



**DISEÑO DE PUENTES
REALIZADOS CON MADERA
DE PROCEDENCIA LOCAL PARA
EL PASO DE VEHÍCULOS
PESADOS EN EL SECTOR
AGRÍCOLA Y FORESTAL**

FEBRERO 2018

SERIE
FPTA-INIA

62

DISEÑO DE PUENTES REALIZADOS CON MADERA DE PROCEDENCIA LOCAL PARA EL PASO DE VEHÍCULOS PESADOS EN EL SECTOR AGRÍCOLA Y FORESTAL

Proyecto FPTA - 306

Autores: Vanesa Baño¹, Carlos Mazzey², Laura Moya³ y Sebastián Dieste⁴

¹ Dr. Ing. Montes. Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

² Estudiante Ing. Civil Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

³ Ph.D. Arq. Facultad de Arquitectura, Universidad ORT Uruguay.

⁴ Ing.Civil. RDA Ingenieros

Título: Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal

Investigadores FPTA-306-INIA:

Nombre	Institución/Empresa
Vanesa Baño (Dr. Ing. Montes)	Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República
Laura Moya (PhD Arq.)	Facultad de Arquitectura. Universidad ORT Uruguay
Carlos Mazzey (Estudiante Ing. Civil)	Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República
Sebastián Dieste (Ing. Civil)	RDA Ingenieros
Antonio Dieste (Ing. Civil)	CYD Ingenieros
Gonzalo Cetrangolo (Dr. Ing.)	Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República
Atilio Morquio (Dr. Ing. Civil)	Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República
Santiago Díaz (MSc. Ing. Agr.)	Productor agrícola
Roberto Bavosi (Ing. Agr.)	Forestal Caja Bancaria

Colaboradores FPTA-306-INIA:

Nombre	Institución/Empresa
Daniela de Souza (Ing. Civil)	RDA Ingenieros
Abel Vega (Dr. Ing. Montes)	Becario postdoctoral ANII en el Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República
Daniel Godoy (MSc. Arq.)	Instituto de Ensayos de Materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República
Leandro Domenech (Ing. Civil)	Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República

Serie: FPTA N° 62

ISBN: 978-9974-38-394-4

© 2018, INIA

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología de INIA
Andes 1365, Piso 12. Montevideo, Uruguay
<http://www.inia.org.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Este libro no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

Integración de la Junta Directiva

D.M.T.V., Ph.D. José Luis Repetto - Presidente

Ing. Agr., M.Sc., Ph.D. Álvaro Roel - Vicepresidente



Ing. Agr., M.Sc. Diego Payssé Salgado

Ing. Agr. Jorge Peñaricano



Ing. Agr. Pablo Gorriti

Ing. Agr. Alberto Bozzo



FONDO DE PROMOCIÓN DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) fue instituido por el artículo 18° de la ley 16.065 (ley de creación del INIA), con el destino de financiar proyectos especiales de investigación tecnológica relativos al sector agropecuario del Uruguay, no previstos en los planes del Instituto.

El FPTA se integra con la afectación preceptiva del 10% de los recursos del INIA provenientes del financiamiento básico (adicional del 4o/oo del Impuesto a la Enajenación de Bienes Agropecuarios y contrapartida del Estado), con aportes voluntarios que efectúen los productores u otras instituciones, y con los fondos provenientes de financiamiento externo con tal fin.

EL FPTA es un instrumento para financiar la ejecución de proyectos de investigación en forma conjunta entre INIA y otras organizaciones nacionales o internacionales, y una herramienta para coordinar las políticas tecnológicas nacionales para el agro.

Los proyectos a ser financiados por el FPTA pueden surgir de propuestas presentadas por:

- a) los productores agropecuarios, beneficiarios finales de la investigación, o por sus instituciones.
- b) por instituciones nacionales o internacionales ejecutoras de la investigación, de acuerdo a temas definidos por sí o en acuerdo con INIA.
- c) por consultoras privadas, organizaciones no gubernamentales o cualquier otro organismo con capacidad para ejecutar la investigación propuesta.

En todos los casos, la Junta Directiva del INIA decide la aplicación de recursos del FPTA para financiar proyectos, de acuerdo a su potencial contribución al desarrollo del sector agropecuario nacional y del acervo científico y tecnológico relativo a la investigación agropecuaria.

El INIA a través de su Junta Directiva y de sus técnicos especializados en las diferentes áreas de investigación, asesora y facilita la presentación de proyectos a los potenciales interesados. Las políticas y procedimientos para la presentación de proyectos son fijados periódicamente y hechos públicos a través de una amplia gama de medios de comunicación.

El FPTA es un instrumento para profundizar las vinculaciones tecnológicas con instituciones públicas y privadas, a los efectos de llevar a cabo proyectos conjuntos.

De esta manera, se busca potenciar el uso de capacidades técnicas y de infraestructura instalada, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de los recursos nacionales para resolver problemas tecnológicos del sector agropecuario.

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria contribuye de esta manera a la consolidación de un sistema integrado de investigación agropecuaria para el Uruguay.

A través del Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA), INIA ha financiado numerosos proyectos de investigación agropecuaria a distintas instituciones nacionales e internacionales. Muchos de estos proyectos han producido resultados que se integran a las recomendaciones tecnológicas que realiza la institución por sus medios habituales.

En esta serie de publicaciones, se han seleccionado los proyectos cuyos resultados se considera contribuyen al desarrollo del sector agropecuario nacional. Su relevancia, el potencial impacto de sus conclusiones y recomendaciones, y su aporte al conocimiento científico y tecnológico nacional e internacional, hacen necesaria la amplia difusión de estos resultados, objetivo al cual se pretende contribuir con esta publicación.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	9
2. NECESIDADES Y OPORTUNIDADES	10
2.1 Necesidades	10
2.2 Oportunidades: disponibilidad de madera en Uruguay con potencial uso estructural	12
3. DISEÑO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DEL PUENTE	15
3.1 Revisión de tipologías estructurales de puentes de madera	15
3.2 Diseño de modelos de puentes	18
3.3 Metodología de cálculo estructural en madera	21
3.4 Estribos	22
3.5 Prototipo de puente de madera a fabricar	24
4. FABRICACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS ELEMENTOS DE MADERA	25
4.1 Requisitos de fabricación de vigas de madera laminada encolada	25
4.2 Fabricación de Paneles CLT	27
4.3 Determinación de las propiedades mecánicas de las vigas de MLE y de los paneles CLT de pino	27
5. FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO DE PUENTE	28
5.1 Ejecución del prototipo de puente	28
5.2 Validación estructural del puente	31
6. ANÁLISIS ECONÓMICO	33
7. DIFUSIÓN	33
BIBLIOGRAFÍA	34

Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal

FPTA 306

Período de ejecución:

Enero – Enero 2018

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 2010). 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. En muchos casos, existen pasos 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. La infraestructura vial de las explotaciones debería, por lo tanto, contemplar los requisitos para el paso de la maquinaria involucrada en la explotación, así como el de vehículos que transportan los productos agroforestales.

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, a la escasa disponibilidad del recurso forestal-maderero de procedencia local. Aunque

esto está cambiando. La elevada disponibilidad actual de madera, con potencial uso estructural, producto de las plantaciones forestales nacionales realizadas en la década del 90 (principalmente pino y eucalipto), se entiende como una oportunidad para el desarrollo de productos estructurales para su uso en arquitectura e ingeniería civil. Por lo tanto, 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 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 (Ramage et al. 2017). 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*.

Por lo tanto, el objetivo principal del presente proyecto fue el diseño, cálculo estructural y construcción de un puente para el paso de vehículos pesados en el sector agrícola y forestal utilizando madera de procedencia local.

El presente documento resume las actividades realizadas en el marco del proyecto titulado "Diseño de puentes realizados con madera de procedencia local para el paso de vehículos pesados en el sector

agrícola y forestal". Está conformado por siete capítulos, que recogen la información realizada en cada actividad del proyecto y se estructura de la siguiente manera: Capítulo 1) Introducción; Capítulo 2) Necesidades y oportunidades; Capítulo 3) Diseño y cálculo estructural del puente; Capítulo 4) Análisis estructural de la madera empleada; Capítulo 5) Fabricación y validación del prototipo de puente; Capítulo 6) Análisis económico y Capítulo 7) Difusión.

2. NECESIDADES Y OPORTUNIDADES

2.1 Necesidades

El estudio de las necesidades de pasos agroforestales para salvar accidentes geográficos y permitir el paso de maquinaria y vehículos de transporte pesado se realizó en base a encuestas a productores forestales y agrícolas. Para ello se describieron las etapas de producción y explotación de cada uno con el fin de analizar el tipo de maquinaria y camiones involucrados,

y conocer el peso, dimensiones y frecuencia de paso por el puente a diseñar. En función de este análisis, se estudiaron las necesidades de puentes para cada cultivo. La Tabla 1 describe de forma esquemática la metodología para el estudio de las necesidades de pasos forestales y la Tabla 2 las necesidades de los pasos agrícolas.

Con el fin de facilitar la comprensión de algunos términos usados, se muestra a continuación un glosario de términos agroforestales: Plataforma= cabezal; Trocha= ancho; Feller= taladora; Harvester= cosechadora; Forwader= autocargador; y Skidder= tractor de arrastre.

Como resumen general de las exigencias dimensionales y de carga de la maquinaria por tipo de cultivo a considerar en el diseño de los puentes, éstas se describen en la Tabla 3. Asimismo, se incluyen los viajes estimados por el puente durante el proceso de cosecha y de transporte del cultivo.

Tabla 1. Resumen del estudio de necesidades de pasos forestales en las diferentes etapas

PRODUCTO	ETAPAS	MAQUINARIA Y CAMIONES	REQUISITOS Y NECESIDADES
MADERA PARA TRANSFORMACIÓN QUÍMICA (Celulosa)	HERBICIDA	Tractor 120-140 hp y trocha 2.6 m.	1.Cosechadora en aprovechamiento forestal de eucalipto: 10-210 pasos/semana 2. Camiones: 10 viajes/día aproximadamente
	LABOREO	Tractor 120-140 hp y trocha 2.6 m.	
	PLANTACIÓN	Tractor 120-140 hp para y trocha 2.6 m + máquina plantadora	
	APOYOS	Tractor 80 hp y trocha 2.2. m	
	HERBICIDA	Tractor 120-140 hp y trocha 2.6 m.	
	COSECHA	Cosechadora y procesadora forestal	
MADERA PARA TRANSFORMACIÓN MECÁNICA (Carpintería y Construcción)	HERBICIDA	Tractor 120-140 hp y trocha 2.6 m.	3.Paso esporádico de la maquinaria pesada 4. Se evita que los camiones transiten dentro del predio. Cuando transitan, la carga puede alcanzar las 50 t 5. Necesidad de puentes fáciles de armar, con especies de madera accesibles y poco tiempo de montaje "in situ"
	LABOREO	Tractor 120-140 hp y trocha 2.6 m.	
	PLANTACIÓN	Tractor 120-140 hp + máquina plantadora	
	APOYOS	Tractor 80 hp y trocha 2.2. m	
	HERBICIDA	Tractor 120-140 hp y trocha 2.6 m.	
	1° RALEO NO COMERCIAL	Tractor 120 hp y ancho 2.6 m + equipos de corte Feller o cosechadora de 18 t y ancho de 3.0 m	
	COSECHA ¹ (raleos comerciales y tala rasa)	Cosechadora o equipos de corte Feller (3 m de ancho y 18 t de peso) y procesadora forestal (30 t y ancho 3.0 m) Forwarder (autocargador) y Skidder (tractor de arrastre)- 30 t cargado Camión cargado hasta 50 t Cargador frontal	

Fuentes consultadas: UPM, FCB, A. Dieste, INIA

Tabla 2. Resumen del estudio de necesidades de pasos agrícolas para diferentes cultivos en las diferentes etapas

PRODUCTO	ETAPAS	MAQUINARIA Y CAMIONES	REQUISITOS Y NECESIDADES
SOJA Y OTROS GRANOS (Plantación de 14 Ha)	LABOREO	Tractor 200 hp + disquera	1. Es habitual un cultivo con un cereal de invierno entre mayo y noviembre (trigo, avena, centeno, etc.), además del de soja, donde se utiliza la misma maquinaria. 2. La cosechadora puede regular la altura del cabezal unos 80-100 cm 3. Se puede desarmar el cabezal de la cosechadora (tiempo estimado en desarmar y armar el cabezal: 15-20 min.) 4. Muchos de los pasos son inundables. 5. El paso del predio donde se realizará el prototipo de puente se inunda unas 10 veces al año y la crecida dura unas 12 h. 6. Los camiones de carga no suelen acceder al predio, pero se considera una gran ventaja el diseño de un puente que permita su acceso.
	SIEMBRA	Sembradora	
	PULVERIZADO	Pulverizadora plegable tirada con tractor de 200 hp.	
	COSECHA	Cosechadora + cabezal como remolque (3 ejes) Tolvas de la cosechadora, que se queda a la entrada del puente Tractor + remolque	
SOJA Y OTROS GRANOS (Plantación >100 Ha)	SIEMBRA	Sembradora de araña (air-drill) + tractor 250 hp	1. Cosechas: 1 cosecha/año 2. Se cosecha todos los años 3. Las necesidades suelen ser de puentes menores a 15 m de longitud y con un ancho máximo de 7 m para el paso de las cosechadoras
	FERTILIZACIÓN	Tractores de 120-150 hp Fertilizadoras con tolvas Camión para el transporte del fertilizante (peso cargado: 45 t)	
	PULVERIZADO	Pulverizadoras autopropulsadas con tracción de 2 ó 4 ruedas (mosquitos). Tamaños: 22-36m de ancho operativo, siendo las más utilizadas de 28 m.	
	COSECHA	Cosechadora con ancho de corte operativo entre 9 y 12 m. Tractor + tolva de entre 5-20 t Camión	
ARROZ	LABOREO	Tractores: 80-350 hp	1. Cosechas: 1 cosecha/año 2. Se cosecha todos los años 3. Las necesidades suelen ser de puentes menores a 15 m de longitud y con un ancho máximo de 7 m para el paso de las cosechadoras
	SIEMBRA	Camión 30 t o tractor pequeño con zorra	
	COSECHA	Cosechadora (18 t) Carretones (20 t) tirados por tractores de 200 hp Camiones de hasta 45 t en caminos internos ²	

Fuentes consultadas: S. Arana, S. Díaz, Casarone

Tabla 3. Exigencias dimensionales y de carga para el diseño de los puentes

	APROVECHAMIENTO FORESTAL	CULTIVO SOJA Y OTROS GRANOS	CULTIVO ARROZ	
COSECHA	ANCHO DE PASO	3.5 m	Máx. 5.7 m (h libre:21.6 cm)	3.4 m
	LONGITUD	Distancia entre ejes: 3.0-6.1 m	Long.: 11 m Distancia entre ejes: 3 m	Distancia entre ejes: 3.6 m
	PESO	24 t	24 t	18t
	VIAJES	10-210 viajes/semana	4 viajes/año	2 viajes/año
	TRANSPORTE FUERA DEL PREDIO	ANCHO DE PASO	2.6 m	2.6 m
TRANSPORTE FUERA DEL PREDIO	LONGITUD	13-30 m	13-30 m	13-30 m
	PESO	45 t	45 t	45 t
	VIAJES	Carga excepcional: 50 t 30 viajes/día	Dentro del predio: 10 t -	Carga excepcional: 52 t -

2.2 Oportunidades: disponibilidad de madera en Uruguay con potencial uso estructural

La evaluación de la disponibilidad de madera estructural y productos de ingeniería de madera (en función de la especie, del formato, de las dimensiones, de la durabilidad natural, de sus propiedades mecánicas, etc.) en el mercado uruguayo pasa por el análisis de la madera disponible en el país con potencial uso estructural para su uso en el diseño de puentes.

2.2.1. Especies de madera cultivadas en Uruguay

El 45% de la superficie forestada en Uruguay tiene fines de uso industrial. De este 45 %, 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. elliotii*, *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, lo que supone el 71% del volumen de madera disponible en Uruguay. El 29 % restante (4.2 millones de m³) corresponde a la industria de transformación mecánica (productos para la construcción y la carpintería), de los cuales 3 millones de m³ corresponden a pinos (fundamentalmente *P. taeda*) y 1.2 millones de m³ a los eucaliptos *grandis* (que engloba las especies *Eucalyptus grandis*, *E. Saligna* e híbridos de ellos) (Dieste 2012). Además, el volumen de madera sin uso industrial en el año 2014 ascendía a 1.7 millones de m³ de trozas de

pino y a 0.4 millones de m³ de eucalipto (Dieste, 2014).

2.2.2. Madera aserrada de procedencia nacional

La madera aserrada para aplicaciones estructurales debe ser previamente clasificada de acuerdo a su resistencia mecánica, rigidez y densidad, a un contenido de humedad de referencia del 12%. La clasificación estructural permite asignar a cada categoría de madera (normalmente definida por la especie, la procedencia y el tamaño del elemento estructural de madera considerado) una familia de valores característicos de sus propiedades mecánicas y densidad que posibilita diseñar, calcular y construir edificaciones y puentes de madera en forma confiable y eficiente.

En Uruguay, la madera aserrada de procedencia nacional no se encuentra clasificada estructuralmente y no se comercializa seca al 12% de contenido de humedad, aunque existen documentos publicados orientados a la creación de una normativa de clasificación de las especies plantadas en Uruguay (Moya et al. 2017, Baño et al 2015, Baño y Moya 2015, Moya et al 2015, Moya et al 2013). En dichos documentos se propone una tabla de clasificación visual de las tablas de madera de pino y eucalipto en base a la presencia de singularidades naturales de la madera y a defectos en el procesamiento industrial (nudos, desvío de fibra, fisuras, deformaciones de secado, etc.). La Tabla 1 muestra los valores límite permitidos para cada una de estas singularidades de modo de asociar una calidad visual EC7 a cada tabla de *Pinus elliotii/taeda*.

Tabla 1. Clasificación visual estructural de la madera de *Pinus taeda/elliottii* uruguayo

CRITERIOS DE CALIDAD	CALIDAD VISUAL EC7
Diámetro de los nudos (d) sobre la cara (h)	$d < 2/5 h$
Diámetro de los nudos (d) sobre el canto (b)	$d < 2/5 b$
Presencia de médula	Permitida
Dirección de las fibras	Desviación menor que 1:6
Anchura máxima de los anillos de crecimiento	-
Fendas de secado pasantes / Rajaduras	$< 1,0 m$ ó $< (1/4)l$
Fendas de secado no pasantes / Grietas	$< 1,5 m$ ó $< (1/2)l$
Fendas/Fisuras de rayo, heladura o abatimiento	No permitidas
Bolsas de resina y entrecasco	$< 2 h$
Madera de reacción: compresión	-
Alteraciones biológicas: - Azulado - Hongos de pudrición - Galerías de insectos	Permitido No permitido Diámetro de los orificios $< 2 mm$
Deformaciones: - Curvatura de cara, combado o arqueadura - Curvatura de canto o encorvadura - Alabeo o torcedura - Abarquillado o acanaladura - Arista faltante	$< 12 mm$ $< 9 mm$ $< 1,5 mm$ - $< 1/5 h$

Los valores característicos de las propiedades físicas y mecánicas, referidos a un 12% de contenido de humedad, asociados a la calidad

visual EC7 se presentan en la Tabla 2. Estos son asimilables a una clase resistente C14 de la norma europea EN 338 (EN 338 2016).

Tabla 2. Valores característicos de las propiedades mecánicas de la madera clasificada como EC7

PROPIEDAD		
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra ($E_{0,m}$)	N/mm ²	7040
Resistencia a flexión ($f_{m,k}$)	N/mm ²	14.6
Densidad (ρ_k)	Kg/m ³	348

La información sobre las propiedades estructurales de madera aserrada de *Eucalyptus grandis* uruguayo es parcial y muy reciente, resultado del proyecto de investigación en curso denominado "Estudio de las propiedades estructurales de vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* producida en Uruguay para su asignación a clases resistentes" (INNOVAGRO 2013). Se puede estimar que los valores característicos de las propiedades mecánicas, asociados a una calidad visual "Grado 2" de acuerdo a la norma argentina de clasificación visual estructural de madera de *E. grandis* (IRAM 9662-2:2005), rondan

los correspondientes a una clase resistente D20 (EN 338:2016).

2.2.3. Madera aserrada importada

Actualmente es posible encontrar en el mercado uruguayo madera aserrada importada de EEUU de las especies pinos del sur (*P. echinata*, *P. elliottii*, *P. palustris* y *P. taeda*). A diferencia de la madera producida localmente, ésta cuenta con certificación de calidad estructural, esto es: i) madera con propiedades estructurales conocidas, ii) seca en estufa al contenido de humedad normativo, y iii) calibrada.

Tradicionalmente, la madera utilizada con fines estructurales en Uruguay era de procedencia extranjera, principalmente de Brasil y Paraguay y actualmente se comercializan en el país madera importada de cedro, curupay, lapacho, quebracho colorado, entre otros. Esta madera se vuelca en el mercado sin especificaciones técnicas, por lo cual el proyectista de estructuras se ve obligado a diseñar con valores conservadores de propiedades estructurales extraídos de manuales de referencia, reglamentos y normas extranjeras.

2.2.4. Madera laminada encolada (MLE) de producción nacional

Actualmente no se comercializa madera laminada encolada estructural de producción nacional. Si bien la técnica del laminado encolado no es nueva en el país (introducida en la década de los noventa), y al menos tres empresas están dedicadas a su producción, la madera laminada encolada que se fabrica en la actualidad no cumple con los requerimientos técnicos de un material estructural. Su uso teórico es en productos de carpintería y mueble, sin embargo, son varias las edificaciones en el país construidas con estos productos y con función portante. El riesgo de un potencial fallo estructural no suele ser inmediato, sino que puede producirse en cualquier momento de su vida útil, ejemplo de ello es el colapso de las vigas de MLE de la cubierta de una piscina de madera laminada en Montevideo, Montevideo, que se produjo tras 10 años en carga (Baño et al. 2015).

A efectos de contribuir a resolver estas limitantes, se desarrolló un proyecto de investigación (INNOVAGRO 2013), llevado a cabo por investigadores del equipo multidisciplinar Universidad ORT-LATU- Universidad de la República, para establecer los requisitos de fabricación y caracterizar estructuralmente vigas de madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* y de *Pinus taeda/elliottii* producidas en Uruguay. Los primeros resultados mostraron una mejora en el comportamiento estructural de las

uniones *finger-joint* de las láminas al aumentar la longitud del diente de 11 a 15 mm (Vega et al. 2017). Se prevé que, con la culminación de este proyecto, se cuente con información técnica sobre las propiedades estructurales de la madera laminada encolada estructural de eucalipto y pino nacional.

2.2.5. Madera laminada encolada importada

Actualmente es posible encontrar en el mercado local vigas de madera laminada de procedencia argentina con certificado de calidad expedido por el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Existe también la posibilidad de importación directa de madera aserrada o madera laminada encolada con certificación estructural, tanto de Argentina o Chile como de Europa.

2.2.6. Durabilidad natural e impregnabilidad de madera de pino y eucalipto

No existen datos nacionales publicados de durabilidad natural de los pinos de procedencia uruguaya. De acuerdo a la norma EN 350-2 (EN 350-2:1995), la madera de *P. elliottii* y *P. taeda* procedente de Centro-América y América del Norte, no presenta durabilidad natural frente al ataque de hongos e insectos. Con respecto a la impregnabilidad, esta especie es clasificada como impregnable en albura según la citada norma. A la misma conclusión llegan Bobadilla et al. (2006) con respecto a la madera de *P. taeda* de procedencia argentina. Dado que la madera empleada en Uruguay proviene generalmente de ejemplares jóvenes, que no forman madera de duramen, la impregnabilidad de la misma sería la correspondiente a la madera de albura, clasificada como impregnable según las referencias anteriores.

En base a estudios realizados en Uruguay sobre plantaciones de *E. grandis* de 16 años de edad (Böthig et al. 2008), la Tabla 3 muestra los resultados de durabilidad natural frente al ataque de hongos e insectos.

Tabla 3. Durabilidad natural de la madera de *Eucalyptus grandis* (adaptado de Böthig et al. 2008)

RESISTENCIA DEL <i>E. grandis</i> A:	DESCOMPOSICIÓN FÚNGICA	MADERA JUVENIL	Moderadamente durable
	(<i>G. Trabeum</i>)	MADERA ADULTA O EN TRANSICIÓN	Durable
	TERMITAS		Moderada o seriamente atacable

En base a experiencias en el país, se puede decir que la madera de albura del *E. grandis* es impregnable, mientras que el duramen no es impregnable. Algunas de estas experiencias son la utilización de madera de *E. grandis* impregnado en albura para su uso como postes de tendido eléctrico, aunque esto no implica una preservación de todo el poste. Las fendas de secado suponen un punto de entrada de los hongos a la madera de duramen (no impregnable), provocando, en muchos casos, la pudrición interna del mismo.

3. DISEÑO Y CÁLCULO ESTRUCTURAL DEL PUENTE

3.1 Revisión de tipologías estructurales de puentes de madera

Parte de la información mostrada en este apartado pertenece al artículo titulado "Revisión de las tipologías estructurales de puentes de madera de pequeñas luces para el paso de vehículos pesados", presentado en las XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, y en

cuyo artículo se podrá encontrar información más detallada (Baño et al. 2014).

La mayor parte de los puentes existentes en Uruguay están resueltos utilizando hormigón estructural, armado y/o pretensado. El Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV 1989) prescribe el uso de este material y habilita, de forma excepcional, el uso de tableros metálicos o mixtos.

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 al puente, apoyado sobre vigas metálicas o de madera (Figura 1). Son habituales las soluciones temporales construidas con madera para el paso de camiones que transportan madera, normalmente ejecutadas sin ningún tipo de comprobación estructural ni de previsión de su vida útil. La problemática habitual en este tipo de soluciones es: i) no existe cálculo estructural que garantice el paso de vehículos; ii) se desconocen las propiedades mecánicas de la madera empleada; iii) empleo de madera no durable y sin protección por diseño ni mediante tratamiento de preservación.



Figura 1. Vigas de madera resueltas con rollizos y entablado de madera (Fuente: propia y Bernasconi 2013)

Existen, sin embargo, algunos antecedentes de puentes de madera vehiculares en Uruguay, algunos de ellos con muchos años de antigüedad, como son el puente del Río Yi en Durazno, diseñado por el Ing. Federico Capurro en el año 1903, con marcados daños estructurales en la actualidad, 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, con madera de eucalipto colorado (*Eucalyptus tereticornis*), Figura 2.



Figura 2. a) Puente en Durazno; b) puente en Fray Bentos (www.ElDiario.com.uy); c) Puente en Cerro Largo (www.tiempo.com.uy, 2012)

A nivel internacional, son varias las tipologías estructurales utilizadas para la construcción de puentes vehiculares, muchas de ellas utilizando productos de ingeniería de madera, como son las vigas de madera laminada encolada. La Tabla 4 resume algunas de ellas.

Tabla 4. Revisión de tipologías estructurales de puentes vehiculares de madera (adaptado de Baño et al. 2014)

SISTEMA	PRODUCTOS	DESCRIPCIÓN	FIGURAS
VIGAS	TRONCOS	Troncos de madera colocados en la dirección longitudinal del puente para que funcionen como vigas principales y una plataforma o tablero transversal. 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.	Figura 3
	MADERA ASERRADA	Empleo de escuadrías de madera aserrada, simples o compuestas. 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. La luz del puente queda limitada por las dimensiones de las vigas.	Figura 4
	MADERA-HORMIGÓN	El sistema está constituido por troncos o piezas de madera aserrada en forma paralela y en la dirección longitudinal del puente, una carpeta superior de hormigón armado y conectores metálicos fijados con adhesivo epoxi y que contribuyen a conformar un único elemento estructural.	Figura 4
	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.	Figura 5
COMPUESTAS O EN CELOSÍA	MADERA ASERRADA	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). En muchos casos, la estructura 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 6
	MLE	La disponibilidad en muchos países de MLE validada estructuralmente lleva a que los puentes en celosía más modernos se ejecuten con estos elementos.	Figura 7
	MADERA-HORMIGÓN	Vigas principales en celosía de madera laminada encolada y tablero de rodadura de hormigón.	Figura 8
ARCOS	MLE	Los arcos de madera laminada encolada pueden utilizarse como soporte de un tablero de rodadura superior o como el cordón superior de una viga en celosía.	Figura 8
PLACAS	TENSADAS	Uso de madera aserrada de secciones comerciales unidas por la cara y tensadas mediante cable de acero. 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.	Figura 9
OTROS	CLT	Soluciones poco habituales: Tableros de madera contralaminada (CLT-cross laminated timber), apoyados sobre vigas principales portantes.	Figura 10
	PLYWOOD	Soluciones poco habituales: Vigas portantes realizados con varios tableros contrachapados dispuestos verticalmente, unidos con piezas de madera aserrada y posteriormente tensados con cable metálico.	Figura 10



Figura 3. a) Puente 6 m de longitud en Floresta, Brasil (Calil, 2002); b) puente de 10 m de luz en Australia; c) puente de 50 años, Australia

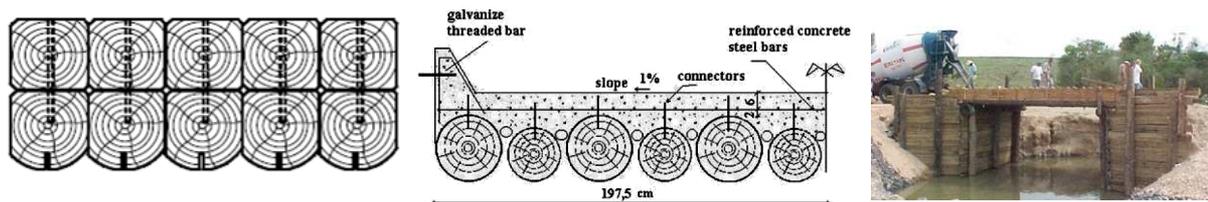


Figura 4. a) Vigas compuestas de madera maciza (Flach 2010); b) tablero de rollizo-hormigón (Pigozzo et al. 2004); c) puente en Brasil (Calil, 2002)



Figura 5. Puente 24 m luz y hasta 30 t carga, España (www.mediamadera.com)



Figura 6. a) Puente cubierto Thurbücke (año 1815), Suiza; b) Puente Pymont en Sydney, Australia (1900)



Figura 7. a) Puente cubierto Bauherrschaft, Suiza (año 1992); b) puente en Noruega.



Figura 8. a) Puentes Kjollosaeterbrua (2005) hasta 65 t, Noruega; b) Tablero sobre arco, Canadá (www.nordic.ca); c) Celosía con cordón superior en arco (www.schaffitzel-miebach.com)



Figura 9. a) Puentes en Australia; b) en Brasil (Fonte, 2004); c) en Chile (Giuliano, 2011); d) detalle de tipología



Figura 10. a) Puentes con tablero de madera contralaminada (Flach, 2011); b) puente con vigas de tablero contrachapado (Calil, 2006)

3.2 Diseño de modelos de puentes

Se estudian diferentes diseños de puente que cumplan con los requisitos necesarios para el paso de cargas pesadas en pasos agroforestales y se identifica el diseño óptimo para la fabricación de un prototipo a escala real, teniendo en cuenta, además, los aspectos constructivos para que su implementación sea viable.

3.2.1 Requisitos para el diseño del puente

Debido al tipo de maquinaria implicada en los procesos productivos, los puentes tienen que soportar elevadas sobrecargas de uso y tener en cuenta la geometría acorde con las dimensiones de la maquinaria. Se describen a continuación los requisitos base a tener en cuenta para el diseño del puente:

1. El ancho del puente debe ser, como 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.
2. 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.

3. 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.
4. En base a los pesos de los equipos y camiones implicados en los procesos productivos se ha adoptado, como valor de 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 11. 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.
5. A efectos de los cálculos se consideran las cargas como instantáneas ($k_{mod}=1,10$).
6. 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.

7. 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.
8. El puente se debe diseñar considerando la menor altura posible, de manera de reducir la realización de obra complementaria como son terraplenes para dar acceso al puente.
9. El diseño de las fundaciones se elaborará en base a diseños sencillos que no requieran recursos ni mano de obra especializada.
10. La clase resistente considerada para el cálculo estructural con madera aserrada de *Pinus elliottii/taeda* es C14 (Moya et al 2017, Baño y Moya 2015). Las propiedades mecánicas de la madera laminada encolada serán las obtenidas de los ensayos experimentales de vigas fabricadas con este fin.
11. El caudal del cauce es suficiente para inundar el puente algunos días al año.
12. Se considera que el puente está sometido a una clase de servicio 3, según el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004/A2:2014). Esto es, madera expuesta a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y a una humedad relativa mayor 85%, y cuya humedad de equilibrio higroscópico puede superar el 20% en la mayoría de las coníferas.
13. Se considera que los elementos de madera estarán trabajando en una clase de uso 4 (EN 335:2013)
14. Los requisitos de fabricación de vigas de MLE se basan en los descritos en la norma europea UNE-EN 14080 (2013).
15. Para la comprobación de todos los elementos estructurales de madera se deben realizar las verificaciones de resistencia de las piezas y considerar verificaciones de servicio, según lo establecido en el Eurocódigo 5.

En base a estos requisitos, y dado que el puente no será cubierto para no limitar el paso de maquinaria de anchura mayor a la del puente, se decide que la madera utilizada para la fabricación del prototipo del puente sea madera de pino (*Pinus taeda/elliottii*) de procedencia uruguaya impregnado en profundidad (con sales CCA, por ser el único tratamiento disponible en Uruguay que permite el uso de la madera en clase de uso 4).

3.2.1 Modelos de puente

Se evalúan distintos modelos de puente en relación a su comportamiento estructural, teniendo en cuenta también aspectos económicos y facilidad de construcción. Los distintos modelos de puente evaluados son: i) Tablero tensado; ii) Puente de vigas y viguetas de madera laminada encolada; y iii) Puente en dos huellas con vigas de madera laminada encolada y tablero de madera contralaminada.

i) Tablero tensado

El tablero de madera tensada se caracteriza por la unión de tablas de sección rectangular colocadas de canto mediante un cable de acero. El sistema de tensado del cable logra que las tablas trabajen en conjunto y que el tablero se comporte de forma similar a una placa.

Se definió un primer diseño basado en un tablero de madera aserrada tensada (con sección de tabla de $70 \times 200 \text{ mm}^2$). Dada la calidad de la madera y de las dimensiones de las tablas aserradas que se encuentran disponibles en el mercado, este tablero no podría trabajar como elemento único para soportar las cargas requeridas, sino que formaría el tablero de un sistema más complejo formado por viguetas transversales y vigas longitudinales como elementos principales (Figura 12a).

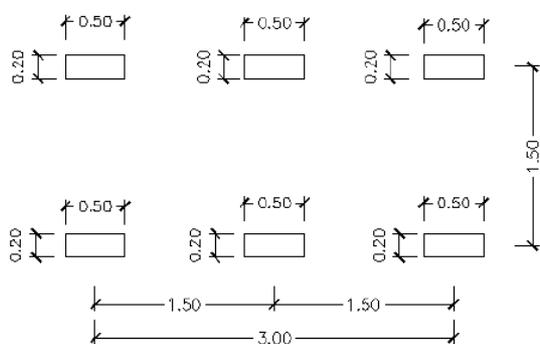


Figura 11. Tren de cargas del Pliego de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV, 1989)

Para solventar el problema de la limitante en canto de los tableros de madera aserrada tensada, se pensó en la configuración de un tablero de piezas tensadas de MLE, pues tanto la sección como la longitud de éstas tienen un rango de medidas bastante amplio, lo que permite una mayor flexibilidad en el diseño. En base a un cálculo de predimensionado, y a falta del cálculo estructural definitivo, se diseñó un tablero formado por vigas de madera laminada encolada de 150 mm de ancho, longitud igual a la luz total del puente y canto aproximado de 450 mm para una luz de 10 m (Figura 12b).

Con el fin de disminuir el canto del tablero tensado, se diseñó una última opción que aprovechaba que parte de las piezas de madera

que lo componían funcionasen como vigas, con un canto mayor a las demás piezas (Figura 12c).



Figura 12. Tablero de madera tensada: a) con madera aserrada; b) con MLE; c) con MLE nervada

ii) Puente de vigas y viguetas de madera laminada encolada

El puente se conforma por vigas principales colocadas en la dirección longitudinal, vigas-

riostras dispuestas entre las vigas principales y en la dirección transversal a éstas, diagonales de arriostramiento y viguetas longitudinales que sirven de apoyo al tablero de rodadura, todo en madera laminada encolada (Figura 13).

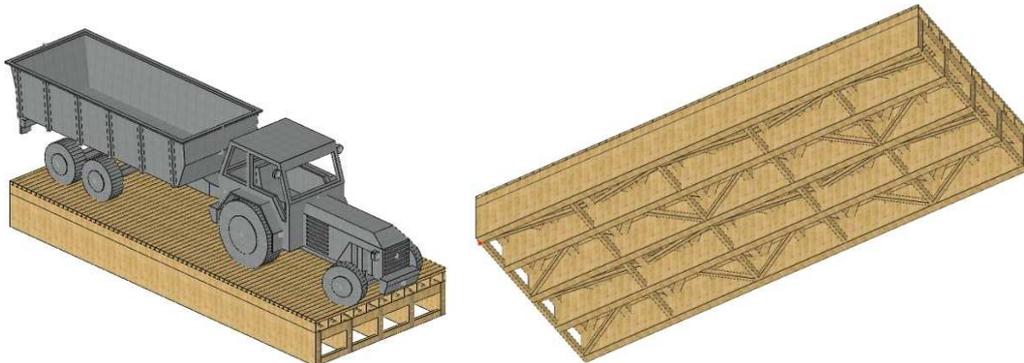


Figura 13. Puente de vigas y viguetas de MLE

iii) Puente en dos huellas con vigas de madera laminada encolada y tablero de madera contralaminada

Con el objetivo de disminuir el volumen de madera y, por lo tanto, el costo del puente, se diseñó un puente en dos huellas, una para el paso de cada una de las ruedas del vehículo según una vista frontal. El

puente está conformado por vigas principales de madera laminada encolada y tablero de rodadura de madera contralaminada (CLT) y se estudiaron distintas configuraciones de puente, en función de la disposición de las vigas, con el fin de encontrar la distribución transversal de esfuerzos óptima. La Figura 14 muestra las distintas configuraciones y el coeficiente transversal de esfuerzos (c) de cada una.

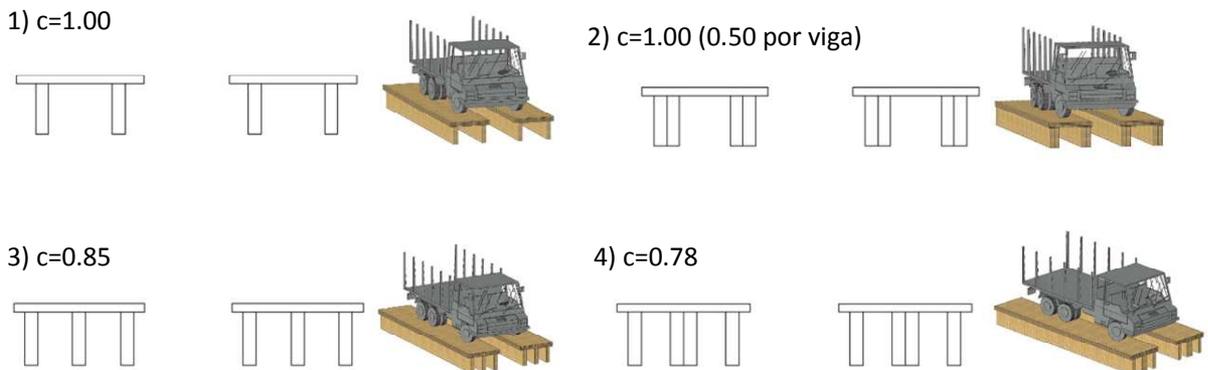


Figura 14. Distintas configuraciones del puente (1, 2, 3 y 4) en relación a la disposición de vigas

La Tabla 5 muestra un cuadro comparativo de los distintos modelos de puente evaluados desde el punto de vista de las ventajas y desventajas, del

volumen de madera implicada en su construcción y de la altura de la superficie de rodadura del puente con respecto al nivel del terreno.

Tabla 5. Evaluación comparativa de distintos modelos de puentes

TIPOLOGÍA DE PUENTE	ESQUEMA TRANSVERSAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS	DISEÑO(*)
Tablero tensado		<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> Volumen de madera (m³): 16,00 Altura total puente (m): 0,50 Verificación que limita el diseño: flexión
Vigas y viguetas		<ul style="list-style-type: none"> Empleo de elementos simples de MLE de sección rectangular 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> Tipología en fase de dimensionamiento Volumen estimado de madera (m³): 18,00 Altura total puente estimada (m): 1,30
Dos huellas: configuración 1 vigas separadas	Dos 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> Volumen de madera (m³): 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 pares de vigas apareadas	Dos 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> Volumen de madera (m³): 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 tres vigas separadas		<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> Aumenta el canto de la viga y la altura total del puente con respecto a la configuración anterior 	<ul style="list-style-type: none"> Volumen de madera (m³): 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 vigas simples laterales y dos pareadas en el centro		<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> Aumenta el volumen de madera con respecto a la configuración anterior 	<ul style="list-style-type: none"> Volumen de madera (m³): 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

3.3 Metodología de cálculo estructural en madera

3.3.1 Tableros de madera tensada

No existen antecedentes en Uruguay de utilización de este tipo de tableros en estructuras de madera ni normativa de diseño y cálculo de los mismos, por lo que el cálculo estructural para el predimensionado de los modelos de puentes se basó en el documento “Manual de diseño, construcción, mantención y monitoreo de tableros de madera tensado” de la Universidad de Concepción (Giuliano et al. 2011).

3.3.2 Vigas de madera laminada encolada

El cálculo de las vigas de madera laminada encolada se realizó de acuerdo al Eurocódigo 5-Parte 1-1 (EN 1995-1-1:2004/A2:2014) de acuerdo al método de los Estados Límite, teniendo en cuenta las modificaciones pertinentes según las condiciones locales. Dado que la madera nacional

utilizada no se encuentra caracterizada de acuerdo al sistema de clases resistentes (EN 338:2016) que establece el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004/A2:2014), se determinaron los valores estimados de las propiedades mecánicas a partir de ensayos de rotura de vigas fabricadas para este fin.

3.3.3 Paneles CLT

Los paneles CLT no se fabrican ni se comercializan actualmente en Uruguay. A falta de norma local, la normativa de requisitos de fabricación y ensayos para la determinación de su comportamiento estructural que se tuvo en cuenta fue la EN 16351 (EN 16351:2015), además de los resultados preliminares del proyecto de investigación en curso “Desarrollo de paneles contralaminados con madera de bajas propiedades mecánicas” (Baño et al. 2016, Godoy et al. 2017).

En cuanto al cálculo estructural, no hay una normativa nacional y todavía está en proceso de redacción el apartado correspondiente a paneles

CLT en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004/A2:2014), el cual se prevé que será publicado en el año 2020. Como referente para el cálculo estructural de estos paneles se tomó el manual de cálculo redactado por proHozl (proHolz, 2014), basado en el Anexo B del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004/A2:2014), asumiendo el comportamiento del CLT como una viga doble con conectores metálicos.

3.4 Estribos

Se evaluaron cuatro alternativas para la construcción de estribos: i) Estribo de hormigón armado tradicional; ii) Estribo de tierra armada;

iii) Estribo de gaviones; y iv) estribo flotante de hormigón armado. Dado que el estribo se debía de fabricar *in-situ*, se tuvieron en cuenta, para la selección de la mejor opción, aspectos como la calidad del hormigón y la facilidad de armado de la ferralla en función de la capacidad del personal y de la maquinaria disponible en el lugar de emplazamiento.

3.4.1. Estribo de hormigón armado tradicional

El estribo de hormigón armado como “caja cerrada” que se detalla en la Figura 15 presenta la gran ventaja de un buen comportamiento frente a las situaciones de inundación del puente.

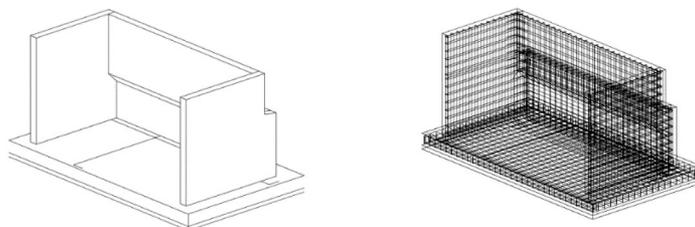


Figura 15. Estribo de hormigón armado tradicional

3.4.2. Estribo de tierra armada

La solución en tierra armada se compone de dos partes principales: i) la viga de apoyo, un dintel de hormigón armado, sobre la cual se ancla la estructura del puente; y ii) la contención del talud mediante “tierra armada”, tal y como se detalla en la Figura 16. A modo de resumen, la contención del

suelo se logra mediante un paramento de bloques especiales de hormigón (escamas) el cual se ancla con refuerzos en el suelo compactado.

La solución en tierra armada es una solución adecuada teniendo en cuenta la facilidad de montaje, sin embargo, actualmente no resulta una solución económica.

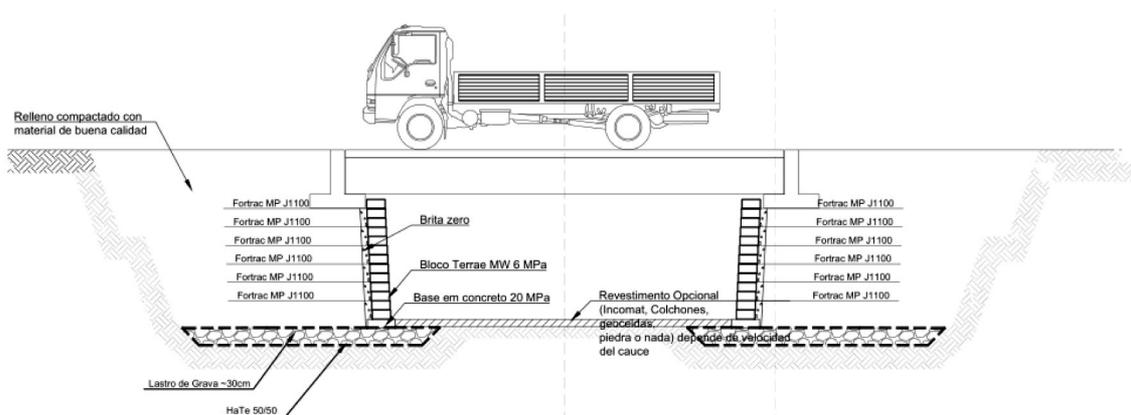


Figura 16. Estribo de tierra armada

3.4.3. Estribo de gaviones

La solución realizada con gaviones, al igual que en el caso anterior, requiere de un dintel de apoyo realizado en hormigón armado. La contención se logra mediante un muro formado por gaviones, tratan una especie de “jaulas” realizadas con malla metálica, que se rellenan con rocas. Las unidades

de gaviones se enlazan unas con otras formando un muro de contención.

La solución resulta de interés y se vuelve competitiva si en el sitio se pueden encontrar rocas de los tamaños requeridos. Por otra parte, el montaje requiere de operarios especializados que deben posicionar las rocas de una manera particular para que el sistema funcione correctamente.

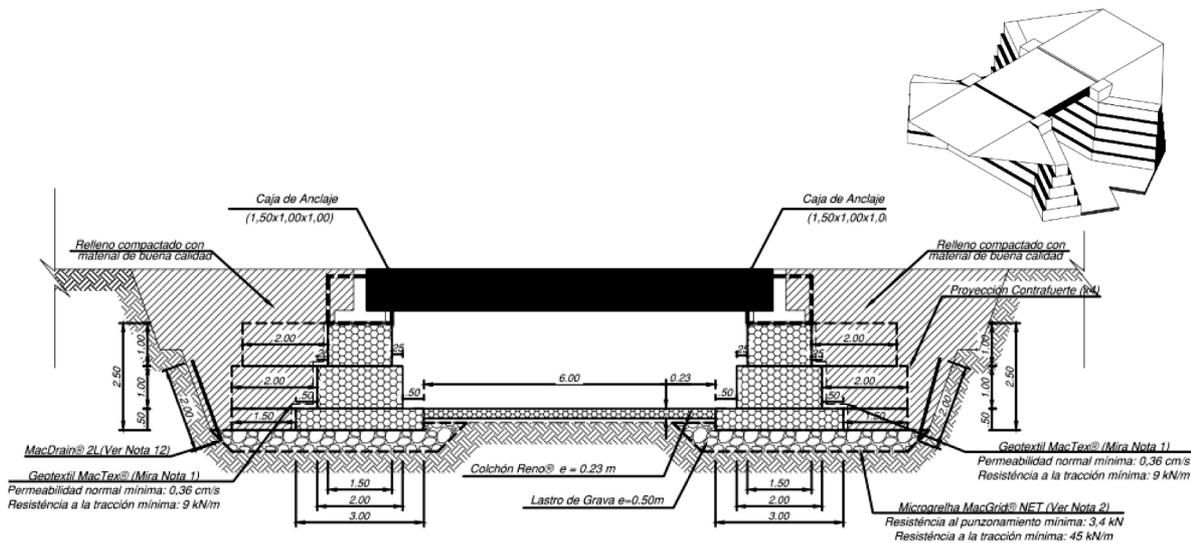


Figura 17. Estribo de gaviones

3.4.4. Estribo flotante de hormigón armado

La estructura del puente se apoya sobre un dintel de hormigón armado, y éste sobre suelo cemento (Figura 18). Con el fin de evitar la erosión causada

por el río durante las crecidas, el talud se reviste con suelo cemento. La presente solución fue la adoptada para la construcción del prototipo de puente por su facilidad de construcción y aspectos económicos.

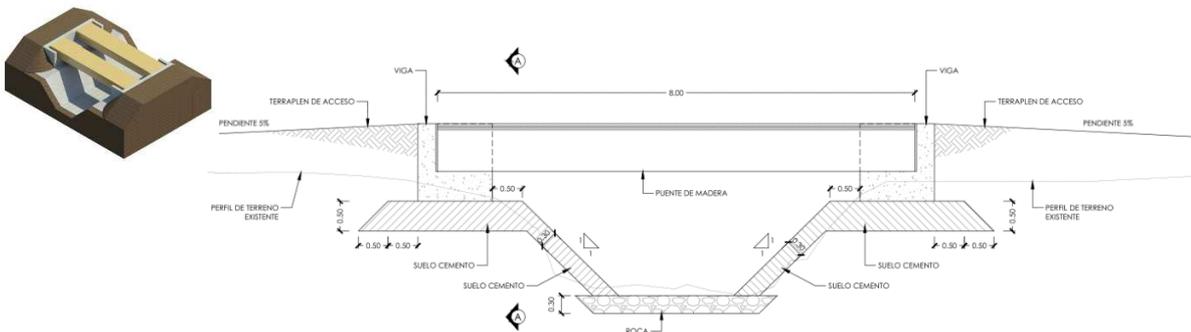


Figura 18. Estribo flotante de hormigón armado

3.5 Prototipo de puente de madera a fabricar

La configuración 2 del puente de dos huellas (Figura 14) combina la ventaja de implicar un volumen reducido de madera con una altura total

del puente aceptable. Así, cada huella del puente se compone de dos vigas dobles de MLE de 8 m de longitud, tablero de rodadura de madera contralaminada de 1.6m de ancho por huella y arriostramiento metálico en cruces de San Andrés entre las vigas principales (Figura 19).

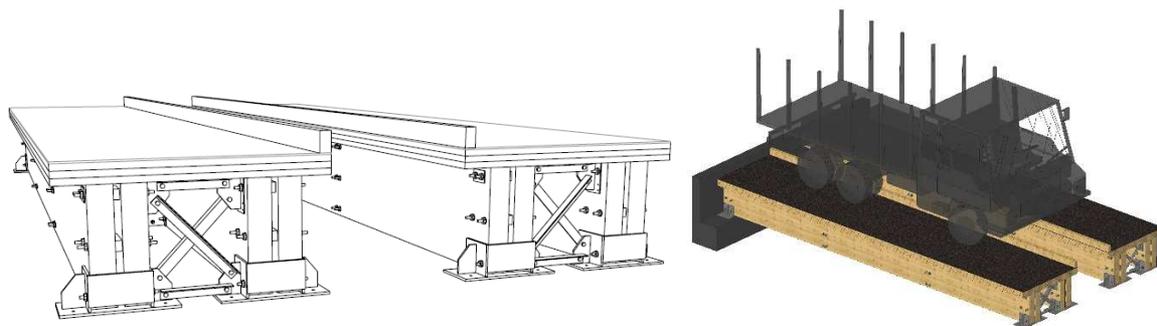


Figura 19. Prototipo de puente

Con el fin de estudiar su comportamiento estructural para distintas luces (entre 4 y 13 m), se comprobó el Estado Límite Último (ELU) para cortante y momento flector y se limitó el valor de la flecha debido a la sobrecarga en Estado Límite de Servicio (ELS). Se consideró que el tablero trabaja como “colaborante” con las vigas en las verificaciones de ELU. Esto implicó el dimensionamiento y cálculo del número de conectores metálicos de unión entre ambos para soportar el esfuerzo rasante proveniente del esfuerzo de flexión del puente. En las verificaciones de ELS, no se tuvo en cuenta la colaboración del tablero CLT con las vigas de MLE, por lo que se consideraron únicamente las vigas longitudinales como elementos resistentes y el tablero como carga permanente.

La limitación de la flecha del puente debida a la sobrecarga de uso fue de $L/250$, siendo L la luz del puente. 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: i) la integridad de elementos constructivos frágiles que puedan existir sobre la estructura, que en este caso no aplica; ii) el confort de los usuarios; y iii) 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. Dado 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 verificó la flecha total diferida.

En la Figura 20 se muestra la altura de viga de MLE mínima diseñada para resistir el cortante y el momento flector, así como para verificar la flecha debida a la sobrecarga para las luces estudiadas.

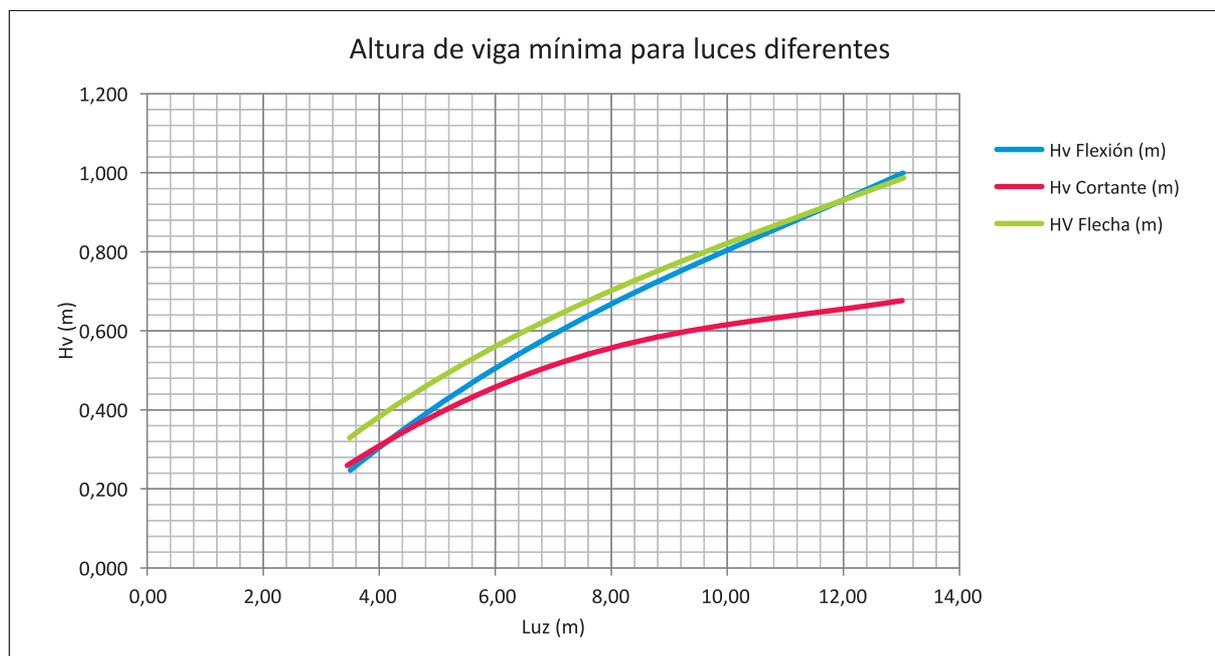


Figura 20. Relación entre el canto de viga y la luz del puente para las comprobaciones de resistencia a flexión y a cortante y la flecha

En luces cortas, la limitación en el diseño en ELU se da por cortante en combinación con la flexión, mientras que para luces mayores el limitante en ELU es únicamente la flexión. La verificación de ELS resulta más restrictiva que las verificaciones en ELU 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.

Se comprobaron, además, la resistencia a compresión perpendicular a la fibra en los apoyos y el vuelco lateral de las vigas. Para cumplir con estos requisitos, fue necesario reforzar la madera de las vigas en el apoyo, mediante la colocación de tornillos dispuestos en la dirección perpendicular a la fibra, para disminuir el aplastamiento provocado por la sobrecarga de uso. El arriostamiento longitudinal de las vigas permitió la verificación a vuelco lateral.

4. FABRICACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS ELEMENTOS DE MADERA

Para la realización del cálculo estructural del prototipo de puente a fabricar fue necesario

estimar las propiedades mecánicas de vigas de MLE, fabricadas con pino de procedencia nacional (*Pinus taeda/elliottii*) y bajo condiciones de fabricación que aseguren su función estructural.

4.1 Requisitos de fabricación de vigas de madera laminada encolada

La fabricación de las vigas de 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 (Baño et al 2015, Moya et al 2017), Figura 21a). Posteriormente a la clasificación visual, las tablas de madera se secaron a un contenido de humedad próximo al 12% para poder ser impregnadas para su protección en profundidad. Las sales empleadas en el proceso de impregnación fueron Cobre-Cromo-Arsénico (CCA), único tratamiento químico disponible en Uruguay para clase de uso 4. Una vez impregnadas, se sometieron a un nuevo proceso de secado en cámara que deje el contenido de humedad de la madera próximo al 12%. La segunda etapa se correspondió con el proceso de laminado en sí, Figura 21b).

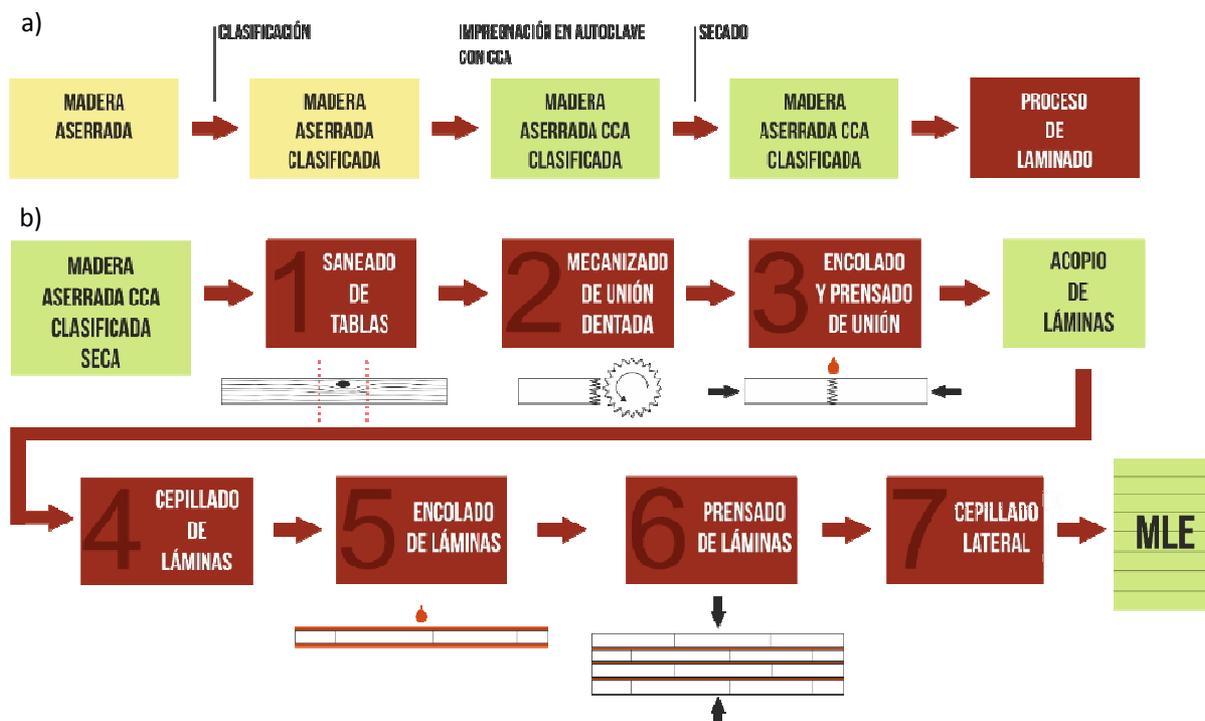


Figura 21. Esquema del proceso de fabricación de MLE

Los requisitos de fabricación de las vigas de MLE se basaron en la norma EN 14080 (EN 14080:2015), adaptados a las posibilidades de la industria local. En cada etapa del proceso se verificó el cumplimiento de los requisitos establecidos.

Las láminas fueron elaboradas a partir de bloques de madera aserrada de 400 a 1000 mm de longitud de pino 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 citada norma. 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 vigas y se detectó alguna rotura de diente debido, probablemente, a un exceso de presión.

El adhesivo utilizado, tanto en la unión finger como en el encolado de caras de las láminas, fue Resorcinol-Fenol-Formaldehido, comúnmente llamado Resorcinol, cumpliendo así con los requerimientos de madera en clase de servicio 3 (EN 1995-1-1:2004/A2:2014). El Resorcinol es un adhesivo estructural bi-componente, formado por una base líquida y un catalizador en polvo.

Debido a que la industria no tenía implementado en su línea de fabricación la posibilidad de aplicar un adhesivo bi-componente en las uniones finger, éste se aplicó de forma manual, tal y como contempla la norma europea. En las láminas se aplicó de forma automática mediante rodillos incluidos en la línea de producción (Figura 22), 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 22. Encolado de lámina, prensado y vigas finalizadas

Las vigas utilizadas para el prototipo del puente se elaboraron a partir de láminas de 31 mm de espesor (t) y 140 mm de ancho (b).

4.2 Fabricación de 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 (EN 16531:2016), 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 1.0 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 x3.5 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 23 muestra el proceso de fabricación artesanal de los paneles CLT.



Figura 23. Proceso de fabricación de los paneles CLT

4.3 Determinación de las propiedades mecánicas de las vigas de MLE y de los paneles CLT de pino

4.3.1. Vigas de madera laminada encolada

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 (Moya et al 2017, Baño et al. 2015). 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 (EN 408:2010+A1:2012) 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.

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 (EN 13183-1:2002).

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 (EN 384:2016).

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 8820 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, superando al de la madera aserrada de las láminas que configuraron la viga.

Las roturas observadas durante los ensayos fueron, principalmente, roturas por madera, existiendo un número muy pequeño de fallas en la unión finger-joint. No se observó en ningún caso separación de láminas en el momento de la rotura.

4.3.2. Estimación de las propiedades mecánicas de los paneles CLT

La mayoría de los paneles CLT comercializados en Europa y en Canadá tienen propiedades mecánicas según la clase resistente C24 (EN 338:2016). La madera estructural disponible en Uruguay se clasifica, como máximo, como una clase resistente C14 para una calidad visual EC7, tal y como se comentó anteriormente.

En base a los antecedentes de investigación en paneles CLT uruguayos, las propiedades mecánicas obtenidas de resultados preliminares (Godoy et al 2017), con madera clasificada visualmente con una calidad menor a la EC7, fueron de: a) resistencia a flexión media: 22 N/mm²; b) resistencia a flexión característica: 17 N/mm²; y c) módulo de elasticidad global promedio: 6685 N/mm².

Dado que la madera empleada para la fabricación de los paneles que conformarían el tablero de paso del puente fue clasificada visualmente como EC7, se consideraron las propiedades mecánicas correspondientes a la clase resistente C14 para el cálculo estructural.

5. FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO DE PUENTE

5.1 Ejecución del prototipo de puente

5.1.1 Descripción del prototipo

Como prototipo de puente se ejecutó la opción de puente en dos huellas formado por vigas de madera laminada encolada y tablero de rodadura de paneles de madera contralaminada. Para el diseño estructural del mismo se tuvieron en cuenta todas las consideraciones presentadas en la sección 3.2.1, con las siguientes modificaciones para adecuarse al presupuesto del proyecto de investigación y a los condicionantes de construcción:

- Se ejecutó un puente de 8 m de longitud y 7,4 m de luz libre
- El tren de carga considerado para el diseño y cálculo del prototipo se correspondió al de 9 t/ eje (18 t total) y el coeficiente de impacto fue 1,00. Debido a problemas en la fabricación de las vigas de madera laminada encolada, el canto de las mismas se vio disminuido, por lo que la carga final que soporta el puente rondó las 15 t.
- Se consideró que los elementos de madera

laminada encolada tenían una clase resistente GL20h (EN 14080:2015) y los paneles CLT una clase resistente C14 (EN 338:2016)

- La solución que resultó óptima para el lugar de emplazamiento del puente, en cuanto al aspecto económico y práctico, fue la solución de estribo flotante de hormigón armado.

5.1.2 Ubicación

El prototipo se ubicó sobre el arroyo Las Brujas, en un predio privado de una explotación agrícola. El predio se encuentra cercano al pueblo Los Cerrillos, en el departamento de Canelones.

5.1.3 Estructura del prototipo de puente

El puente consta de los siguientes elementos estructurales:

- Vigas longitudinales: Vigas longitudinales dobles de MLE de pino impregnado con CCA, formadas por 21 láminas y con una longitud de 8 m. Se colocan pareadas y separadas mediante tacos, de modo que aseguren en comportamiento conjunto de ambas vigas.
- Tablero: Módulos de tableros CLT de tres capas, de 1.0 m de longitud, que conforman el tablero de rodadura de cada huella, de 8 m de longitud y 1.6 m de anchura. Las capas externas se orientan en el sentido de mayor esfuerzo de flexión, que para las dimensiones consideradas fue el transversal, mientras que la central se orienta en sentido longitudinal.
- Conexiones: Cada huella se arriostra mediante cruces de San Andrés de acero galvanizado en caliente. Las conexiones entre el tablero CLT y las vigas MLE se realizan mediante tornillería estructural, determinando la cantidad y diámetro en función del esfuerzo rasante a soportar, y las vigas apoyan sobre la cimentación mediante herrajes de apoyo de acero galvanizado.
- Estribos: De hormigón armado para soportar las reacciones verticales de apoyo del puente y contener la tierra de las rampas de acceso al puente.

5.1.4 Proceso constructivo del prototipo de puente de 15 t

5.1.4.1 Estribos de hormigón armado

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 24.



Figura 24. Movimiento de tierras y construcción de estribos de hormigón armado

5.1.4.2 Fabricación del puente de madera

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 sus instalaciones.

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 estructurales roscados de 200 mm de longitud 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 25. 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 arriostamiento de las vigas principales y unir éstas con los paneles CLT de rodadura, Figura 26. La unión entre estos elementos se realizó con tornillos estructurales, 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 25. Tornillos de refuerzo de resistencia perpendicular a la fibra y herrajes de apoyo



Figura 26. Arriostamiento metálico y unión de paneles CLT y vigas MLE

5.1.4.3 Montaje del puente de madera

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 27 muestra el proceso de colocación de las huellas sobre los estribos de hormigón y el puente puesto en carga.



Figura 27. Colocación del puente y prueba de carga

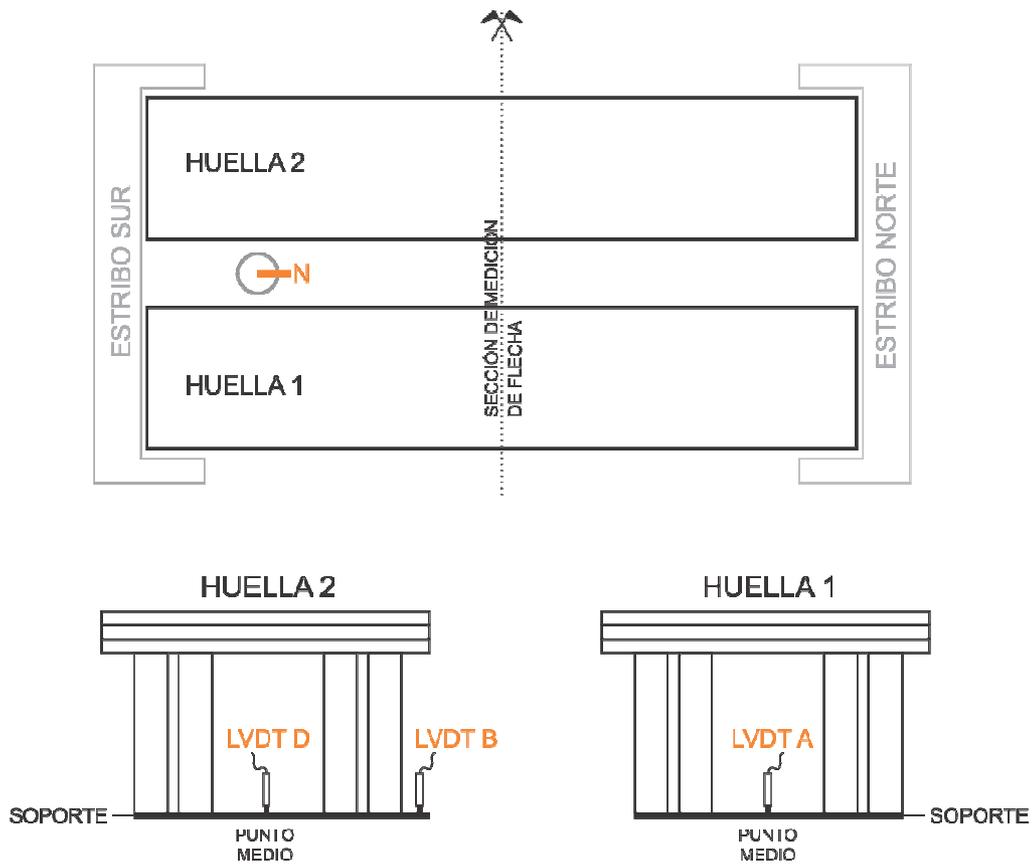


Figura 29. Instrumentación y paso del camión cargado durante la prueba de carga



Figura 30. Instrumentación y paso del camión cargado durante la prueba de carga

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

El objetivo de la presente actividad de investigación es estimar el costo de los puentes diseñados y del prototipo final.

Para ello se analizan de forma independiente el costo estimado de los materiales, de la mano de obra y de los medios de transporte y elevación y el costo total estimado de cada prototipo de puente ejecutado.

El costo de fabricación del prototipo de puente de madera para una carga de 18 t ascendió a 23553 US\$. Dicho costo incluye el costo de la

madera y de la fabricación de los productos de ingeniería de madera (18 m³ aproximadamente), el adhesivo estructural, la importación de la tornillería estructural, la fabricación de los herrajes galvanizados y el costo de la mano de obra para la fabricación y montaje del puente. El costo del movimiento de tierras y del material y mano de obra en la construcción de los estribos de hormigón ascendió a 16316 US\$.

7. DIFUSIÓN

La Tabla 7 presenta las publicaciones y actividades de difusión realizados hasta la fecha, resultado del proyecto de investigación.

Tabla 7. Publicaciones y difusión de los resultados del proyecto de investigación FPTA-306-INIA

Año y lugar	Evento/Revista/Diario	Autores	Título
2014, Montevideo Uruguay	Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural ISBN: 978-9974-0-116	V. Baño, S. Dieste, C. Calil Junior, G. M. Giuliano y L. Moya	Revisión de las tipologías estructurales de puentes de madera LINK: https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2016/25086/2014-JSIE-paper%20puentes.pdf
2015, Montevideo Uruguay	10° Congreso de la Vialidad Uruguaya	V. Baño, S. Dieste, C. Mazzey, D. de Souza y L. Moya	Uso de productos de ingeniería de madera uruguaya para el diseño de puentes prefabricados vehiculares de pequeñas luces LINK: https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2016/25086/2015-10congreso%20vialidad.pdf
2015, Montevideo	Ingeniería de Muestra	V. Baño, C. Mazzey, S. Dieste, D. de Souza y L. Moya	Puentes de madera local para vehículos pesados en el sector agrícola y forestal
2016, Porto Alegre Brasil	Revista Estradas N° 21. Noviembre 2016	V. Baño, S. Dieste, C. Mazzey, D. de Souza, A. Vega y L. Moya	Diseño de un puente para vehículos de 36 t a partir de nuevos productos estructurales de pino uruguayo de rápido crecimiento. (pp. 16-23). ISSN:1807-426X LINK: https://issuu.com/revistaestradas/docs/revista_estradas_21
2016, Montevideo	Ingeniería de Muestra	A. Vega, C. Mazzey, V. Baño	Alternativas constructivas para puentes de altas cargas en el medio rural: madera
2016, Canelones Uruguay	Acto inaugural puente	R. Scoz, A. Morquio, S. Cayota L. Moya	Sesión de apertura Premisas para el diseño del puente: necesidades y oportunidades
		S. Dieste	Cargas consideradas sobre el puente y dimensionamiento
		V. Baño	Fabricación de los elementos estructurales de madera laminada y madera contralaminada y proceso constructivo del puente
2017 Uruguay	Diario El Observador 3 febrero 2017	Juan Samuelle	"Se concretó la construcción de un puente de madera utilizando madera de pino" LINK: http://www.elobservador.com.uy/se-concreto-la-construccion-un- puente-utilizando-madera-pino-n1024840
2017, Junín- Buenos Aires Argentina	CLEM+CIMAD A presentar entre el 17 y 19 de mayo 2017	V. Baño, C. Mazzey, A. Vega, D. Godoy y L. Moya	Fabricación de un prototipo de puente vehicular a partir del desarrollo de productos de ingeniería de madera de pino uruguayo

BIBLIOGRAFÍA

- Baño V., Godoy D., Vega A.** (2016). Experimental and Numerical Evaluation of Cross-Laminated Timber (clt) Panels Produced with Pine Timber from Thinnings in Uruguay. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria.
- Baño V., Moya L., O'Neill H., Cardoso A., Cagno M, Cetrangolo G., Domenech L.** (2015) 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.
- Baño V. y Moya L.** (2015). Documento Técnico: Pliego de Condiciones Técnicas para la madera estructural en la edificación en Uruguay. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. ISBN: 978-9974-0-1331-5
- Baño V., Domenech L., Cetrangolo G. y Morquio A.** (2015). Inspección y restauración de la cubierta de madera laminada encolada de una piscina climatizada. Proceedings del congreso CONPAT 2015. Lisboa, Portugal
- Baño V, Dieste S, Calil 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. Proceedings de las XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo, Uruguay
- 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
- 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.
- Dieste A.** (2012). Informe 1. Programa de Promoción de Exportaciones de Productos de Madera. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industrias, Energía y Minería. Consejo Sectorial Forestal-Madera. Montevideo, Uruguay
- Dieste A.** (2014). Informe 4. Posibles destinos para los productos de madera fabricados en Uruguay. Dirección Nacional de Industrias. Ministerio de Industrias, Energía y Minería. Consejo Sectorial Forestal-Madera. Montevideo, Uruguay
- Errea, E., Peyrou, J., Secco, J. y 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.
- 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
- Giuliano et al.,** 2011. “Manual de diseño, construcción, mantención y monitoreo de tableros de madera tensado” de la Universidad de Concepción
- Godoy D., Vega A., Baño V.** (2017)- Caracterización de paneles de madera contralaminada (CLT) fabricados a partir de tablas de *Pinus taeda*/elliottii de bajas propiedades mecánicas. Proceedings de CLEM+CIMAD 2017. Junín, Argentina.
- MGAP** (2010). Monitoreo de los recursos forestales. Inventario forestal nacional. Resumen de resultados. Dirección General Forestal, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.
- Moya L., Domenech L., Cardoso A., O'Neill H. & Baño V.** (2017). Proposal of visual strength grading rules for Uruguayan pine timber. European Journal of Wood and Wood Products (on-press).
- Moya, L., Cardoso, A., Cagno, M. y O'Neill, H.** (2015) Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. Maderas: Ciencia y Tecnología Open Access Volume 17, Issue 3, 2015, pp. 597-612
- Moya L, Laguarda M.F., Cagno M., Cardoso A., Gatto F. y O'Neill H.** (2013). Physical and mechanical properties of Loblolly and Slash pine wood from Uruguayan plantations. Forest Products Journal, 63 (3-4), pp. 128-137

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.

Pro:Holz. Cross-Laminated Timber Structural Design - Basic design and engineering principles according to Eurocode, 2014

Ramage M. H., Burrige H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D. U., Wu G., Yu L., Fleming P., Densley-Tingley D., Allwood J., Dupree P., Linden P.F., Scherman O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. Renewable and Sustainable Energy Reviews 68: 333-359.

Uruguay XXI (2014). Sector Forestal Uruguay XXI. Promoción de inversiones y exportaciones. Montevideo, abril 2014),

Vega A., Baño V., Pérez-Gomar C., Cardoso A., Godoy D., O'Neill H. y Moya L. (2017). Evaluación de la resistencia de uniones dentadas finger-joint con madera de *Eucalyptus grandis* de procedencia uruguaya. Proceedings de CLEM+CIMAD 2017. Junín, Argentina.

Normas:

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 de la Dirección Nacional de Vialidad. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Montevideo, Uruguay.

EN 335:2013. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Clases de uso: definiciones, aplicación a la madera maciza y a los productos derivados de la madera.

EN 338:2016. Madera estructural. Clases resistentes.

EN 350-2:1995. Durabilidad de la madera y de los materiales derivados de la madera. Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 2: guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa

EN 408:2010+A1:2012. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

EN 1995-1-1:2004/A2:2014. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.

EN 13183-1:2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa

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

EN 16351:2015. Estructuras de madera. Madera contralaminada. Requisitos

IRAM 9662-2:2005. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Instituto argentino de normalización y certificación

Entrevistas personales:

UPM Claudio Rodríguez

FCB Roberto Bavosi

FING-IIQ/Dr. Ing. Agr. Andrés Dieste

INIA Fernando Resquin / Jorge Basso

Ing. Agrónomo Santiago Arana

MSc. Ing. Agrónomo Santiago Díaz

CASARONE Rodrigo Gorriarán

Impreso en Marzo de 2018
PRONTOGRAFICA S.A.
Cerro Largo 850 - Tel.: 2902 3172
E-mail: prontografica@prontografica.com.uy
Depósito Legal 369.749/2018

INIA Dirección Nacional
Andes 1365 P. 12
Montevideo
Tel.: ++598 2902 0550
Fax: ++598 2902 3633
iniadn@inia.org.uy

INIA La Estanzuela
Ruta 50 Km. 11
Colonia
Tel.: ++598 4574 8000
Fax: ++598 4574 8012
iniale@le.inia.org.uy

INIA Las Brujas
Ruta 48 Km. 10
Canelones
Tel.: ++598 2367 7641
Fax: ++598 2367 7609
inia_lb@lb.inia.org.uy

INIA Salto Grande
Camino al Terrible
Salto
Tel.: ++598 4733 5156
Fax: ++598 4732 9624
inia_sg@sg.inia.org.uy

INIA Tacuarembó
Ruta 5 Km. 386
Tacuarembó
Tel.: ++598 4632 2407
Fax: ++598 4632 3969
iniatbo@tb.inia.org.uy

INIA Treinta y Tres
Ruta 8 Km. 281
Treinta y Tres
Tel.: ++598 4452 2023
Fax: ++598 4452 5701
iniatt@tyt.inia.org.uy