, para luces cortas, la limitación en el diseño en estado límite último se da por cortante en combinación con la flexión, mientras que para luces mayores la limitante en estado límite último es únicamente la flexión.

Por otra parte la verificación de estado límite de servicio resulta más restrictiva que las verificaciones en estado límite último en luces cortas y medias. Esta diferencia se hace menos pronunciada a medida que se aumenta la luz, siendo para la luz de aproximadamente 12,00 m igual de restrictiva que la verificación por flexión.

En lo anterior es importante tener en cuenta que el diseño en estado límite último se ha realizado considerando la colaboración tablero-vigas, mientras que el diseño en estado límite de servicio se ha realizado considerando únicamente a las vigas como elementos estructurales, razón por la cual, aún para el rango menor de luces consideradas, la limitación de deformaciones es el criterio de diseño más restrictivo.

5. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares de este trabajo sugieren que el empleo de madera de procedencia local resulta una alternativa válida para estructuras de puentes de madera para el paso de vehículos pesados de hasta 10,00 m de luz.

Se analizaron tres tipologías con el fin de determinar el diseño más eficiente y económico: i) puente de madera tensada, ii) puente de vigas y viguetas de madera laminada encolada y iii) puente de dos huellas con tablero de madera contralaminada, considerando cuatro configuraciones diferentes.

Analizadas las diferentes configuraciones y el volumen de madera involucrado en cada diseño, se encontró que la tipología de puente de dos huellas, donde cada huella se configura con dos vigas pareadas en cada extremo (4 vigas por huella), y tablero de madera contralaminada, es la más eficiente desde el punto de vista estructural y económico.

En base a la relación entre canto y viga y luz del puente para los estados límite últimos y de servicio se concluye que el dimensionado de la estructura según la tipología descrita resulta óptimo para luces entre 4,00 y 10,00 m. En este rango las verificaciones se encuentran con coeficientes de aprovechamiento próximos a 1,00, mientras que para luces más largas, la estructura está sobredimensionada para el esfuerzo de cortante.

- El procedimiento de verificación de la estructura para ELU, determinó que el esfuerzo de flexión limita el diseño para luces grandes, mientras que flexión y cortante limitan el diseño para luces pequeñas (en luces de 4,5 m ambos esfuerzos limitan en igual proporción).
- La verificación de la estructura en ELS mostró que la flecha es lo más restrictivo en el diseño en puentes de luces menores a aproximadamente 11,00 m. Como se señaló previamente, los criterios de limitación de flechas deben discutirse, puesto que se considera que no son aplicables los criterios propuestos por la normativa de referencia para puentes de carreteras normales, pero también hay que considerar que flechas, y por lo tanto curvaturas, elevadas, podrían afectar al sistema de conexión tablero-vigas.

El trabajo futuro involucra ensayos físicos y mecánicos de los productos de ingeniería de madera propuestos (madera laminada encolada y madera contralaminada) y la validación experimental del puente a través de la construcción y ensayos sobre un prototipo a escala real.

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.

BIBLIOGRAFÍA

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

Astori, R E; Barrios D´ambra R; Solari, F; Kostesty LE. 2006. Puente carretero de estructura mixta de hormigón-madera. 1ª etapa. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2006. Universidad Nacional del Nordeste.

Baño, V.; Dieste, S.; Calil Junior, C.; Giuliano, G.M.; Moya, L. (2014). Revisión de las tipologías estructurales de puentes de madera de pequeñas luces para el paso de vehículos pesados. XXXVI JSIE. Noviembre 2014. Montevideo, Uruguay.

Baño, V.; Moya, L. (2015). Tecnología de la construcción con madera en Uruguay. Estado del arte y perspectivas. II CBCTEM. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Belo Horizonte, Brasil. (en estado de publicación)

DNV (1989). Pliego de condiciones de la Dirección Nacional de Vialidad para la construcción de puentes y carreteras. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Montevideo, Uruguay.

DNV (2003). Especificaciones técnicas complementarias y/o modificativas del Pliego de condiciones para la construcción de puentes y carreteras de la Dirección Nacional de Vialidad. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. 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 ICBT 2010. International Conference on Timber Bridges. Lillehammer, Norway.

Fernandes da Fonte, T. (2004). Pontes protendidas de eucalipto citridora. Tesis de maestría Escola de Engenharia de Sao Carlos. Universidade de Sao Paulo.

FONDO INDUSTRIAL-DNI (2012). Dirección Nacional de Industrias del MIEM. Proyecto "Evaluación de madera de pino por clasificación visual para uso estructural"..

FONDO INDUSTRIAL-DNI (2014). Dirección Nacional de Industrias del MIEM. Proyecto "Documentos técnicos base para la normalización de estructuras y construcciones con madera". Exp. No. 2013-8-2-0003823.

FONDO MARÍA VIÑAS-ANII (2010). Caracterización estructural de madera aserrada de pinos (*P. elliotii* y *P. taeda*) asociada a grados estructurales. Agencia Nacional de Investigación e Innovación. PR FMV 2009_1_2772

FONDO FPTA-INIA (2012). Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal en Uruguay. Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria. Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas, INIA. Proyecto No. FPTA-306.

FONDO INNOVAGRO-ANII (2013). Estudio de las propiedades estructurales de vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* producida en Uruguay para su asignación a clases resistentes". Agencia Nacional de Investigación e Innovación. FSA_1_2013_1_12897

FONDO BECA INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN-ANII (2013). Determinación experimental del comportamiento elasto-plástico de la madera de *Pinus elliotii* de procedencia uruguaya y aplicación en el desarrollo de modelos de elementos finitos para el cálculo estructural. Agencia Nacional de Investigación e Innovación. INI_X_2013_1_1012202

FONDO BECA INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN-ANII (2013). Determinación de las constantes elásticas de madera de *Pinus elliotii* y *Pinus taeda*. Agencia Nacional de Investigación e Innovación. INI_X_2013_1_101164

FONDO DESARROLLO DE PROTOTIPOS-FUNDACIÓN RICALDONI (2014). Panel estructural autoportante de madera contralaminada (CLT) a partir de madera de pino proveniente de raleos. Programa de fomento al emprendedorismo. F.R. F07-2014.

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.

IE4-50 (1950). Norma para proyectos de estructuras de madera para edificios. Facultad de Ingeniería. Instituto de Estructuras y Transporte. Montevideo, Uruguay.

Media Madera, Ingenieros Consultores, S.A. (2004). Galería de imágenes de puentes (www.mediamadera.com)

MGAP (2010). Monitoreo de los recursos forestales. Inventario forestal nacional. Resumen de resultados. Dirección General Forestal, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.

UNE-EN 1991-1-1:2006: Eurocódigo 5 - Proyecto de estructuras de madera - Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.

UNE-EN 1991-1-1:2006/A1:2010: Eurocódigo 5 - Proyecto de estructuras de madera - Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.

UNE-EN 1995-2:2010: Eurocódigo 5 - Proyecto de estructuras de madera - Parte 2: Puentes.

UNE-EN 14080:2013. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Requisitos