



Unidad de Posgrados y Educación Permanente



FACULTAD DE
AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE PLACAS DE MADERA LAMINADA TARUGADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ENTREPISOS Y TECHOS DE VIVIENDAS EN URUGUAY

Gastón Rafael BRUZZONE GONZÁLEZ

Magíster en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

Marzo 2023

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE
PLACAS DE MADERA LAMINADA
TARUGADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE
ENTREPISOS Y TECHOS DE VIVIENDAS
EN URUGUAY**

Gastón Rafael BRUZZONE GONZÁLEZ

Magíster en Ciencias Agrarias
opción Ciencias Vegetales

Marzo 2023

Tesis aprobada por el tribunal integrado por la Ing. Quím. Dr. Marcela Ibáñez, la Ing. For. Dr. Ana Paula Coelho y el Arq. MSc. Jorge Franco, el 6 de marzo de 2023. Autor: Ing. Agr. Gastón Rafael Bruzzone González. Directora: Arq. PhD. Laura Moya.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Señor y a María, por guiarme y acompañarme a lo largo del proceso, y darme la oportunidad de seguir desarrollándome profesionalmente.

A mis familiares y amigos, en especial a Araselis, Rafael, Silvana, Lucía, Lucas y Antonia, por su apoyo y aliento incondicional a lo largo del proceso.

A mi tutora Laura, por su gran apoyo y brindarme todas las herramientas y conocimientos para llevar a cabo este trabajo de investigación.

A todo mi equipo de trabajo, Sebastián, Jorge, Ignacio, Daniel, Diego, Stephany y Silvia.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), por brindar la financiación necesaria para realizar el posgrado. En especial a Diego Gutiérrez por su constante colaboración.

Al Laboratorio Tecnológico del Uruguay, en especial a Javier por abrirme las puertas, permitirme utilizar las instalaciones de los laboratorios y el aserradero, y confiar en este proyecto.

A mi querida institución, Facultad de Agronomía, en especial al equipo de UPEP.

Al Centro Universitario Regional (CENUR) Noreste, por permitirme utilizar las instalaciones e instrumentos de los laboratorios.

Con mucho cariño y agradecimiento, les dedico este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
TABLA DE CONTENIDO.....	IV
RESUMEN	VII
SUMMARY	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	2
1.2. DESARROLLO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	3
1.3 MARCO CONCEPTUAL.....	3
1.3.1 <u>La madera para uso estructural</u>.....	3
1.3.2 <u>Oportunidades para construcción con madera en Uruguay</u>.....	4
1.3.3 <u>Sistemas constructivos de madera masiva <i>mass timber</i></u>	6
1.3.4 <u>Madera laminada tarugada (DLT)</u>.....	8
1.3.4.1 Aplicaciones estructurales	10
1.3.4.2 Conexiones de madera.....	10
1.3.4.3 Propiedades de los paneles DLT.....	12
2. <u>CARACTERIZACIÓN DE LÁMINAS Y TARUGOS DE MADERA PARA LA FABRICACIÓN DE PLACAS Y PANELES DLT</u>.....	16
2.1. RESUMEN	16
2.2. SUMMARY	17
2.3. INTRODUCCIÓN.....	18
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
2.4.1 <u>Láminas de madera</u>.....	20
2.4.1.1 Clasificación visual preliminar.....	21
2.4.1.2 Ensayos dinámicos.....	22
2.4.1.2 Ensayos estáticos.....	23
2.4.2 <u>Tarugos de madera</u>.....	25

2.4.2.1 Propiedades mecánicas.....	27
2.4.2.1 Propiedades físicas.....	29
2.4.3 <u>Análisis estadístico</u>	29
2.5. RESULTADOS	30
2.5.1. <u>Láminas de madera</u>	30
2.5.2. <u>Tarugos de madera</u>	36
2.6. CONCLUSIONES.....	39
2.7. BIBLIOGRAFÍA.....	40
3. <u>STRUCTURAL BEHAVIOUR OF DOWEL LAMINATED TIMBER</u>	
<u>PANEL BUILT WITH FAST-GROWING URUGUAYAN SPECIES</u>	45
3.1 ABSTRACT.....	45
3.2 INTRODUCTION.....	46
3.3 MATERIALS AND METHODS	48
3.3.1 <u>Materials</u>	48
3.3.2 <u>Design and Manufacture of DLT Panels</u>	49
3.3.3 <u>Four-Point Static Bending Tests</u>	52
3.3.4 <u>Data Processing and Statistical Analysis</u>	54
3.4 RESULTS.....	55
3.4.1 <u>Four-Point Static Bending Tests</u>	55
3.4.1.1 Load vs. Deformation Graphs.....	57
3.4.1.2 Relation MOE DLT Panel / MOE Lamellas.....	59
3.4.2 <u>Physical Properties</u>	60
3.4.3 <u>Failure Modes</u>	61
3.5 CONCLUSIONS.....	62
3.6 REFERENCES.....	63
4. <u>DISCUSIÓN GENERAL</u>	67
5. <u>CONCLUSIONES GENERALES</u>	70
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	73
7. <u>ANEXOS</u>	79
7.1 ANEXO 1. CARACTERIZACIÓN DE LÁMINAS Y TARUGOS DE MADERA PARA LA FABRICACIÓN DE PLACAS Y PANELES DLT.....	79

7.1.1 <u>Valores promedios de láminas de <i>Pinus elliottii</i> perteneciente al muestreo I</u>	79
7.1.2 <u>Valores promedios de láminas de <i>Pinus elliottii</i>/<i>P. taeda</i> perteneciente al muestreo II</u>	84
7.1.3 <u>Valores promedios de láminas de <i>Eucalyptus grandis</i> perteneciente al muestreo III</u>	87
7.1.4 <u>Valores promedios de láminas de <i>Eucalyptus grandis</i> perteneciente al muestreo IV</u>	91
7.1.5 <u>Valores promedio de tarugos de <i>Eucalyptus tereticornis</i> de 18 mm de diámetro</u>	95
7.1.6 <u>Valores promedio de tarugos de <i>Eucalyptus tereticornis</i> de 15 mm de diámetro</u>	96
7.1.7 <u>Valores promedio de tarugos de <i>Balfourodendron riedelianum</i> de 20 mm de diámetro</u>	97
7.1.8 <u>Valores promedio de tarugos de <i>Balfourodendron riedelianum</i> de 12 mm de diámetro</u>	98
7.1.9 <u>Valores promedio de tarugos de <i>Eucalyptus grandis</i> de 18 mm de diámetro</u>	99
7.1.10 <u>Valores promedio de tarugos de <i>Eucalyptus grandis</i> de 20 mm de diámetro</u>	100
7.2 ANEXO 2. STRUCTURAL BEHAVIOUR OF DOWEL LAMINATED TIMBER PANEL BUILT WITH FAST-GROWING URUGUAYAN SPECIES.....	101
7.2.1 <u>Average values of DLT panels composed of lamellas of <i>Pinus elliottii</i> and 20 mm diameter <i>Balfourodendron riedelianum</i> dowels</u>	101
7.2.2 <u>Average values of DLT panels composed of lamellas of <i>Pinus elliottii</i> and 20 mm diameter <i>Eucalyptus grandis</i> dowels</u>	102
7.2.3 <u>Average values of DLT panels composed of lamellas of <i>Eucalyptus grandis</i> and 15 mm diameter <i>E. tereticornis</i> dowels</u>	103
7.2.4 <u>Average values of DLT panels composed of lamellas of <i>Eucalyptus grandis</i> and 18 mm diameter <i>E. tereticornis</i> dowels</u>	104

RESUMEN

Uruguay dispone de 1,7 millones m³ de pino (principalmente *Pinus elliottii* y *P. taeda*) y 0,4 millones m³ de eucalipto (principalmente *Eucalyptus grandis*) sin destino industrial. Parte de esa madera podría ser utilizada para fabricar un material de construcción innovador para Uruguay, como la madera laminada tarugada (su acrónimo en inglés, DLT). DLT consiste en tablas colocadas de canto y unidas entre sí por tarugos de madera, requiere menor cantidad de energía para su producción comparado con los materiales tradicionales de construcción y puede ser utilizado en pisos, paredes y techos de viviendas. El objetivo principal de esta tesis fue estudiar las principales propiedades estructurales de placas laminadas tarugadas de pinos y eucaliptos uruguayos, para su uso en entresijos y techos de viviendas. El programa experimental se dividió en dos fases: i) caracterización de los materiales constituyentes del DLT, esto es, evaluación física y mecánica de láminas y de tarugos de madera de diferentes diámetros; y ii) la fabricación y determinación de las propiedades de flexión de placas DLT de tamaño estructural. Los resultados de los ensayos de las láminas de *P. elliottii*, *P. taeda* y *E. grandis* presentaron valores de resistencia y rigidez de flexión y densidad dentro de los rangos de valores medios indicados en las normas UNIT 1261 y UNIT 1262. Los resultados de los ensayos de tarugos de maderas de *E. tereticornis* y *B. riedelianum*, presentaron valores de resistencia y densidad significativamente superiores en comparación a los tarugos de *E. grandis*. A partir de los valores obtenidos en los ensayos de láminas y tarugos se establecieron patrones de diseño y fabricación para prototipos de placas DLT. Se observó que las uniones tarugadas colaboraron en el trabajo conjunto de las láminas constituyentes y que los modos de rotura de las placas se debieron a fallas por tracción, originadas mayormente por desviaciones muy pronunciadas de las fibras en zonas cercanas a las nudosidades. Este trabajo sugiere que las placas DLT construidas con maderas de producción nacional cuentan con propiedades estructurales que permiten su uso en pisos y techos de viviendas.

Palabras clave: plantaciones de Uruguay, madera estructural, madera laminada tarugada, DLT, viviendas de madera

EXPERIMENTAL EVALUATION OF DOWEL LAMINATED TIMBER FOR FLOORS AND ROOFS OF DOWELLINGS IN URUGUAY

SUMMARY

Uruguay has 1.7 million m³ of pine (mainly *Pinus elliottii* and *P. taeda*) and 0.4 million m³ of eucalyptus (mainly *Eucalyptus grandis*) with no industrial use. Part of this wood could be used for an innovative Uruguayan construction material, called dowel laminated timber (DLT). DLT, which consists of lamellas laid edge-to-edge and joined together by wooden dowels, requires less energy to be produced compared to traditional construction materials, can be used for floors, walls and roofs in dwellings. The aim of this thesis was to study the main structural properties of dowel laminated timber panels made of Uruguayan pines and eucalyptus, for use in mezzanines and roofs of houses. The experimental program was divided into two phases: i) characterization of the constituent materials of the DLT, i.e., physical and mechanical evaluation of lamellas and wooden dowels of different diameters; and ii) fabrication and determination of the bending properties of structural size DLT panels. Tests results of *P. elliottii* and *E. grandis* lamellas showed values of density and bending strength and stiffness within the ranges of mean values indicated in the Uruguayan standards UNIT 1261 and UNIT 1262. The test results of dowels made of *E. tereticornis* and *B. riedelianum* wood presented values of strength and density significantly higher than those of *E. grandis* dowels. From the tests results of lamellas and dowels, patterns for the design and manufacture of DLT prototypes were established. It was observed that the doweled joints efficiently collaborated in the joint work of the constituent lamellas. Failure modes of the DLT panels were due to tensile failures, caused mainly by pronounced fibre deviation close to knots. This work suggests that DLT made of domestically produced timber have structural properties that allow their use in residential floors and roofs.

Keywords: Uruguayan plantations, structural timber, dowel laminated timber, DLT, timber houses

1. INTRODUCCIÓN

La madera ha sido uno de los materiales más utilizados por el ser humano para construir edificaciones desde los comienzos de la historia. Aunque el uso de acero, hormigón o hierro haya aportado avances significativos a la construcción, la madera nunca ha perdido su popularidad. En las últimas décadas la industria de la madera ha evolucionado gracias al desarrollo de nuevas tecnologías que permitirían el uso masivo de este material en la construcción (Ugarte et al., 2022).

Tradicionalmente en Uruguay la madera ha sido escasamente utilizada como material constructivo en proyectos de arquitectura e ingeniería civil. Los motivos son diversos: falta de disponibilidad de recursos madereros de origen nacional, o de origen extranjero con precios competitivos frente a otros materiales de construcción, factores culturales, carencias en la formación de arquitectos e ingenieros, y reglamentaciones/normativas que en algunos casos limitan su uso como material estructural.

Actualmente, Uruguay registra un déficit habitacional de aproximadamente 60.000 - 65.000 viviendas (MVOT, 2021). Las políticas gubernamentales están impulsando el uso de sistemas constructivos no tradicionales, particularmente en madera, para la producción de vivienda social. Los sistemas constructivos que emplean madera permiten reducir los tiempos de ejecución en obra y contribuyen a reducir los efectos de las emisiones de CO₂ (Ahmed, 2021). Adicionalmente, se generan espacios para el desarrollo de nuevas empresas que apunten a producir insumos para esta actividad, lo que se traduce en una mayor fuente de empleo para los uruguayos.

El desarrollo de la industria de la construcción con madera requiere contar no sólo con el recurso maderero, sino que ese recurso esté procesado como material estructural. Ello implica que la madera tenga los contenidos de humedad adecuados (aproximadamente 18 %), esté escuadrada y clasificada por resistencia. Resulta fundamental contar con mano de obra capacitada, recursos humanos especializados y

con un cuerpo normativo y reglamentario que no limite el uso estructural de la madera en la construcción de viviendas. Estos aspectos están siendo considerados y la situación de la madera estructural viene cambiando en los últimos años.

Las viviendas con sistemas constructivos que emplean intensivamente madera presentan una serie de ventajas con respecto a otros sistemas y materiales. Un aspecto importante a destacar es el confort y las prestaciones que brinda una edificación con estructura de madera, que pueden ser similares o superiores a las de una tradicional. Entre las ventajas del uso de estos sistemas se destacan la facilidad, la rapidez en el montaje y la alta relación entre la resistencia y el peso.

A modo de ejemplo, en Uruguay en general una vivienda de 65 m² construida con materiales y tecnología tradicionales insume un plazo de ejecución de obras de cinco o seis meses, que puede reducirse a un tercio empleando sistemas constructivos en madera (ORT, 2021).

1.1 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Este trabajo plantea la siguiente hipótesis: las placas de madera laminada tarugada de pino (*Pinus elliottii*) y eucalipto (*Eucalyptus grandis*) son aptas para la construcción de entresijos y techos en viviendas.

El objetivo principal de esta tesis es estudiar las principales propiedades estructurales de placas laminadas tarugadas de pinos y eucaliptos uruguayos, para su uso en entresijos y techos de viviendas.

Los objetivos específicos incluyen: i) caracterizar láminas de madera de pino y eucalipto mediante ensayos físicos y mecánicos; ii) caracterizar tarugos de madera de distintas especies mediante ensayos físicos y mecánicos; iii) diseñar y construir placas DLT de pino y eucalipto empleando tarugos de distintas especies; iv) determinar experimentalmente la resistencia y rigidez a la flexión de placas DLT.

1.2 DESARROLLO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo de investigación se desarrolla en dos etapas: la primera, focalizada en la caracterización de láminas y tarugos de madera de distintas especies mediante ensayos físicos y mecánicos; la segunda, centrada en el análisis del comportamiento mecánico de las placas DLT de tamaño estructural (esto es, probetas de ensayos con dimensiones de sección transversal y longitud consistentes con las tendencias actuales para determinar las propiedades de flexión en piezas de madera).

La tesis está estructurada en cinco capítulos principales. El capítulo 1 describe brevemente la situación forestal del Uruguay y la disponibilidad esperable en el largo plazo de madera nacional, con destino aserrable, para uso estructural. Se introducen conceptos básicos de los productos de madera masiva, haciendo énfasis en la madera laminada tarugada (DLT). Se centra en la conformación, propiedades y campos de aplicación de este tipo de producto y revisa el estado del arte. Los capítulos 2 y 3, escritos en formato de artículos científicos, focalizan en la caracterización física y mecánica de láminas y tarugos de distintas especies y diámetros, y en la determinación de las propiedades de flexión de las placas DLT. El capítulo 4 presenta una discusión general y el capítulo 5 sintetiza las conclusiones de la tesis.

1.3 MARCO CONCEPTUAL

1.3.1 La madera para uso estructural

La madera fue uno de los primeros materiales utilizados por el ser humano como material de construcción, debido a un conjunto de factores, como la relativa facilidad con la que se puede extraer del entorno y su buena relación resistencia/peso (Mocellin y Gavassoni, 2019).

Sin embargo, durante el siglo XX, aspectos relacionados con la durabilidad, estabilidad y resistencia al fuego llevaron al remplazo progresivo de la madera por el acero y el

hormigón armado, materiales además que posibilitaron el desarrollo de edificios de gran altura.

Las nuevas técnicas silvícolas y de aserrado, que permiten mejorar la calidad de la madera para uso estructural, las nuevas tecnologías de construcción y el desarrollo de productos novedosos, como la madera laminada cruzada (CLT), y el desarrollo de software de cálculo estructural, han llevado a que en la última década, arquitectos e ingenieros especifiquen productos de madera en proyectos fundamentalmente europeos y norteamericanos (Pereira et al., 2019).

En la actualidad, la industria mundial de la construcción busca optimizar procesos y utilizar sistemas constructivos sostenibles y eficientes que colaboren en la conservación del medioambiente y en la reducción de costos. Los sistemas constructivos con alto grado de prefabricación permiten simplificar la cadena de construcción y reducir los tiempos de montaje (Núñez, 2005, Lang, 2019).

En Estados Unidos y Canadá la madera y los productos de ingeniería de madera (EWP) son utilizados en más del 90 % de la construcción residencial, particularmente en viviendas aisladas o conjuntos residenciales de hasta seis niveles de altura (Rajendra, 2020).

1.3.2 Oportunidades para construcción con madera en Uruguay

En el sector forestal uruguayo, la fase industrial cumple un rol fundamental, ya que nuclea alrededor de 77 aserraderos dedicados principalmente a transformar mecánicamente un grupo de especies integrado por pinos (*Pinus elliottii* y *P. taeda*) y eucalipto (*Eucalyptus grandis*, Uruguay XXI, 2022).

A comienzos del presente siglo, los aserraderos fueron desafiados por la demanda de madera de eucaliptos de las plantas de celulosa. Varios tuvieron que experimentar cambios para modernizar sus procesos, algunos cerraron, y los que persisten

generalmente cuentan con masas forestales propias. Los aserraderos que procesan solamente pino han tenido menos desafíos porque el suministro de madera de pino es varias veces mayor que la demanda, estimándose un consumo anual de un millón de m³/año. Sin embargo, se estima que, en los próximos 20 años, la disponibilidad anual promedio de madera de coníferas superará los tres millones de m³/año (ANIU, 2021, Uruguay XXI, 2022). Por tanto, existe una oportunidad no sólo para aumentar el uso de la capacidad de transformación mecánica instalada en los aserraderos, y dar respuesta a la oferta de madera de pino, sino también para agregarle valor a la madera mediante procesos que transformen el recurso para su uso en construcción y posibiliten el desarrollo de la construcción con madera en Uruguay (ANIU, 2021).

Para viabilizar el desarrollo de la industria de la construcción con madera, es necesario contar con materiales caracterizados y con propiedades estructurales conocidas.

En los países con tradición de construcción con madera, existen los sistemas de grados estructurales o clases resistentes, donde cada grado o clase tiene un conjunto de propiedades asociadas, tales como la resistencia y el módulo de elasticidad de flexión, la densidad, la resistencia de tracción y compresión en direcciones paralela y perpendicular a la fibra, etc. En esos países, cada pieza de madera que se utiliza con fines estructurales, tiene un sello de certificación de calidad estructural donde se indica el grado estructural o la clase resistente. En Uruguay, la madera nacional no cuenta con sello de certificación estructural. No obstante, algunos aserraderos han comenzado a clasificar madera de producción nacional en «calidades visuales». Esas calidades visuales están asociadas a las propiedades de flexión y la densidad. En el caso de la madera de pino, los valores de las propiedades de flexión y densidad están tabulados en la norma UNIT 1261 (2018b), y, en el caso del eucalipto, en la norma UNIT 1262 (2018a).

Se prevé que la disponibilidad de madera nacional clasificada visualmente por resistencia dinamizará el mercado y contribuirá a promover el uso en construcción en el corto o mediano plazo (Uruguay XXI, 2022).

1.3.3 Sistemas constructivos de madera masiva *mass timber*

Los sistemas constructivos de madera masiva, conocidos en inglés como *mass timber*, emplean volúmenes importantes de madera en elementos generalmente superficiales tales como placas o losas horizontales y muros verticales.

La madera masiva comprende una familia de productos caracterizada por tablas de madera unidas mediante adhesivos, clavijas de acero o de madera que, según su diseño, pueden funcionar estructuralmente como vigas, columnas, losas y muros (Hernández, 2018).

El uso de adhesivos para unir piezas individuales de madera permite crear uniones uniformes, secciones de mayor tamaño y de formas más eficientes en comparación con las de las piezas individuales. Sin embargo, el uso de adhesivos reduce las credenciales generales de impacto ambiental, y a menudo requiere un alto nivel de inversión de capital para su fabricación (Plowas et al., 2016).

Los productos *mass timber* incluyen: i) Productos laminados y encolados, fundamentalmente, madera laminada encolada (su acrónimo en inglés, Glulam) y madera laminada cruzada (CLT); y ii) Productos laminados libre de adhesivo, madera laminada tarugada (DLT), madera laminada clavada (su acrónimo en inglés, NLT) y madera laminada cruzada tarugada (su acrónimo en inglés, DCLT). La figura 1 muestra los principales productos de ingeniería de madera masiva.

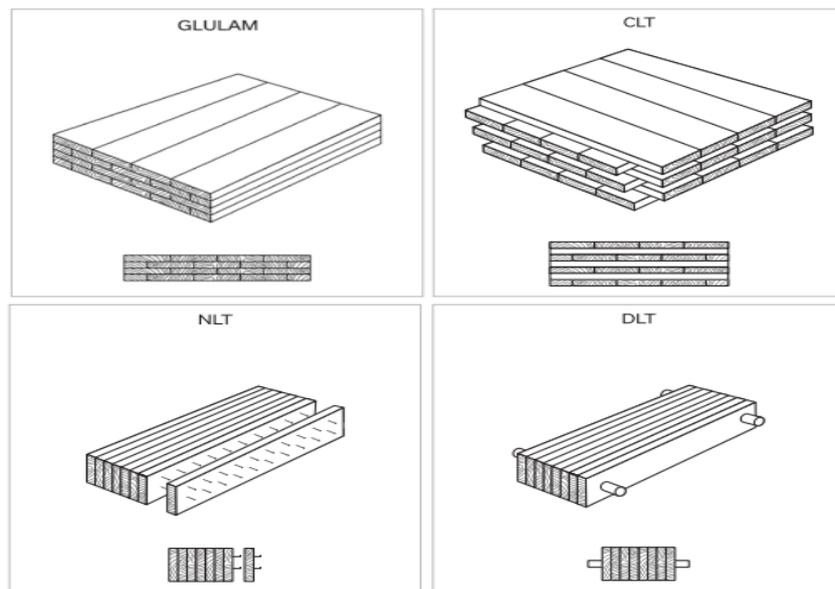


Figura 1. Principales productos de ingeniería de madera masiva. Fuente: Think Wood (2019).

Estos productos han ampliado la oferta de madera estructural y son adoptados cada vez más por arquitectos e ingenieros, debido a que su empleo permite una gran rapidez y facilidad en la ejecución de obras, además de las propiedades estructurales (resistencia y rigidez), el atractivo estético y los beneficios que su empleo conlleva para el medioambiente (Rajendra, 2020). Estos productos en general, permiten ser fabricados a partir de especies subutilizadas y de árboles de pequeños diámetros (Ahmed, 2021).

El proceso de fabricación de algunos productos de madera masiva, tales como el de la madera laminada encolada y el CLT, está establecido en normas internacionales. En los casos de DLT y NLT, la situación es diferente. En Europa, no existen normas de fabricación para ninguno de los dos productos. En EE. UU. y Canadá, existen especificaciones de fabricación sólo para NLT, que están descritos en el International Building Code (ICC, 2018) y en la Nail-Laminated Timber Design and Construction Guide (BSLC, 2017), mientras que para DLT las especificaciones están indicadas en documentos técnicos desarrollados por las empresas productoras.

El uso intensivo de estos productos en proyectos contemporáneos de arquitectura e ingeniería civil es relativamente reciente y, por ello algunos de los productos no están considerados en las normas de diseño y cálculo estructural. En Europa, con la excepción de algunos documentos nacionales, el diseño estructural con CLT no está descrito en el Eurocódigo 5 (Abejón y Moya, 2021); tampoco el diseño con DLT o NLT. Esta ausencia de reglas de diseño lleva a los profesionales a usar los diferentes métodos de cálculo publicados en los Documentos de Evaluación Técnica Europea (ETA) para cada tipo de producto, e integrar los resultados adecuadamente a la reglamentación local de cada país (Bell, 2018). Vale señalar, que el ETA es un documento a nivel europeo, emitido por un instituto independiente, que proporciona procedimientos para evaluar las propiedades fundamentales (estructurales, acústicas, térmicas) de los productos de construcción no estandarizados. Adicionalmente, el ETA ofrece a los fabricantes una ruta voluntaria hacia el mercado de conformidad (CE), cuando el producto no está o no está completamente descrito por una norma bajo el Reglamento de Productos de Construcción (UE) 305/2011. El mercado CE basado en ETA permite a los fabricantes comercializar libremente su producto en todo el mercado europeo e introducir productos innovadores en plazos exiguos. A modo de ejemplo, el ETA 19/0066, es un documento para la fabricación de un elemento de losa de madera constituida por miembros de madera aserrada escuadrada unidos mecánicamente para uso estructural en edificios. El producto se denomina FBE – PHE element, fabricado por la empresa FBE snc y evaluado técnicamente por Austrian Institute of Construction Engineering (OIB, ETA, 2023).

1.3.4 Madera laminada tarugada (DLT)

La madera laminada tarugada, conocida por su acrónimo en inglés DLT, es un producto de madera masiva compuesto por tablas de madera aserrada (láminas) colocadas de canto y paralelas entre sí, unidas con clavijas o tarugos de madera (Plowas et al., 2016, Rajendra, 2020). Las láminas usualmente son de 20 a 45 mm de espesor, de maderas de coníferas y con contenidos de humedad de 12 a 16 %. Los tarugos son generalmente de diámetros entre 12 y 24 mm, de maderas de latifoliadas

con contenidos de humedad de 6 a 8 %. Usualmente la ubicación de los tarugos se realiza de acuerdo a uno de los dos patrones de clavado: i) en una línea recta, ubicada cerca del eje neutro de la cara de la pieza y espaciados regularmente entre 200 y 300 mm, y ii) en zigzag, colocando un tarugo en un ángulo diagonal hacia un lado de la pieza de madera, y luego colocando otro tarugo en un ángulo diagonal hacia el otro lado de la pieza de madera, de modo que los tarugos se entrecrucen. El largo de los tarugos puede variar de acuerdo al proceso de fabricación. En un proceso industrializado, en general, los tarugos son continuos y unen transversalmente todas las láminas del panel. Mientras que, en un proceso artesanal, pueden ser discontinuos con respecto al ancho del panel y unen determinada cantidad de láminas, dependiendo de la tecnología que se esté empleando. Una vez colocados, los tarugos tienden a equilibrarse con el contenido de humedad de las láminas y se hinchan; al hacerlo, aseguran el trabajo conjunto de todas las láminas, generando un único componente DLT (Bell, 2018, Think Wood, 2019).

Por la facilidad de fabricación, con equipos sencillos como tornos y enrutadores, y por estar compuestos totalmente de madera, el DLT está siendo muy popular en Europa Central y en América del Norte (Ogunrinde, 2019). Este producto permite gran flexibilidad para crear espacios libres y de grandes luces (Coronel, 2014, Pereira et al., 2019). En Mineápolis, destaca el edificio de oficinas T3 construido en 2016, y, en Berlín, el edificio E3 de 2008 (Kleilein, 2009, StructureCraft, 2022).

Las principales ventajas del DLT frente a otros materiales de construcción como el acero y el hormigón (Mocellin y Gavassoni, 2019) son: i) su ligereza, una característica común a todas las estructuras de madera, en que se estima que una estructura de madera pesa alrededor del 20 % de la estructura equivalente en hormigón armado; ii) su buen comportamiento frente al fuego, por su constitución maciza, ya que, si bien la madera es un material combustible, el carbón producido en la combustión crea una capa aislante que ralentiza la penetración de la llama y protege la parte central de las secciones del elemento, manteniendo sus propiedades mecánicas y permitiendo que la estructura presente suficiente tiempo de resistencia al fuego para la evacuación del

edificio; y iii) el atractivo estético de una estructura realizada únicamente con madera, lo que permite una variedad de acabados superficiales.

Otra importante ventaja es que su producción requiere menor cantidad de energía y los materiales empleados provienen en su totalidad (láminas y tarugos) de recursos forestales renovables. Además, su uso permite una mayor velocidad y eficiencia en la ejecución y montaje de obras, lo que logra edificaciones con mejor desempeño térmico y más eficientes energéticamente (Bell, 2018, Lang, 2019).

1.3.4.1 Aplicaciones estructurales

Los paneles DLT se utilizan como elementos portantes, verticales (como muros) y horizontales (como pisos y techos).

Comúnmente, los paneles DLT para su empleo en muros se fabrican en espesores de 80 a 120 mm, en anchos de hasta 2,5 m y en longitudes de hasta 17 m (Dauksta, 2014).

Los paneles DLT para pisos suelen fabricarse en espesores de 100 a 240 mm, en anchos de hasta 2,5 m y en longitudes de hasta 17 m (Dauksta, 2014). Se fabrican en una amplia gama con diferentes niveles de acabado y con terminaciones que dejan a la vista perfiles diferentes de las láminas (Gong, 2019).

La información técnica suele estar disponible en Tablas (con luces y capacidad de cargas) elaboradas por el fabricante, a partir de ensayos de laboratorio (Bell, 2018).

1.3.4.2 Conexiones de madera

El comportamiento de la unión madera-madera resulta fundamental para predecir el comportamiento de los paneles DLT. Las conexiones generalmente representan puntos críticos en cualquier tipo de estructura.

Desde mediados de la década de 1950, en los países europeos, principalmente, se han llevado a cabo extensas investigaciones en conexiones de madera (Ogunrinde, 2019). En la actualidad, las conexiones de madera se desarrollan, en su mayoría, en el sector de la carpintería tradicional y cada vez es mayor su utilización y fabricación en industrias aserrables de gran porte. Muchas de estas conexiones emplean conectores de tarugos de madera, que se puede encontrar en todo el mundo (Canales, 2014).

La unión con tarugos es generalmente sencilla y es durable en la medida en que esté correctamente diseñada y sea capaz de transferir correctamente las solicitaciones entre elementos, en general de corte, axiales y momentos flectores (Ogunrinde, 2019).

Las principales ventajas del uso de tarugos de madera, como elementos de unión frente a otros medios de unión (pasadores de acero, adhesivos) son múltiples: i) mayor regularidad con la resistencia a la corrosión, dado que las estructuras hechas con maderas duras tienen un alto contenido de ácidos que atacan a los materiales ferrosos, lo que elimina esta incompatibilidad entre los materiales; ii) proporcionan resistencia al fuego, a diferencia de las uniones metálicas atornilladas, las cuales contribuyen a la conducción del calor al centro de la madera y la pérdida de capacidad portante del elemento de fijación metálico; iii) impactos ambientales positivos, como la reducción de dióxido de carbono (CO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COV, Canales, 2014, Martos, 2015).

Varios trabajos de investigación reportan sobre el comportamiento físico y mecánico de uniones de madera con tarugos.

Entre ellos se destacan los trabajos realizados por Eckelman y Haviarova (2007) reportaron que la orientación del grano del tarugo tuvo efecto sobre la resistencia a la flexión, siendo mayor la resistencia cuando los tarugos fueron cargados en la dirección radial. También encontraron que las variaciones moderadas en el tamaño del orificio tuvieron efecto mínimo sobre la resistencia de flexión.

Plowas et al. (2016) realizaron pruebas de flexión en tres puntos en tarugos de *Fraxinus sp.*, *Fagus sp.* y *Quercus sp.* de 20,5 mm, en base en la norma europea BS EN 373. Se ensayaron veinte ejemplares de cada especie que fueron cargados tangencialmente paralelo al grano para asegurar la menor resistencia a la rotura. Los valores de resistencia media (f_m , mean), módulo de elasticidad media (E_{mean}) y densidad media (p_{mean}) para las tres especies estudiadas respectivamente fueron: *Fraxinus sp.* = 127,05 N/mm², 9825 N/mm², 0,588 g/cm³; *Fagus sp.*: 129,13 N/mm², 10492 N/mm², 0,666 g/cm³; *Quercus sp.* = 108,39 N/mm², 8032 N/mm², 0,593 g/cm³. Los autores concluyeron que los tarugos de *Fagus sp.* presentaron valores de f_m , E_{mean} y p_{mean} superiores en comparación con las restantes especies de tarugos ensayados, y decidieron diseñar y fabricar paneles DLT conformados por láminas de *Larix sp.* unidos por tarugos de *Fagus sp.*

Bell (2018) llevó a cabo una evaluación de la calidad de los tarugos de madera a partir de ensayos de flexión en tres puntos en cuatro especies de madera de latifoliadas (*Fraxinus sp.*, *Fagus sp.*, *Quercus sp.*, *Acer sp.*) en una serie de cinco tramos (10, 15, 20, 25, 35 mm). El número total de muestras por serie fue igual a cinco. Estas se cargaron tangencialmente paralelo al grano para garantizar la menor resistencia a la rotura. Los resultados mostraron que los tarugos de *Fraxinus sp.*, *Fagus sp.*, *Quercus sp.* y *Acer sp.* experimentaron una deformación lineal hasta aproximadamente 1,5-2 mm, seguida de una respuesta no lineal con una pequeña meseta de deformación de carga casi plástica que ocurrió inmediatamente después de una falla inicial del tarugo.

1.3.4.3 Propiedades de los paneles DLT

Las propiedades de flexión de los paneles DLT dependen de varios factores, entre ellos, la capacidad de transferencia de corte entre láminas, la relación entre el espesor de las láminas y la longitud del panel, y las características de las láminas que componen los paneles (ejemplo: densidad, rigidez, presencia de singularidades como nudos o desviación de fibra importante, Plowas et al., 2016).

Las propiedades estructurales de los componentes DLT pueden ser determinadas mediante extensas campañas experimentales o por métodos analíticos. El enfoque experimental implica que cada vez que se realicen modificaciones en los parámetros de fabricación del componente (por ejemplo, patrón de clavado, diámetro de tarugos y/o especies utilizadas) es necesario realizar ensayos físicos y mecánicos (Ogunrinde, 2019). Los métodos analíticos permiten estimar las propiedades a través de modelos de comportamiento.

Los valores de resistencia y rigidez obtenidos a partir de un panel DLT han resultado superiores en comparación con las propiedades mecánicas de cada lámina individual, debido a que los tarugos transfieren mayor tensión a las láminas más rígidas y resistentes que forman parte del panel (Plowas et al., 2016).

La literatura sobre el comportamiento mecánico de componentes DLT es escasa y relativamente reciente. A continuación, se revisan algunos trabajos de investigación más relevantes.

Bocquet et al. (2007) examinaron vigas de madera laminada tarugada (DLT) compuestas de dos láminas colocadas de canto y unidas por sus caras con tarugos de madera y estudiaron la relación entre la carga aplicada y la deflexión, comparando con vigas de madera laminada clavada (NLT) y vigas de madera laminada encolada (GLT). Los resultados mostraron que las vigas DLT presentaron los mayores valores de rigidez y resistencia de flexión en comparación con las vigas NLT y GLT. En particular, reportaron valores de módulo de deslizamiento de 0,04, 0,06 y 0,08 kN/mm para NLT, GLT y DLT, respectivamente, y cargas de rotura promedio de 3,20, 3,21 y 3,25 kN para NLT, GLT y DLT, respectivamente.

Plowas et al. (2016) realizaron una serie de pruebas en paneles DLT compuestos por láminas de *Larix sp.* de 140 mm x 300 mm x 2520 mm unidas por tarugos de *Fagus sp.* de 20 mm de diámetro separados cada 300 mm. Se realizaron pruebas de flexión en cuatro puntos en cinco paneles de tamaño estructural para determinar el módulo de

elasticidad (MOE) local y global, y la resistencia a la flexión (MOR) según la norma europea EN 408. Los paneles DLT se orientaron en una dirección plana para representar una luz de piso típica y se cargaron en todo su ancho a una velocidad constante de 0,08 mm/s, asegurando que la falla de los paneles se alcanzara en 300 segundos. Los valores promedios de MOR, MOE local y global fueron 33,9 N/mm², 10484 N/mm² y 9671 N/mm², respectivamente. Los resultados demostraron que la resistencia a la flexión de los paneles tarugados fue superior a lo que se puede esperar para la madera de grado C22 (clase de resistencia para madera aserrada de conífera según Eurocódigo 5). Los autores concluyeron que la madera cultivada en el Reino Unido puede ser utilizada para la fabricación de paneles DLT para la construcción de pisos.

Bell (2018) evaluó la resistencia y rigidez de siete paneles DLT de 140 mm x 600 mm x 3000 mm formados por láminas de *Larix decidua* de 140 x 30 mm, unidos por tarugos de *Fagus sylvatica* de 20,5 mm de diámetro separados cada 300 mm. Se realizó pruebas de flexión estática en cuatro puntos hasta alcanzar la rotura, de acuerdo a la norma europea EN 408. Los valores promedios de fuerza máxima, MOE global y local, y MOR (y sus coeficientes de variación), fueron igual a 80.460 N (15,28 %), 9720 N/mm² (8,90 %), 10.480 N/mm² (9,92 %), 33,60 N/mm² (16,4 7%), respectivamente. El autor concluyó que los paneles DLT pueden ser desarrollados en el Reino Unido, utilizando madera de origen nacional. Planteó, además, la necesidad de que, en la cadena de suministros, la madera esté disponible en los tamaños y con los contenidos de humedad adecuados para la producción de DLT.

El-Houjeyri et al. (2019) fabricaron y analizaron el comportamiento estructural de cinco vigas DLT de 67,5 mm x 70 mm x 1450 mm compuesto por tres láminas de madera de *Quercus robur* unidos por tarugos de madera comprimida de *Picea abies* de 16 mm de diámetro. Realizaron ensayos de flexión estática en cuatro puntos hasta alcanzar la rotura y reportaron valores promedios de módulo de elasticidad y carga máxima, con sus desvíos estándar, iguales a 6970 N/mm² ± 1090 N/mm² y 9950 N/mm² ± 1070 N/mm², respectivamente. Las vigas DLT ensayadas presentaron una

resistencia a la flexión similar con respecto a las vigas encoladas. Concluyeron que el uso de tarugos de madera densificada como elementos de unión para sustituir adhesivos y elementos metálicos es prometedor. Se podrían lograr mejores desempeños estructurales mediante la optimización de patrones de unión y laminación (diámetro y ángulo de clavado del tarugo, y ancho de la lámina).

Pereira et al. (2019) evaluaron la rigidez y modo de falla de un panel DLT de 90 mm x 1330 mm x 2950 mm compuesto por láminas de *Pinus elliotti/P. taeda* de 38 x 90 mm, unidos por tarugos de *Peltogyne spp.* de 19 mm de diámetro. Los valores de módulo de elasticidad, fuerza máxima y módulo de rotura fueron 6630 N/mm², 106 kN y 40,6 N/mm², respectivamente. Estos autores concluyeron que el panel DLT ensayado fue capaz de soportar elevadas cargas, del orden de diez toneladas (100 kN), lo que indica que es posible utilizarlo para fines estructurales, siempre que esté previamente caracterizado y dimensionado para cada situación.

2. CARACTERIZACIÓN DE LÁMINAS Y TARUGOS DE MADERA PARA LA FABRICACIÓN DE PLACAS Y PANELES DLT

2.1. RESUMEN

La madera laminada tarugada (su acrónimo en inglés, DLT) es un producto de ingeniería de madera para uso en arquitectura e ingeniería civil que consiste en tablas de madera aserrada colocadas de canto y unidas entre sí por tarugos de madera. El diseño de DLT requiere, entre otros, conocer las propiedades de los materiales constituyentes (por ejemplo, láminas y tarugos). Este trabajo se focalizó en la caracterización física y mecánica de láminas de madera de procedencia uruguaya y tarugos de madera. El material experimental incluyó: i) una muestra de 138 láminas (50 x 147 x 2850 mm) de *Pinus elliottii*, una muestra de 95 láminas (48 x 98 x 2400 mm) de *P. elliottii* y *P. taeda*, dos muestras, una de 108 láminas (36 x 89 x 1900 mm) y otra de 137 láminas (36 x 89 x 2400 mm) de *Eucalyptus grandis*; ii) seis series de tarugos, dos de *Eucalyptus grandis* (18 y 20 mm de diámetro), dos de *Eucalyptus tereticornis* (15 y 18 mm de diámetro) y dos de *Balfourodendron riedelianum* (12 y 20 mm de diámetro). El programa experimental se dividió en dos etapas: i) evaluación de láminas para determinar el módulo de elasticidad mediante ensayos no destructivos (dinámicos) de impacto de onda y ensayos destructivos (estáticos) de flexión en máquina universal, y ii) ensayos destructivos de tarugos para determinar la tensión normal y la tensión de corte en flexión estática. Las láminas de *Eucalyptus grandis* presentaron valores de densidad, módulos de elasticidad estático y dinámico significativamente superiores a las láminas de *Pinus elliottii/P. taeda*. Las correlaciones entre módulo de elasticidad estático y dinámico mostraron valores similares entre los muestreos estudiados ($r = 0,8-0,9$). La relación entre la resistencia a flexión estática en cuatro puntos y la densidad mostró valores similares entre los muestreos estudiados ($r = 0,4 - 0,5$). Los tarugos de *E. tereticornis* y *B. riedelianum* presentaron valores de resistencia y densidad al 12% significativamente superiores a los tarugos de *E. grandis*. Los resultados de este trabajo permitieron establecer patrones de diseño y fabricación de prototipos de placas DLT a partir de maderas y tecnología de producción uruguayas.

Palabras clave: madera laminada tarugada, DLT, *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis*, módulo de elasticidad

2.2. SUMMARY

Dowel laminated timber (DLT) is an engineered wood product intended for structural applications made of sawn lumber jointed together by wood dowels. The design of DLT requires knowledge of the properties of the constituent materials (i.e., lamellas and dowels). This work focused on the physical and mechanical characterization of wooden lamellas and dowels with the potential to be used in DLT panels made of Uruguayan timber species. The experimental material included: i) one sample of 138 lamellas (50 x 147 x 2850 mm), of *Pinus elliottii*, one sample of 95 lamellas (48 x 98 x 2400 mm) of *Pinus elliottii/P. taeda*, two samples, one of 108 lamellas (36 x 89 x 1900 mm), and another of 137 lamellas (36 x 89 x 2400 mm) of *Eucalyptus grandis*; and ii) six series of wooden dowels, two of *Eucalyptus grandis* (18 and 20 mm diameter), two of *Eucalyptus tereticornis* (15 and 18 mm diameter) and two of *Balfourodendron riedelianum* (12 and 20 mm diameter). The experimental program was divided into two phases: i) evaluation of lamellas to determine the modulus of elasticity through non-destructive (dynamic) wave impact testing and destructive (static) flexion testing on a universal testing machine, and ii) destructive testing of dowels in static bending to determine normal stress and shear stress. *Eucalyptus grandis* lamellas showed significantly higher values of density, static and dynamic MOE compared to *Pinus elliottii/P. taeda*. The correlations between the static and dynamic modulus of elasticity showed similar values among the samples, with r being around 0.8 to 0.9. The relationship between the strength and the density showed similar values among the samples studied, with r being around 0.4 to 0.5. *E. tereticornis* and *B. riedelianum* dowels showed strength and density at 12% values significantly higher than the respective values of *E. grandis* dowels. The results of this work allowed to establish design patterns for manufacturing DLT panels using Uruguayan timber and technology.

Keywords: dowel laminated timber, DLT, *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis*, modulus of elasticity

2.3 INTRODUCCIÓN

En los países desarrollados de la tecnología de construcción con madera, la madera y los productos de ingeniería de madera proveniente de plantaciones con certificación forestal están siendo consumidos intensivamente como materiales estructurales en edificios y puentes. La madera laminada tarugada, también conocida como DLT por su acrónimo en inglés, pertenece al grupo de productos de «madera masiva» que tienen la capacidad de secuestrar y almacenar mayor cantidad de CO₂ que los productos tradicionales de madera empleados en la construcción (Mocellin y Gavassoni, 2019). Se trata de un producto generado a partir de láminas de madera aserrada de longitudes y secciones habituales (generalmente 2" x 4", 2" x 6", 2" x 8") colocadas de canto y unidas mediante tarugos de madera (Fig. 1, Hernández, 2018). El DLT puede emplearse como material estructural para construir entresijos horizontales y techos, así como para generar muros verticales en edificaciones. Junto con la madera contralaminada, son los productos de ingeniería de madera de mayor proyección internacional, ya que su empleo permite la construcción de edificios en altura y contribuye a alcanzar los objetivos del acuerdo de París (UN, 2015). Para que el DLT constituido por láminas y tarugos funcione exitosamente, las láminas deben trabajar solidariamente unas con otras y, por lo tanto, el elemento de unión —en este caso, el tarugo— cumple un rol relevante. Un aspecto clave en la fabricación del DLT es la expansión que debe experimentar el tarugo al equilibrarse con el contenido de humedad (CH) de las tablas, al ser colocado como elemento de unión. Por ello, los tarugos suelen fabricarse con maderas de densidades mayores y acondicionarse a CH inferiores a los CH de las láminas. Generalmente, los tarugos emplean maderas de latifoliadas (*Quercus sp.*, *Acer sp.*) de 500 Kg/m³ de densidad y son acondicionados al 6-8 % de CH; mientras que las tablas presentan 16 % de CH (Gong, 2019).

En Uruguay, la producción de madera con fines industriales procesa principalmente árboles de especies de rápido crecimiento, provenientes de plantaciones con manejo forestal sostenible. Vale señalar que más del 80 % de las plantaciones uruguayas cuentan con certificación forestal, FSC (Forest Stewardship Council) y/o PEFC

(Programme for the Endorsement of Forest Certification). La masa forestal destinada a los procesos de primera transformación está compuesta por 79 % del género *Eucalyptus* y 21 % del género *Pinus* (SPF, 2021).

Varios autores indican que las propiedades mecánicas y elásticas de la madera de eucalipto y pino permiten su empleo como material estructural (Moya et al., 2015, Baño et al., 2018). Para mejorar la eficiencia en la predicción de las propiedades mecánicas, se utilizan técnicas no destructivas (NDT), cuyo fundamento radica en la relación entre el módulo de elasticidad estático, usualmente determinado en ensayos de flexión, y el módulo de elasticidad dinámico (Pérez del Castillo, 2000, O'Neill et al., 2003).

En el mercado uruguayo, es posible encontrar tarugos de madera de diferentes procedencias. Por un lado, de origen nacional de *Eucalyptus grandis*, que se caracteriza por presentar propiedades mecánicas (resistencia y rigidez de flexión) y densidad igual a 50 MPa, 11.500 MPa y 0,45 - 0,56 g/cm³, respectivamente. Por otro lado, tarugos de madera importada, como de *Balfourodendron riedelianum*, que presenta los siguientes valores: módulo de rotura de 123 MPa, módulo de elasticidad de 13.000 – 15.000 MPa y densidades de 0,80 - 0,84 g/cm³ (Rivera y Lenton, 1999, O'Neill et al., 2004, Cueto, 2012, Watkins y Salazar, 2012).

El diseño de placas y paneles DLT requiere, en una primera etapa, conocer el comportamiento físico y mecánico de los materiales constituyentes (láminas y tarugos de madera). A partir de los resultados obtenidos en los ensayos, se realiza el diseño estructural más favorable de las placas y paneles DLT y la consiguiente validación. El objetivo central de este trabajo fue caracterizar estructuralmente láminas y tarugos de madera de distintas especies para el diseño y fabricación de placas y paneles DLT.



Figura 1. Placa de madera laminada tarugada, DLT (Fuente: StructureCraft, 2017).

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Láminas de madera

Con respecto a las láminas de madera, consistieron en un total de 478 tablas, de las cuales 233 correspondieron a *Pinus elliottii* y *P. taeda*, y las 245 tablas restantes, a *Eucalyptus grandis*. Proviene de cuatro muestreos distintos junto a sus características como número total (n), dimensiones (espesor, ancho y longitud) y procedencia (Tabla 1). La totalidad de las láminas fueron secadas en horno convencional y luego enviadas al Departamento de Materiales y Productos Forestales del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), donde fueron equilibradas a un contenido de humedad (CH) de aproximadamente $12\pm 2\%$.

Tabla 1. Resumen de materiales ensayados.

Muestreo	Especie	N	Dimensiones	Origen
I	<i>Pinus elliotti</i>	138	50 x 147 x 2850 mm	Rivera
II	<i>Pinus elliotti</i> y <i>P. taeda</i>	95	48 x 98 x 2400 mm	Tacuarembó
III	<i>Eucalyptus grandis</i>	137	36 x 89 x 2400 mm	Rivera
IV		108	36 x 89 x 1900 mm	

Cabe destacar que las láminas provenientes a los muestreos anteriormente mencionados serán utilizadas para la construcción de placas y paneles DLT de tamaño estructural. Las láminas de los muestreos I y IV fueron destinadas a la fabricación de

placas horizontales DLT, mientras que las láminas de los muestreos II y III fueron destinadas a la fabricación de paneles verticales DLT.

2.4.1.1 Clasificación visual preliminar

La clasificación visual consistió en seleccionar aquellas láminas que en la zona central (espacio donde se introducen los tarugos) de las caras y en toda su longitud presentan la menor cantidad de nudos y deformaciones o alabeos para posibilitar la unión de las tablas entre sí. El procedimiento fue elaborado por el equipo de trabajo, cuyo objetivo central fue seleccionar las láminas que se utilizarán para fabricar las placas y paneles DLT. En la figura 2 se puede observar los tres escenarios posibles encontrados con respecto a la posición de los nudos en la zona central de la cara y a lo largo de toda la longitud de las láminas.

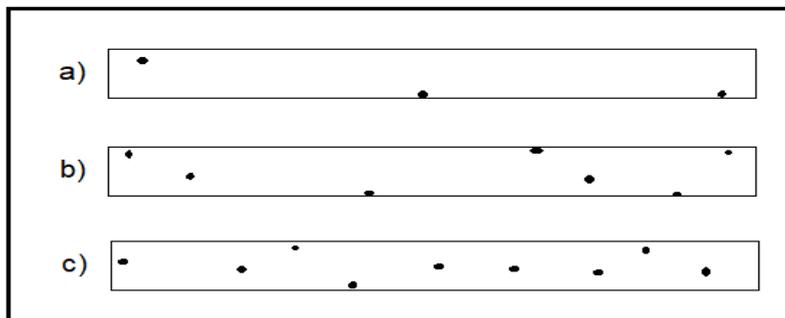


Figura 2. Croquis de posibles escenarios durante la clasificación visual. a. Lámina libre de nudos en la zona central de la cara. b. Lámina con algunos nudos en zona central. c. Lámina con exceso de nudos.

Cabe destacar que en los casos a y b, las láminas son seleccionadas para la fabricación de placas y paneles DLT. Con respecto al caso c, las láminas son rechazadas.

Por otro lado, es importante aclarar que las láminas de *Pinus elliottii* y *P. taeda* y *Eucalyptus grandis* no fueron clasificadas visualmente en base a normas nacionales (UNIT 1261 para *Pinus elliottii* y *P. taeda*, y UNIT 1262 para *Eucalyptus grandis*).

2.4.1.2 Ensayos dinámicos

Luego de clasificadas, las láminas seleccionadas fueron ensayadas mediante NDT para determinar el módulo de elasticidad dinámico (E_d). Para cada lámina se registraron las dimensiones reales promedio (base, altura y luz), la masa con una balanza electrónica de 0,1 g de precisión (Mettler Toledo) y el CH con xilohigrómetro de resistencia eléctrica (Lignomat). La densidad aparente (ρ) de cada viga se calculó como el cociente entre la masa y su respectivo volumen.

La determinación del E_d se realizó por el método de onda de impacto utilizando el equipo Microsecond Timer (Fakopp). Se midió el tiempo de propagación de onda sónica gastó en recorrer la distancia entre dos transductores, cada uno ubicado en las testas de la lámina, y posteriormente se calculó la velocidad (m/s).

El E_d se calculó de acuerdo a la ecuación (1):

$$E_d = \rho \times v^2 \quad (1)$$

donde:

ρ es la densidad de la viga (kg/m^3),

v es la velocidad de propagación (m/s).

A continuación, en la figura 3 puede observarse los distintos ensayos dinámicos llevados a cabo por el equipo de trabajo.



Figura 3. Ensayos dinámicos realizados en una lámina de *Eucalyptus grandis* correspondiente al muestreo III. a. Xilohigrómetro. b. Calibre digital. c. Cinta métrica. d. Fakopp.

2.4.1.3 Ensayos estáticos

Inmediatamente después de la realización de los ensayos dinámicos, todas las láminas fueron ensayadas a flexión estática en cuatro puntos de acuerdo con la norma EN 408 (CEN, 2011), en el tramo elástico de comportamiento. Los ensayos fueron realizados hasta lograr una carga máxima de aproximadamente el 40 % de la carga de rotura determinada, la cual fue previamente estimada a partir de 10 láminas de cada muestra, ensayadas hasta la rotura (figura 4).

El módulo de rotura (MOR) se calculó a partir de la ecuación (2):

$$MOR = ((3 \times Fmax \times 900)/(b \times h^2)) \quad (2)$$

donde,

$Fmax$ = carga máxima (N)

b = espesor (mm)

$h = \text{ancho (mm)}$

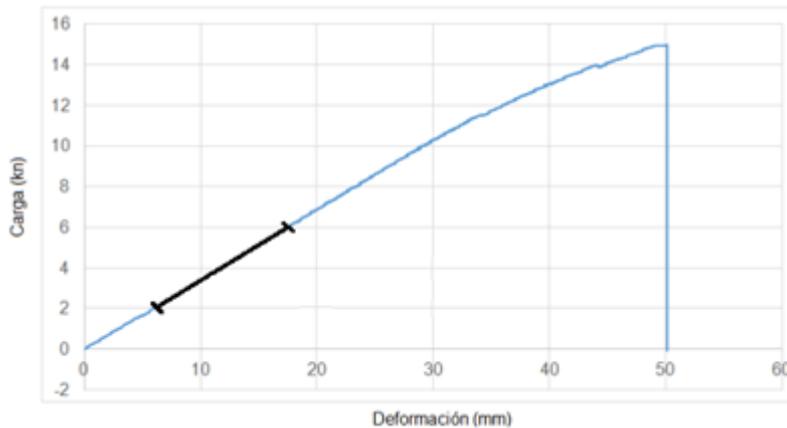


Figura 4. Resultado del ensayo en máquina universal de una lámina de *Pinus elliottii* correspondiente al muestreo I, hasta la rotura. Nótese la barra negra representa el tramo elástico comprendido entre el 10 al 40 % de la $F_{\text{máx,est}}$.

Para ello se utilizó una máquina universal (Minebea) con una celda de carga de 250 kN y con capacidad para aplicar cargas a velocidad constante. La deformación fue medida con dos extensómetros ubicados en el eje longitudinal y según el canto de la pieza (figura 5).

Para cada lámina, el módulo de elasticidad global en flexión $E (m, g)$ se calculó de acuerdo con la ecuación (3):

$$E(m, g) = (3aL^2 - 4a^3) / (2bh^3 (2(w_2 - w_1) / (F_2 - F_1) - 6a / 5Gb)) \quad (3)$$

donde:

a es la distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm),

L es la luz de ensayo (mm),

b y h son base y altura (mm), respectivamente,

G es el módulo de elasticidad transversal, calculado como $E_{m,g}/16$ (EN 384, 2010),

$F2 - F1$ es el incremento de carga en la línea recta de regresión entre el 10 % y 40 % de la carga máxima determinada (N),

$w2 - w1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F2 - F1$ (mm).



Figura 5. Dispositivo experimental para determinar el módulo de elasticidad mediante máquina universal en una lámina de *Pinus elliottii* correspondiente al muestreo I.

El módulo de elasticidad y la densidad se ajustaron al 12 % de CH de acuerdo con la norma EN 384 (CEN, 2010).

2.4.2 Tarugos de madera

El material utilizado en este estudio provino de dos conjuntos de láminas de dos procedencias y de dos especies en Uruguay. El primero, compuesto por tablas de *Eucalyptus grandis* (38 mm x 89 mm x 2400 mm) secadas en horno, con contenidos de humedad (CH) cercanos al 18 %, proveniente de una plantación comercial y aserradero ubicado en el noreste del departamento de Rivera (30°56'05"S 55°34'10"W). El segundo, láminas de *Eucalyptus tereticornis* (30 mm x 150 mm x longitud variable) con CH mayores al PSF procedentes de un monte ubicado en la Estación experimental de Bañados de Medina de la Universidad de la República, en el centro-este del departamento de Cerro Largo (32°21'53"S 54°26'13"W). Previo al maquinado, las tablas de *E. tereticornis* fueron trasladadas al Departamento de Productos Forestales del LATU, donde fueron secadas en horno solar, siguiendo una agenda típica de secado para impedir deformaciones y grietas excesivas, hasta alcanzar

un CH aproximado de 16 % a 18 %. A continuación, en la tabla 2 se describe las especies junto a sus diámetros de los tarugos ensayados.

Tabla 2. Características de los tarugos ensayados.

Especie	Diámetros (mm)			
<i>Balfourodendron riedelianum</i>	20	—	—	12
<i>Eucalyptus grandis</i>	20	18	—	—
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	—	18	15	—

Posteriormente, todas las láminas fueron cortadas longitudinalmente para generar escuadrías de 25 mm x 25 mm de sección transversal, y luego maquinadas en un torno con el fin de producir varillas de sección circular, de 15 mm y 18 mm de diámetro y 1 m de longitud. Adicionalmente, y a efectos comparativos, se incluyeron varillas, suministradas por un proveedor local de *E. grandis* de 20 mm de diámetro y de *B. riedelianum* de 20 mm y 12 mm de diámetro.

Cabe destacar, que la selección de especies y diámetros de los tarugos estuvo influenciada por dos aspectos, el primero, debido al escaso número de fábricas de moldeduras y carpinterías que fabrican varillas de madera. Por otra parte, el segundo aspecto se debió a que en los trabajos de investigación consultados durante la revisión bibliográfica aconsejaban utilizar tarugos con diámetros entre 12 a 24 mm para la fabricación de placas laminadas tarugadas.

Las varillas fueron cortadas para producir seis muestras de tarugos de 200 mm de longitud. La longitud fue definida a partir del criterio propuesto por Bell (2018), que sugiere cumplir con la relación luz de ensayo igual a 9 veces el diámetro. Cada muestra estuvo compuesta por al menos 20 cuerpos de prueba. Todos los tarugos fueron colocados en cámara climatizada (20 °C y 65 % HR, figura 6) hasta alcanzar 12±2 %

de CH, para luego ser ensayados en el Laboratorio del Grupo de Procesos Industriales de la Madera de la Sede Tacuarembó del Centro Universitario Regional Noreste de la Universidad de la República.



Figura 6. Tarugos acondicionados en cámara climatizada.

2.4.2.1 Propiedades mecánicas

Los ensayos de flexión estática en tres puntos se realizaron hasta la rotura en máquina universal (Shimadzu AGS-100) con una celda de carga de 100 kN y a una velocidad de 1,5 mm/min siguiendo el procedimiento establecido en Bell (2018). De los ensayos se obtuvieron registros de carga aplicada y desplazamiento de cabezal hasta rotura. La aplicación de carga en el punto medio de la longitud del tarugo fue realizada a través de un dispositivo especialmente mecanizado para este ensayo, según los lineamientos realizados por Bell (2018).

La clavija de madera fue constreñida en una placa de 10 mm de espesor y alineada correctamente sobre el soporte debajo de la máquina universal. La placa contaba con tres orificios fijos de 20, 16 y 12 mm de diámetro (+ 0,5 mm/-0,5 mm, figura 7) para los diferentes diámetros de tarugos ensayados (20, 18, 15 y 12 mm). La carga aplicada promovió el desarrollo de tensiones normales a la sección transversal del tarugo, provenientes de la flexión y tensiones de corte, que a su vez fueron debidas a la combinación del modo de carga en tres puntos y el dispositivo de aplicación de carga.

La distancia entre los apoyos fue tal que para todas las medidas de tarugo se mantuvo una relación constante igual a

$$l = 3 * d + 10$$

donde:

l: distancia entre los apoyos del dispositivo,

d: diámetro del tarugo.

Vale señalar que se tuvo especial precaución en la colocación del tarugo sobre el dispositivo de ensayo, procurando que la carga fuera aplicada en dirección radial. Esta orientación es la menos favorable para este tipo de carga aplicada (Jockwer et al., 2018). Debido a la geometría de los tarugos, no se pudo diferenciar si la orientación fue hacia la fibra traccionada o hacia la comprimida.



Figura 7. Ensayo de flexión en 3 puntos de tarugos.

Para cada tarugo, se obtuvo la tensión normal de flexión (σ_f) y la tensión tangencial de corte (τ_v) de acuerdo con las ecuaciones (2) y (3), respectivamente. La relación l/d adoptada garantizó que la tensión cortante desarrollada fuera nueve veces menor a la tensión normal correspondiente.

$$\sigma_f = (8 \times P \times l) / (\pi \times d^3) \quad (2)$$

$$\tau_v = (8 \times P) / (3 \times \pi \times d^3) \quad (3)$$

dónde:

P es la carga máxima (kN),

l es la luz de ensayo (mm),

d es el diámetro (mm) del tarugo.

2.4.2.2 Propiedades físicas

Se determinó la densidad aparente corriente (al 12% CH) y el contenido de humedad de cada tarugo de acuerdo a las normas ISO 3131 (ISO, 1975a) e ISO 3130 (ISO, 1975b).

2.4.3 Análisis estadístico

Se procedió a la realización de análisis descriptivos, comparativos y predictivos mediante planillas de cálculos y software estadísticos como Excel (2016) e InfoStat. Estos programas permiten manejar los datos y disponerlos de la forma adecuada para su posterior análisis.

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis descriptivo que consistió en pruebas de normalidad, atendiendo los valores de sesgo y curtosis, histogramas de frecuencia y gráficos de probabilidad normal. Para las láminas se realizó el test de Kolmogorov-Smirnov ($n \geq 50$) y en los tarugos el test de Shapiro Wilk ($n < 50$) para confirmar que los datos de las muestras provenían de distribuciones normales. Además, se calcularon variables estadísticas descriptivas como son la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación e intervalo de confianza al 95 % para la media (Pérez, 2014). En segundo lugar, se procedió al análisis comparativo para las láminas y tarugos. Para las láminas, teniendo en cuenta las exigencias en los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia, se realizaron análisis de varianzas (ANOVA). Por otro lado, para los tarugos, se recurrió a un test no paramétrico como el test de Kruskal Wallis con el fin de determinar si existían diferencias significativas entre los valores medios de las especies analizadas (Pérez, 2014; Acuña et al., 2015). Una vez

confirmada la existencia de diferencias significativas entre las series de tarugos, se continuó con el test de Nemenyi para determinar que muestreos eran significativamente diferentes entre sí.

Por último, en el caso de las láminas, se estimó la correlación a partir del coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de correlación de Pearson (r). Se estudió la relación de los valores del módulo de elasticidad estático (variable de referencia) y los valores de los módulos de elasticidad dinámicos y densidad (variables predictoras) a partir de modelos de regresión lineal simple. Por otro lado, en los tarugos se estudió la asociación entre variables cuantitativas a partir de la correlación de Spearman (r_s): tensión normal vs. densidad normal y tensión de corte vs. densidad normal.

2.5 RESULTADOS

2.5.1 Láminas de madera

En las tablas 3 y 4 se presentan los valores descriptivos correspondientes al módulo de elasticidad obtenido en ensayos estáticos (E_m 12 global), dinámicos (E_d) y densidad para los muestreos analizados. La densidad (ρ_{12}) y el E_m 12 global fueron corregidos a 12 % de CH de acuerdo con la norma EN 384.

Tabla 3. Valores medios del módulo de elasticidad estático y dinámico, y densidad para *Pinus elliottii* y *P. taeda*, corregidos al 12 % de contenido de humedad.

	Muestra I		
	p12 (g/cm ³)	Módulo de elasticidad	
		Em 12 global Maq. Universal (N/mm ²)	Ed Fakopp (N/mm ²)
N	128	128	128
Media	0,351	5373	6273
Desv. Std	0,042	1351	1336
CoV (%)	11,9	25,1	21
IC (95 %)	(+/-) 0,01	(+/-) 236,26	(+/-) 233,71
	Muestra II		
	p12 (g/cm ³)	Módulo de elasticidad	
		Em 12 global Maq. Universal (N/mm ²)	Ed Fakopp (N/mm ²)
N	85	85	85
Media	0,397	7345	8383
Desv. Std	0,028	1291	1349
CoV (%)	7,1	17,6	16
IC (95 %)	(+/-) 0,003	(+/-) 278,37	(+/-) 291,01

Tabla 4. Valores medios del módulo de elasticidad estático y dinámico, y densidad para *Eucalyptus grandis* corregidos al 12 % de contenido de humedad.

	Muestra III		
	p12 (g/cm ³)	Módulo de elasticidad	
		Em 12 global Maq. Universal (N/mm ²)	Ed Fakopp (N/mm ²)
N	127	127	127
Media	0,424	9785	11419
Desv. Std	0,044	1460	1319
CoV (%)	10,5	14,9	12
IC (95 %)	(+/-) 0,006	(+/-) 256,43	(+/-) 231,59
	Muestra IV		
	p12 (g/cm ³)	Módulo de elasticidad	
		Em 12 global Maq. Universal (N/mm ²)	Ed Fakopp (N/mm ²)
N	98	98	98
Media	0,420	10585	11865
Desv. Std	0,042	1299	1236
CoV (%)	10,1	12,3	10
IC (95 %)	(+/-) 0,01	(+/-) 260,40	(+/-) 247,74

Con respecto a la especie *Pinus elliottii* y *P. taeda*, se encontró diferencias significativas para las tres variables estudiadas: se observaron valores mayores en el

módulo de elasticidad estático y dinámico, y densidad en el muestro II con respecto al muestreo I. Existieron similitudes con trabajos de investigación nacional como Casaravilla (2022), que obtuvo un valor promedio de módulo de elasticidad global al 12 % igual a 5015 N/mm² y un valor promedio de densidad al 12 % igual a 0,419 g/cm³ para 250 láminas de *Pinus elliottii* de tamaño estructural de 50 x 150 x 3000 mm. Adicionalmente, Quagliotti et al. (2019) registraron un valor promedio de módulo de elasticidad dinámico obtenido por Fakopp igual a 7401 N/mm² en 248 láminas de *Pinus elliottii* de 50 x 150 x 2850 mm, previamente clasificadas visualmente como EC0 y EC1 de acuerdo con los lineamientos de la norma UNIT 1261. En el contexto regional, resultó interesante mencionar la similitud observada con respecto al trabajo realizado por Fank et al. (2017a), que calcularon un valor promedio de módulo de elasticidad obtenido por máquina universal igual a 7345 N/mm² y un valor promedio de densidad igual a 0,473 g/cm³ para 233 láminas de 105,3 x 24,4 x 500 mm de *Pinus elliottii* y *P. taeda* proveniente del nordeste de Argentina.

Por otro lado, para la especie *Eucalyptus grandis* se determinaron diferencias significativas con respecto al módulo de elasticidad estático y dinámico: se observaron valores mayores de las variables mencionadas en el muestreo IV con respecto al muestreo III. Sin embargo, no existieron diferencias significativas con respecto a los valores densidad entre ambos muestreos. Los resultados obtenidos fueron inferiores a los reportados en la bibliografía nacional; como por ejemplo Baño et al. (2019), que obtuvieron valores promedio de módulo de elasticidad estático (máquina universal) y dinámico (Fakopp), y densidad corregidos al 12 % de CH iguales a 14120 N/mm², 14640 N/mm² y 0,599 g/cm³, respectivamente, para 86 láminas de *Eucalyptus grandis* de sección 30 x 90 mm, previamente clasificadas visualmente como EF1 de acuerdo con los lineamientos de la norma UNIT 1262. En la región, se encontraron diferencias con respecto al trabajo realizado por Mastrandrea et al. (2016), que registraron un valor promedio de módulo de elasticidad estático y dinámico, y densidad igual a 12609 N/mm², 13319 N/mm² y 0,554 g/cm³, respectivamente, en 70 piezas de madera de *Eucalyptus grandis* de 23,5 x 129 x 501 mm proveniente de la provincia de Entre Ríos.

Por otra parte, las láminas de *P. elliotii* y *P. taeda* de los muestreos I y II presentaron valores promedio de MOE global (5373 N/mm²; 7345 N/mm²) similares a los valores promedio de la clase visual EC0 y EC1 de la norma UNIT 1261 (5327 N/mm²; 7139 N/mm²). Las láminas de *E. grandis*, de los muestreos III y IV, presentaron valores promedio de MOE global (10185 N/mm²) levemente inferior al valor de referencia de la clase EF1 de la norma UNIT 1262 (11960 N/mm²).

En la Tabla 5 se presentan los modelos de regresión lineal simple ajustados para la predicción del módulo de elasticidad estático, coeficiente de determinación (R²) y coeficiente de correlación de Pearson (r) para las especies *Pinus elliotii* y *P. taeda* y *Eucalyptus grandis*.

Tabla 5. Modelos de regresión lineal simple para la predicción del módulo de elasticidad estático, coeficiente de determinación (R²) y coeficiente de correlación de Pearson (r).

Especie	Muestreo	Variable predictora	Modelo de regresión lineal	R ²	R
<i>Pinus elliotii/P. taeda</i>	I	Ed Fakopp ¹	$y = 0,9192x - 393,68$	0,83	0,91
		p12 ²	$y = 14029x + 446,9$	0,19	0,43
	II	Ed Fakopp	$y = 0,8017x + 624,33$	0,70	0,84
		p12	$y = 19751x - 502,36$	0,19	0,43
<i>Eucalyptus grandis</i>	III	Ed Fakopp	$y = 0,9665x - 1252,1$	0,76	0,87
		p12	$y = 17487x + 2372,4$	0,28	0,53
	IV	Ed Fakopp	$y = 0,8658x + 312,34$	0,68	0,82
		p12	$y = 14889x + 4328,7$	0,25	0,49

¹ Módulo de elasticidad dinámico utilizando Fakopp

² Densidad al 12% de CH

Las correlaciones entre el módulo de elasticidad estático y dinámico mostraron valores similares entre los muestreos estudiados, estando *r* en el entorno de 0,8 a 0,9. Por otra parte, la relación entre la resistencia a flexión estática en cuatro puntos y la densidad mostró valores similares entre los muestreos estudiados, ubicándose *r* en el entorno de 0,4 a 0,5.

En las figuras 8 y 9 se presentan las rectas de regresión lineal simple, que relacionan el módulo de elasticidad estático con el módulo de elasticidad dinámico y la densidad para las láminas de *Pinus elliottii*, *P. taeda* y *Eucalyptus grandis*.

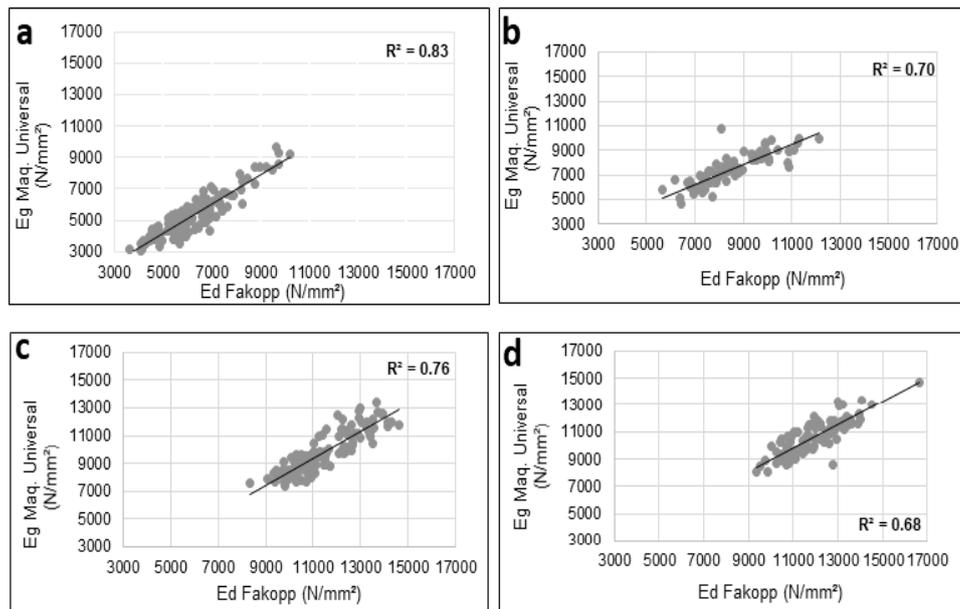


Figura 8. Modelos de regresión lineal simple para el módulo de elasticidad estático utilizando el módulo de elasticidad dinámico como estimador. a. Muestreo I. b. Muestreo II. c. Muestreo III. d. Muestreo IV.

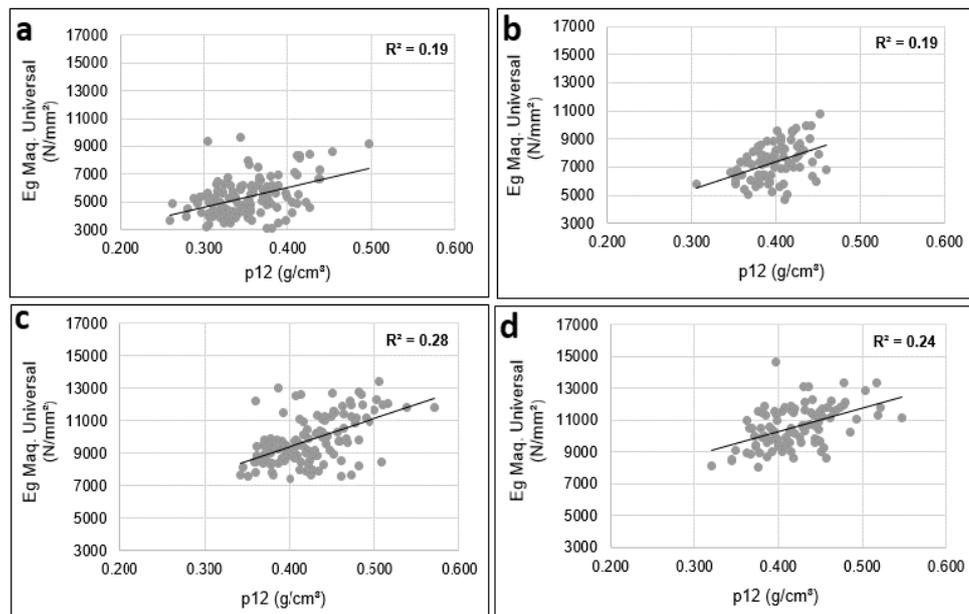


Figura 9. Modelos de regresión lineal simple para el módulo de elasticidad estático utilizando la densidad como estimador. a. Muestreo I. b. Muestreo II. c. Muestreo III. d. Muestreo IV.

En el caso de las láminas de *Pinus elliottii* y *P. taeda*, los resultados obtenidos se asimilaron a los reportados en la bibliografía nacional. Bruzzone y Chabén (2019) reportaron valores de r igual a 0,92 y 0,475 para MOE maq. universal vs Fakopp y MOE maq. universal vs. Densidad, respectivamente. Cardoso (2018) encontró un coeficiente de correlación igual a 0,92 para la relación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico. En Argentina, Fank y Mastrandrea (2017b) reportaron valores de $R^2 = 0,85$ para un modelo de regresión lineal entre el MOE estático y dinámico. Con respecto a las láminas de *Eucalyptus grandis*, los resultados fueron inferiores con respecto a trabajos realizados en el ámbito nacional, Baño et al. (2019), quienes determinaron un R^2 igual a 0,89 y 0,36 para las relaciones entre el módulo de elasticidad estático vs. dinámico y el módulo de elasticidad estático vs. Densidad, respectivamente. Pérez del Castillo (2001) calculó un valor de r igual a 0,92 para la relación entre el MOE maq. universal y Fakopp. Comparando con estudios regionales, en Argentina, De Cademartori et al. (2014) registraron un valor de $r = 0,92$ para un modelo de regresión lineal entre MOE estático y MOE dinámico.

2.5.2 Tarugos de madera

En la tabla 6 se presentan los resultados de los ensayos de flexión y densidad de los tarugos.

Tabla 6. Resultados de caracterización de tarugos. Valores medios (y desvíos estándar).

Parámetro\Especie	<i>B. riedelianum</i>		<i>E. grandis</i>		<i>E. tereticornis</i>	
Diámetro [mm]	20	12	20	18	18	15
N	22	20	22	24	22	23
Carga Máxima [kN]	7,56 (1,09)	3,29 (0,29)	4,65 (0,57)	2,97 (0,44)	6,58 (0,54)	4,17 (0,45)
Tensión normal [N/mm ²]	168 (24)	223 (20)	104 (13)	83 (12)	184 (15)	173 (19)
Tensión de corte [N/mm ²]	16,0 (2,3)	19,4 (1,7)	9,9 (1,2)	7,8 (1,2)	17,3 (1,4)	15,7 (1,7)
Densidad aparente corriente [g/cm ³]	0,741 (0,03)	0,774 (0,02)	0,524 (0,04)	0,431 (0,04)	0,868 (0,02)	0,904 (0,03)
Contenido de humedad (%)	11,9 (0,8)	12,1 (0,2)	11,3 (0,8)	12,4 (0,4)	13,7 (0,2)	13,0 (0,5)

Los resultados de los ensayos mecánicos y de densidad son consistentes con los reportados por Bell (2018). En particular, los tarugos de 20 mm de diámetro de *Balfourodendron riedelianum* y de *E. grandis* presentaron valores similares de carga

máxima y densidad que los tarugos de 20 mm de diámetro de madera de *Fagus sylvatica* (7,69 kN, 753 Kg/m³) y de *Acer pseudoplatanus* (4,57 kN, 547 kg/m³), respectivamente.

Se observó que, en todos los casos, el modo de falla de los tarugos fue por desgarro en la fibra traccionada más alejada con respecto al plano neutro (figura 10).



Figura 10. Falla característica causada por desgarro de las fibras en ejemplares de tarugos de *Balfourodendron riedelianum* de 20 mm y *Eucalyptus tereticornis* de 18 mm.

Con respecto a las propiedades mecánicas, tanto el módulo de elasticidad como la tensión normal y de corte, los valores promedio para las especies *Eucalyptus tereticornis* y *Balfourodendron riedelianum* resultaron significativamente superiores a la especie *Eucalyptus grandis*. Por otro lado, con respecto a las propiedades físicas, los valores promedio de densidad aparente corriente en *Eucalyptus tereticornis* y *Balfourodendron riedelianum* resultaron significativamente superiores en comparación con los valores de *Eucalyptus grandis*.

En la Tabla 7 se muestran los coeficientes de correlación de Spearman para tensión normal vs. densidad al 12% y tensión de corte vs. densidad al 12%.

Tabla 7. Coeficiente de correlación de Spearman para las relaciones tensión normal vs. densidad al 12% y tensión de corte vs. densidad al 12%.

Especie	Diámetro	Variable de referencia	Variable predictora	Coeficiente de correlación de Spearman (rs)
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	15	tensión normal	densidad aparente corriente	0,44
		tensión de corte		0,44
	18	tensión normal	densidad aparente corriente	0,07
		tensión de corte		0,06
<i>Balfourodendron riedelianum</i>	12	tensión normal	densidad aparente corriente	0,40
		tensión de corte		0,40
	20	tensión normal	densidad aparente corriente	0,29
		tensión de corte		0,29
<i>Eucalyptus grandis</i>	18	tensión normal	densidad aparente corriente	0,93
		tensión de corte		0,93
	20	tensión normal	densidad aparente corriente	0,90
		tensión de corte		0,90

¹ Densidad al 12% de CH

Las correlaciones estudiadas resultaron dispares: se observó una correlación alta para *E. grandis* y una correlación baja para *B. riedelianum* y *E. tereticornis*. Las propiedades mecánicas estuvieron influenciadas por las propiedades físicas (densidad), la orientación del grano (dirección radial y tangencial), defectos durante el secado y maquinado durante el proceso de fabricación de los tarugos, entre otros.

La tensión máxima normal y la tensión tangencial de corte en función de la densidad al 12 % de todos los ensayos se visualiza en la figura 11. Se pudo observar cómo la tensión máxima y de corte aumentan con la densidad del tarugo para los tarugos de *E. grandis* y *B. riedelianum*. Los tarugos de *E. tereticornis* no presentan esta tendencia, posiblemente por fisuración por colapso durante el secado natural de la troza realizado en época estival.

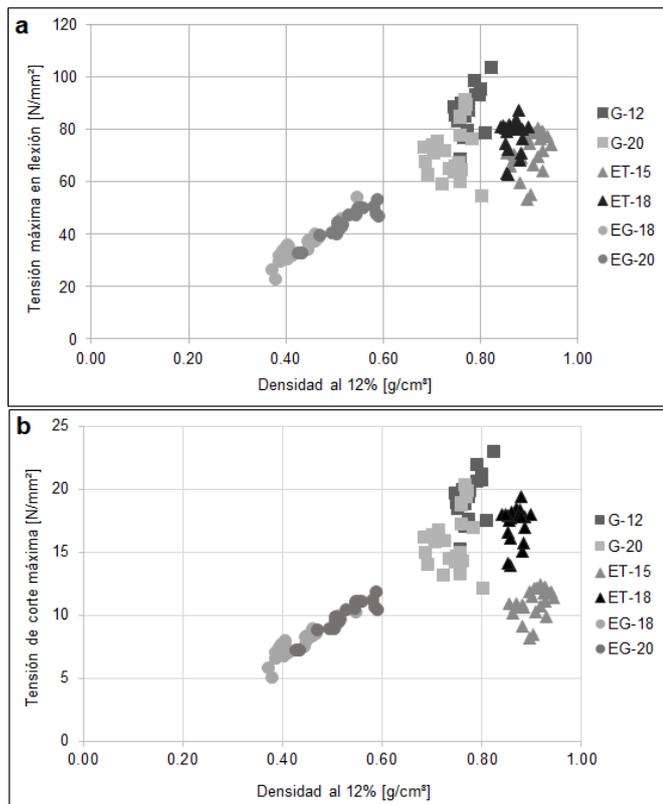


Figura 11. Relación entre las propiedades mecánicas y la densidad al 12 % para las series de tarugos ensayadas. a. Relación entre tensión máxima en flexión y densidad al 12 %. b. Relación entre tensión de corte máxima y densidad al 12 %.

2.6 CONCLUSIONES

i) Las láminas de *P. elliotii* y *P. taeda* presentaron valores promedio de MOE (5373 N/mm² y 7345 N/mm²) similares a los valores promedio de la clase visual EC0 y EC1 de la norma UNIT 1261 (5327 N/mm² y 7139 N/mm²). Para las láminas de *Eucalyptus grandis* presentaron un valor promedio de MOE (10.185 N/mm²) levemente inferior al de la clase EF1 de la norma UNIT 1262 (11.960 N/mm²).

ii) El modelo de regresión permite estimar adecuadamente el módulo de elasticidad estático a partir de la medición de la vibración longitudinal (Fakopp). Adicionalmente, resultó ser altamente eficiente para obtener el módulo de elasticidad dinámico en todos los muestreos, siendo de fácil aplicación en un aserradero, evitando

de esta forma un procedimiento de ensayo en máquina universal, más lento y más costoso.

iii) No se recomienda determinar el MOE estático a partir del valor de densidad en un modelo de regresión lineal simple.

iv) Los tarugos de madera de *Eucalyptus tereticornis* y *B. riedelianum* presentaron valores de densidad al 12% y resistencia superior a los tarugos de *E. grandis*, lo cual pueden ser utilizados como elementos de unión en láminas de *E. grandis* para la fabricación de placas y paneles DLT de tamaño estructural.

v) Debido a la amplia disponibilidad de madera de *Eucalyptus grandis*, pueden ser considerados como una opción válida para ser utilizados como elementos de unión en placas y paneles DLT, fabricados con láminas de maderas de densidades inferiores, tales como el pino cultivado en Uruguay.

vi) Los resultados de este trabajo permitieron sentar las bases para el diseño más adecuado, la posterior fabricación y la validación estructural de prototipos, de placas DLT a partir de maderas y tecnología de producción uruguayas.

2.7 BIBLIOGRAFÍA

Acuña L, Carretero M, Casado M, Spavento E. 2015. Módulos de elasticidad dinámicos como predictores del módulo de elasticidad estático. En: Workshop sobre II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira (2015, Belo Horizonte). Trabajos presentados. Valladolid, Universidad de Valladolid. 13 p.

Baño V, Moltini G, Aulet A, Cetrangolo G, Quagliotti S, Moya L. 2019. Módulo elástico de pino y eucalipto uruguayo a partir de la frecuencia longitudinal de vibración. En: 4.º Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas (2019, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 10 p.

- Baño V, Moya L, Domenech L, Godoy D, Sánchez A, Quagliotti S. 2018. Informes técnicos de normalización de madera estructural: madera aserrada de *Eucalyptus grandis*. Montevideo, UdelaR. Facultad de Ingeniería/UdelaR. Facultad de Arquitectura/Universidad ORT/LATU. 13 p. (Informes Técnicos de Normalización de Madera Estructural n.º 2). <https://hdl.handle.net/20.500.12008/23187>
- Bell T A. 2018. A detailed investigation into the engineering properties and challenges affecting the potential introduction of a UK grown dowel-laminated timber floor panel into the domestic construction market. Doctoral dissertation, University of Strathclyde. 309 p. <https://doi.org/10.48730/yt00-d987>
- Bruzzone G, Chabén Á. 2019. Clasificación visual y estructural de tablas de *Pinus elliottii* nacional en base a norma UNIT 1261. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 85 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29450>
- Cardoso A. 2018. Diseño de una metodología de clasificación visual estructural para madera de pinos del Noreste Uruguayo. Tesis Maestría en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 84 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31552>
- Casaravilla J. 2022. Propiedades de flexión de paneles de madera laminada clavada de pino para uso en viviendas construidas por el sistema cooperativo de ayuda mutua en Uruguay. Tesis Mag. en Construcción en Madera. Montevideo, Uruguay. Universidad del Bío-Bío. Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño. 118 p.
- CEN (Comité Europeo de Normalización). 2011. Estructuras de madera: madera aserrada y madera laminada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. EN 408. Bruselas. CEN. 37 p.
- CEN (Comité Europeo de Normalización). 2010. Madera estructural: determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. EN 384. Bruselas. CEN. 19 p.
- Cueto G. 2012. Influencia del raleo sobre la productividad y calidad de la madera en *Eucalyptus grandis*. Tesis de grado. Facultad de Agronomía, Universidad de la

República. Montevideo, Uruguay. 59 p.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/1849>

- De Cademartori P, Missio A, Gatto D, Beltrame R. 2014. Prediction of the Modulus of Elasticity of *Eucalyptus grandis* Through Two Nondestructive Techniques. *Floresta e ambiente*, 21 (3): 369-375. DOI: 10.1590/2179-8087.042313
- Fank P, Stefani P, Piter J. 2017a. Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el Nordeste de Argentina. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(3): 247-264. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000021>
- Fank P, Mastrandrea C. 2017b. Validación de un método acústico no destructivo para la determinación de la rigidez de tablas aserradas de Pino resinoso (*Pinus elliottii* y *Pinus taeda*) cultivado en el Nordeste de Argentina. *Revista forestal Yvyrareta*, 24: 114-121.
- Gong M. 2019. *Lumber-Based Mass Timber Products in Construction*. London, IntechOpen. 20 p. DOI: 10.5772/intechopen.85808
- Hernández C. 2018. *Construcción con madera masiva: propuesta para construir vivienda vertical sustentable en Zapopan*. Tesis Mag. en Proyectos y Edificación Sustentables. Jalisco, México. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano. 177 p. <http://hdl.handle.net/11117/5399>
- ISO (International Organization for Standardization). 1975a. Wood: determination of density for physical and mechanical test. ISO 3131. Ginebra, Suiza. 2 p.
- ISO (International Organization for Standardization). 1975b. Wood: determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO 3130. Ginebra, Suiza. 2 p.
- Jockwer R, Wiehle P, Palma P, Klippel M, Wapp A, Frangi A, Hebel D. 2018. Structural behaviour and design of timber connections with dowels and slotted - in plates made of bamboo composite. In: 2018 World Conference on Timber Engineering (2018, Seoul). Proceedings paper. Seoul, WCTE. 10 p.
- Mastrandrea C, Dacoregio H, Sbravati M, Lovatell Q. 2016. Utilización de métodos no destructivos por vibración para evaluar el módulo de elasticidad en tablas aserradas de *Eucalyptus grandis*. En: *Workshop sobre XXX Jornadas*

- Forestales de Entre Ríos (2016, Entre Ríos). Trabajos presentados. Entre Ríos, INTA. 1-5 p.
- Mocellin G, Gavassoni E. 2019. Análise técnica comparativa entre os usos de dlt e decking em estruturas de madeira. En: 4.º Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas (2019, Montevideo). Trabajos apresentados. Curitiba, Universidade Federal do Paraná. 10 p.
- Moya L, Cardoso A, Cagno M, O'Neill H. 2015. Caracterización estructural de madera aserrada de pinos cultivados en Uruguay. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 17(3):597-612. DOI: 10.4067/S0718-221X2015005000053
- O'Neill H, Tarigo F, Iraola P. 2004. Propiedades mecánicas de *Eucalyptus grandis* H. del norte del Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 55 p. (Informe n.º 6).
- O'Neill H, Tarigo F, Trambauer C. 2003. Propiedades mecánicas de *P. taeda* L. del litoral del Uruguay. Montevideo, LATU/JICA. 46 p. (Informe n.º 2).
- Pérez A. 2014. Comparación de ensayos a compresión de madera estructural mediante norma UNE y norma ASTM. Tesis Máster en Ingeniería de Montes. Valladolid, España. Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agrarias. 89 p.
- Pérez Del Castillo A. 2001. Propiedades mecánicas y calidad de madera de *Eucalyptus grandis* del norte de Uruguay. LATU/JICA, Montevideo, Uruguay. 35 p. (Informe de Investigación n.º 4).
- Pérez Del Castillo A, De Castro R, Ohta S. 2000. Índices de calidad de madera en *Pinus taeda* de Rivera para la optimización en el uso final. Montevideo, LATU. 22 p. (Informe de Investigación n.º 2).
- Quagliotti S, Bruzzone G, Cháben Á, Baño V, Moya L. 2019. Clasificación visual de madera de *Pinus elliottii* de Uruguay y estimación del módulo de elasticidad mediante técnicas no destructivas. En: 4.º Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas (2019, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 11 p.
- Rivera S M, Lenton M S. 1999. La xilología y las propiedades mecánicas de cinco maderas nativas argentinas. *Quebracho*, n.º 7: 72-78.

- SPF (Sociedad de Productores Forestales). 2021. Uruguay forestal: datos. Montevideo. [En línea]. Consultado 15 de octubre 2021. Disponible en: <https://www.spf.com.uy/datos/>
- UN (United Nations). 2015. The Paris Agreement. París. 27 p. [En línea]. Consultado 12 de junio 2021. Disponible en: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
- Watkins M, Salazar G. 2012. Diseño, construcción y ensayo de un secadero solar para madera. ASADES, 16: 7 p.

3. STRUCTURAL BEHAVIOUR OF DOWEL LAMINATED TIMBER PANEL BUILT WITH FAST-GROWING URUGUAYAN SPECIES

3.1 ABSTRACT

Approximately two million m³ of fast-growing species, mostly pine (*Pinus elliottii* and *P. taeda*) and eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) with not industrial use in Uruguay could provide a raw material for engineered wood products. There is a need and an opportunity to add value to the forest-timber chain developing construction systems that use mass timber, such as dowel laminated timber (DLT). DLT is made of sawn lumber staked on edges and jointed together by wooden dowels to create structural components that can be used in floors, roofs and walls. The objective of this work was to determine the bending strength and stiffness of DLT panels made of fast-growing Uruguayan species. The experimental program consisted on the design, manufacturing and testing of structural size DLT panels made of i) *Pinus elliottii* lamellas of lower structural quality jointed with 20 mm diameter dowels of *Balfourodendron riedelianum* and *Eucalyptus grandis*; and ii) *Eucalyptus grandis* lamellas of higher structural quality jointed with 15 mm and 18 mm diameter dowels of *E. tereticornis*. Four-point bending tests were carried out on structural size DLT pine (138 x 350 x 2850 mm) and DLT eucalyptus (89 x 252 x 1900 mm) panels using a universal testing machine according to EN 408. In addition, density and moisture content tests were performed on all tested specimens according to ISO 3130 and ISO 3131. The modulus of elasticity and density values were adjusted to 12 % moisture content according to EN 384. DLT panels made of *E. grandis* lamellas with 15 and 18 mm diameter dowels of *E. tereticornis* respectively showed values of modulus of elasticity (10548 N/mm² and 10523 N/mm²) and modulus of rupture (46.4 N/mm² and 39.9 N/mm²) that were significantly higher than those corresponding to panels made of *P. elliottii* lamellas regardless of dowel species (5048 N/mm² and 19.72 N/mm² for *B. riedelianum*, and 5292 N/mm² and 16.84 N/mm² for *E. grandis*). However, not significant difference with respect to the ultimate load for both types of panels was found. All DLT panels showed a linear behaviour until failure. Pine DLT exhibited higher deformation with respect to maximum load compared to eucalyptus DLT. Panels failed in tension mainly due to pronounced fibre deviations due to knotty areas.

Keywords: mass timber, dowel laminated timber, DLT, fast-growing species

3.2 INTRODUCTION

Adoption of construction systems that massively use wood, called mass timber, has been steadily increasing worldwide, due to high government policies to care for the environment and meet the objectives of the Paris Agreement (UN, 2015). Additionally, these engineered wood products are manufactured to achieve various structural properties such as resistance, durability and consistency (Ahmed, 2021) together with reduction of the execution times of works, thus improving the performance of buildings. These characteristics have motivated engineers and architects to consider need to buildings in height, although there are currently some implications to be resolved related to building codes (Ramage et al., 2017).

In Uruguay, a country with not tradition in timber construction, government is promoting the use of structural timber as a quick solution to the existence of a deficit of approximately 60,000 houses (MVOT, 2021). Forest projections for 2030 indicate the availability of a minimum of 3 million m³/year of pine (*P. elliotii* and *P. taeda*), and 0.2 million m³/year of eucalyptus (*E. grandis*), both for mechanical transformation (Uruguay XXI, 2022). Therefore, there is an opportunity to develop wood construction systems that allow adding value to forestry-timber production chain through development of construction systems that massively use wood, in particular doveled laminated timber panel (DLT) for use in mezzanines, ceilings and walls of residential buildings, as can be seen in figure 1. These panels can be produced in usual dimensions for low-income housing in such a way that their manufacture and/or handling allows participation of unskilled labour.



Figure 1. Example of building comprising DLT floor and roof panels.

DLT, that can avoid the use of adhesives and it was developed in Europe by the German engineer Julius Natterer in the 1970s (Henderson, 2009). Its earliest form consisted of sawn timber lamella placed side by side, continuously nailed to create solid structural elements about 600 mm wide. The width of lamellas varied from 80 to 200 mm and long nails were used to join approximately 3-4 lamellas at a time (Bell, 2018). Today, it is a specialized product typically associated with sustainable design, consisting of lamellas placed edgewise and joined together by wooden dowels, in order to create a structural element with a larger cross-section, i.e., plate, panel or beam (Akkari et al., 2020).

At the end of the 20th century, research work began to be carried out, studying the mechanical behaviour of engineered timber products used today. It is worth highlighting some works, which can be mentioned as a reference, developed by Natterer and Sandoz (1996) in Switzerland, in which they study the use of low-cost lamellas joined by nails or wooden dowels to form panels that acquire new structural features. Among them, Bell (2018) stands out, that carried out extensive work in the United Kingdom on the manufacture of 300 x 140 x 3000 mm dowel laminated timber panels, formed with 140 x 30 mm lamellas of *Picea sitchensis* and *Larix deciduamm* coniferous wood joined together by 20 mm diameter hardwood dowels. It established that the strength performance of DLT panels is greater than expected from a single lamination; however, DLT panels did not experience a proportional increase in stiffness when extended in one direction. This indicates that location of the dowels and

their stiffness do not provide improved properties and DLT cannot be treated as a composite panel without the use of additional supplementary fixings.

In the South American region, there are some research works carried out. In Chile, Núñez (2005) demonstrated the potential of using fast-growing pine wood for the construction of panels made up of lamellas of wood and pine dowels.

However, at the national level, there is not history of projects on research, development and innovation DLT, but there are on other wood engineering products, such as Glued laminated timber (GLULAM), Cross-laminated timber (CLT) and Nail Laminated Timber (NLT).

This paper presents the first national study based on the mechanical properties (modulus of elasticity and resistance) in horizontal panels of structurally sized dowel laminated timber made with fast-growing Uruguayan species.

3.3 MATERIALS AND METHODS

3.3.1 Materials

For this work, 138 pine lamellas (*Pinus elliottii*) of 50 x 147 x 2850 mm and 108 eucalyptus lamellas (*Eucalyptus grandis*) of 36 x 89 x 1900 mm, from sawmills located in the northeast of Uruguay, were selected. After drying in a conventional oven to approximately 12 % moisture content (MC), both batches of boards were packed in polyethylene film and transferred to the Department of Forest Materials and Products of the Technological Laboratory of Uruguay (LATU) for further processing and analysis. All lamellas were previously structurally characterized by physical and mechanical tests. It should be noted that lamellas were not visually classified according to the Uruguayan standards (UNIT 1261 and UNIT 1262) but the reference values were compared. *Pinus elliottii* lamellas presented values of stiffness (MOE) consistent with the reference values of visual EC0 class of the UNIT 1261 (2018b) standard and

Eucalyptus grandis lamellas showed MOE values slightly lower than the reference values of visual EF1 class of the UNIT 1262 (2018a) standard.

In addition, wooden dowels were used that varied according to diameter, species and origin/supplier/supply. *Eucalyptus grandis* and *Balfourodendron riedelianum* dowels were used, both 20 mm in diameter provided by a local supplier. Subsequently, *Eucalyptus tereticornis* dowels of 15 and 18 mm in diameter from a forest plantation located in the midwest of Cerro Largo department were elaborated in a homemade way. All the dowels had a length of 450 mm.

3.3.2 Design and Manufacture of DLT Panels

Four series of DLT horizontal panels of structural size were manufactured, consisting of: i) PBP (pine-*Balfourodendron riedelianum* panel), ii) PEP (pine-*Eucalyptus grandis* panel, iii) ET15P (eucalyptus-*Eucalyptus tereticornis* 15 mm panel) and iv) ET18P (eucalyptus-*Eucalyptus tereticornis* 18 mm panel). Each series consisted of six panels.

The series called PBP and PEP were made up of *Pinus elliottii* lamellas joined with wooden dowels of *Balfourodendron riedelianum* and *Eucalyptus grandis*, 20 mm in diameter. Regarding the ET15P and ET18P panels, they were composed of *Eucalyptus grandis* lamellas joined with *Eucalyptus tereticornis* wood dowels of 15 and 18 mm in diameter respectively. The final length of dowels was 450 mm in four series of DLT panels.

Prior to fabrication of panels, in order to generate a uniform set of DLT panels with similar structural properties, special care was taken in selection of lamellas (i.e., of different ranges of elastic properties and densities) and in their location (i.e., according to a defined order) within each panel. Thus, lamellas were classified according to their modulus of elasticity into four subgroups and criteria were established, both for distributing the lamellas in the different panels and for arranging lamellas within

panels. In this way, panels were made up of a total of seven lamellas: two lamellas from the group with lowest MOE rank (position 3 and 5), two from the second group (pos. 2 and 6), two from the third (pos. 1 and 7) and one from the group higher MOE (pos. 4; figure 2).



Figure 2. Distribution of lamellas within each panel according to MOE.

For PBP and PEP series, MOEs of each subgroup covered the following ranges: Subg. 1, 3107 - 4028 N/mm²; Subg. 2, 4029 - 5368 N/mm²; Subg. 3, 5369 - 6710 N/mm²; Subg. 4, 6711 - 9597 N/mm².

On the other hand, for ET15P and ET18P series, the MOE of each subgroup covered the following ranges: Subg. 1, 8017 - 9149 N/mm²; Subg. 2, 9150 - 10514 N/mm²; Subg. 3, 10515 - 11879 N/mm²; Subg. 4, 11884 - 15522 N/mm².

In each DLT panel, lamellas with 12±2 % CH were joined by wooden dowels with 8 % CH. This aspect is fundamental for DLT panels to successfully fulfil their structural function because wooden dowels, having a lower moisture content than lamellas, swell when they are in contact and balance with them (Plowas et al., 2016). Previously, cylindrical holes were made in the central area, distributed linearly along each lamella

using an electric hand drill, and then, dowels were nailed with a rubber hammer (figure 3).



Figure 3. Fabrication of structural size DLT panels.

In PBP and PEP series, the distance between dowels was equal to 300 mm. It is important to mention that prior to manufacture of panels, all pine lamellas were planed again until they reached cross sections with uniform geometries and identical dimensions along their longitudinal axis that enable correct assembly of the DLT panels. The final configuration of pine lamellas was 138 x 350 x 2850 mm (figure. 4). Regarding PBP and PEP series, distance between dowels was equal to 200 mm. The configuration of eucalyptus panels was 89 x 252 x 1900 mm (figure 4).

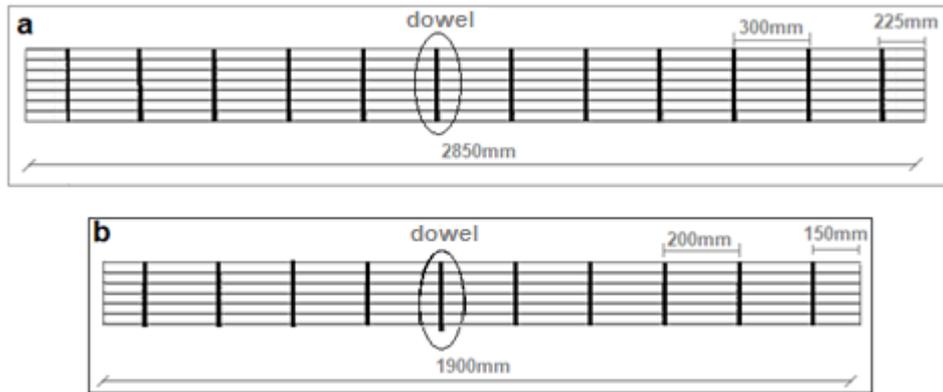


Figure 4. Structural size DLT panel configuration. a. DLT pine panel. b. DLT eucalyptus panel.

It's important to clarify that the spacing between dowels on DLT panels was determined based on the UNE-EN-1995-1-1 (CEN, 2016) standard, which establishes design and calculation requirements for timber structures. For wood-to-wood joints (such as dowels), the following relationship was used:

$$f_{h,i,k} = t_i * d$$

where:

$f_{h,i,k}$: characteristic crushing strength of the timber member,

t_i : thickness of the timber member,

d : diameter of the fastener element.

3.3.3 Four-Point Static Bending Tests

Once built, all DLT panels were tested to static bending at four points according to EN 408 (CEN, 2011), resting horizontally on supports and two loads were applied at ends of central third, with a constant load advance at a speed adequate to reach rupture in a given time between 180 and 420 seconds. Tests were carried out in a Minebea brand universal machine, model AL-250 kN of the LATU. Deformations were recorded using an extensometer (Mitutoyo), located on underside of plate and in the middle of

the piece's span, until reaching a load equal to 40 % of estimated maximum load, ensuring thus the record of load cycle and its corresponding deformation within elastic period. After that, the extensometer was removed and test continued applying load at the same speed until panel broke (figure 5).



Figure 5. *Pinus elliottii* panel tested in static bending at four points in a universal machine.

For each DLT panel, global elastic modulus $E (m, g)$ and rupture modulus (MOR) values were obtained, according to (1) and (2), respectively:

$$E(m, g) = (3aL^2 - 4a^3)/(2bh^3 (2 (w2 - w1)/(F2 - F1) - 6a/5Gbh)) \quad (1)$$

$$MOR = ((3 \times F \times a)/(b \times h^2)) \quad (2)$$

where:

a is the distance between the load point and the nearest support (mm),

L is the test span (mm),

b and h are base and height (mm), respectively,

G is the transverse elasticity modulus, considered as infinite,

F2 - F1 is the load increase in the straight line of regression between 10 % and 40 % of the estimated maximum load (N),

w2 - w1 is the deformation increment corresponding to F2-F1 (mm),

F is the maximum load (N).

After four-point bending tests, seven samples were taken, one for each lamella that formed panel, which was cut as close as possible to the point of failure to determine physical properties such as moisture content (MC) and density, according to ISO 3131 (ISO, 1975a) and ISO 3130 (ISO, 1975b; figure 6).



Figure 6. Density and CH tests on *Pinus elliottii* and *Eucalyptus grandis* panels.

The modulus of elasticity and density were adjusted to 12 % CH according to EN 384 (CEN, 2010).

3.3.4 Data Processing and Statistical Analysis

The statistical analysis included a descriptive and comparative analysis between DLT panels of pine and eucalyptus.

Regarding descriptive analysis, it consisted of normality tests, considering the values of skewness and kurtosis, frequency histograms and normal probability graphs. Shapiro Wilk Test ($n < 50$) was performed to confirm that the sample data came from normal distributions.

On the other hand, comparative analysis consisted of analysis of variances (ANOVA) to determine the existence of significant differences among series of DLT panels

regarding to their physical and mechanical properties. Subsequently, HSD Test of Tuckey was carried out, that allowed to calculate all the differences of the sample means between t levels of the factor studied. Differences above that threshold (0,05) will be considered significant differences; those that are not will be considered non-significant differences.

3.4 RESULTS

3.4.1 Four-Point Static Bending Tests

Tables 1 and 2 show the average values of ultimate load (UL), global modulus of elasticity (Global MOE) and modulus of rupture (MOR) for DLT pine panels (PBP and PEP series) and eucalyptus (ET15P and ET18P).

Table 1. Mean values of the mechanical properties in DLT pine panel.

PBP serial			
Serial number	UL Fmax (kN)	Global MOE (N/mm ²)	MOR (N/mm ²)
PBP-1	67.31	5417	25.1
PBP-2	55.06	4996	20.5
PBP-3	55.75	4632	20.8
PBP-4	45.93	4939	17.1
PBP-5	38.56	4951	14.4
PBP-6	57.68	5352	21.5
Mean	53.38	5048	19.72
COV %	19.00	5.78	21.00
PEP serial			
Serial number	UL Fmax (kN)	Global MOE (N/mm ²)	MOR (N/mm ²)
PEP-1	59.62	5597	22.2
PEP-2	53.18	5069	19.8
PEP-3	51.18	5079	13.8
PEP-4	72.31	5572	19.5
PEP-5	55.06	5073	14.9
PEP-6	48.75	5366	13.2
PEP-7	53.56	4873	14.5
Mean	56.24	5292	16.84
COV %	14.00	5.29	21.00

Table 2. Mean values of the mechanical properties in DLT eucalyptus panel.

ET15P serial				
Serial number	UL	Fmax (kN)	Global MOE (N/mm ²)	MOR (N/mm ²)
ET15P-1		55.68	11181	44.7
ET15P-2		60.43	10242	48.5
ET15P-3		48.56	10731	39
ET15P-4		54.5	9721	43.7
ET15P-5		56.81	10710	45.6
ET15P-6		70.56	10705	56.6
Mean		57.76	10548	46.4
COV %		13.00	4.76	13.00
ET18P serial				
Serial number	UL	Fmax (kN)	Global MOE (N/mm ²)	MOR (N/mm ²)
ET18P-1		57.25	10008	45.9
ET18P-2		45.31	10526	36.4
ET18P-3		48.87	10385	39.2
ET18P-4		57.43	10948	46.1
ET18P-5		53.75	10682	43.1
ET18P-6		35.75	10588	28.7
Mean		49.73	10523	39.9
COV %		17.00	2.99	17.00

ANOVA showed significant differences ($\alpha < 0.05$) for variables Global MOE and MOR in DLT panels of pine and eucalyptus. Subsequently, Tuckey HSD Test determined that mean values of global MOE and MOR were significantly higher in eucalyptus DLT panels compared to pine DLT panels. On the other hand, regarding the ultimate load, no significant differences ($\alpha > 0.05$) were found between pine and eucalyptus DLT panels.

Global MOE and MOR values in eucalyptus DLT panels (ET15P and ET18P) were higher than the result reported in the literature for panels made up of other species. El-Houjeyri et al. (2019), who manufactured and analysed the structural behaviour of five 67,5 mm x 70 mm x 1450 mm DLT panels made up of three lamellas of *Quercus robur* joined by 16 mm diameter *Picea abies* compressed wood dowels. They found an average value of the global elasticity modulus equal to 6970 N/mm².

Average values of UL, global MOE and MOR in pine DLT panels (PBP and PEP) were lower than works reported by Plowas et al. (2016) carried out a series of tests on 140 mm x 300 mm x 2520 mm *Larix sp.* panels joined by 20 mm diameter *Fagus sp.* dowels. Average values of global MOE and MOR were 9671 N/mm² and 33.9 N/mm², respectively. Bell (2018) evaluated strength and stiffness of seven 140 mm x 600 mm x 3000 mm DLT panels made up of 140 x 30 mm lamellas of *Larix decidua* joined by 20.5 mm diameter *Fagus sylvatica* dowels. Average values of global MOE and MOR were equal to 9720 N/mm² and 33.60 N/mm². Pereira et al. (2019) evaluated to strength and stiffness of a 90 mm x 1330 mm x 2950 mm DLT panel composed of 38 x 90 mm *Pinus elliottii* and *P. taeda* lamellas laterally joined by 19.04 mm diameter and 190 mm long *Peltogyne spp.* wood dowels. They found UL, Global MOE and MOR values equal to 106 kN, 6630 N/mm² and 40.6 N/mm² respectively.

Regarding, the resistance values (MOR) obtained in pine and eucalyptus DLT horizontal panels, they seem to be consistent with the mean values for wood pieces of EC0 and EF1 visual classes of the UNIT 1261 (2018b) and UNIT 1262 (2018a) standards, respectively. Additionally, with respect to the stiffness values (MOE) in pine and eucalyptus DLT horizontal panels, they were slightly lower than the mean values of EC0 and EF1 visual classes of the UNIT 1261 (5327 N/mm²) and UNIT 1262 (11960 N/mm²) standards, respectively.

3.4.1.1 Load vs. Deformation Graphs

The load-slip behaviour in DLT panels was linear up to ultimate load (UL), where abrupt (brittle) failure was observed. However, in some series of DLT panels, abrupt and successive drops were observed, due to the fact that in the set of lamellas that make up the DLT panel, there are sheets with lower resistance and stiffness, reaching rupture and transmitting the stress through the pegs to the next lamella (figure 7).

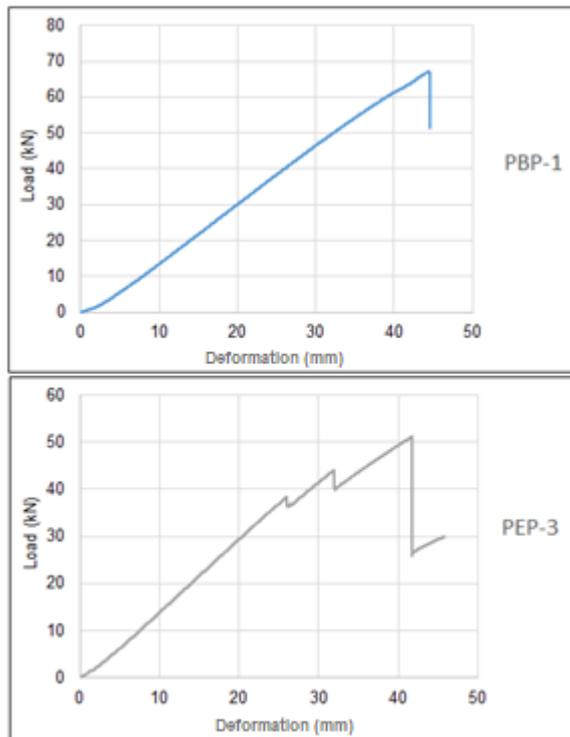


Figure 7. Behaviours of DLT panels in the Load vs. Deformation graph. to. DLT panel with abrupt (brittle) failure. b. DLT panel with abrupt and successive drops.

Results showed a variation in stiffness between pine and eucalyptus DLT panels (figure 8). In this sense, pine DLT panels presented greater deformations with respect to maximum load compared to eucalyptus DLT panels. In other words, in almost all tests of the DLT pine panels (PBP and PEP series) deformation exceeded 40 mm until reaching the maximum load. However, deformation in the eucalyptus panels (ET15P and ET18P series) did not exceed 40 mm until reaching maximum load.

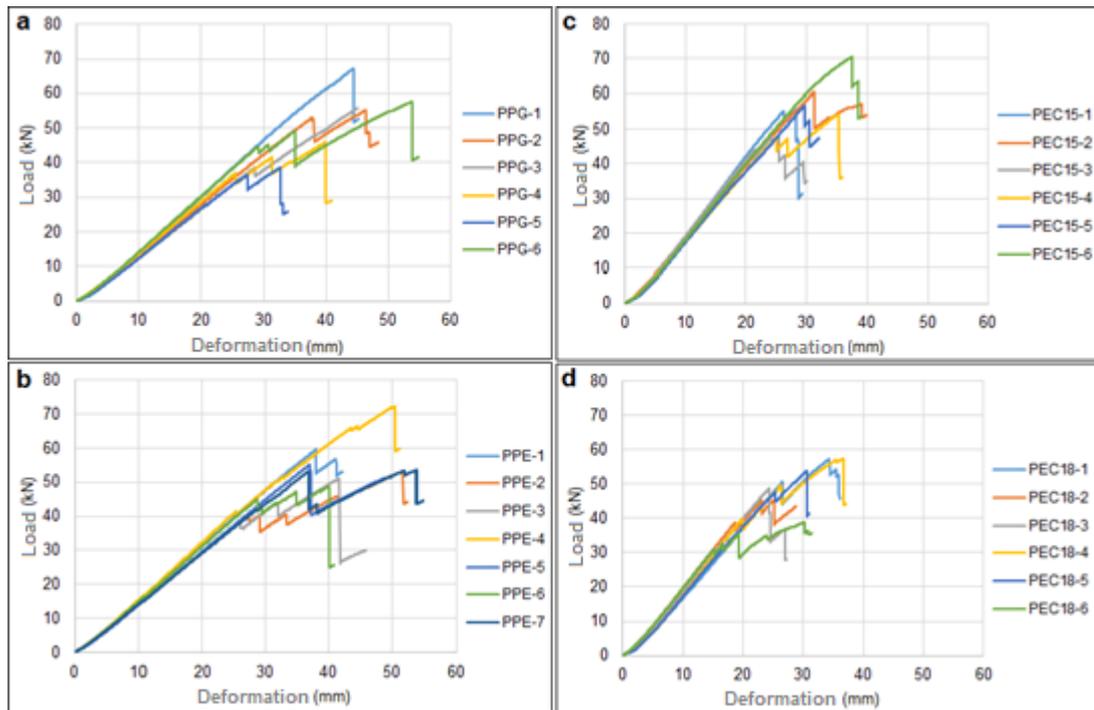


Figure 8. Load vs. Deformation graphs in pine and eucalyptus DLT panels. a) PBP panels. b) PEP panels. c) ET15P panels. d) ET18P panels.

3.4.1.2 Relation MOE DLT Panel/MOE Lamellas

It is important to study relationship between average MOE of each series of DLT panel and average MOE of lamellas that constituted those panels. It is expected a ratio value greater than 1, which means that the stiffness of panel is greater than that of lamellas working individually, and the means of connection (i.e., the dowel) allows collaboration between them and determines the success of assembly.

The relationship in the PEP, ET15P, and ET18P series was approximately 1, except for the PBP series where the ratio was less than 1, with a value of 0.95 (table 3). This value can be attributed to disparities in the structural quality of lamellas that make up DLT panels.

Table 3. Comparative table between average MOE values of DLT panels and individual lamellas.

	Series			
	PBP	PEP	ET15P	ET18P
MOE average DLT panel (COV %)	5048 (5.78)	5292 (5.29)	10548 (4.76)	10523 (2.99)
MOE average lamellas (COV %)	5317 (21.77)	5212 (28.20)	10699 (14.38)	10465 (12.70)
Relation MOE DLT panel/MOE lamellas	0.95	1.02	0.99	1.01

Additionally, it was verified that the structural quality of lamellas influenced in flexural properties, particularly in the MOE. The most relevant defects in lamellas were deviations of fibers and knotty areas.

3.4.2 Physical Properties

Table 4 shows average values of physical properties, density at 12% and moisture content (MC), for the tested DLT panels of pine (PBP and PEP) and eucalyptus (ET15P and ET18P).

Table 4. Results of the physical properties in DLT panels.

Serial	12 % density (g/cm ³)		MC %	
	Mean	COV %	Mean	COV %
PBP	0.347	5.97	11.4	1.29
PEP	0.364	5.16	11.5	1.80
ET15P	0.434	2.50	11.4	2.36
ET18P	0.423	4.41	11.3	2.36

Density values corrected to 12 % MC were significantly higher in eucalyptus DLT panels (series ET15P and ET18P) compared to pine DLT panels (PBP and PEP).

3.4.3 Failure Modes

Pine and eucalyptus DLT panels reached their breaking point after experiencing high deformation due to a combination of tensile and compressive stresses in each layer, a behaviour similar to that reported by Bell (2018) for DLT panels. Additionally, when the failure of a DLT panel layer subjected to bending stresses is considered critical, as it can lead to the failure of the entire DLT panel and spread to the rest of the building structure.

The failures observed in DLT panels occur due to ruptures in wood fibers, leading in some cases to a brittle failure. Additionally, the failure modes in pine and eucalyptus panels were due to tension failures, mainly caused by highly pronounced fiber deviations and deviations due to the presence of knots or knotty areas in places very close to the holes where the dowels were nailed.

Continue, the failures were mostly located in the central third of the panel. The amount and distribution of failures depend mainly on the quantity, type, and location of defects (particularly knots) present in each layer, which prevents establishing a common behaviour pattern for the entire panel.

Moreover, not cracks or breaks were detected in dowels, and failures were exclusively due to the rupture of individual lamellas (figure 9). In addition, not differences in failure modes were observed between pine and eucalyptus DLT panels.



Figure 9. DLT panels after breaking. a. Pine DLT panels. b. Eucalyptus DLT panels.

3.5 CONCLUSIONS

Results of this work allowed to establish the following conclusions:

- i) DLT panels made up of lamellas of *E. grandis* presented values of global modulus of elasticity and modulus of rupture significantly higher than values corresponding to panels composed of *P. elliottii* lamellas, regardless of species of dowels. However, not significant differences were found with respect to ultimate load for both types of panels.
- ii) All series of DLT panels maintained a linear behaviour up to maximum load with abrupt break. Pine DLT panels showed higher deformation with respect to maximum load compared to eucalyptus DLT panels.
- iii) Doweled joints collaborated in the joint work of lamellas and the failure modes of panels were due to tensile failures, mainly caused by very pronounced deviations of fibers and the presence of knots in places very close to the holes where the dowels were nailed.

- iv) In pine DLT panels, the average strength values (MOR) were consistent with the corresponding average value for wood pieces of EC0 class in UNIT 1261. However, the mean stiffness values (MOE) were slightly lower compared to the respective expected value of EC0 class. It is recommended for future research work to use pine wood lamellas of higher structural quality (e.g. visual quality EC1 class based on UNIT 1261 standard), which will contribute to increase of the properties of DLT panels.
- v) In eucalyptus DLT panels, the average MOR values were in the range of average values that can be expected for wood of EF1 class of UNIT 1262 standard. In relation to stiffness, the average MOE values were slightly lower compared to the respective expected value of EF1 class. However, the stiffness could be increased by placing a reinforced concrete folder (e.g. 50 mm thick) or a structural board (plywood) on the DLT panels joined by connectors.
- vi) It is recommended for future research works to visually classify wood lamellas based on national standards (e.g. UNIT 1261 and UNIT 1262), prior to the manufacturing process. This will allow the use of lamellas with acceptable singularities and characteristics included in the visual grades. Additionally, each visual grade has its equivalence in terms of physical and mechanical properties in international standards (e.g. UNE-EN 384 and UNE-EN 338).

3.6 REFERENCES

Ahmed S. 2021. Evaluating the feasibility of mass timber as a mainstream building material in the U.S. construction market: industry perception, cost competitiveness, and environmental performance analysis. Thesis Doctor of Civil Engineering. Corvallis, United States. Oregon State University. School of Civil and Construction Engineering. 187 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.21991.16809

- Akkari R, García B, Looney S. 2020. The project management of investigating dowel laminated timber. San Luis Obispo, California Polytechnic State University. 43 p.
- Bell T A. 2018. A detailed investigation into the engineering properties and challenges affecting the potential introduction of a UK grown dowel-laminated timber floor panel into the domestic construction market. Thesis Doctor of Architecture. Glasgow, United Kingdom. University of Strathclyde. Faculty of Engineering. 309 p. <https://doi.org/10.48730/yt00-d987>
- CEN (Comité Europeo de Normalización). 2016. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: reglas generales y reglas para edificación. EN 1995-1-1. Bruselas. CEN. 150 p.
- CEN (Comité Europeo de Normalización). 2011. Estructuras de madera: madera aserrada y madera laminada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. EN 408. Bruselas. CEN. 37 p.
- CEN (Comité Europeo de Normalización). 2010. Madera estructural: determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. EN 384. Bruselas. CEN. 19 p.
- El-Houjeyri I, Thi V D, Oudjene M, Khelifa M, Rogaume Y, Sotayo A, Guan Z. 2019. Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels. *Construction and Building Materials*, 222: 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.163>
- Henderson J. 2009. Brettstapel: an investigation into the properties and merits of brettstapel construction. Glasgow, Scotland. University of Strathclyde. Faculty of Engineering, Department of Architecture and Building Design. 92 p.
- ISO (International Organization for Standardization). 1975a. Wood: determination of density for physical and mechanical test. ISO 3131. Ginebra, Suiza. 2 p.
- ISO (International Organization for Standardization). 1975b. Wood: determination of moisture content for physical and mechanical tests. ISO 3130. Ginebra, Suiza. 2 p.

- MVOT (Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial). 2021. Primer Gabinete del SPV. Montevideo. [En línea]. Consultado 12 de mayo 2022. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-vivienda-ordenamiento-territorial/comunicacion/noticias/se-realizo-primer-reunion-del-gabinete-del-sistema-publico-vivienda>
- Natterer J, Sandoz J L. 1996. Timber construction between techniques and ecology. *Folia Forestalia Polonica*, 27: 115 – 121.
- Núñez V. 2005. Diseño, construcción y ensayo de una losa de madera unida con tarugos y su comparación con losas de madera postensada, clavada y encolada. Tesis Ing. Civ. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 134 p. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.1.a07>
- Pereira M, Minari V, Sohier L, Descamps T, Calil C. 2019. Comparativo da rigidez e ruptura de dois painéis estruturais de madeira macica lamelar unida por cavilhas. In: 4.º Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas (2019, Montevideo). Trabajos apresentados. São Paulo, Universidade de São Paulo. 9 p.
- Plowas W, Bell T, Hairstans R, Williamson J. 2016. Understanding the compatibility of UK resource for dowel laminated timber construction. *TH Building construction*. 12 p.
- 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(1): 333-359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- UN (United Nations). 2015. The Paris Agreement. París. 27 p [En línea]. Consultado 12 de junio 2021. Disponible en: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
- UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas). 2018a. Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). UNIT 1262. Montevideo, Uruguay. 20 p.

UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas). 2018b. Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de pino taeda y pino ellioti (*Pinus taeda* y *Pinus elliotii*). UNIT 1261. Montevideo, Uruguay. 22 p.

Uruguay XXI. 2022. Sector forestal en Uruguay. [En línea]. Montevideo. 51 p. Consultado 20 de agosto 2022. Disponible en: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/sector-forestal/>

4. DISCUSIÓN GENERAL

En esta sección se discuten los resultados obtenidos en los artículos que se presentaron en los capítulos anteriores, iniciando por la caracterización de láminas y tarugos de madera de distintas especies mediante ensayos físicos y mecánicos y, posteriormente, se analiza el comportamiento mecánico de las placas DLT de tamaño estructural.

Con respecto a la primera parte, para las láminas de *Pinus elliottii* y *P. taeda* hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el muestreo I y II para el módulo de elasticidad estático (E_m 12 global) y dinámico (E_d), y para la densidad (p_{12}). Los valores promedio de las láminas pertenecientes al muestreo I fueron consistentes con los reportados en la bibliografía por Casaravilla (2022), que obtuvo un valor promedio de módulo de elasticidad global al 12 % igual a 5015 N/mm² y un valor promedio de densidad al 12 % igual a 0,419 g/cm³, y a Fank et al. (2017), que calcularon un valor promedio de módulo de elasticidad obtenido por máquina universal igual a 7345 N/mm² y un valor promedio de densidad igual a 0,473 g/cm³. Quagliotti et al. (2019) registraron un valor promedio de módulo de elasticidad dinámico obtenido utilizando Microsecond Timer Fakopp igual a 7401 N/mm², lo cual es consistente al valor promedio obtenido en las láminas pertenecientes al muestreo II. Por otra parte, para las láminas de *Eucalyptus grandis* se encontraron valores significativamente mayores ($p < 0,05$) para el E_m 12 global y E_d en el muestreo IV con respecto al muestreo III. Sin embargo, los valores promedio obtenidos fueron inferiores a los reportados en la bibliografía: Baño et al. (2019), que obtuvieron, para láminas de la misma especie, valores promedio de E_m 12 global, E_d y densidad corregidos al 12 % de contenido de humedad iguales a 14120 N/mm², 14640 N/mm² y 0,599 g/cm³, respectivamente. En cuanto a la densidad al 12 %, no se encontraron diferencias significativas entre los muestreos III y IV.

Los resultados de los coeficientes de determinación (R^2) y correlación de Pearson (r) para ambas especies de láminas determinaron una relación significativa entre los valores del módulo de elasticidad estático (variable de referencia) y los valores de los

módulos de elasticidad dinámicos y densidad (variables predictoras) a partir de modelos de regresión lineal simple. Para las láminas de *Pinus elliottii* y *P. taeda*, los resultados obtenidos se asimilaron a los resultados reportados en la bibliografía: en el caso de Bruzzone y Chabén (2019) que registraron valores de r igual a 0,92 y 0,475 para MOE vs. MOEd (usando Microsend Timer Fakopp) y MOE vs. Densidad, respectivamente, y Cardoso (2018) que calculó un coeficiente de correlación igual a 0,92 para la relación entre el MOE estático y MOE dinámico. Por otro lado, para *Eucalyptus grandis*, los resultados fueron inferiores con respecto a los trabajos realizados por Baño et al. (2019), que determinaron un R^2 igual a 0,89 y 0,36 para las relaciones entre el módulo de elasticidad estático vs. dinámico, y el módulo de elasticidad estático vs. Densidad, respectivamente, y Pérez del Castillo (2001) que calculó un valor de r igual a 0,92 para la relación entre el MOE estático y MOE dinámico.

En el caso de los tarugos, los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos y físicos son consistentes con los reportados por Bell (2018): los tarugos de 20 mm de diámetro de *Balfourodendron riedelianum* y de *E. grandis* presentaron valores similares de carga máxima y densidad que los tarugos de 20 mm de diámetro de madera de *Fagus sylvatica* (7,69 kN, 753 Kg/m³) y de *Acer pseudoplatanus* (4,57 kN, 547 kg/m³), respectivamente. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para las variables estudiadas: módulo de elasticidad, módulo de rotura, tensión normal y de corte, y densidad aparente corriente (12% CH). Con respecto a las propiedades mecánicas, tanto para el módulo de elasticidad como la tensión normal y de corte, los valores promedios para las especies *Eucalyptus tereticornis* y *Balfourodendron riedelianum* resultaron superiores a la especie *Eucalyptus grandis*. Por otro lado, los valores promedio de densidad al 12% CH en *Eucalyptus tereticornis* y *Balfourodendron riedelianum* resultaron significativamente superiores en comparación con *Eucalyptus grandis*. Las correlaciones entre tensión normal vs densidad al 12% CH y tensión de corte vs densidad al 12% CH resultaron dispares: se observó una correlación alta para la especie *E. grandis* y una correlación baja para *B. riedelianum* y *E. tereticornis*.

Con respecto a la segunda parte, se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) para el módulo de elasticidad global (MOE global) y módulo de rotura (MOR) en las placas DLT de pino y eucalipto. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas con respecto a la carga máxima para ambos tipos de placas DLT. Los valores promedio de MOE global y MOR en las placas DLT de eucalipto resultaron superiores con respecto al trabajo reportado en la literatura. El-Houjeiry et al. (2019) calcularon un valor promedio de MOE global igual a 6970 N/mm². Por otro lado, los valores promedio de MOE global y MOR en las placas DLT de pino resultaron inferiores a los valores reportados por Plowas et al. (2016) registraron valores promedios de MOE global y MOR de 9671 N/mm² y 33,9 N/mm², respectivamente. Bell (2018) obtuvo valores promedios de MOE global y MOR igual a 9720 N/mm² y 33,60 N/mm², respectivamente. Pereira et al. (2019) determinaron valores de MOR y MOE global igual a 40,6 N/mm² y 6630 N/mm². Haciendo énfasis en la densidad, se encontraron diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) entre placas DLT de pino y eucalipto. Los valores promedio de densidad en placas DLT de eucalipto fueron significativamente superiores a los valores en placas DLT de pino.

La relación MOE placa/MOE láminas en la serie PPG fue menor a 1, con un valor igual a 0,95, valor que se puede atribuir a la disparidad de la calidad estructural de las láminas que conforman las placas DLT.

Las placas horizontales DLT de pino y eucalipto alcanzaron la rotura después de experimentar una alta deformación debido a una combinación de esfuerzos de tracción y compresión en cada una de las láminas, comportamiento similar a lo reportado por Bell (2018) en placas horizontales DLT.

5. CONCLUSIONES GENERALES

El trabajo de tesis logró verificar la hipótesis planteada y presentó una propuesta para el diseño y fabricación de placas horizontales DLT de tamaño estructural, construidas con madera de pinos y eucaliptos uruguayos, para su utilización en entresijos y techos en viviendas.

Las conclusiones generales fueron las siguientes:

- i) Las láminas de *P. elliotii* y *P. taeda* presentaron valores promedio de MOE similares a los valores promedio de la clase visual EC0 y EC1 de la norma UNIT 1261. Para las láminas de *E. grandis*, presentaron un valor promedio de MOE levemente inferior a los valores medios de la clase EF1 de la norma UNIT 1262.
- ii) Los tarugos de *E. tereticornis* y *B. riedelianum* presentaron valores de resistencia y densidad significativamente superiores a los valores de los tarugos de *E. grandis*. Sin embargo, debido a la disponibilidad de *E. grandis*, pueden ser considerados como una opción válida para ser utilizados en DLT fabricado con tablas de maderas con valores de densidades inferiores, tales como el pino cultivado en Uruguay.
- iii) Los valores obtenidos en los ensayos de láminas y tarugos permitieron sentar las bases para el diseño, fabricación y validación estructural de prototipos de placas DLT.
- iv) Todas las series de placas DLT mantuvieron un comportamiento lineal hasta la carga máxima con una rotura abrupta. Las placas DLT conformadas por láminas de *E. grandis* presentaron valores de módulo de elasticidad y módulo de rotura significativamente superiores a los de las placas compuestas por láminas de *P. elliotii*, independientemente de la especie de los tarugos. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas con respecto a la carga máxima para ambos tipos de paneles.

v) Las uniones tarugadas colaboraron en el trabajo conjunto de las láminas y los modos de rotura de las placas se debieron a fallas por tracción, originadas mayormente por desviaciones de las fibras muy pronunciadas y por desviaciones debidas a la presencia de nudos o zonas nudosas en lugares muy cercanos a los orificios donde se clavaron los tarugos.

vi) En las placas horizontales DLT de pino, los valores de resistencia promedio (MOR) fueron consistentes con el correspondiente valor medio para piezas de madera de la clase EC0 en la norma UNIT 1261. Sin embargo, los valores medios de rigidez (MOE) fueron ligeramente inferiores en comparación con el respectivo valor esperado de la clase EC0. Se recomienda para futuros trabajos de investigación, utilizar láminas de madera de pino de calidad estructural superior (por ejemplo, calidad visual EC1 basada en la norma UNIT 1261), lo cual contribuirá al incremento de las propiedades de los paneles DLT, y probablemente podría cumplir con los requisitos de aptitud estructural para entresijos y techos (horizontales) de viviendas.

vii) En las placas horizontales DLT de eucalipto, los valores promedio de MOR estuvieron en el rango de valores medios que se pueden esperar para la madera de la clase EF1 de la norma UNIT 1262. En relación a la rigidez, los valores promedio de MOE fueron ligeramente más bajos en comparación con el respectivo valor esperado de la clase EF1. Sin embargo, la rigidez podría incrementarse colocando una carpeta de hormigón armado (por ejemplo, de 50 mm de espesor) o un tablero estructural (contrachapado) sobre los paneles DLT unido mediante conectores. Esta solución utilizada con frecuencia para resolver la vibración en los pisos de madera, aumentaría la rigidez general y probablemente podría cumplir con los requisitos de aptitud estructural para entresijos y techos (horizontales) de viviendas.

El presente trabajo de investigación expuso los primeros resultados nacionales acerca del comportamiento estructural de placas horizontales DLT provenientes de madera de rápido crecimiento de origen nacional. Adicionalmente, se presentaron las etapas previas fundamentales de diseño, fabricación y caracterización de elementos

maderables que conformaron las placas DLT. Estos resultados reflejaron un aporte importante para el área de la construcción con madera nacional, de la cual constituyeron un primer paso para el diseño y fabricación de placas horizontales DLT de tamaño estructural.

Se recomienda para futuros trabajos de investigación, desarrollar nuevas vías de investigación acerca del diseño, fabricación y comportamiento estructural de la madera laminada cruzada (DCLT), que surge de la fusión del DLT y la madera contralaminada (CLT), y compuestos DLT-hormigón. El desarrollo nuevas vías de investigación permitirá realizar diversas comparaciones y dar a conocer las ventajas y desventajas de cada uno de los productos de madera de ingeniería.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abejón R, Moya L. 2021. Cross-laminated timber: perspectives from a bibliometric analysis (2006-2018). *Wood Material Science and Engineering*, 17(6): 429-450 p. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1955295>
- Ahmed S. 2021. Evaluating the feasibility of mass timber as a mainstream building material in the U.S. construction market: industry perception, cost competitiveness, and environmental performance analysis. Thesis Doctor of Civil Engineering. Corvallis, United States. Oregon State University. School of Civil and Construction Engineering. 187 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.21991.16809
- ANIU (Academia Nacional de Ingeniería del Uruguay). 2021. Producción forestal en el Uruguay: balance y perspectivas. Montevideo. 17 p. [En línea]. Consultado 13 de abril 2022. Disponible en: https://aniu.org.uy/wp-content/uploads/2021/05/Produccion_forestal_Uruguay_20210504.pdf
- Baño V, Moltini G, Aulet A, Cetrangolo G, Quagliotti S, Moya L. 2019. Módulo elástico de pino y eucalipto uruguayo a partir de la frecuencia longitudinal de vibración. En: 4.º Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas (2019, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 10 p.
- Bell TA. 2018. A detailed investigation into the engineering properties and challenges affecting the potential introduction of a UK grown dowel-laminated timber floor panel into the domestic construction market. Thesis Doctor of Architecture. Glasgow, United Kingdom. University of Strathclyde. Faculty of Engineering. 309 p. <https://doi.org/10.48730/yt00-d987>
- Bocquet J, Pizzi A, Despres A, Mansouri H, Resch L, Michael D. 2007. Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21:3-4, 301-317. <https://doi.org/10.1163/156856107780684585>
- Bruzzone G, Chabén Á. 2019. Clasificación visual y estructural de tablas de *Pinus elliottii* nacional en base a norma UNIT 1261. Tesis Ing. Agr. Montevideo,

- Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 85 p.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/29450>
- BSLC (Binational Softwood Lumber Council). 2017. Nail-Laminated Timber Design and Construction Guide. 128 p.
- Canales J. 2014. Resistencia al cizallamiento de tarugos de madera de *Calycophyllum spruceanum* Benth (capirona) en el ensamble de piezas de madera. Tesis Ing. For. Pucallpa, Perú. Universidad Nacional de Ucayali. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. 56 p.
- Cardoso A. 2018. Diseño de una metodología de clasificación visual estructural para madera de pinos del Noreste Uruguayo. Tesis Maestría en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 84 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31552>
- Casaravilla J. 2022. Propiedades de flexión de paneles de madera laminada clavada de pino para uso en viviendas construidas por el sistema cooperativo de ayuda mutua en Uruguay. Tesis Mag. en Construcción en Madera. Universidad del Bío-Bío. Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño. 118 p.
- Coronel F. 2014. Placas alveolares prefabricadas de madera para forjado y cubierta: alternativa de uniones con pasadores de madera sin adhesivo. Tesis Mtr. en Tecnología en la arquitectura. Barcelona, España. Universidad Politècnica de Catalunya. Departamento de Construcción y Nuevas Tecnologías. 80 p. <http://hdl.handle.net/2099.1/24535>
- Dauksta D. 2014. Brettstapel; brettstapel production in other parts of the world; adapting techniques for utilization of homegrown timbers in Britain. [En línea]. Woodknowledge Wales. 26 p. Consultado 15 de mayo 2022. Disponible en: <https://www.academia.edu/12643343/Brettstapel>
- Eckelman C, Haviarova E. 2007. Load capacity and deflection characteristics of large wooden dowels loaded in double shear. *Forest Products Journal*, 57(5): 60-64.
- El-Houjeiry I, Thi V.D, Oudjene M, Khelifa M, Rogaume Y, Sotayo A, Guan Z. 2019. Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed

- wood dowels. *Construction and Building Materials*, 222: 288-299.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.163>
- ETA (European Technical Assessment). 2023. ETA-19/0066. Bruselas. [En línea]. Consultado 2 de diciembre 2022. Disponible en: <https://www.eota.eu/etassessments/8990>
- Fank P, Stefani P, Piter J. 2017. Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el Nordeste de Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 19(3): 247-264. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000021>
- FPL. 1999. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, U. S. Department of Agriculture, Forest Service. 463 p. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-113>
- Gong M. 2019. *Lumber-Based Mass Timber Products in Construction*. London, IntechOpen. 20 p. DOI: 10.5772/intechopen.85808
- Hernández C. 2018. *Construcción con madera masiva: propuesta para construir vivienda vertical sustentable en Zapopan*. Tesis Mag. en Proyectos y Edificación Sustentables. Jalisco, México. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano. 177 p. <http://hdl.handle.net/11117/5399>
- ICC (International Code Council). 2018. *International Building Code*. [En línea]. 14 de junio 2022. Disponible en: <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2018P6>
- Kleilein D. 2009. Edificio residencial E3 con estructura de madera en Berlín. [En línea]. AITIM, Arquitectura. 12-17 p. (Boletín de Información Técnica n.o 258). Consultado 28 de diciembre 2022. Disponible en: <https://docplayer.es/10134492-Edificio-residencial-e3-con-estructura-de-madera-en-berlin.html>
- Lang H. 2019. *Análise da aplicacao do bim no processo de projeto e de construcao de edificacoes em madeira*. Trabalho de Conclusão de Engenheiro Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. 28 p. <http://hdl.handle.net/10183/205758>

- Martos R. 2015. Uniones en estructuras de madera laminada: pórticos de luces medias. Tesis Arq. Sevilla, España. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. 37 p.
- Mocellin G, Gavassoni E. 2019. Análise técnica comparativa entre os usos de dlt e decking em estruturas de madeira. En: 4.º Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas (2019, Montevideo). Trabalhos apresentados. Curitiba, Universidade Federal do Paraná. 10 p.
- MVOT (Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial). 2021. Primer Gabinete del SPV. Montevideo. [En línea]. Consultado 12 de mayo 2022. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-vivienda-ordenamiento-territorial/comunicacion/noticias/se-realizo-primera-reunion-del-gabinete-del-sistema-publico-vivienda>
- Núñez V. 2005. Diseño, construcción y ensayo de una losa de madera unida con tarugos y su comparación con losas de madera postensada, clavada y encolada. Tesis Ing. Civ. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 134 p. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.1.a07>
- Ogunrinde O. 2019. Evaluation of bending performance of nail laminated and dowel laminated timber. Thesis Master of Science in Forest Engineering. New Brunswick, Canada. The University of New Brunswick. Faculty of Forestry and Environmental Management. 146 p.
- ORT. 2021. La madera, una solución económica, rápida y ecológica al déficit habitacional en Uruguay. [En línea]. Consultado 10 de mayo 2022. Disponible en: <https://www.ort.edu.uy/novedades/la-madera-una-solucion-economica-rapida-y-ecologica-al-deficit-habitacional-en-uruguay-109976>
- Pereira M, Minari V, Sohier L, Descamps T, Calil C. 2019. Comparativo da rigidez e ruptura de dois painéis estruturais de madeira macica lamelar unida por cavilhas. En: 4.º Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas (2019, Montevideo). Trabalhos apresentados. São Paulo, Universidade de São Paulo. 9 p.

- Pérez Del Castillo A. 2001. Propiedades mecánicas y calidad de madera de *Eucalyptus grandis* del norte de Uruguay. LATU/JICA, Montevideo, Uruguay. 35 p. (Informe de Investigación n.º 4).
- Plowas W, Bell T, Hairstans R, Williamson J. 2016. Understanding the compatibility of UK resource for dowel laminated timber construction. TH Building construction. 12 p.
- Quagliotti S, Bruzzone G, Cháben Á, Baño V, Moya L. 2019. Clasificación visual de madera de *Pinus elliottii* de Uruguay y estimación del módulo de elasticidad mediante técnicas no destructivas. En: 4.º Congreso Latinoamericano de estructuras de maderas (2019, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Laboratorio Tecnológico del Uruguay. 11 p.
- Rajendra B. 2020. Development of a cost prediction model for mass timber gravity frame construction. Thesis Master of Science. East Lansing, United States. Michigan State University. 140 p. <https://doi.org/doi:10.25335/sdt9-7064>
- StructureCraft. 2022. Projects: T3 Minneapolis Mass Timber Office Building. [En línea]. 27 de diciembre 2022. Disponible en: <https://structurecraft.com/projects/t3-minneapolis>
- Think Wood. 2019. Designing sustainable. prefabricated wood buildings. [En línea]. 22 de junio 2022. Disponible en: <https://www.thinkwood.com/continuing-education/designing-sustainable-prefabricated-wood-buildings>
- Ugarte J, Sierra A, Codriansky K. 2022. Hoja de ruta para la construcción de vivienda social en madera en Uruguay. Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial, Uruguay. 193 p.
- UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas). 2018a. Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). UNIT 1262. Montevideo, Uruguay. 20 p.
- UNIT (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas). 2018b. Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de pino taeda y pino elliotti (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*). UNIT 1261. Montevideo, Uruguay. 22 p.
- Uruguay XXI. 2022. Sector forestal en Uruguay. Montevideo. 51 p. [En línea]. Consultado 20 de agosto 2022. Disponible en:

<https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/sector-forestal/>

7. ANEXOS

7.1 ANEXO 1. CARACTERIZACIÓN DE LÁMINAS Y TARUGOS DE MADERA PARA LA FABRICACIÓN DE PLACAS Y PANELES DLT

7.1.1 Valores promedios de láminas de *Pinus elliottii* perteneciente al muestreo I

Tabla	CH (%)	esp, prom, (mm)	ancho prom, (mm)	largo (mm)	F máx, (N)	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	Fakopp (N/mm ²)
						MOR (N/mm ²)	MOE global (N/mm ²)	MOE local (N/mm ²)	Peso (Kg)	Densidad (g/cm ³)	
MCM4-117 (1)	11,1	50	147,62	2850	14620	36,23	-	-	-	-	-
MCM4-232 (2)	10,95	50,19	147,46	2850	4620	11,43	-	-	-	-	-
MCM4-319 (3)	12,15	50,135	148,47	2850	22250	54,36	-	-	-	-	-
MCM4-74 (4)	12	50,34	147,98	2850	7620	18,66	-	-	-	-	-
MCM4-78 (5)	12,2	50,29	147,81	2850	12810	31,48	-	-	-	-	-
MCM4-15 (6)	11,9	50,01	147,86	2850	6430	15,88	-	-	-	-	-
MCM4-73 (7)	12,25	50,06	147,65	2850	8560	21,18	-	-	-	-	-
MCM4-91 (8)	10,65	50,315	147,725	2850	4310	10,60	-	-	-	-	-
MCM4-59 (9)	11,6	50,3	147,68	2850	9500	23,38	-	-	-	-	-
MCM4-320 (10)	12,1	49,98	147,54	2850	12060	29,93	-	-	-	-	-
MC-6	11,8	50,2	147,77	2850	-	-	8375	8770	8,671	0,411	9212
MC-31	11,4	50,26	147,85	2850	-	-	7107	7443	8,630	0,409	6965
MCM2-1	10,7	49,47	147,31	2850	-	-	3507	3671	8,023	0,389	4267
MCM2-4	12,3	50,02	147,59	2850	-	-	6548	6856	7,742	0,367	7887
MCM2-9	13,9	50,02	147,2	2850	-	-	4343	4546	7,244	0,342	5213
MCM2-12	12,25	49,79	147,03	2850	-	-	6849	7168	7,921	0,379	6661
MCM2-16	11,7	49,94	147,28	2850	-	-	4143	4337	7,134	0,341	5486
MCM2-22	10,4	50,3	147,09	2850	-	-	4856	5082	7,142	0,341	5756
MCM2-28	14	49,5	147,52	2850	-	-	3165	3314	7,874	0,375	4110
MCM1-9	11,3	50	147,67	2850	-	-	6222	6515	7,987	0,381	7065
MCM3-1	11,5	51,49	148,77	2850	-	-	4440	4652	7,722	0,355	5734
MCM3-2	13	50,235	147,85	2850	-	-	4711	4933	7,343	0,345	5908

MCM3-3	12,5	50,33	147,88	2850	-	-	5323	5574	8,507	0,400	6941
MCM3-5	13,4	50,95	148,2	2850	-	-	4891	5123	5,684	0,262	5682
MCM3-6	12,8	50,26	147,52	2850	-	-	6316	6613	6,674	0,315	6788
MCM3-7	11	50,54	147,795	2850	-	-	4228	4427	7,776	0,367	5617
MCM3-8	12,1	50,395	148,13	2850	-	-	5858	6135	6,744	0,317	7612
MCM3-13	13,2	50,485	148,6	2850	-	-	5889	6170	7,374	0,343	7401
MCM3-14	14	50,14	148,455	2850	-	-	3697	3873	5,550	0,259	4164
MCM3-15	12,3	50,59	147,77	2850	-	-	5272	5521	6,613	0,310	6592
MCM3-17	12,5	50,53	148	2850	-	-	6300	6598	6,933	0,324	6336
MCM3-18	12,9	49,96	147,625	2850	-	-	4592	4808	8,170	0,387	6386
MCM3-19	11	50,29	147,785	2850	-	-	6219	6512	7,524	0,357	7258
MCM3-20	10,8	50,435	148,14	2850	-	-	3833	4015	7,461	0,352	5742
MCM3-21	12,1	50,25	147,615	2850	-	-	5018	5254	6,466	0,306	5342
MCM3-22	12	50,375	147,6	2850	-	-	4223	4422	8,610	0,406	5682
MCM3-23	11,6	49,985	147,565	2850	-	-	5817	6091	7,792	0,371	6247
MCM3-24	12,5	50,155	148,02	2850	-	-	3185	3336	6,423	0,303	3602
MCM3-25	11,7	50,425	147,98	2850	-	-	5627	5893	6,713	0,316	6040
MCM3-26	13,2	50,07	147,945	2850	-	-	3712	3887	7,583	0,357	4969
MCM3-27	13,6	51,59	148,34	2850	-	-	3829	4011	7,438	0,338	4627
MCM3-29	12,3	50,475	148,15	2850	-	-	7502	7858	7,796	0,365	8263
MCM3-30	12,7	49,95	147,02	2850	-	-	4606	4821	6,814	0,324	4812
MCM3-31	11	50,47	147,635	2850	-	-	4357	4562	6,747	0,319	5233
MCM3-32	10,9	50,4	147,755	2850	-	-	4581	4797	7,361	0,349	4802
MCM3-33	11,6	50,25	147,68	2850	-	-	4927	5159	6,159	0,292	5747
MCM3-34	12,5	50,27	148,03	2850	-	-	4214	4413	6,319	0,297	6011
MCM3-37	13	50,235	148,045	2850	-	-	5213	5459	7,186	0,337	7172
MCM3-40	12,7	50,675	147,52	2850	-	-	4161	4357	6,673	0,312	5759
MCM3-41	11,9	49,63	147,405	2850	-	-	7942	8314	7,333	0,352	8162
MCM3-42	11,7	50,71	148,125	2850	-	-	4543	4758	6,861	0,321	6426
MCM3-43	11,4	50,26	147,48	2850	-	-	4500	4712	6,808	0,323	5855
MCM3-44	14	50,08	147,73	2850	-	-	4860	5089	8,079	0,379	6602
MCM3-45	12,3	50,245	147,595	2850	-	-	4890	5120	6,572	0,310	6747
MCM3-46	11,6	50,28	147,535	2850	-	-	5897	6174	7,247	0,343	5986
MCM3-47	11,9	50,17	147,48	2850	-	-	6451	6754	6,690	0,317	6648
MCM3-48	12,1	50,165	147,26	2850	-	-	4214	4411	6,859	0,326	4539
MCM3-49	10,9	50,475	148,24	2850	-	-	3787	3967	6,926	0,327	5401

MCM3-50	10,8	50,555	148,03	2850	-	-	3381	3541	6,489	0,306	4855
MCM3-51	11,6	51,02	148,22	2850	-	-	7661	8024	7,608	0,354	8484
MCM3-53	11,8	50,315	147,22	2850	-	-	6232	6523	7,000	0,332	6597
MCM3-55	12,4	50,355	148,605	2850	-	-	4142	4340	6,506	0,304	4574
MCM3-56	12,9	50,155	147,625	2850	-	-	4372	4578	7,550	0,356	6900
MCM3-57	12,6	50,675	147,885	2850	-	-	4424	4633	6,649	0,310	4539
MCM3-58	13	50,375	147,59	2850	-	-	4393	4600	6,986	0,328	6293
MCM3-59	10,9	50,075	147,875	2850	-	-	3973	4160	6,431	0,306	5932
MCM3-61	11,5	50,335	147,615	2850	-	-	4489	4700	5,906	0,280	4670
MCM3-62	12,3	49,86	147,7	2850	-	-	3860	4041	6,733	0,320	5524
MCM3-63	11,9	50,355	148,14	2850	-	-	5564	5828	7,533	0,355	7402
MCM3-64	11,7	50,17	148,23	2850	-	-	5296	5547	6,974	0,330	5361
MCM3-65	13,6	50,175	147,2	2850	-	-	3497	3660	6,881	0,324	5667
MCM3-67	13,2	50,925	147,59	2850	-	-	5774	6045	8,275	0,384	6927
MCM3-69	12	50,435	147,7	2850	-	-	5210	5455	7,975	0,376	5752
MCM3-70	11,7	50,815	148,015	2850	-	-	6023	6308	7,645	0,357	8257
MCM3-72	11	50,26	148,24	2850	-	-	4497	4710	6,767	0,320	5407
MCM3-74	10,9	50,5	147,78	2850	-	-	3944	4130	5,900	0,279	4420
MCM3-85	12,9	50,07	147,51	2850	-	-	4783	5007	7,933	0,375	5513
MCM3-86	12,4	50,32	148,435	2850	-	-	5269	5520	7,193	0,337	6809
MCM3-87	12,8	49,99	147,145	2850	-	-	5102	5340	7,457	0,354	5583
MCM3-90	13,5	50,71	148,13	2850	-	-	5814	6089	7,726	0,358	6083
MCM3-92	13,2	50,48	147,75	2850	-	-	4966	5200	6,816	0,319	6117
MCM3-93	12	50,405	147,895	2850	-	-	4105	4299	6,980	0,329	4854
MCM3-94	11,8	50,47	147,915	2850	-	-	6784	7104	6,968	0,328	7496
MCM3-95	10,7	50,535	148,02	2850	-	-	5598	5863	7,592	0,358	6758
MCM3-96	11,5	50,705	147,47	2850	-	-	5376	5628	7,170	0,337	5902
MCM3-98	11,1	50,265	147,575	2850	-	-	3527	3693	6,986	0,332	4078
MCM3-99	12,7	50,31	147,58	2850	-	-	5779	6050	6,840	0,322	6814
MCM3-100	13	51,28	149,055	2850	-	-	5625	5895	6,656	0,304	6542
MCM3-101	12,3	50,78	147,91	2850	-	-	3834	4015	7,085	0,330	4566
MCM3-102	13	50,24	147,435	2850	-	-	5106	5346	7,474	0,352	6197
MCM3-103	10,8	50,265	148,385	2850	-	-	3959	4147	6,547	0,310	5669
MCM3-105	11,9	50,67	147,88	2850	-	-	5255	5504	6,157	0,288	5610
MCM3-106	11,7	50,085	147,985	2850	-	-	5386	5640	6,216	0,295	5503
MCM3-108	12,7	50,43	148,5	2850	-	-	5622	5890	6,925	0,323	5769

MCM3-109	12,5	50,825	147,865	2850	-	-	5761	6033	7,187	0,335	6156
MCM3-110	12,2	50,245	147,2	2850	-	-	6576	6883	7,715	0,366	7765
MCM3-112	11	50,2	147,89	2850	-	-	5057	5295	7,770	0,369	5889
MCM3-113	10,9	50,57	147,045	2850	-	-	6179	6468	7,320	0,347	7309
MCM3-114	11,8	50,315	147,495	2850	-	-	4186	4382	7,413	0,351	4915
MCM3-115	13	50,425	147,56	2850	-	-	9337	9776	6,475	0,304	9765
MCM3-116	11,4	50,71	147,665	2850	-	-	9654	10109	7,307	0,343	9651
MCM3-117	13,6	50,325	147,38	2850	-	-	5290	5537	6,642	0,312	6144
MCM3-118	13,5	50,78	147,7	2850	-	-	4290	4492	7,186	0,334	5144
MCM3-120	12	50,89	147,93	2850	-	-	6064	6350	7,366	0,343	6649
MCM3-121	11,5	50,28	147,59	2850	-	-	4798	5024	7,494	0,355	5480
MCM3-122	11	50,815	147,9	2850	-	-	5123	5365	6,682	0,314	5222
MCM3-123	12,5	50,315	148,3	2850	-	-	4233	4434	7,054	0,331	4806
MCM3-127	13,6	50,88	147,78	2850	-	-	5166	5409	6,257	0,290	6909
MCM3-174	13,2	50,77	147,88	2850	-	-	5413	5668	6,493	0,302	6714
MCM4-22	11	50,32	147,73	2850	-	-	4924	5156	8,688	0,412	5299
MCM4-34	10,9	50,06	147,48	2850	-	-	6975	7303	8,592	0,411	8186
MCM4-36	11,05	50,54	147,7	2850	-	-	8594	8999	9,615	0,454	9758
MCM4-50	11,2	50,3	147,78	2850	-	-	6209	6502	7,674	0,364	7158
MCM4-69	11,95	50,1	147,55	2850	-	-	7320	7664	9,254	0,439	8754
MCM4-75	11,65	50	147,6	2850	-	-	4851	5080	7,427	0,354	5629
MCM4-76	12,1	50,15	147,8	2850	-	-	3103	3250	8,055	0,381	4052
MCM4-80	10,75	50,12	147,54	2850	-	-	5680	5947	8,066	0,385	6459
MCM4-89	12,1	50,06	147,35	2850	-	-	5670	5936	8,381	0,398	6906
MCM4-102	11,7	50,23	147,63	2850	-	-	8408	8804	9,007	0,427	8777
MCM4-104	10,5	50,26	147,64	2850	-	-	6786	7106	7,677	0,366	7556
MCM4-109	12	50,05	147,81	2850	-	-	5386	5640	7,792	0,370	5931
MCM4-118	10,75	49,98	147,32	2850	-	-	6202	6493	8,107	0,389	6738
MCM4-122	11,1	50,07	147,58	2850	-	-	5414	5668	7,869	0,375	6690
MCM4-123	12,15	50,05	147,55	2850	-	-	6134	6422	7,903	0,375	7222
MCM4-135	10,1	49,97	147,6	2850	-	-	4647	4866	8,862	0,426	5393
MCM4-137	10,6	50,26	147,73	2850	-	-	9164	9596	10,438	0,497	10216
MCM4-142	11,5	50,2	147	2850	-	-	4929	5159	7,914	0,377	5528
MCM4-150	12,3	50,45	147,26	2850	-	-	5869	6143	7,967	0,376	6558
MCM4-152	11,35	50,25	147,67	2850	-	-	6711	7026	9,233	0,438	7653
MCM4-159	11,45	50,48	147,65	2850	-	-	6620	6932	9,250	0,437	7274

MCM4-186	10,7	50,29	147,66	2850	-	-	8205	8591	8,736	0,415	9498	
MCM4-202	11,9	50,05	147,62	2850	-	-	5032	5269	8,526	0,405	5444	
MCM4-252	11,85	50,58	147,73	2850	-	-	8358	8752	8,841	0,415	8991	
MCM4-271	11	50	147,6	2850	-	-	5541	5802	8,643	0,413	5724	
MCM4-272	10,64	49,98	147,3	2850	-	-	4787	5011	7,244	0,348	5229	
MCM4-273	12,1	50,49	147,45	2850	-	-	3721	3895	8,443	0,398	4412	
MCM4-285	11,7	50,12	147,4	2850	-	-	6937	7262	8,176	0,389	7088	
MCM4-301	10	49,95	147,71	2850	-	-	5021	5257	8,789	0,422	5417	
PROMEDIO	-	-	-	-	-	-	25,31	5373	5626	-	0,351	6273

7.1.2 Valores promedios de láminas de *Pinus elliotii*/P. taeda perteneciente al muestreo II

						corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	
Tabla	CH (%)	esp, prom, (mm)	ancho prom, (mm)	largo (mm)	F máx, (N)	MOR (N/mm ²)	MOE global (N/mm ²)	MOE local (N/mm ²)	Peso (Kg)	Densidad (g/cm ³)	Fakopp (N/mm ²)
1	11,06	48,55	98,62	2400	8500	32,40	-	-	-	-	-
2	9,73	48,43	98,48	2400	3620	13,87	-	-	-	-	-
3	9,96	48,69	98,57	2400	12930	49,20	-	-	-	-	-
20	9,28	48,33	98,55	2400	4310	16,53	-	-	-	-	-
38	10,44	48,36	98,25	2400	6000	23,14	-	-	-	-	-
32	10,15	48,42	98,55	2400	9060	34,68	-	-	-	-	-
24	9,27	48,44	98,31	2400	3000	11,53	-	-	-	-	-
33	10,74	48,41	97,78	2400	7870	30,61	-	-	-	-	-
28	10,12	48,52	98,31	2400	9000	34,55	-	-	-	-	-
37	9,64	48,63	98,42	2400	5310	20,29	-	-	-	-	-
4	11,1	48,46	98,49	2400	-	-	6434	6738	4,490	0,394	7902
5	12,15	48,78	98,58	2400	-	-	6414	6716	4,070	0,352	7812
6	10,1	48,49	98,7	2400	-	-	6010	6293	4,473	0,393	6938
7	10,6	48,46	98	2400	-	-	6978	7306	4,855	0,429	7918
8	11,5	48,83	98,66	2400	-	-	7142	7479	4,277	0,371	8134
9	12,3	48,44	98,61	2400	-	-	8600	9007	4,384	0,382	9772
10	11,35	48,37	98,51	2400	-	-	6456	6757	4,314	0,378	7340
11	11,45	48,5	98,51	2400	-	-	5890	6169	4,315	0,377	7331
12	10,7	48,55	98,5	2400	-	-	7848	8219	4,864	0,427	8604
13	11,9	48,55	98,01	2400	-	-	5079	5318	4,190	0,367	6366
14	11,85	48,48	98,28	2400	-	-	7633	7993	4,415	0,386	8161
15	11	48,57	98,49	2400	-	-	8096	8477	4,264	0,373	8632
16	10,64	48,42	98,53	2400	-	-	7426	7773	4,489	0,395	8016
17	12,1	48,63	98,96	2400	-	-	7703	8064	4,222	0,365	8392
18	11,7	48,44	98,12	2400	-	-	6087	6373	4,316	0,379	7227
19	10	48,52	98,27	2400	-	-	5778	6050	4,635	0,409	7080
21	10,5	48,45	98,49	2400	-	-	6391	6690	5,044	0,444	7604
22	12	48,34	98,13	2400	-	-	7265	7606	4,424	0,389	7560
23	10,75	48,41	98,75	2400	-	-	8917	9338	4,758	0,417	9042
25	10,75	48,45	98,31	2400	-	-	5917	6194	4,454	0,392	7071
26	12,1	48,62	98,49	2400	-	-	5594	5859	4,321	0,376	6953
27	11,7	48,57	98,67	2400	-	-	5462	5718	4,163	0,363	6940

29	11.95	48.52	98.38	2400	-	-	6404	6705	4.119	0.360	7607
30	11.65	47.9	98.34	2400	-	-	5589	5853	4.558	0.404	7310
31	12.1	48.36	98.48	2400	-	-	7876	8246	4.400	0.385	7909
34	10.9	48.36	98.55	2400	-	-	7179	7517	4.368	0.384	8792
35	11.05	48.54	98.42	2400	-	-	6838	7160	4.039	0.354	7993
36	11.2	48.42	98.53	2400	-	-	8512	8907	4.321	0.379	9483
39	12.3	48.36	98.58	2400	-	-	6075	6361	4.034	0.352	6935
40	11.6	48.69	98.65	2400	-	-	9580	10033	4.828	0.420	9880
41	11.9	48.38	98.31	2400	-	-	9779	10238	4.829	0.423	10141
42	12.1	48.37	98.52	2400	-	-	7783	8149	4.458	0.390	8561
43	10.9	48.4	98.44	2400	-	-	8225	8612	4.925	0.433	9560
44	10.8	48.23	98.59	2400	-	-	8296	8688	4.580	0.404	8316
45	11.6	48.36	98.44	2400	-	-	7969	8344	5.143	0.451	10845
46	11.8	48.3	98.65	2400	-	-	6946	7275	4.631	0.405	7223
47	12.4	48.31	97.81	2400	-	-	7702	8059	4.639	0.408	8369
48	12.9	48.39	98.61	2400	-	-	5798	6071	3.522	0.306	5636
49	12.6	48.31	98.48	2400	-	-	6467	6772	4.395	0.384	6805
50	12.2	48.51	98.31	2400	-	-	10786	11292	5.183	0.452	8113
51	10.9	48.62	98.44	2400	-	-	6599	6910	3.951	0.346	6161
52	11.5	48.37	98.14	2400	-	-	5767	6037	4.451	0.392	6969
53	12.3	48.47	98.62	2400	-	-	7914	8287	4.397	0.383	8608
54	11.9	48.4	98.53	2400	-	-	8205	8592	4.569	0.399	9373
55	11.7	48.76	98.51	2400	-	-	5842	6118	4.389	0.381	7299
56	12.44	48.45	98.52	2400	-	-	9468	9915	4.812	0.419	9924
57	12.32	48.19	98.01	2400	-	-	7395	7740	4.333	0.382	8027
58	12	48.4	98.36	2400	-	-	9974	10442	5.040	0.441	12156
59	11.7	48.3	98.44	2400	-	-	8701	9110	4.874	0.428	9339
60	11	48.66	98.54	2400	-	-	9574	10025	4.602	0.402	11247
61	10.9	48.61	98.6	2400	-	-	7937	8312	4.562	0.399	8558
62	11.56	48.33	98.21	2400	-	-	9046	9469	4.999	0.440	10435
63	11.9	48.55	98.44	2400	-	-	6933	7259	4.715	0.411	7474
64	12.1	48.43	98.54	2400	-	-	8875	9294	4.458	0.389	9673
65	12.4	48.77	98.88	2400	-	-	7350	7700	4.407	0.380	8098
66	11.88	48.62	98.54	2400	-	-	5241	5488	4.543	0.395	7734
67	12	48.41	98.66	2400	-	-	4675	4896	4.702	0.410	6423

68	11,8	48,63	98,2	2400	-	-	7356	7701	4,170	0,364	7655
69	10,7	48,83	98,31	2400	-	-	7505	7857	4,547	0,397	8811
70	11,5	48,21	98,65	2400	-	-	8867	9286	4,514	0,396	9970
71	11,1	48,67	98,78	2400	-	-	8299	8692	4,706	0,410	9730
72	12,7	48,77	98,98	2400	-	-	8870	9292	4,721	0,406	10878
73	12,55	48,22	98,45	2400	-	-	7501	7854	4,572	0,400	8160
74	12,12	48,45	98,61	2400	-	-	9082	9511	4,663	0,406	11073
75	11,95	48,75	98,88	2400	-	-	7359	7708	4,254	0,368	8497
76	10,8	48,21	98,34	2400	-	-	5981	6262	5,059	0,447	7279
77	11,9	48,44	98,22	2400	-	-	5079	5317	4,719	0,413	6356
78	11,7	48,98	98,56	2400	-	-	7370	7718	4,804	0,415	8514
79	12,7	48,81	98,45	2400	-	-	8380	8775	4,714	0,407	10056
80	12,5	48,77	98,34	2400	-	-	9939	10406	5,027	0,436	11331
81	12,2	48,65	98,91	2400	-	-	8494	8897	4,917	0,425	9948
82	11	48,43	98,2	2400	-	-	6797	7115	5,218	0,459	7909
83	10,9	48,32	98,32	2400	-	-	7656	8015	4,801	0,423	10868
84	11,8	48,21	98,81	2400	-	-	6333	6634	4,400	0,385	6671
85	12,6	48,66	98,76	2400	-	-	7398	7749	5,133	0,444	8986
86	11,4	48,12	98,26	2400	-	-	7168	7504	4,736	0,419	8218
87	12,1	48,91	98,34	2400	-	-	7330	7675	4,135	0,358	8326
88	12,3	48,23	98,21	2400	-	-	6980	7307	4,530	0,398	7927
89	12	48,43	98,65	2400	-	-	6955	7284	4,822	0,421	8664
90	11,5	48,67	98,32	2400	-	-	6089	6374	4,238	0,370	6778
91	11	48,44	98,15	2400	-	-	7337	7680	4,406	0,388	8829
92	10,6	48,89	98,54	2400	-	-	8107	8490	4,940	0,430	10051
93	11,1	48,94	98,4	2400	-	-	7350	7696	4,559	0,396	7596
94	12,3	48,32	98,77	2400	-	-	6487	6794	4,433	0,386	8287
95	11	48,76	98,65	2400	-	-	5837	6113	4,053	0,353	7436
PROMEDIO	-	-	-	-	-	26,68	7345	7691	-	0,397	8383

7.1.3 Valores promedios de láminas de *Eucalyptus grandis* perteneciente al muestreo III

Tabla	CH (%)	esp, prom, (mm)	ancho prom, (mm)	largo (mm)	F máx, (N)	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	corr, CH 12 %	Fakopp (N/mm ²)
						MOR (N/mm ²)	MOE global (N/mm ²)	MOE local (N/mm ²)	Peso (Kg)	Densidad (g/cm ³)	
1	13,50	36,87	89,75	2400	-	-	9128	9582	3,406	0,426	9987
2	14,90	36,62	89,44	2400	-	-	8485	8903	4,059	0,509	10240
3	13,20	36,76	89,78	2400	-	-	9023	9471	3,345	0,420	10989
4	14,35	36,51	89,19	2400	-	-	9486	9951	3,288	0,416	11542
5	11,95	37,11	89,89	2400	-	-	12287	12899	4,021	0,503	13194
6	11,95	36,45	88,55	2400	-	-	13382	14028	3,917	0,506	13940
7	15,95	36,48	88,98	2400	-	-	9175	9623	3,414	0,430	10903
8	16,15	36,65	89,92	2400	-	-	11147	11703	3,564	0,441	13149
9	16,40	36,54	89,46	2400	-	-	9537	10007	3,302	0,412	11737
10	14,50	36,64	88,99	2400	-	-	11246	11795	3,495	0,441	12577
11	11,80	36,46	89,04	2400	-	-	8877	9310	3,174	0,408	11164
12	11,95	36,94	89,30	2400	-	-	9246	9701	3,053	0,386	10803
13	13,15	36,75	88,81	2400	-	-	10273	10772	3,457	0,439	12534
14	10,55	36,81	89,55	2400	-	-	9528	9999	2,895	0,369	10881
15	14,20	36,50	88,71	2400	-	-	9872	10350	3,319	0,422	12585
16	11,60	36,84	89,54	2400	-	-	13031	13675	3,052	0,386	13230
17	14,85	36,84	89,54	2400	-	-	12801	13433	3,869	0,482	13184
18	12,10	36,81	89,43	2400	-	-	8267	8674	2,984	0,378	10058
19	12,10	36,89	89,50	2400	-	-	9645	10121	3,714	0,469	10743
20	12,35	36,67	89,61	2400	-	-	9026	9473	3,180	0,403	10473
21	12,55	36,71	89,08	2400	-	-	8358	8766	3,037	0,386	9994
22	14,35	36,87	89,29	2400	-	-	8152	8552	2,765	0,346	9756
23	14,05	36,53	88,81	2400	-	-	12003	12586	3,817	0,485	13511
24	12,00	36,89	89,50	2400	-	-	10114	10614	3,301	0,417	12698
25	10,95	36,79	89,36	2400	-	-	9883	10369	2,960	0,377	11747
26	12,30	36,90	89,38	2400	-	-	8473	8890	2,841	0,358	9657
27	12,10	36,73	88,97	2400	-	-	11493	12054	3,560	0,454	12482
28	11,85	36,82	89,14	2400	-	-	12526	13139	3,209	0,408	12289
29	11,25	36,83	89,68	2400	-	-	9628	10105	2,989	0,379	10481
30	12,10	36,60	89,21	2400	-	-	9493	9958	3,075	0,392	11012
31	14,90	36,68	89,44	2400	-	-	9610	10083	3,260	0,408	11387
32	11,70	36,78	89,02	2400	-	-	10464	10975	3,309	0,422	11249
33	11,55	36,67	89,23	2400	-	-	9731	10208	3,181	0,406	11435
34	12,70	36,81	88,84	2400	-	-	8351	8756	2,983	0,379	9833
35	11,20	36,82	89,12	2400	-	-	9420	9881	2,970	0,379	10309
36	13,95	36,88	89,54	2400	-	-	9148	9600	3,158	0,395	10882

37	12,65	36,39	89,11	2400	-	-	8834	9266	2,825	0,362
38	11,95	36,77	88,98	2400	-	-	8763	9191	3,099	0,395
39	13,10	36,47	88,98	2400	-	-	9183	9631	3,500	0,447
40	14,25	36,66	88,77	2400	-	-	9786	10260	3,034	0,384
41	11,35	36,75	89,59	2400	-	-	11599	12173	3,563	0,452
42	14,15	36,61	89,34	2400	-	-	9111	9559	2,974	0,375
43	13,10	36,66	89,28	2400	-	-	9733	10211	3,232	0,409
44	15,20	36,42	89,15	2400	-	-	8862	9296	3,243	0,410
45	12,85	36,63	89,16	2400	-	-	12002	12590	3,714	0,472
46	12,25	36,96	89,31	2400	-	-	11427	11988	3,674	0,463
47	11,00	36,88	89,48	2400	-	-	11065	11611	3,459	0,439
48	12,80	36,66	88,82	2400	-	-	11254	11801	3,522	0,449
49	12,70	36,76	89,34	2400	-	-	10561	11080	3,663	0,463
50	10,85	36,85	89,26	2400	-	-	8350	8760	2,894	0,369
51	13,40	36,65	89,49	2400	-	-	10855	11391	3,781	0,477
52	12,10	36,84	89,47	2400	-	-	9780	10263	2,929	0,370
53	12,40	36,91	89,48	2400	9310	50,47	-	-	-	-
54	12,45	36,77	89,50	2400	-	-	9034	9480	2,988	0,378
55	12,85	36,60	89,35	2400	-	-	9595	10067	3,496	0,444
56	12,90	36,80	89,13	2400	-	-	12208	12805	3,725	0,471
57	15,35	36,35	88,94	2400	-	-	11213	11759	3,865	0,490
58	11,15	37,04	89,46	2400	-	-	12671	13295	3,566	0,450
59	13,00	36,72	89,63	2400	-	-	11607	12181	3,583	0,451
60	11,85	36,73	89,31	2400	-	-	8500	8918	3,099	0,394
61	14,85	36,55	89,51	2400	-	-	9739	10220	3,647	0,458
62	10,65	36,94	89,60	2400	-	-	8512	8933	2,899	0,367
63	13,60	36,62	89,01	2400	-	-	12001	12586	4,020	0,510
64	14,65	36,58	89,43	2400	-	-	10305	10813	3,625	0,456
65	12,85	36,86	89,09	2400	7370	40,36	-	-	-	-
66	11,55	36,84	89,42	2400	-	-	11462	12027	3,097	0,393
67	15,65	36,35	88,63	2400	-	-	8873	9302	3,409	0,433
68	12,00	36,83	88,73	2400	-	-	8435	8844	2,826	0,360
69	12,60	36,80	89,14	2400	-	-	12630	13248	3,827	0,485
70	12,55	36,70	89,12	2400	-	-	12201	12798	2,829	0,359
71	10,50	36,53	88,81	2400	-	-	12626	13239	3,196	0,414
72	12,40	36,94	89,30	2400	-	-	9106	9554	3,211	0,405
73	10,75	36,84	89,74	2400	-	-	11097	11648	3,249	0,412
74	12,75	36,66	88,96	2400	-	-	8867	9299	3,144	0,400
75	13,35	36,94	89,55	2400	-	-	8914	9355	3,612	0,452
76	10,90	36,83	89,58	2400	-	-	10909	11448	3,288	0,418
77	14,35	36,73	89,31	2400	-	-	8686	9113	2,907	0,365

78	14,80	36,59	88,69	2400	-	-	9248	9695	3,191	0,404	11253
79	12,40	36,87	89,29	2400	-	-	8983	9424	3,221	0,407	10699
80	12,00	36,74	89,52	2400	-	-	9525	9995	2,980	0,378	11217
81	10,30	36,90	89,54	2400	-	-	9858	10345	3,213	0,409	11519
82	13,75	36,31	88,94	2400	-	-	8307	8711	3,447	0,441	11290
83	12,90	36,83	88,97	2400	-	-	8880	9313	3,387	0,429	11390
84	12,35	36,73	89,00	2400	-	-	10072	10564	3,492	0,444	12527
85	14,95	36,57	89,13	2400	-	-	11861	12441	3,672	0,462	13446
86	15,50	36,58	89,24	2400	-	-	9224	9677	3,345	0,419	11731
87	12,30	36,94	89,67	2400	-	-	9790	10275	3,011	0,378	11534
88	11,70	36,94	89,73	2400	-	-	9440	9909	2,866	0,361	11329
89	15,15	36,48	88,65	2400	-	-	10191	10684	3,408	0,432	12659
90	13,70	36,62	89,55	2400	-	-	9504	9974	3,132	0,395	11235
91	12,20	36,78	89,50	2400	-	-	7691	8071	2,705	0,342	9943
92	12,90	36,81	89,32	2400	-	-	11356	11914	3,432	0,433	12678
93	15,20	36,54	89,00	2400	8810	48,78	-	-	-	-	-
94	14,70	36,67	89,41	2400	-	-	12025	12618	4,112	0,516	14456
95	14,70	36,32	88,72	2400	-	-	11149	11690	3,749	0,478	12963
96	14,60	36,27	89,05	2400	-	-	7981	8371	3,238	0,412	10502
97	14,50	36,32	88,72	2400	-	-	9763	10236	3,591	0,459	11798
98	15,25	36,37	88,89	2400	-	-	11657	12224	3,948	0,501	14450
99	13,30	36,76	89,02	2400	-	-	10952	11487	3,901	0,494	13680
100	12,50	36,94	89,19	2400	-	-	9704	10179	3,099	0,391	12328
101	12,35	36,78	89,02	2400	-	-	11820	12397	4,240	0,539	12872
102	16,85	36,74	88,94	2400	-	-	9852	10332	3,871	0,482	12603
103	12,50	36,83	89,06	2400	10870	59,62	-	-	-	-	-
104	17,00	36,59	89,21	2400	-	-	9901	10387	3,750	0,467	12872
105	19,70	36,57	88,79	2400	-	-	10401	10906	3,528	0,435	13797
106	17,70	36,37	89,05	2400	-	-	11787	12363	4,559	0,570	14906
107	12,20	36,77	89,40	2400	-	-	8862	9299	3,115	0,395	11960
108	13,70	36,75	89,45	2400	-	-	8566	8989	2,972	0,374	10902
109	13,45	36,49	89,40	2400	-	-	7972	8365	3,368	0,427	10912
110	13,80	36,72	89,60	2400	-	-	7808	8194	2,874	0,361	9799
111	14,05	36,27	89,65	2400	-	-	8260	8669	3,796	0,482	10767
112	15,35	36,51	89,75	2400	-	-	7559	7934	2,810	0,351	8328
113	14,60	36,82	89,43	2400	-	-	7814	8199	3,029	0,378	10719
114	15,40	36,28	89,32	2400	-	-	7673	8050	3,370	0,426	9405
115	16,25	36,49	89,51	2400	-	-	7863	8251	3,477	0,434	9059
116	15,40	36,71	89,34	2400	-	-	8715	9144	3,127	0,390	10382
117	14,10	36,27	89,45	2400	-	-	7671	8049	2,990	0,380	10720

119	15,45	36,37	89,77	2400	-	-	8707	9139	3,247	0,407	10356
120	13,30	36,17	89,65	2400	-	-	11003	11548	3,457	0,441	12073
121	13,45	36,83	89,54	2400	-	-	8502	8922	3,671	0,460	10900
122	13,30	36,85	89,43	2400	-	-	8490	8909	3,291	0,413	10427
123	14,00	36,69	89,56	2400	-	-	7917	8308	3,346	0,420	9988
124	13,40	36,80	89,88	2400	-	-	8339	8754	3,384	0,423	10355
125	13,65	36,28	89,45	2400	-	-	7684	8063	3,710	0,472	10314
126	14,70	36,92	89,66	2400	-	-	11292	11852	3,800	0,472	12287
127	16,00	36,86	89,77	2400	-	-	7436	7805	3,247	0,401	9817
128	15,30	36,48	89,56	2400	-	-	7598	7974	3,670	0,460	9793
129	14,60	36,33	89,70	2400	-	-	8960	9405	2,933	0,370	11445
130	13,45	36,41	89,23	2400	-	-	7821	8205	3,327	0,424	10498
131	15,75	36,79	89,77	2400	-	-	10015	10512	3,543	0,439	11660
132	14,10	36,66	89,24	2400	8250	45,27	-	-	-	-	-
133	13,40	36,86	89,85	2400	7680	41,35	-	-	-	-	-
134	12,60	36,68	89,06	2400	7750	42,67	-	-	-	-	-
135	13,20	36,89	89,94	2400	7000	37,58	-	-	-	-	-
136	13,80	36,96	89,90	2400	10060	53,95	-	-	-	-	-
137	14,30	36,47	88,50	2400	5750	32,25	-	-	-	-	-
PROMEDIO	-	-	-	-	-	45,23	9785	10265	-	0,424	11419

7.1.4 Valores promedios de láminas de *Eucalyptus grandis* perteneciente al muestreo IV

Tabla	CH (%)	esp. prom. (mm)	ancho prom. (mm)	largo (mm)	F máx. (N)	corr. CH 12 %	corr. CH 12 %	corr. CH 12 %	corr. CH 12 %	corr. CH 12 %	Fakopp (N/mm ²)
						MOR (N/mm ²)	MOE global (N/mm ²)	MOE local (N/mm ²)	Peso (Kg)	Densidad (g/cm ³)	
1	14,4	36,48	89,12	1900	-	-	11029	3,081	11569	0,493	12501
2	15,25	36,41	89,22	1900	-	-	11313	2,775	11868	0,442	11663
3	11,25	36,92	89,45	1900	-	-	11183	3,42	11734	0,547	13303
4	14,5	36,44	89,31	1900	-	-	9842	2,78	10326	0,444	11680
5	14,85	36,42	88,6	1900	-	-	14662	2,468	15370	0,397	16649
6	15,1	36,73	89,27	1900	-	-	9055	2,556	9500	0,404	10523
7	14,8	36,36	88,54	1900	-	-	11508	2,361	12063	0,381	11935
8	14,35	36,42	89,27	1900	10000	55,2	-	-	-	-	-
9	14,95	36,24	88,47	1900	-	-	11318	3,211	11863	0,519	13295
10	12,1	36,87	89,82	1900	-	-	9345	2,568	9810	0,408	11070
11	11,6	36,7	88,96	1900	-	-	8737	2,389	9163	0,386	10823
12	12,85	36,57	89,22	1900	9000	49,53	-	-	-	-	-
13	11,05	36,88	89,65	1900	-	-	11824	2,872	12409	0,459	12126
14	10,3	36,72	89,41	1900	8680	47,38	-	-	-	-	-
15	14,3	36,57	89,65	1900	10750	58,59	-	-	-	-	-
16	12,55	36,19	88,5	1900	10870	61,44	-	-	-	-	-
17	12,1	36,45	89,09	1900	-	-	9101	2,154	9546	0,349	10873
18	15,45	36,35	88,71	1900	-	-	8031	2,343	8420	0,376	9847
19	12,3	36,8	89,18	1900	-	-	8574	2,147	8994	0,344	10687
20	11,25	37,12	89,97	1900	-	-	9748	2,47	10234	0,391	11617
21	11,75	36,69	89,55	1900	-	-	9294	2,828	9753	0,454	10496

22	10,95	36,63	89,39	1900	-	-	11385	2,455	11946	0,397	12973
23	13,75	36,66	88,93	1900	-	-	11410	2,493	11966	0,399	12229
24	11,45	36,78	89,21	1900	-	-	9634	2,571	10107	0,414	10820
25	10,35	36,9	89,57	1900	-	-	11753	2,618	12334	0,420	13232
26	12,6	36,73	89,02	1900	-	-	11810	3,25	12387	0,522	12845
27	12,1	36,81	89,09	1900	-	-	12893	3,139	13523	0,504	13049
28	15,65	36,49	89,11	1900	-	-	10533	2,616	11048	0,416	11963
29	12,15	37,01	89,29	1900	-	-	11845	2,405	12426	0,383	12001
30	12,25	36,91	89,35	1900	-	-	9033	2,46	9477	0,392	10392
31	10,4	36,92	89,59	1900	-	-	8599	2,85	9024	0,457	12777
32	12,7	36,73	89,15	1900	-	-	11634	2,93	12204	0,469	13907
33	10,85	36,82	89,48	1900	-	-	12153	2,987	12753	0,480	13366
34	12,05	36,8	89,27	1900	-	-	10137	2,623	10635	0,420	12588
35	10,2	36,96	89,88	1900	-	-	12104	2,698	12707	0,431	11949
36	12,35	36,86	89,67	1900	-	-	9410	2,347	9876	0,373	11418
37	10,85	36,7	89,36	1900	-	-	11890	2,576	12474	0,416	13572
38	10,35	36,98	89,45	1900	4430	23,99	-	-	-	-	-
39	11,65	36,9	89,65	1900	-	-	11509	2,625	12079	0,418	11807
40	11,3	36,99	89,81	1900	11560	62,08	-	-	-	-	-
41	11,35	36,85	89,37	1900	-	-	12228	2,886	12829	0,463	13928
42	10,35	37,17	89,45	1900	-	-	11698	2,833	12274	0,452	13107
43	11,65	36,78	89,56	1900	-	-	10996	2,486	11539	0,398	11230
44	11,75	36,79	89,36	1900	-	-	11759	2,538	12337	0,407	12000
45	11,45	36,89	89,75	1900	-	-	9003	2,829	9450	0,451	10896
46	10,95	36,88	89,54	1900	-	-	9982	2,395	10476	0,384	10705
47	10,6	36,82	89,39	1900	-	-	10500	2,675	11016	0,431	12014
48	11,05	36,79	89,36	1900	8180	44,61	-	-	-	-	-
49	10,55	36,77	89,78	1900	-	-	9591	2,407	10067	0,387	10831

50	14,65	36,57	89,03	1900	-	-	10908	2,81	11441	0,448	12683
51	14,85	36,54	89,19	1900	7000	38,59	-	-	-	-	-
52	11,1	36,91	89,4	1900	-	-	11633	2,698	12206	0,432	12219
53	12,3	37,23	89,85	1900	-	-	9622	2,827	10101	0,444	11099
54	11,9	36,91	89,5	1900	-	-	9411	2,571	9876	0,410	10585
55	11,45	36,85	89,36	1900	-	-	10646	2,773	11170	0,444	11686
56	10,5	37,34	89,52	1900	-	-	11129	2,906	11678	0,461	12837
57	12,5	36,88	89,38	1900	-	-	11524	2,363	12092	0,376	11801
58	10,15	36,9	89,64	1900	6680	36,09	-	-	-	-	-
59	11,75	36,66	89,13	1900	-	-	13069	2,703	13709	0,436	14525
60	10,5	36,88	89,65	1900	-	-	9909	2,372	10400	0,380	10003
61	13,2	36,56	89,2	1900	-	-	9778	2,788	10257	0,447	11864
62	15,6	36,22	89,12	1900	-	-	13307	2,989	13957	0,479	13016
63	13,1	36,7	89,34	1900	-	-	8490	2,155	8907	0,344	9538
64	11,2	36,75	89,93	1900	-	-	10459	2,309	10980	0,369	10452
65	12,45	36,78	89,49	1900	-	-	10992	2,275	11534	0,363	11064
66	12,05	36,65	89,61	1900	-	-	11210	2,824	11765	0,453	12853
67	11,2	36,93	89,27	1900	-	-	9301	2,517	9757	0,404	10900
68	11,35	36,86	89,33	1900	-	-	9947	2,652	10436	0,425	11946
69	11,2	36,94	89,51	1900	-	-	11518	2,476	12086	0,396	12079
70	11,35	36,84	89,27	1900	-	-	10522	2,356	11039	0,378	11971
71	11,55	36,78	89,64	1900	-	-	9872	2,493	10361	0,399	11599
72	12,05	36,96	89,5	1900	-	-	11532	2,934	12101	0,467	12717
73	11,5	36,75	89,47	1900	-	-	9541	2,496	10012	0,401	10227
74	10,55	36,88	89,51	1900	-	-	10613	2,429	11137	0,390	11592
75	12,15	36,8	89,5	1900	-	-	8948	2,269	9389	0,362	9737
76	11,4	36,58	89,13	1900	-	-	10359	2,669	10866	0,432	11412
77	12,5	36,83	88,96	1900	-	-	8653	2,605	9075	0,417	10261
78	10,25	36,89	89,39	1900	-	-	11538	2,511	12106	0,404	11765

79	13,55	36,47	88,43	1900	-	-	9002	2,563	9435	0,415	11072
80	10,5	36,8	89,27	1900	-	-	11936	2,966	12522	0,479	13989
81	11,7	36,91	89,51	1900	-	-	10709	2,745	11238	0,438	12435
82	10,6	36,76	89,37	1900	-	-	10284	2,564	10790	0,414	10841
83	11	36,76	89,44	1900	-	-	8098	1,987	8497	0,320	9367
84	10,65	36,83	89,74	1900	-	-	11534	2,803	12107	0,449	11724
85	12	37	89,71	1900	-	-	13348	3,26	14010	0,517	14075
86	10,95	36,64	89,44	1900	-	-	9971	2,303	10462	0,372	11954
87	11,45	36,93	89,91	1900	-	-	9805	2,569	10293	0,408	11366
88	10,5	36,83	89,41	1900	-	-	9314	2,316	9772	0,373	10665
89	11,4	36,9	89,6	1900	-	-	10434	2,46	10950	0,393	12231
90	10,8	36,86	89,82	1900	-	-	9852	2,471	10342	0,395	11600
91	11,6	36,83	89,3	1900	-	-	11461	2,739	12024	0,439	13420
92	10,6	36,83	89,29	1900	-	-	10273	2,458	10777	0,396	10434
93	12,15	37	89,59	1900	-	-	10234	3,061	10740	0,486	12409
94	12,85	36,52	89,54	1900	-	-	10623	2,676	11148	0,429	10760
95	10,25	36,8	89,52	1900	-	-	11290	2,392	11848	0,386	11982
96	10,7	37,1	89,91	1900	-	-	8968	2,381	9415	0,378	10506
97	10,15	36,78	89,51	1900	-	-	10407	2,774	10921	0,448	12931
98	10,35	36,93	89,68	1900	-	-	13092	2,682	13741	0,430	13231
99	11	36,9	89,61	1900	-	-	12282	2,754	12890	0,441	13936
100	11,45	36,74	89,12	1900	-	-	9673	2,788	10146	0,449	11185
101	11,1	36,92	89,84	1900	-	-	10683	2,707	11215	0,431	10945
102	10,15	36,88	89,32	1900	-	-	9913	2,535	10401	0,409	11559
103	10,85	36,9	89,55	1900	-	-	11836	2,96	12421	0,474	12668
104	10,65	36,78	89,55	1900	-	-	10453	2,273	10969	0,366	11634
105	12,4	36,76	89,33	1900	-	-	8858	2,291	9294	0,366	10469
106	10	36,86	89,37	1900	-	-	11644	2,577	12217	0,416	13622
107	11,6	36,99	89,67	1900	-	-	9584	2,687	10059	0,427	11557
108	10,3	36,87	89,23	1900	-	-	9315	2,477	9771	0,400	11092
PROMEDIO	-	-	-	-	-	47,75	10585	-	11106	0,420	11865

7.1.5 Valores promedio de tarugos de *Eucalyptus tereticornis* de 18 mm de diámetro

Muestreo	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Tensión normal (MPa)	Tensión de corte (MPa)
ET18-1	0,859	17395	152,02	79,87	17,75
ET18-2	0,871	16701	158,44	83,25	18,50
ET18-3	0,859	7263	154,95	81,42	18,09
ET18-4	0,887	16081	152,06	79,90	17,75
ET18-5	0,855	16835	150,27	78,95	17,55
ET18-6	0,852	12356	141,63	74,42	16,54
ET18-7	0,860	14562	155,50	81,70	18,16
ET18-8	0,899	13323	153,84	80,83	17,96
ET18-9	0,876	19068	154,38	81,12	18,03
ET18-10	0,877	16738	157,10	82,54	18,34
ET18-11	0,882	15249	129,36	67,97	15,10
ET18-12	0,857	14658	119,16	62,61	13,91
ET18-13	0,841	17450	151,60	80,96	17,99
ET18-14	0,886	15043	145,38	76,39	16,97
ET18-15	0,885	17455	135,09	70,98	15,77
ET18-16	0,875	16846	152,93	80,35	17,86
ET18-17	0,852	15115	152,90	80,34	17,85
ET18-18	0,853	12654	118,60	63,34	14,08
ET18-19	0,879	18065	152,45	80,10	17,80
ET18-20	0,880	17889	165,87	87,15	19,37
ET18-21	0,848	16943	154,38	81,12	18,03
ET18-22	0,857	16381	137,82	72,41	16,09

7.1.6 Valores promedio de tarugos de *Eucalyptus tereticornis* de 15 mm de diámetro

Muestreo	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Tensión normal (MPa)	Tensión de corte (MPa)
ET15-1	0,882	13344	154,67	69,86	10,78
ET15-2	0,919	13987	154,26	69,67	10,75
ET15-3	0,884	14945	155,67	68,86	10,63
ET15-4	0,924	15119	166,81	76,12	11,75
ET15-5	0,945	15072	167,47	74,08	11,43
ET15-6	0,869	14035	149,12	68,75	10,61
ET15-7	0,856	12717	145,99	70,83	10,93
ET15-8	0,939	14313	167,06	77,02	11,89
ET15-9	0,901	14791	163,50	74,61	11,51
ET15-10	0,863	12206	143,99	65,71	10,14
ET15-11	0,870	15191	148,33	70,52	10,88
ET15-12	0,926	15289	171,01	78,85	12,17
ET15-13	0,928	13216	154,53	71,98	11,11
ET15-14	0,897	12962	119,87	53,03	8,18
ET15-15	0,919	15101	174,64	80,52	12,43
ET15-16	0,897	13531	163,32	76,86	11,86
ET15-17	0,909	14673	147,19	66,48	10,26
ET15-18	0,929	14901	164,72	79,11	12,21
ET15-19	0,882	12367	132,76	59,34	9,16
ET15-20	0,904	12087	119,38	55,04	8,49
ET15-21	0,905	14233	161,70	78,45	12,11
ET15-22	0,911	13979	166,97	78,57	12,13
ET15-23	0,930	13860	138,79	63,99	9,88

7.1.7 Valores promedio de tarugos de *Balfourodendron riedelianum* de 20 mm de diámetro

Muestreo	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Tensión normal (MPa)	Tensión de corte (MPa)
G20-1	0,759	18339	169,10	84,55	18,79
G20-2	0,771	18171	179,12	89,56	19,90
G20-3	0,688	15420	134,98	67,49	15,00
G20-4	0,705	15235	142,02	71,01	15,78
G20-5	0,685	15290	146,06	73,03	16,23
G20-6	0,760	18421	170,22	85,11	18,91
G20-7	0,701	15697	147,89	73,94	16,43
G20-8	0,712	15411	151,01	75,51	16,78
G20-9	0,768	18763	175,01	87,50	19,45
G20-10	0,767	19404	183,01	91,51	20,33
G20-11	0,757	15679	117,87	59,82	13,29
G20-12	0,756	14879	130,79	67,38	14,97
G20-13	0,760	18390	160,31	77,77	17,28
G20-14	0,692	15717	130,68	62,92	13,98
G20-15	0,736	15824	126,28	65,05	14,46
G20-16	0,747	14856	123,79	63,77	14,17
G20-17	0,722	14606	115,68	59,15	13,14
G20-18	0,784	18359	159,67	76,29	16,95
G20-19	0,761	16619	127,91	64,44	14,32
G20-20	0,803	17839	107,00	54,71	12,16
G20-21	0,726	18112	150,27	71,80	15,96
G20-22	0,749	15945	128,99	65,96	14,66

7.1.8 Valores promedio de tarugos de *Balfourodendron riedelianum* de 12 mm de diámetro

Muestreo	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Tensión normal (MPa)	Tensión de corte (MPa)
G12-1	0,767	10987	149,41	76,59	17,02
G12-2	0,752	10512	172,32	88,33	19,63
G12-3	0,753	10052	162,42	83,26	18,50
G12-4	0,760	11383	171,33	87,82	19,52
G12-5	0,764	9734	169,93	87,11	19,36
G12-6	0,791	12210	181,25	92,91	20,65
G12-7	0,789	12233	192,53	98,69	21,93
G12-8	0,809	9331	153,70	78,79	17,51
G12-9	0,799	11267	181,86	93,22	20,72
G12-10	0,800	11074	186,28	95,49	21,22
G12-11	0,762	10618	175,23	89,82	19,96
G12-12	0,767	10097	165,48	84,83	18,85
G12-13	0,763	10305	167,49	85,85	19,08
G12-14	0,776	11779	174,11	89,25	19,83
G12-15	0,746	10239	172,52	88,44	19,65
G12-16	0,758	10629	134,09	68,73	15,27
G12-17	0,749	10053	166,53	85,36	18,97
G12-18	0,773	9542	154,82	79,36	17,64
G12-19	0,775	11402	170,01	87,15	19,37
G12-20	0,823	13069	202,09	103,59	23,02

7.1.9 Valores promedio de tarugos de *Eucalyptus grandis* de 18 mm de diámetro

Muestreo	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Tensión normal (MPa)	Tensión de corte (MPa)
EG18-1	0,548	7411	91,99	54,04	10,22
EG18-2	0,514	8352	89,80	46,00	9,98
EG18-3	0,467	6158	76,15	38,71	8,60
EG18-4	0,460	6363	76,55	40,22	8,94
EG18-5	0,403	4593	58,26	30,61	6,80
EG18-6	0,405	4943	66,73	35,06	7,79
EG18-7	0,458	5883	71,52	37,58	8,35
EG18-8	0,460	6429	71,46	37,55	8,34
EG18-9	0,445	6049	71,15	37,38	8,31
EG18-10	0,444	4958	64,74	34,02	7,56
EG18-11	0,399	4796	65,64	34,49	7,66
EG18-12	0,448	7638	71,86	37,75	8,39
EG18-13	0,372	4784	50,09	26,32	5,85
EG18-14	0,388	4238	56,75	29,82	6,63
EG18-15	0,406	4870	61,40	32,26	7,17
EG18-16	0,404	5545	68,16	35,81	7,96
EG18-17	0,459	6997	71,86	37,76	8,39
EG18-18	0,379	2688	43,23	22,72	5,05
EG18-19	0,413	4668	60,41	31,74	7,05
EG18-20	0,454	5616	70,52	37,05	8,23
EG18-21	0,386	5541	60,69	31,89	7,09
EG18-22	0,448	5974	68,56	36,02	8,01
EG18-23	0,394	4399	63,95	33,60	7,47
EG18-24	0,387	5027	56,69	29,78	6,62

7.1.10 Valores promedio de tarugos de *Eucalyptus grandis* de 20 mm de diámetro

Muestreo	Densidad aparente corriente (g/cm ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Tensión normal (MPa)	Tensión de corte (MPa)
EG20-1	0,509	7723	83,77	41,89	9,31
EG20-2	0,512	7909	87,76	43,88	9,75
EG20-3	0,507	7842	89,25	44,63	9,92
EG20-4	0,514	7809	85,67	42,83	9,52
EG20-5	0,494	6947	80,78	40,39	8,98
EG20-6	0,582	10491	100,56	50,28	11,17
EG20-7	0,507	8352	86,25	43,12	9,58
EG20-8	0,547	10101	97,84	48,92	10,87
EG20-9	0,589	10319	106,32	53,16	11,81
EG20-10	0,504	7584	80,98	40,49	9,00
EG20-11	0,529	8943	94,21	47,10	10,47
EG20-12	0,517	8187	87,55	43,78	9,73
EG20-13	0,560	11420	98,68	50,08	11,13
EG20-14	0,545	10221	93,32	47,36	10,53
EG20-15	0,586	9995	93,93	47,67	10,59
EG20-16	0,555	9260	98,23	49,86	11,08
EG20-17	0,505	7385	78,99	40,09	8,91
EG20-18	0,470	8003	78,39	39,79	8,84
EG20-19	0,590	10791	92,66	47,03	10,45
EG20-20	0,434	5947	64,55	32,76	7,28
EG20-21	0,426	6416	64,29	32,63	7,25
EG20-22	0,548	9456	96,93	49,93	11,10

7.2 ANEXO 2. STRUCTURAL BEHAVIOUR OF DOWEL LAMINATED TIMBER PANEL BUILT WITH FAST-GROWING URUGUAYAN SPECIES

7.2.1 Average values of DLT panels composed of lamellas of *Pinus elliottii* and 20 mm diameter *Balfourodendron riedelianum* dowels

		kN	N	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	(%)
Series	Panel	Ultimate load F _{max}		MOR	Global MOE	Local MOE	Moisture content
VP+G 7	PBP 1	67.31	67310	25.1	5417	5680	11.6
VP+G 9	PBP 2	55.06	55060	20.5	4996	5239	11.39
VP+G 8	PBP 3	55.75	55750	20.8	4632	4858	11.22
VP+G 11	PBP 4	45.93	45930	17.1	4939	5179	11.57
VP+G 6	PBP 5	38.56	38560	14.4	4951	5192	11.39
VP+G 10	PBP 6	57.68	57680	21.5	5352	5613	11.31
Average		53.38	53382	19.72	5048	5293	11.41

7.2.2 Average values of DLT panels composed of lamellas of *Pinus elliottii* and 20 mm diameter *Eucalyptus grandis* dowels

		kN	N	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	(%)
Series	Panel	Ultimate load Fmax		MOR	Global MOE	Local MOE	Moisture content
VP+E14	PEP 1	59.62	59620	22.2	5597	5869	11.24
VP+E1	PEP 2	53.18	53180	19.82	5069	5315	11.53
VP+E4	PEP 3	51.18	51180	13.82	5079	5326	11.78
VP+E12	PEP 4	72.31	72310	19.53	5572	5843	11.6
VP+E3	PEP 5	55.06	55060	14.87	5073	5319	11.24
VP+E5	PEP 6	48.75	48750	13.17	5366	5627	11.6
VP+E2	PEP 7	53.56	53560	14.46	4873	5110	11.34
Average		56.24	56237	16.84	5292	5550	11.48

7.2.3 Average values of DLT panels composed of lamellas of *Eucalyptus grandis* and 15 mm diameter *E. tereticornis* dowels

		kN	N	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	(%)
Series	Panel	Ultimate load F _{max}		MOR	Global MOE	Local MOE	Moisture content
VE+C7	ET15P 1	55.68	55680	44.7	11181	11724	11.09
VE+C4	ET15P 2	60.43	60430	48.5	10242	10740	11.7
VE+C5	ET15P 3	48.56	48560	39	10731	11253	11.3
VE+C6	ET15P 4	54.5	54500	43.7	9721	10194	11.32
VE+C9	ET15P 5	56.81	56810	45.6	10710	11231	11.79
VE+C8	ET15P 6	70.56	70560	56.6	10705	11226	11.3
Average		57.76	57757	46.35	10548	11061	11.42

7.2.4 Average values of DLT panels composed of lamellas of *Eucalyptus grandis* and 18 mm diameter *E. tereticornis* dowels

		kN	N	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	(%)
Series	Panel	Ultimate load Fmax		MOR	Global MOE	Local MOE	Moisture content
VE+C3	ET18P 1	57.25	57250	45.9	10008	10495	10.97
VE+C10	ET18P 2	45.31	45310	36.4	10526	11038	11.13
VE+C11	ET18P 3	48.87	48870	39.2	10385	10890	11.39
VE+C2	ET18P 4	57.43	57430	46.1	10948	11480	11.7
VE+C12	ET18P 5	53.75	53750	43.1	10682	11202	11.24
VE+C1	ET18P 6	35.75	35750	28.7	10588	11103	11.53
Average		49.73	49727	39.9	10523	11035	11.33