

## **CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL DLT COMO NUEVO PRODUCTO DE MADERA MASIVA EN LA INDUSTRIA CHILENA Y COMPARACIÓN CON NLT**

*Karina Ayleen Fuentes Cárcamo<sup>1</sup>, Javiera Padilla Reyes<sup>2</sup> y Nelson Maureira Carsalade<sup>3</sup>*

### **RESUMEN**

En la industria maderera chilena, se está buscando constantemente la innovación, y ha surgido un nuevo método de unión en la madera masiva conocido como DLT, destacando su viabilidad ambiental y capacidad de automatización. Este método ha sido exitosamente adoptado en Europa y Estados Unidos gracias a su respeto por el medio ambiente y su sólido rendimiento estructural. Tanto es así que los pasadores de madera como método de unión están incluidos en las normativas vigentes. Sin embargo, la implementación en Chile requiere evaluar su compatibilidad con las especies madereras locales, tal como el pino radiata, ampliamente utilizado en la industria forestal del país.

Una forma de describir y evaluar el DLT es a través de la caracterización mecánica mediante ensayos basados en normativas europeas realizados en laboratorios del Instituto Forestal (LME-INFOR), teniendo en cuenta sus parámetros más característicos, como tensiones de rotura, deformaciones en el rango elástico, y la interacción viga-tarugo, entre otros. Dicha caracterización es necesaria para asegurar diseños seguros, selección de materiales óptimos, durabilidad y eficiencia del elemento.

Por otro lado, un método de unión conocido, estudiado y especificado en las normas chilenas es la unión con distintos tipos de pasadores de acero, destacándose los clavos como medio de unión (NLT), el cual será el elemento para comparar con el DLT, puesto que son elementos similares, pero con materiales diferentes.

Basado en los ensayos realizados, se observa que el DLT exhibe una resistencia a la rotura un 40% mayor que el NLT en ensayos de probetas pequeñas. Sin embargo, se destaca la diferencia en la deformación del material antes de alcanzar dicha resistencia, siendo el NLT más dúctil que el DLT. Además, se observa una similitud en el comportamiento de vigas hechas de pasadores de acero y de madera, mostrando, por ejemplo, solo un 0.3% de diferencia en la máxima fuerza de soporte alcanzada por el elemento.

**PALABRAS CLAVE:** DLT, caracterización mecánica, NLT, EN 26891, EN 408.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [kfuentes@ing.ucsc.cl](mailto:kfuentes@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, M.Sc., Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [Javiera.padilla@ucsc.cl](mailto:Javiera.padilla@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [nmaureira@ucsc.cl](mailto:nmaureira@ucsc.cl)

## ABSTRACT

In the Chilean timber industry, there is a constant pursuit of innovation, and a new method of joining in massive wood known as DLT has emerged, highlighting its environmental viability and automation capability. This method has been successfully adopted in Europe and the United States due to its environmental friendliness and strong structural performance. So much so that wooden dowels as a joining method are included in current regulations. However, its implementation in Chile requires evaluating its compatibility with local wood species, such as radiata pine, widely used in the country's forestry industry.

One way to describe and evaluate DLT is through mechanical characterization using tests based on European standards conducted in laboratories of the Forest Institute (LME-INFOR), considering its most characteristic parameters, such as rupture tensions, deformations in the elastic range, and beam-dowel interaction, among others. Such characterization is necessary to ensure safe designs, optimal material selection, durability, and efficiency of the element.

On the other hand, a known, studied, and specified joining method in Chilean standards is the use of various types of steel dowels, with nails standing out as a joining medium (NLT), which will be the element to compare with DLT since they are similar elements but with different materials.

Based on the tests conducted, it is observed that DLT exhibits a 40% higher rupture strength than NLT in small specimen tests. However, the difference in material deformation before reaching this strength is highlighted, with NLT being more ductile than DLT. Additionally, there is a similarity in the behavior of beams made of steel dowels and wood, showing, for example, only a 0.3% difference in the maximum support force reached by the element.

**KEYWORDS:** DLT, mechanical characteristics, NLT, EN 26891, EN 408.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. MADERA MASIVA

La madera masiva refiere a piezas de madera laminadas ensambladas entre sí mediante diferentes métodos, lo que genera como producto un elemento visualmente macizo y sólido, aportando características necesarias para el uso estructural. Estos elementos de madera masiva son ampliamente utilizados debido a las dimensiones y formas que pueden obtener, y también por los usos que se les otorgan, los cuales son vigas de entrepiso o techo, muros, losas y columnas según condiciones que lo estimen dentro de normativas vigentes y las condiciones de diseño específicas requeridas. (INFOR, 2022).

En el contexto de la madera masiva, se pueden encontrar los siguientes tipos:

- **Madera Laminada Clavada (NLT):** También conocido como Nail Laminated Timber, está conformado por piezas de madera laminada ensamblada entre ellas mediante clavos (ver imagen n°1). Este ejemplo de madera masiva es la combinación entre desempeño estructural y la sofisticación de diseño (Thinkwood, 2022).



Imagen n°1: Madera laminada clavada  
Fuente: INFOR, 2022

- **Madera Laminada Encolada (MLE):** Es el producto estructural que resulta de la unión de piezas de madera con adhesivos industriales (generalmente de resina de melamina o poliuretano). Esta unión consta de dos o más secciones de madera en disposición de la fibra de las capas de laminación ensambladas con alguno de los adhesivos mencionados anteriormente, tal como se puede observar en la imagen n°2. Se utiliza para la creación de vigas curvas o con formas no convencionales, ya que al ser encoladas se le permite, mediante la utilización de prensas, moldear el elemento de acuerdo con las solicitudes de diseño (Thinkwood, 2022).



Imagen n°2: Viga de madera laminada encolada  
Fuente: Wordpress.com, 2024

- **Madera Laminada con Pasador (DLT):** Su nombre original es Dowel Laminated Timber y corresponde a un producto ingenieril de piezas de madera aserrada laminada ensambladas a través de pasadores de madera (ver imagen n°3), obteniendo así un elemento libre de adhesivos o sujetadores metálicos como medio de unión. Se destaca la facilidad e industrialización en el ensamblaje, dado que se requieren maquinarias perforadoras y, posteriormente prensas para ubicar los pasadores de madera. Al ingresar dichos pasadores se genera efecto soldadura debido al roce entre viga-tarugo, y el tarugo al absorber humedad presenta efecto de hinchamiento, produciendo así un ajuste en la viga (Thinkwood, 2022).



Imagen n°3: Ensamblaje de vigas a ensayar DLT  
Fuente: Elaboración propia

## 1.2. CONTEXTO INTERNACIONAL DEL DLT

“La madera laminada con pasadores (DLT) es común en Europa y está ganando terreno en los EE. UU. por su facilidad de uso con maquinaria controlada por computadora (CNC), como tornos, fresadoras y prensas, y su composición exclusivamente de madera. DLT es similar a la madera laminada con clavos (NLT). Sin embargo, en lugar de clavos o tornillos, DLT utiliza tacos de madera para unir las láminas.” (Thinkwood, 2022).

Dentro del contexto internacional, un elemento clave y de gran interés en común corresponde a que tan factible es ambientalmente la producción de ciertos productos, es por lo que solo considerando emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el cual es el principal gas de efecto invernadero emitido por actividades del ser humano, se tiene que solo para la producción del acero se emiten 1,24 ton a la atmósfera por cada 1.0 ton producida (ClimateScience, s.f), en cambio la madera es el único material vivo, dado que en vez de emitir, absorbe  $\text{CO}_2$ , y por esto es que se contrarresta la producción de  $\text{CO}_2$  de producción y da como resultado huella de carbono negativa, dado que es capaz de retener 1.7 ton aún ya siendo utilizado en la construcción (Forestalmaderero, 2022).

Por último, he de destacar que a nivel mundial se realizan ensayos de propiedades mecánicas, caso no excluyente para Chile, dado que, para poder caracterizar el elemento, se requiere conocer sus límites de resistencia en diferentes estados de carga, debido a que solamente de este modo se pueden determinar defectos que prontamente pudieran ser mejorados a través de análisis matemáticos, o mejoras en materiales utilizados para la confección del elemento (Ensayo de Propiedades Mecánicas de Materiales, s. f.).

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. General

- Determinar las características mecánicas del DLT y compararlas con otros productos más convencionales similares en la industria chilena, para evaluar la factibilidad productiva del DLT.

#### 1.3.2. Específicos

- Caracterizar mecánicamente vigas laminadas de pino radiata con unión de tarugos de coihue mediante la norma europea EN26891 y EN408.
- Comparar el desempeño estructural del DLT con NLT.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. MUESTRAS DE ENSAYO

#### 2.1.1. Materiales

- **Pino radiata:** Especie proveniente de los bosques de california, introducida en Chile hace varias décadas y que hoy en día es la principal en plantaciones forestales dado que se ha adaptado positivamente. Dentro de sus usos se destaca la utilización completa del producto, tanto como pulpa, celulosa, madera aserrada laminada o maciza (utilizadas en la construcción), entre otros (MADERERANACIONAL, 2024).

“Es una especie conífera comúnmente utilizada en Chile principalmente en las plantaciones forestales, llegando a la utilización del 97.2% de la producción nacional en el año 2020” (INFOR, 2021).

Especie maderera Pino radiata es utilizada para las piezas de madera tanto de probetas pequeñas y viga de DLT.

- **Coihue:** Árbol perenne, de crecimiento relativamente rápido que puede alcanzar los 40 metros de altura, su tronco es recto, cilíndrico y está libre de ramas en su parte inferior (gochile, 2024). Se destaca por ser madera dura y de gran resistencia mecánica (SIB, 2024). También es utilizada en la construcción con piezas de: molduras, pisos, revestimientos, vigas de madera, entre otros (MADERERANACIONAL, 2024).

La especie maderera coihue es utilizada para los tarugos de madera de todas las probetas que se ensayarán dentro de esta investigación.

### 2.2. PROCEDIMIENTO DE ENSAMBLAJE

#### 2.2.1. Detalle de probetas para ensayo EN 26891

El ensamble de las probetas corresponde a la unión de las piezas de madera con uno y cuatro tarugos según corresponda, esto es dado los espaciamientos establecidos en norma, lo cual establece que las muestras de ensayo se rigen ante la normativa NCh 3028-2 of 2008, la cual señala: “Según señala la Tabla 2- Tamaño de muestra y estadístico de orden para estimar el límite de tolerancia no paramétrico (LTNP) del 5%, para un 75% de confianza se requiere muestra de 28 probetas”.

Por lo tanto, las probetas del ensayo EN 26891 se definen de la siguiente forma:

- **Probeta tarugo simple:** Está compuesta por:

Piezas de madera: 3 unidades.

Alto: 25 cm.

Ancho: 9 cm.

Espesor: 4 cm.

Tarugo: 1.6 cm.

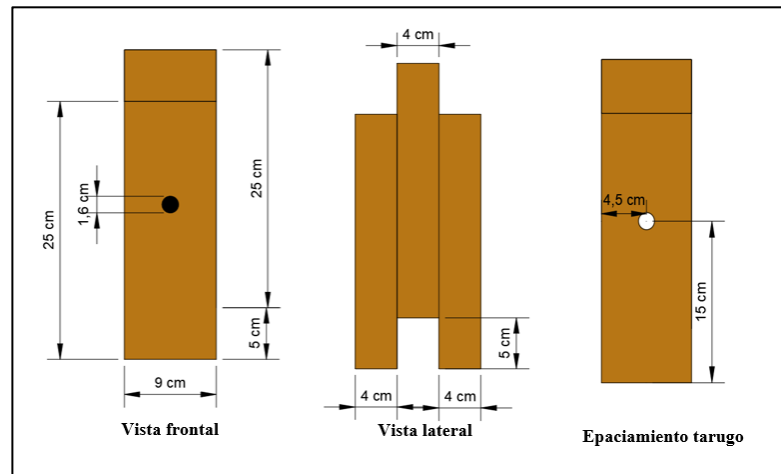


Imagen n°4: Vistas con detalles de probeta con un tarugo  
Fuente: Elaboración propia

- **Probeta tarugo cuádruple:** Está compuesta por:

Piezas de madera: 2

Pieza vertical:

Alto: 29 cm.

Ancho: 18.5 cm.

Espesor: 4 cm.

Pieza horizontal:

Alto: 18.5 cm.

Ancho: 40 cm.

Espesor: 4 cm.

Tarugos:

Cantidad: 4 unidades.

Diámetro: 1.6 cm.

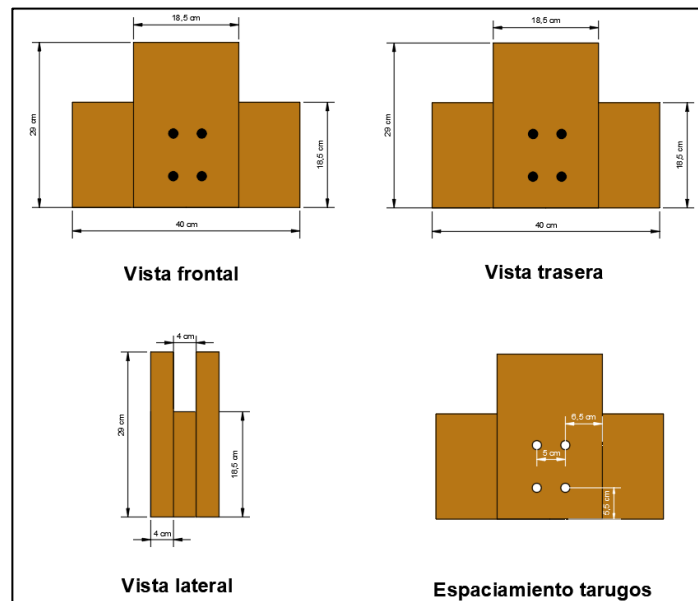


Imagen n°5: Vistas con detalles de probeta con cuatro tarugos  
 Fuente: Elaboración propia

### 2.2.2. Detalle de probetas para ensayo EN 408

Según lo establecido en muestras de ensayo, 2.1.2 EN 408- Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas, el ensamblaje de la probeta corresponde a la unión de las piezas de madera con los espaciamientos establecidos de tarugos, por lo que se obtiene la muestra de la siguiente forma: la norma EN 408 establece el largo de la muestra como mínimo 19 veces el canto de la sección, sin determinar el canto de la sección mínimo o máximo, por lo que quedaría a criterio de la capacidad del equipo disponible para el ensayo, y al utilizar cinco piezas de 4 cm cada una de canto, se obtiene un canto total de 20 cm, llegando al resultado del largo total de la probeta como mínimo es 380 cm.

De acuerdo con lo anterior, la viga con tarugos a ensayar está compuesta por:

- **Probeta vigas atarugadas:**

Viga:

Longitud: 400 cm.  
 Espesor: 18.5 cm.  
 Ancho de cada pieza: 4 cm.  
 Ancho total viga: 20 cm.

Tarugos:

Diámetro: 1.6 cm.

- **Espaciamiento de tarugos:**

En conjunto a INFOR se ha establecido que, considerando la Norma Chilena NCh1998 of 2014, específicamente en el apartado 10.5.2.5 Cargas admisibles de uniones con barras de acero, debido a que es lo que más se asemeja a los pasadores de madera.

Los espaciamientos mínimos a borde se establecen a partir de tabla n°36- Espaciamiento mínimos de pernos y barras de acero a los bordes, utilizando el borde cargado y la dirección de la fuerza con respecto a la fibra se establece el cálculo como:

$$S_{bcp} = 7 * D$$

Por otra parte, está el espaciamiento entre barras, lo cual se establece según la tabla n° 37- Espaciamientos mínimos entre pernos y entre barras de acero, utilizando la dirección paralela a la fibra, se define como:

$$S_p = 7 * D$$

Por lo tanto, considerando diámetro establecido como D=16 mm se obtiene:

$$S_{bcp} = 7 * D$$

$$S_{bcp} = 112 \text{ mm}$$

$$S_p = 7 * D$$

$$S_p = 112 \text{ mm}$$

Por otra parte, se considerará el Eurocódigo n°5, el cual presenta los siguientes detalles: el diámetro del pasador debería ser mayor que 6 mm y menor que 30 mm se utiliza la tabla 8.5- Valores mínimos de las separaciones y de las distancias a los bordes y a las testas para pasadores, se considera al (paralela a la fibra), con ángulo de 90° y a 4,t (borde cargado), también en 90°.

$$\alpha_1 = (3 + 2|\cos \alpha|)d$$

$$\alpha_1 = 48 \text{ mm}$$

$$\alpha_{4,t} = \text{máx}((2 + 2 \text{ sen } \alpha)d; 3d)$$

$$\alpha_{4,t} = \text{máx}(64; 48) \text{ mm}$$

$$\alpha_{4,t} = 64 \text{ mm}$$

Por lo que, asumiendo para el caso de sujetadores de madera se podrían considerar ambas opciones para la realización de las probetas, sin embargo, con los antecedentes recopilados se determinó lo siguiente:

- Separación entre sujetadores longitudinalmente: 15 cm.
- Separación a bordes longitudinalmente: 15 cm.
- Separación entre sujetadores transversalmente: 8.5 cm.
- Separación a bordes transversalmente: 5cm.

### 2.2.3. Tipologías de vigas a ensayar

Dentro de las vigas a ensayar se presentan los siguientes detalles:

- Viga de laminación continua:** Se presentan las piezas de madera aserrada laminada, cada una de 4 m de largo, unidas con tarugos de acuerdo con las especificaciones anteriormente mencionadas en “Espaciamiento de tarugos”.

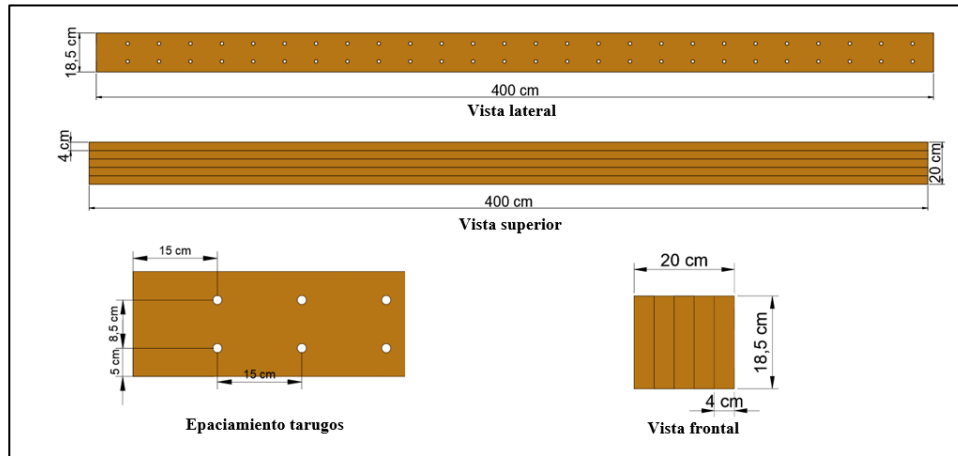


Imagen n°6: Vistas con detalles viga de laminación continua a ensayar  
Fuente: Elaboración propia, 2024

- Viga de laminación con empalme:** Corresponde a la unión de piezas de madera aserrada laminada, con distintas dimensiones que a su vez se unen con tarugos para dar firmeza a la viga. En este caso los espaciamientos son los especificados anteriormente mencionados en “Espaciamiento de tarugos”.

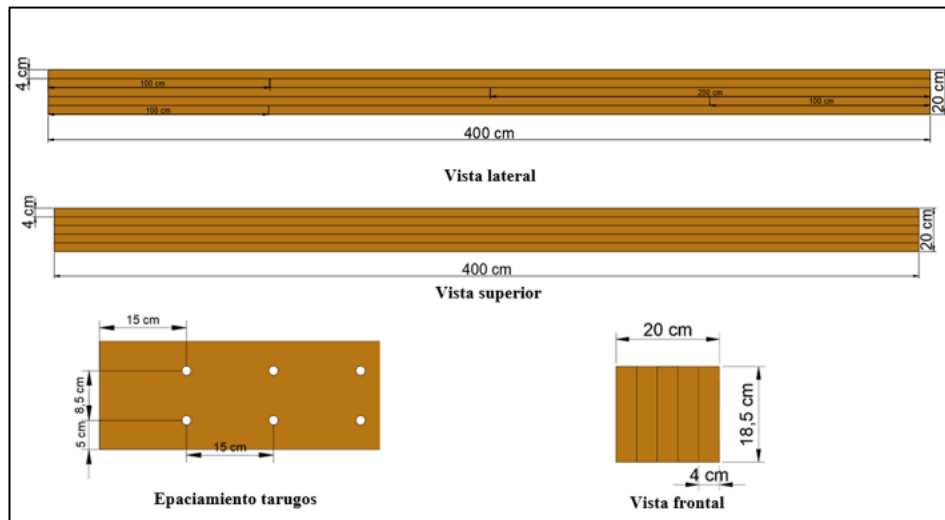


Imagen n°7: Vistas con detalles viga de laminación con empalme a ensayar  
Fuente: Elaboración propia

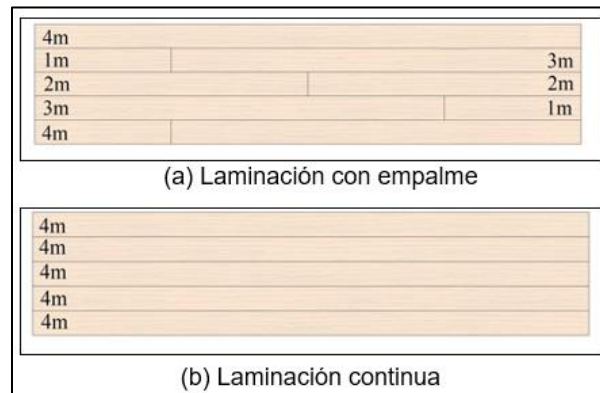


Imagen n°8: Detalle viga de laminación con empalme (a) y laminación continua (b)  
 Fuente: Elaboración propia

## 2.3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

### 2.3.1. Acondicionamiento para probetas a utilizar según EN 26891

La preparación de la muestra está determinada por la norma ISO 554 año 2007, de la cual se establece la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en la que se debe encontrar dichos elementos.

Para la preparación de la muestra se utilizará la cámara de climatización.

De acuerdo con lo anterior se establece:

- Temperatura: 20°C
- Humedad relativa: 65%
- Presión: 86 a 106 kPa

### 2.3.2. Acondicionamiento para probetas a utilizar según EN 408

La presente norma establece: “Los ensayos se realizarán en piezas acondicionadas en el ambiente estándar de  $(20 \pm 2)$  °C y  $(65 \pm 5)$ % de humedad relativa...”. Por lo tanto, se utilizará lo establecido.

Posterior al ensamblaje de las piezas se apartan las probetas a sector de reposo, dentro del laboratorio, el cual es cerrado bajo condiciones mencionadas anteriormente.

## 2.4. ASPECTOS GENERALES NORMA EN 26891

### 2.4.1. Descripción y equipos

Esta norma establece principios generales para la determinación de las características de resistencia y deformación (deslizamiento) de uniones realizadas con sujetadores mecánicos. Esta se encuentra determinada según el método ASTM 1761.

Los especímenes de prueba que consisten en uniones de madera de dos o tres miembros fijados solo con pernos, o pernos y conectores de madera se evalúan por su capacidad para resistir fuerzas de compresión o tracción aplicadas a una tasa uniforme de deformación con una máquina de prueba adecuada.

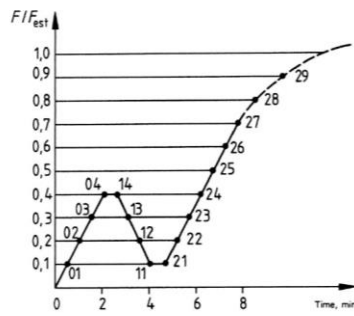
Se mide la deformación de la junta en varios intervalos de carga. También se determinan las propiedades físicas suplementarias de los miembros de madera.

El ensayo se realiza por medio de fases de cargas, las cuales, según norma, se presentan a continuación:

- Se aplica hasta 0.4 veces la fuerza estimada y se mantiene durante 30 s, luego se reduce a 0.1 veces la fuerza estimada y se mantiene durante 30 s. Después del ciclo de carga anterior se incrementa la carga hasta alcanzar la carga última o de deslizamiento de 15 mm por debajo de 0.7 veces de la Fuerza estimada se utilizará una tasa constante de carga o deslizamiento correspondiente a  $0.2 F_{est}$  por min  $\pm 25\%$ .
- Por encima de  $0.7 F_{est}$ , se utilizará una tasa de deslizamiento constante, ajustado de manera en que la carga última o de deslizamiento de 15 mm se alcance entre 3 a 5 min de tiempo de prueba adicional.
- El ensayo se considera finalizado cuando se alcanza la carga última o cuando se produce el deslizamiento de 15 mm.

*Nota: La fuerza estimada corresponde al ensayo 0, en el cual se prueba la resistencia máxima para un estimativo de cargas máximas aceptadas por la probeta hasta la rotura.*

(a)



(b)

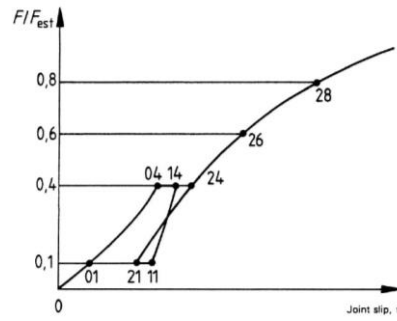


Imagen n°9: Fases de carga ensayo

(a) Fases de carga ensayo; (b) Curva carga-deformación idealizada

Fuente: EN 26891, 1991

La norma establece el método según ASTM 1761, la cual menciona lo siguiente: Es necesario cualquier máquina de prueba adecuada que sea capaz de operar a una velocidad constante de movimiento del cabezal móvil y tenga una precisión del 61% cuando se calibra de acuerdo con las prácticas. Este equipo requiere Mordazas y Medidor de deformación. Se utilizará el equipo Zwick roell Z100.

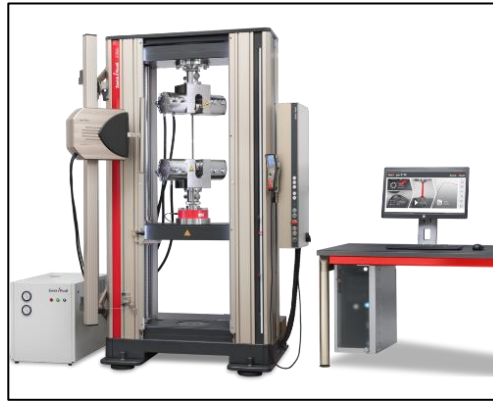


Imagen n°10: Equipo Zwick roell Z100  
Fuente: Zwickroell.com, 2023

El montaje de la probeta en el equipo se encuentra determinado por el método ASTM 1761, el cual se presenta gráficamente a continuación:

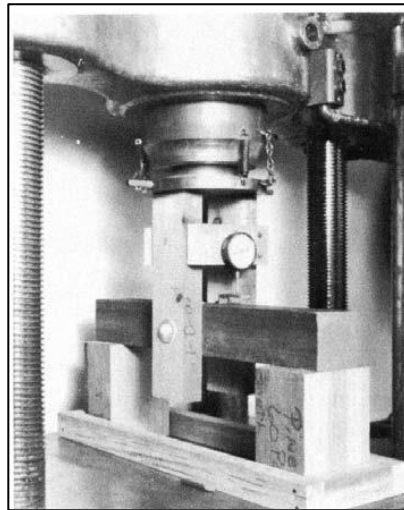


Imagen n°11: Montaje probeta en equipo  
Fuente: ASTM 1761, 2020

Se observa que la probeta debe quedar entre ambos cabezales, de las cuales el cabezal superior es móvil (en el eje vertical) y el cabezal inferior es fija para la realización del ensayo.

#### 2.4.2. Muestras

En consideración de las descripciones realizadas para las muestras, para cada ensayo (tarugo simple y cuádruple) se requieren 30 probetas. A continuación, se presentan imágenes reales de las probetas utilizadas y sus respectivos montajes.

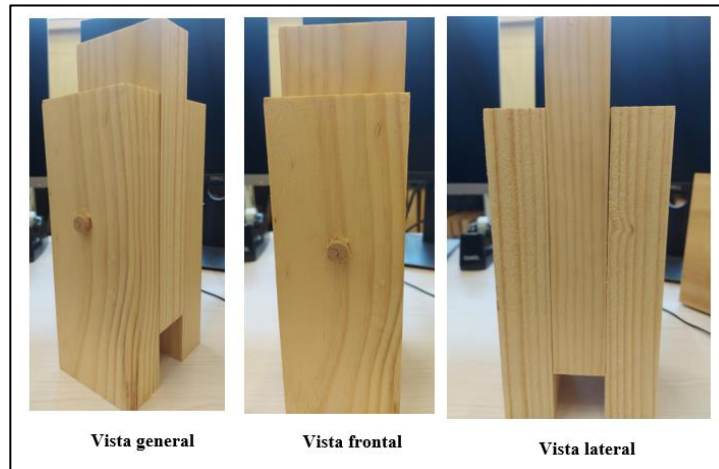


Imagen n°12: Probeta de tarugo simple  
Fuente: Elaboración propia



Imagen n°13: Montaje de probeta de tarugos simple  
Fuente: Elaboración propia

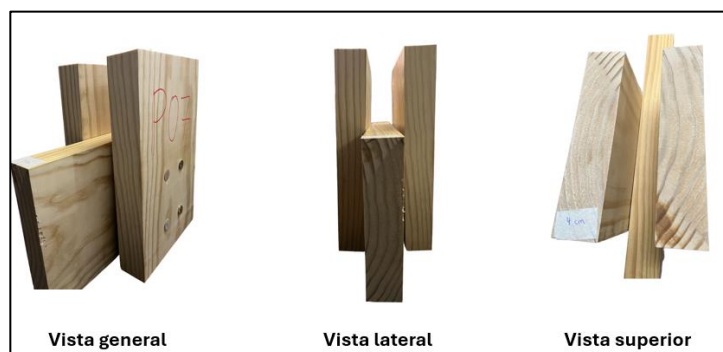


Imagen n°14: Probeta de tarugos cuádruple  
Fuente: Elaboración propia



Imagen n°15: Montaje de probeta de tarugos cuádruple  
 Fuente: Elaboración propia

### 2.4.3. Definición de ecuaciones para determinar cargas, deslizamientos y módulos

Al final del ensayo se deben calcular y registrar los siguientes parámetros:

1. Carga máxima, correspondiente a la carga máxima de soporte del elemento.
2. Carga máxima estimada, también llamada fuerza estimada, la cual corresponde a la carga máxima del ensayo 0.
3. Deslizamiento inicial:  $v_i = v_{04}$ , con  $v_{04}$  como el deslizamiento al 40% de la carga máxima.
4. Deslizamiento inicial modificado:  $v_{i,mod} = \frac{4}{3}(v_{04} - v_{01})$ , con  $v_{04}$  como el deslizamiento al 40% de la carga máxima y  $v_{01}$  como el deslizamiento al 10% de la carga máxima.
5. Deslizamiento conjunto:  $v_s = v_i - v_{i,mod}$
6. Deslizamiento elástico:  $v_e = \frac{2}{3}(v_{14} + v_{24} - v_{11} - v_{12})$
7. Módulo inicial de deslizamiento:  $k_i = 0.4 \frac{f_{est}}{v_i}$
8. Módulo de deslizamiento:  $k_s = 0.4 \frac{f_{est}}{v_{i,mod}}$
9. Deslizamiento al 60% de la fuerza máxima:  $v_{06}$
10. Deslizamiento modificado al 60% de la fuerza máxima:  $v_{06,mod} = v_{06} - v_{24} + v_{i,mod}$
11. Deslizamiento al 80% de la fuerza máxima, corresponde a  $v_{08}$

Deslizamiento modificado al 80% de la fuerza máxima:  $v_{08,mod} = v_{08} - v_{24} + v_{i,mod}$

## 2.5. ASPECTOS GENERALES NORMA EN 408

### 2.5.1. Descripción y equipos

La norma específica métodos de ensayo para determinar las siguientes propiedades de la madera estructural: módulo de elasticidad en flexión, módulo de corte, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad en tensión paralela a la fibra, fuerza de tensión paralela a la fibra y resistencia a la compresión paralela a la fibra.

Los métodos se aplican a formas rectangulares y circulares (de sección transversal sustancialmente constante) de madera maciza sin unir o madera unida.

Con respecto a la determinación del módulo de elasticidad en flexión, se establece que la probeta tendrá una longitud mínima de 19 veces el canto de la sección. En cuanto al procedimiento la pieza de prueba se cargará simétricamente en flexión en dos puntos en un lapso de 18 veces la profundidad como se muestra en la figura.

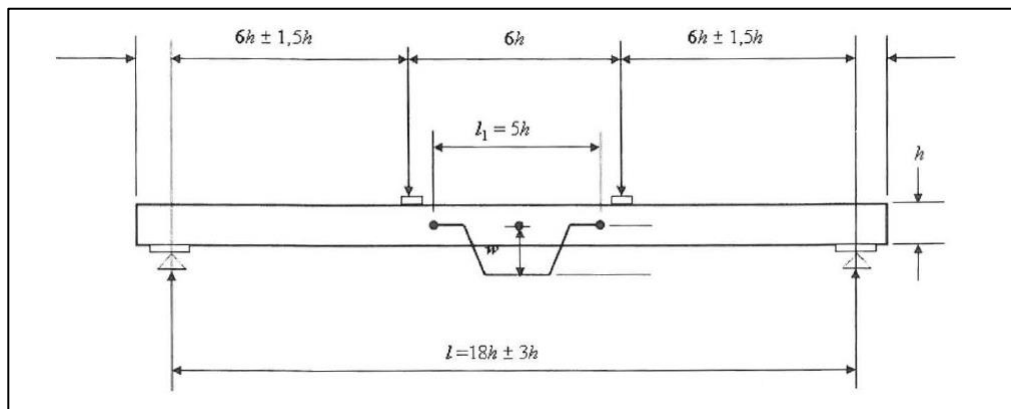


Imagen n°16: Esquema espaciamentos de probeta en equipo  
 Fuente: Norma EN 408

La probeta deberá estar simplemente apoyada. La carga se aplicará a una velocidad constante, el movimiento del cabezal de carga no deberá ser superior a  $(0.003 h)$  mm/s.

Determinación del módulo de corte corresponde a la determinación del módulo de elasticidad en flexión global  $E_m$  y el módulo de elasticidad local  $E_{m,local}$  para la misma longitud de la pieza de prueba.

El equipo de carga utilizado será capaz de medir la carga con una precisión del 1% de la carga aplicada a la probeta, o para cargas inferiores al 10% de la carga máxima aplicada con una precisión del 0.1% de la carga máxima aplicada.

Al expresar los resultados se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Se debe realizar un gráfico para cada probeta, el cual tenga en eje de abscisas la deformación y en el eje de coordenadas la fuerza en Newtons aplicada.
2. A partir del gráfico anterior, revisar el coeficiente de correlación de los datos, este debe ser mayor o igual a 0.99 para un análisis correcto.
3. Una vez verificado lo anterior, utilizar la sección entre  $0.1 F_{m\acute{a}x}$  y  $0.4 F_{m\acute{a}x}$  para el análisis de regresión. En caso contrario se deberá utilizar el rango entre  $0.2 F_{m\acute{a}x}$  y  $0.3 F_{m\acute{a}x}$ .

### 2.5.2. Muestras

En consideración de las descripciones realizadas para las muestras, para el ensayo. A continuación, se presentan imágenes reales de las probetas utilizadas y sus respectivos montajes.

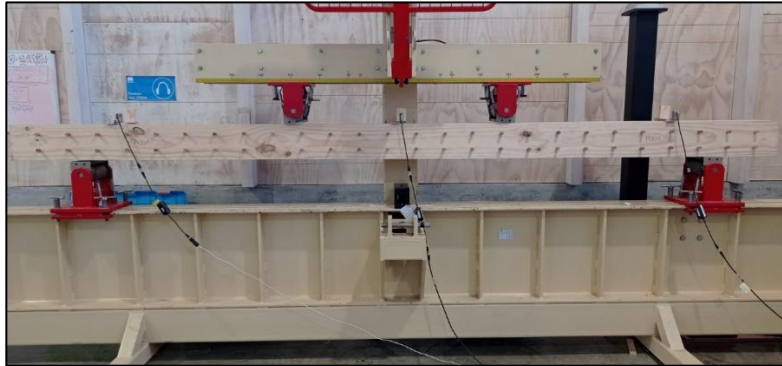


Imagen n°17: Viga continua DLT  
 Fuente: Elaboración propia

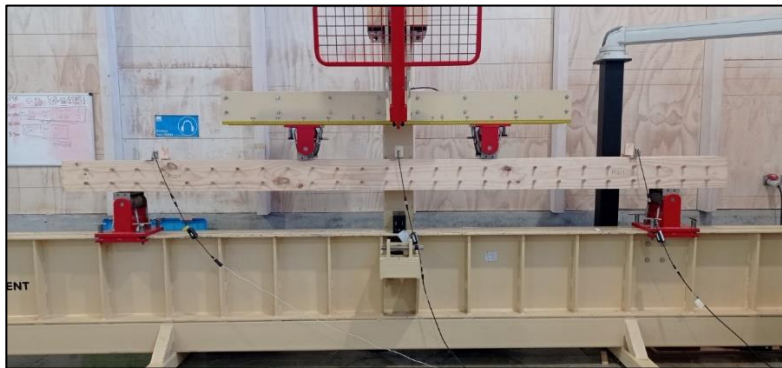


Imagen n°18: Viga con empalme DLT  
 Fuente: Elaboración propia

### 2.5.3. Definición módulos de elasticidad

Al final del ensayo se deben calcular y registrar los siguientes parámetros:

1. Módulo de elasticidad global:  $E_m = \frac{\alpha l_1^2 (f_2 - f_1)}{16l(w_2 - w_1)}$
2. Módulo de elasticidad local:  $E_{m,local} = \frac{3\alpha l^2 - 4a^3}{abh^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{f_2 - f_1} - \frac{6a}{5gbh} \right)}$

Donde:

- $f_2 - f_1$ : es un incremento de carga en newtons en la línea de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor; y
- $w_2 - w_1$ : es el incremento de deformación en milímetros correspondiente a  $f_2 - f_1$
- $\alpha$ : Es la distancia entre el cabezal de carga y el apoyo más cercano.
- $l$ : Corresponde a la distancia entre los puntos medios de los apoyos.
- $b$ : Ancho de la sección.

- $h$ : Altura total de la sección.
- $I$ : Inercia del elemento.
- $G$ : Módulo de corte, en Newtons por milímetros cuadrados

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. DETERMINACIÓN DE DESLIZAMIENTOS, SUS MÓDULOS Y TENSIONES ASOCIADAS SEGÚN EN 26891

##### 3.1.1. Tarugo simple

Tabla n°1: Deformación en puntos de interés tarugo simple compresión perpendicular

PROBETAS	DESLIZAMIENTOS (mm)							
	v01	v04	v14	v11	v21	v24	V06	V08
P 001	0.62	0.94	0.94	0.76	0.76	0.95	1.17	1.48
P 002	0.58	0.99	1.00	0.80	0.80	1.01	1.32	1.75
P 003	0.64	1.19	1.20	0.94	0.94	1.23	1.58	2.05
P 004	0.93	1.46	1.46	1.18	1.17	1.46	1.80	2.30
P 005	0.78	1.48	1.48	1.19	1.18	1.49	1.91	2.63
P 006	0.69	1.28	1.29	1.00	0.99	1.30	1.73	4.00
P 007	1.02	1.62	1.62	1.34	1.34	1.64	2.05	2.95
P 008	0.57	0.95	0.96	0.79	0.79	0.97	1.25	1.69
P 009	0.59	0.91	0.92	0.72	0.72	0.92	1.17	1.54
P 010	0.73	1.14	1.15	0.92	0.91	1.16	1.49	2.07
P 011	0.68	1.01	1.02	0.80	0.80	1.03	1.24	1.49
P 012	0.62	0.98	0.99	0.78	0.78	0.99	1.27	1.73
P 013	0.61	1.06	1.07	0.82	0.82	1.07	1.38	1.84
P 014	1.63	2.02	2.03	1.83	1.83	2.04	2.26	2.51
P 015	0.64	1.04	1.05	0.81	0.81	1.05	1.31	1.66
P 016	0.58	1.01	1.02	0.80	0.79	1.03	1.34	2.81
P 017	0.69	1.06	1.07	0.86	0.85	1.08	1.35	1.81
P 018	0.58	0.94	0.96	0.74	0.74	0.96	1.23	1.62
P 019	0.59	1.07	1.08	0.87	0.87	1.09	1.44	3.36
P 020	0.62	0.95	0.96	0.75	0.74	0.97	1.27	1.79
P 021	0.66	1.10	1.10	0.86	0.86	1.11	1.45	2.00
P 022	0.64	1.11	1.12	0.88	0.88	1.13	1.43	1.96
P 023	0.64	0.97	0.98	0.81	0.80	0.99	1.20	1.51
P 024	0.63	1.23	1.25	0.90	0.89	1.26	1.79	5.43
P 025	0.65	1.28	1.28	1.03	1.03	1.29	1.64	2.16
P 026	0.67	1.12	1.13	0.92	0.91	1.14	1.41	1.83
P 027	0.65	1.12	1.12	0.86	0.86	1.13	1.42	1.79
P 028	0.80	1.42	1.43	1.13	1.12	1.44	1.88	2.90
P 029	0.62	0.91	0.92	0.74	0.74	0.92	1.12	1.39
P 030	0.67	1.24	1.26	0.96	0.96	1.26	1.68	2.72

PROMEDIO	0.70	1.15	1.16	0.93	0.92	1.17	1.49	2.23
MINIMO	0.57	0.91	0.92	0.72	0.72	0.92	1.12	1.39
MÁXIMO	1.63	2.02	2.03	1.83	1.83	2.04	2.26	5.43
RANGO	1.05	1.11	1.11	1.12	1.12	1.11	1.14	4.04
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.20	0.25	0.24	0.23	0.23	0.25	0.29	0.87
CV %	28.78	21.29	21.03	24.60	24.66	21.03	19.29	38.94

Fuente: Elaboración propia

Se presentan valores de deslizamientos en los puntos de interés presentes en la norma, con sus respectivos promedios representativos de cada uno, valores mínimos y máximos presentes, rango de los datos, desviación estándar y coeficiente de variación, en donde este último para “Tabla n°1: Deformación en puntos de interés tarugo simple compresión perpendicular” nos representa un valor menor al 50%, lo que indica que los datos son homogéneos y representativos.

Tabla n°2: Parámetros según EN 26891 tarugo simple compresión perpendicular

Probetas	PARÁMETROS							
	F max (N)	vi (mm)	vi, mod (mm)	ve (mm)	ki (N/mm)	ks(N/mm)	v06 mod (mm)	v08 mod (mm)
P 001	7141	0.94	0.42	0.25	2994.04	6637.14	0.63	0.95
P 002	8374	0.99	0.55	0.27	2832.84	5084.64	0.76	1.19
P 003	6497	1.19	0.74	0.37	2354.24	3799.31	1.12	1.59
P 004	7491	1.46	0.71	0.38	1920.62	3951.40	1.01	1.51
P 005	6099	1.48	0.93	0.40	1892.97	3025.14	1.40	2.13
P 006	5846	1.28	0.79	0.41	2186.21	3536.78	1.29	3.57
P 007	5964	1.62	0.80	0.38	1729.86	3482.26	1.28	2.19
P 008	8612	0.95	0.50	0.24	2949.67	5553.92	0.68	1.12
P 009	6589	0.91	0.43	0.27	3068.47	6514.24	0.70	1.07
P 010	5858	1.14	0.55	0.32	2453.57	5061.53	0.94	1.53
P 011	10343	1.01	0.44	0.30	2765.37	6382.60	0.45	0.70
P 012	5918	0.98	0.47	0.28	2870.78	5911.14	0.80	1.26
P 013	6792	1.06	0.60	0.33	2651.88	4676.24	0.92	1.38
P 014	8740	2.02	0.52	0.27	1387.54	5353.31	0.64	0.89
P 015	7461	1.04	0.54	0.32	2687.81	5197.22	0.77	1.12
P 016	5304	1.01	0.57	0.31	2771.08	4893.52	0.98	2.44
P 017	6620	1.06	0.48	0.29	2653.69	5803.21	0.77	1.23
P 018	7122	0.94	0.48	0.29	2966.71	5793.85	0.75	1.14
P 019	5793	1.07	0.63	0.29	2616.60	4413.94	1.05	2.97
P 020	7173	0.95	0.45	0.29	2935.46	6222.19	0.74	1.26
P 021	5998	1.10	0.59	0.33	2551.14	4774.76	0.98	1.53
P 022	5929	1.11	0.63	0.33	2525.93	4444.80	1.00	1.52
P 023	8425	0.97	0.44	0.24	2888.80	6328.57	0.58	0.89
P 024	5533	1.23	0.80	0.47	2276.42	3505.54	1.45	5.09
P 025	6962	1.28	0.84	0.35	2190.28	3317.15	1.20	1.71
P 026	6450	1.12	0.61	0.29	2493.70	4609.24	0.91	1.33
P 027	8230	1.12	0.63	0.35	2503.88	4441.84	0.83	1.21
P 028	5483	1.42	0.82	0.41	1973.05	3403.12	1.36	2.39
P 029	6551	0.91	0.39	0.24	3065.14	7185.65	0.61	0.88
P 030	5433	1.24	0.76	0.40	2251.10	3670.09	1.28	2.32
PROMEDIO	6824.41	1.15	0.60	0.32	2513.63	4899.14	0.93	1.67
MINIMO	5304.01	0.91	0.39	0.24	1387.54	3025.14	0.45	0.70
MÁXIMO	10342.80	2.02	0.93	0.47	3068.47	7185.65	1.45	5.09
RANGO	5038.79	1.11	0.54	0.24	1680.93	4160.51	1.00	4.39
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1203.77	0.25	0.15	0.06	426.50	1156.02	0.27	0.93
CV %	17.64	21.29	24.55	18.46	16.97	23.60	29.05	55.39

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de caracterización corresponden:  $F_{\max}$  como la carga máxima que resiste la probeta (N), en la cual se obtuvieron 6824 N en promedio para las 30 probetas de un tarugo, deslizamiento inicial de 1.15 mm en promedio, con un mínimo de 0.91 mm y máximo 2.02 mm. En cuanto a los módulos de deslizamientos (corrimiento) se observa el promedio del módulo de deslizamiento inicial  $k_i$  2513.6 N/mm, y el módulo de deslizamiento modificado  $k_s$  4899 N/mm.

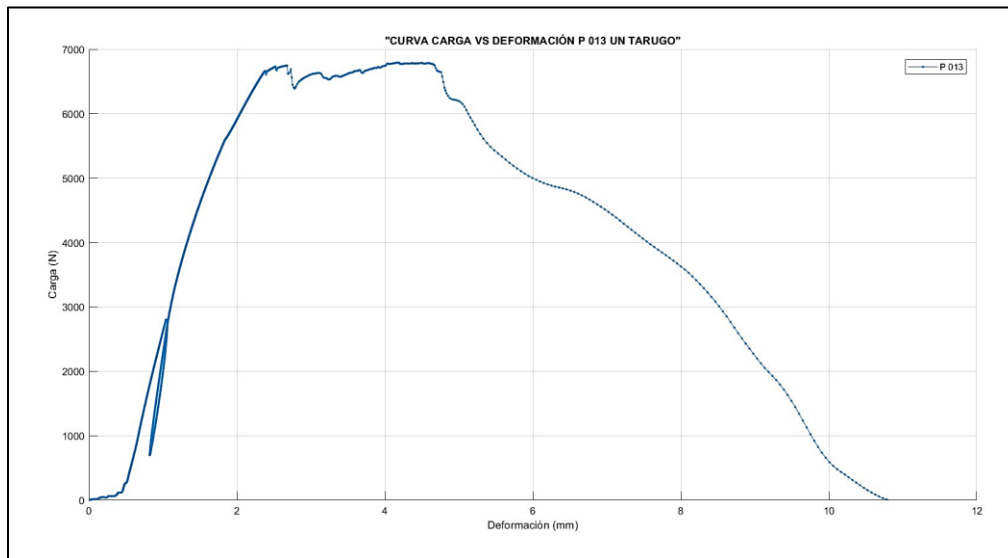


Gráfico n°1: “Curva carga vs deformación P013 un tarugo”

Fuente: Elaboración propia

Gráfico correspondiente a carga aplicada (N) y sus respectivas deformaciones (mm) para valor promedio de las probetas, dado que la presente probeta, por medio del análisis estadístico es determinada como la representativa de las muestras. Se observa curva similar a la esperada en “Imagen n°11: Fases de carga ensayo” (b), lo que indica la ausencia de errores al ensayar.

### 3.1.2. Tarugo cuádruple

Tabla n°3: Deformación en puntos de interés tarugo cuádruple ensayo compresión perpendicular

PROBETAS	DESPLAZAMIENTOS (mm)							
	v01	v04	v14	v11	v21	v24	V06	V08
P 001	-	-	-	-	-	-	-	-
P 002	-	-	-	-	-	-	-	-
P 003	1.04	2.05	2.07	1.42	1.41	2.08	2.63	3.73
P 004	0.92	1.72	1.74	1.13	1.13	1.75	2.36	3.30
P 005	0.97	1.86	1.88	1.23	1.23	1.89	2.48	3.26
P 006	0.92	1.86	1.72	1.14	1.14	1.73	2.25	2.87
P 007	0.80	1.48	1.50	0.94	0.93	1.50	1.99	2.60
P 008	0.99	1.78	1.79	1.21	1.21	1.80	2.31	2.96
P 009	0.94	1.78	1.80	1.15	1.14	1.81	2.44	3.41
P 010	0.91	1.68	1.69	1.12	1.12	1.70	2.25	5.39
P 011	0.88	1.62	1.64	1.05	1.04	1.64	2.21	3.07
P 012	1.03	1.84	1.86	1.26	1.26	1.87	2.38	3.05
P 013	-	-	-	-	-	-	-	-
P 014	0.91	1.70	1.72	1.15	1.15	1.73	2.27	3.02
P 015	0.91	1.71	1.74	1.13	1.13	1.75	2.34	3.62
P 016	1.01	1.87	1.89	1.30	1.30	1.89	2.43	3.10
P 017	0.88	1.60	1.61	1.07	1.07	1.62	2.11	2.71
P 018	0.99	1.86	1.87	1.29	1.29	1.88	2.40	3.02
P 019	1.03	1.92	1.94	1.32	1.31	1.94	2.46	3.19
P 020	0.96	1.95	1.97	1.27	1.26	1.98	2.57	3.43
P 021	0.97	1.94	1.96	1.26	1.25	1.97	2.67	4.96
P 022	0.97	2.02	2.04	1.27	1.26	2.05	2.76	5.74
P 023	1.17	2.07	2.08	1.47	1.46	2.09	2.68	3.60
P 024	1.28	2.82	2.84	2.10	2.09	2.89	3.58	4.43
P 025	1.16	2.22	2.23	1.50	1.50	2.24	2.93	4.00
P 026	1.03	1.93	1.93	1.26	1.25	1.94	2.62	4.71
P 027	0.91	1.65	1.67	1.11	1.10	1.67	2.19	2.94
P 028	1.02	1.84	1.85	1.27	1.27	1.86	2.36	3.10
P 029	1.09	2.06	2.07	1.33	1.32	2.09	2.76	3.77
P 030	1.04	1.90	1.91	1.24	1.24	1.92	2.55	3.40
PROMEDIO	0.99	1.88	1.89	1.26	1.25	1.90	2.48	3.57
MINIMO	0.80	1.48	1.50	0.94	0.93	1.50	1.99	2.60
MÁXIMO	1.28	2.82	2.84	2.10	2.09	2.89	3.58	5.74
RANGO	0.48	1.34	1.34	1.16	1.16	1.39	1.59	3.14
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0.10	0.25	0.25	0.21	0.21	0.26	0.31	0.81
CV %	10.16	13.33	13.39	16.65	16.64	13.66	12.46	22.78

Fuente: Elaboración propia

*Nota: P 001, P002 Y P 013 presentaron errores en realización de ensayo por lo que se descartan del análisis.*

Se proporcionan los valores de deslizamientos en los puntos de interés según lo establecido en la normativa, acompañados de sus respectivos promedios representativos. Además, se incluyen los valores mínimos y máximos observados, el rango de los datos, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Es importante destacar que para la "Tabla n°3: Deformación en puntos de interés tarugo cuádruple ensayo compresión perpendicular", el coeficiente de variación es inferior al 50%, lo que indica que los datos son uniformes y representativos.

Tabla n°4: Parámetros según EN 26891 tarugos cuádruple

Probetas	PARÁMETROS							
	F max (N)	vi (mm)	vi, mod (mm)	ve (mm)	ki (N/mm)	ks(N/mm)	v06 mod (mm)	v08 mod (mm)
P 001	28479.40	-	-	-	-	-	-	-
P 002	23544.10	-	-	-	-	-	-	-
P 003	23379.00	2.05	1.34	0.87	5465.61	8331.68	1.90	3.00
P 004	26967.30	1.72	1.07	0.82	6495.10	10495.04	1.68	2.62
P 005	25433.60	1.86	1.18	0.87	6025.81	9501.29	1.77	2.55
P 006	29575.80	1.86	1.25	0.78	6025.81	8971.81	1.77	2.39
P 007	32305.30	1.48	0.91	0.75	7542.85	12276.18	1.40	2.01
P 008	32003.50	1.78	1.06	0.79	6290.19	10576.65	1.57	2.21
P 009	25068.90	1.78	1.12	0.87	6281.64	10007.83	1.75	2.72
P 010	23038.00	1.68	1.02	0.77	6671.50	10945.32	1.57	4.72
P 011	24791.90	1.62	0.99	0.79	6905.65	11359.51	1.55	2.41
P 012	28673.30	1.84	1.08	0.81	6084.62	10349.35	1.59	2.27
P 013	27030.40	-	-	-	-	-	-	-
P 014	27870.50	1.70	1.05	0.77	6586.45	10621.09	1.60	2.34
P 015	26325.80	1.71	1.07	0.82	6532.10	10497.77	1.66	2.94
P 016	28660.60	1.87	1.14	0.78	5992.25	9828.70	1.68	2.34
P 017	27971.90	1.60	0.95	0.72	7006.25	11732.74	1.44	2.04
P 018	26681.20	1.86	1.15	0.78	6035.98	9697.45	1.67	2.29
P 019	26755.20	1.92	1.19	0.83	5823.81	9449.37	1.71	2.43
P 020	24054.00	1.95	1.32	0.95	5731.92	8462.01	1.91	2.77
P 021	24892.20	1.94	1.29	0.95	5781.60	8693.47	1.99	4.28
P 022	21741.70	2.02	1.40	1.04	5537.54	7986.11	2.11	5.09
P 023	24981.70	2.07	1.19	0.83	5416.62	9375.60	1.78	2.70
P 024	27716.40	2.82	2.05	1.02	3971.21	5460.68	2.74	3.59
P 025	24247.70	2.22	1.41	0.98	5054.22	7928.67	2.10	3.18
P 026	22035.90	1.93	1.20	0.91	5812.17	9350.79	1.87	3.97
P 027	23800.90	1.65	0.98	0.75	6789.69	11389.92	1.50	2.25
P 028	25013.10	1.84	1.09	0.78	6091.26	10308.67	1.59	2.32
P 029	23038.20	2.06	1.30	1.01	5439.01	8640.70	1.97	2.98
P 030	24635.50	1.90	1.14	0.90	5885.29	9787.25	1.77	2.62
PROMEDIO	26023.77	1.88	1.18	0.85	6047.26	9704.65	1.76	2.85
MINIMO	21741.70	1.48	0.91	0.72	3971.21	5460.68	1.40	2.01
MÁXIMO	32305.30	2.82	2.05	1.04	7542.85	12276.18	2.74	5.09
RANGO	10563.60	1.34	1.14	0.32	3571.64	6815.50	1.35	3.08
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	2666.18	0.25	0.22	0.09	697.39	1416.55	0.27	0.81
CV %	10.25	13.33	18.49	10.67	11.53	14.60	15.30	28.26

Fuente: Elaboración propia

*Nota: P 001, P002 Y P 013 presentaron errores en realización de ensayo por lo que se descartan del análisis.*

Los parámetros de caracterización a considerar corresponden a:  $F_{m\acute{a}x}$ , el cual representa la carga máxima que la probeta puede resistir, medida en Newtons (N). Para las 27 probetas de cuatro tarugos, se obtuvo un promedio de 26024 N, con un deslizamiento inicial promedio de 1.88 mm. El deslizamiento inicial mínimo fue de 1.48 mm y el máximo de 2.82 mm.

Por otra parte, para los módulos de deslizamiento se observa un promedio del módulo de deslizamiento inicial ( $k_i$ ) de 6047 N/mm, y del módulo de deslizamiento modificado ( $k_s$ ) de 9705 N/mm.

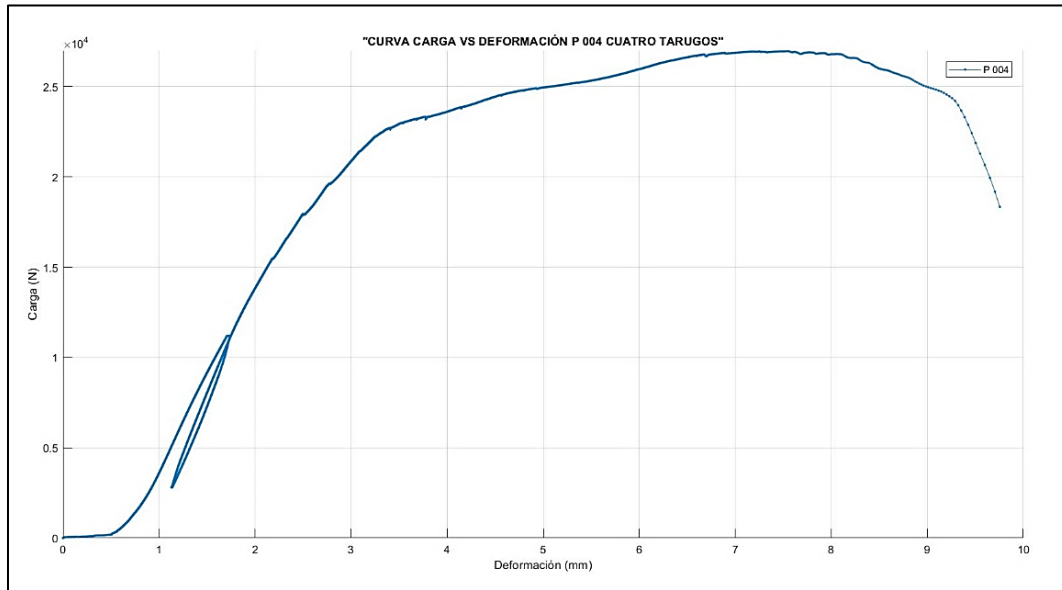


Gráfico n°2: “Curva carga vs deformación P004 cuatro tarugos”

Fuente: Elaboración propia

Gráfico correspondiente a carga aplicada (N) y sus respectivas deformaciones (mm) para valor promedio de las probetas, dado que la presente probeta, por medio del análisis estadístico es determinada como la representativa de las muestras. Se observa curva similar a la esperada en “Imagen n°11: Fases de carga ensayo” (b).

### 3.2. DETERMINACIÓN DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD, MOMENTO FLECTOR Y TENSION DE ROTURA EN ELEMENTOS CONTINUOS Y CON EMPALME SEGÚN EN 408

Tabla n°5: “Ensayo EN 408; flexión en laminación continua”

VIGA	LAMINACIÓN CONTINUA			
	EI, global [kN-m <sup>2</sup> ]	EI, local [kN-m <sup>2</sup> ]	MF [kN-m]	Fmáx [kN]
PC 001	1214	1359	56.0	101.8
PC 002	1186	1328	39.7	72.2
PC 003	1255	1402	50.4	90.8
PC 004	1233	1379	51.2	93.0
PC 005	1399	1555	52.3	95.1
<b>PROMEDIO</b>	1258	1405	49.9	90.6
<b>MINIMO</b>	1186	1328	39.7	72.2
<b>MÁXIMO</b>	1399	1555	56.0	101.8
<b>RANGO</b>	213	226	16.3	29.6
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>	83	88	6.1	11.1
<b>CV %</b>	7	6	12.2	12.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla n°6: “Ensayo EN 408; flexión en laminación con empalme”

VIGA	LAMINACIÓN CON EMPALME			
	El, global [kN-m <sup>2</sup> ]	EI, local [kN-m <sup>2</sup> ]	MF [kN-m]	Fmáx [kN]
PE 001	1061	1194	37.2	67.6
PE 002	992	1119	45.8	83.3
PE 003	956	1080	33.5	60.9
PE 004	979	1106	47.9	87.0
PE 005	987	1114	50.8	92.3
<b>PROMEDIO</b>	995	1123	43.0	78.0
<b>MINIMO</b>	956	1080	33.0	61.0
<b>MÁXIMO</b>	1061	1194	50.8	92.3
<b>RANGO</b>	106	114	17.3	31.4
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>	40	43	7.4	13.4
<b>CV %</b>	4	4	17.1	17.1

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las tablas n°5 y n°6 se aprecia una diferencia entre los elementos continuos y con empalme, correspondiendo 20% más el módulo de elasticidad en flexión global  $[EI, global (kN-m^2)]$  y local  $[EI, local (kN-m^2)]$  para vigas continuas a que con empalme. Con respecto a momento flector  $[MF (kN-m)]$  de las vigas nuevamente la laminación continua es mayor que la laminación con empalme, esta vez en 14%. Por último, se considera la fuerza máxima  $[Fmáx (kN)]$  que resisten los elementos, en la que se observa que la viga con laminación continua arroja 14% más de resistencia a la rotura que las vigas con laminación con empalme.

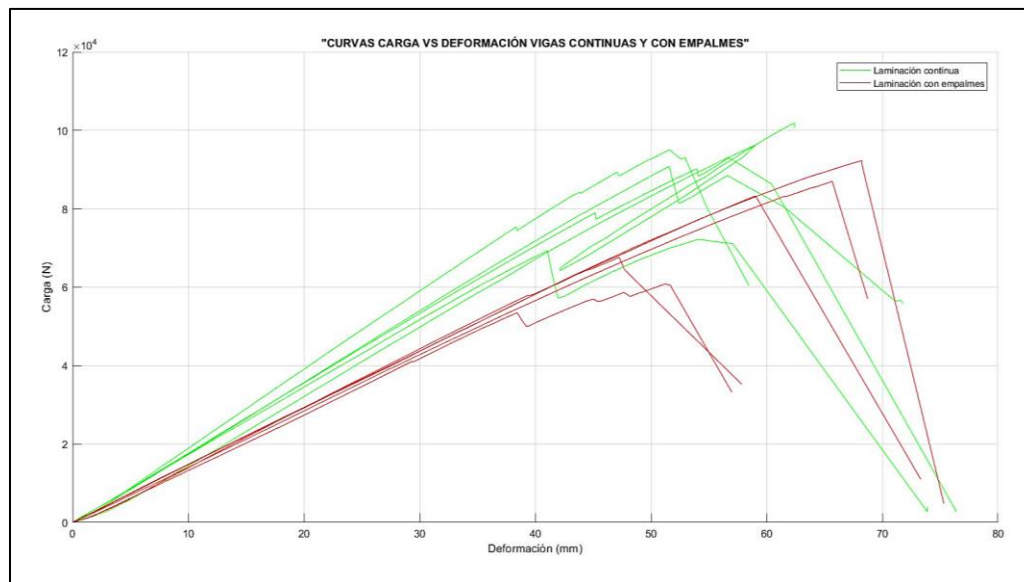


Gráfico n°3: Curvas carga vs deformación vigas continuas y con empalmes

Fuente: Elaboración propia

Dado el análisis realizado a partir de las tablas n°5 y n°6 se presenta gráfico de todas las probetas correspondientes a vigas de laminación continua (verde) y laminación con empalme (rojo), en donde se aprecia la diferencia entre ambas, ubicando así las vigas de laminación continua por sobre las con empalme.

#### 4. DISCUSIÓN

En el presente apartado se considerarán los resultados obtenidos anteriormente en conjunto al Informe Técnico N°253 del Instituto Forestal “Caracterización mecánica de la madera laminada clavada fabricada con madera aserrada estructural de pino radiata”

##### 4.1. COMPARACIÓN DE DLT Y NLT SEGÚN RESULTADOS DE EN 26891

Considerando “Tabla n°4: Parámetros según EN 26891 tarugo cuádruple compresión perpendicular” en conjunto a “Parámetros de deslizamiento obtenidos del ensayo de compresión perpendicular”.

Tabla n°7: Parámetros de deslizamiento obtenidos del ensayo de compresión perpendicular

Cuadro N° 6 PARÁMETROS DE DESLIZAMIENTO OBTENIDOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN PERPENDICULAR							
Probeta N°	Deformación en cada estado de carga						
	V <sub>i</sub> [mm]	V <sub>mod</sub> [mm]	V <sub>e</sub> [mm]	k <sub>i</sub> [N/mm]	k <sub>c</sub> [N/mm]	V <sub>0,mod</sub> [mm]	V <sub>0,mod</sub> [mm]
1	1,11	1,14	0,66	3,965	3,844	3,68	8,35
2	1,01	1,03	0,57	4,346	4,275	2,51	7,02
3	1,07	1,11	0,63	4,123	3,961	2,90	7,71
4	0,97	0,99	0,61	4,534	4,458	2,53	6,75
5	1,13	1,16	0,66	3,893	3,792	4,34	8,30
6	1,29	1,38	0,72	3,416	3,189	4,68	8,85
7	1,13	1,20	0,65	3,909	3,663	3,74	7,18
8	1,75	1,97	0,72	2,517	2,236	6,28	10,92
9	1,39	1,52	0,68	3,172	2,904	5,42	10,08
10	1,61	1,84	0,68	2,725	2,391	6,83	11,36
11	1,62	1,85	0,64	2,722	2,383	6,87	12,13
12	1,28	1,27	0,65	3,439	3,477	3,84	8,11
13	1,39	1,50	0,70	3,170	2,941	5,38	8,43
14	1,31	1,39	0,68	3,371	3,158	4,93	9,05
15	1,47	1,59	0,76	3,002	2,760	5,35	9,92
16	1,15	1,23	0,59	3,822	3,575	2,74	6,73
17	1,23	1,35	0,70	3,564	3,256	4,74	8,62
18	0,87	0,89	0,51	5,034	4,940	2,75	6,44
19	1,47	1,55	0,77	2,991	2,831	4,51	9,57
20	1,23	1,27	0,68	3,585	3,467	4,05	8,28
21	1,51	1,72	0,67	2,909	2,556	5,38	10,24
22	1,16	1,27	0,64	3,788	3,464	3,71	7,68
23	1,38	1,34	0,70	3,197	3,283	4,72	9,10
24	1,43	1,56	0,72	3,067	2,829	5,42	9,30
25	1,88	2,00	0,83	2,343	2,197	6,19	10,84
26	2,10	2,45	0,91	2,087	1,795	7,57	13,11
27	1,23	1,14	0,61	3,586	3,844	4,12	9,16
28	1,48	1,68	0,69	2,966	2,617	5,47	10,28
29	2,20	2,30	0,78	2,003	1,914	7,85	15,50
30	1,33	1,43	0,72	3,315	3,087	5,20	8,94
Estadístico	Deformación en cada estado de carga						
	V <sub>i</sub> [mm]	V <sub>mod</sub> [mm]	V <sub>e</sub> [mm]	k <sub>i</sub> [N/mm]	k <sub>c</sub> [N/mm]	V <sub>0,mod</sub> [mm]	V <sub>0,mod</sub> [mm]
Promedio	1,37	1,47	0,70	3,352	3,170	4,73	9,20
Valor mínimo	0,87	0,89	0,51	2,003	1,795	2,45	6,37
Valor máximo	2,20	2,45	0,91	5,034	4,940	7,56	15,20
Rango	1,32	1,56	0,40	3,030	3,145	5,10	8,83
Des. estándar	0,31	0,38	0,09	696	751	1,44	1,98
C. de V. (%)	23	26	13	21	24	30	22
Tamaño muestra	30	30	30	30	30	30	30
5° Percentil	0,96	0,96	0,56	2,055	1,860	2,50	6,57

Fuente: INFOR, 2022

El análisis comparativo de los parámetros principales que se obtienen de norma corresponde en su mayoría a los deslizamientos determinados, dado que se utilizan para caracterizar el funcionamiento del tarugo con madera aserrada de pino radiata, por lo que, la fuerza máxima promedio de resistencia en compresión perpendicular para DLT con cuatro tarugos corresponde a 26023 N (6506 N cada tarugo), en cambio para NLT con ocho clavos se obtiene 10320 N (1290 N para cada clavo) con coeficiente de varianza de 10% para ambos casos. La diferencia entre ambos corresponde a 40% (DLT mayor a NLT).

El módulo de deslizamiento inicial  $[v_i (mm)]$  de DLT corresponde a 37% más que NLT, lo que se reduce a que el DLT dentro de la primera fase de carga se deforma un 37% más al 40% de la fuerza estimada para cada ensayo. Por otra parte, el módulo de deslizamiento inicial modificado  $[v_{i,mod}(mm)]$  de DLT es 20% menor al NLT, lo que señala que el acomodo inicial de la probeta de DLT es mayor a que el NLT, por lo que, se estima que el funcionamiento del DLT comienza más tardío que el NLT.

En cuanto al deslizamiento elástico  $[v_e (mm)]$  DLT es 21% mayor a NLT, esto es determinado principalmente por las diferentes propiedades de deformaciones presentes en ambos elementos de unión (clavo y tarugo).

Con respecto a los parámetros de corrimiento se presenta lo siguiente:

Tabla n°8: Comparación factores de corrimiento DLT y NLT

Factor corrimiento	Valores [N/mm]	
	DLT	NLT
EN 408- ki	1512	257
EN 408- ks	2426	233

Fuente: Elaboración propia

Para DLT se presentan valores mayores a que NLT, lo que indica la mayor capacidad de carga por cada unidad de deformación. Si bien en Chile existe la normativa correspondiente a factor de corrimiento (NCh 1198) para clavos (NLT) estos no pueden ser comparados debido a que aún no existe dicha normativa para tarugos o elementos de sujeción de madera (DLT).

Por último, los parámetros obtenidos de  $[v_{06,mod}]$  y  $[v_{08,mod} (mm)]$  del DLT son menores en un 63% y 69% respectivamente en comparación con NLT, minoría considerando los datos de deslizamientos que se presentan en los ensayos de ambos elementos.

#### 4.2. COMPARACIÓN DE DLT Y NLT SEGÚN RESULTADOS DE EN 408

Tabla n°9: Ensayo de flexión viga laminada clavada, laminación vertical

Viga	Laminación vertical							
	Laminación continua				Laminación con empalme			
	EI [kN-m <sup>2</sup> ]	EI <sub>local</sub> [kN-m <sup>2</sup> ]	MF [kN-m]	F <sub>max</sub> [kN]	EI [kN-m <sup>2</sup> ]	EI <sub>local</sub> [kN-m <sup>2</sup> ]	MF [kN-m]	F <sub>max</sub> [kN]
1	1.084	1.225	51,0	93,3	826	517	41,5	74,8
2	943	1.559	51,0	93,4	780	651	52,4	94,4
3	989	1.140	50,1	91,7	865	626	37,9	68,3
4	925	1.261	47,7	87,3	874	770	28,3	51,1
5	1.205	1.592	48,5	88,8	762	618	42,3	76,2
Estadística	EI [kN-m <sup>2</sup> ]	EI <sub>local</sub> [kN-m <sup>2</sup> ]	MF [kN-m]	F <sub>max</sub> [kN]	EI [kN-m <sup>2</sup> ]	EI <sub>local</sub> [kN-m <sup>2</sup> ]	MF [kN-m]	F <sub>max</sub> [kN]
Promedio	1.025	1355	49,6	90,9	818	818	39,2	70,6
Valor mínimo	925	1140	47,7	87,3	761	761	28,3	51,1
Valor máximo	1.205	1592	51,0	93,4	875	875	52,4	94,4
Rango	280	453	3,3	6,1	114	114	24,1	43,4
Des. estándar	114	206	1,5	2,8	54	54,6	8,7	15,6
C. de V. (%)	11	15	3	3	7	7	22	22
Tamaño muestra	5	5	5	5	5	5	5	5

EI: Rigidez; MF: Momento flector; F<sub>max</sub>: Carga máxima alcanzada

Fuente: INFOR, 2022

Las vigas de laminación continua de DLT presenta 19% más de rigidez global y 4% más en rigidez local que el NLT. En cuanto al momento flector estos varían en 0.3 kN-m, lo que equivale a 0.6%. La fuerza máxima alcanzada en promedio varía 0.3%, siendo mayor el NLT por 0.3 kN.

Para las vigas con laminación con empalme en todos sus parámetros el DLT es mayor, siendo así la rigidez global 18%, rigidez local 27%, momento flector 9% y la fuerza máxima de soporte en 10% por sobre el NLT de laminación con empalme.

De lo anterior y según los parámetros utilizados se estima que ambos elementos, tanta madera aserrada laminada con tarugos y madera aserrada laminada con clavos funcionan de forma similar.

## 5. CONCLUSIONES

La madera masiva, con sus diversas formas de laminación, ofrece soluciones estructurales versátiles y sostenibles. La variedad de métodos de unión, como la laminación clavada, encolada y con pasadores de madera, proporciona elementos sólidos y estéticamente atractivos para una amplia gama de aplicaciones constructivas. El Dowel Laminated Timber (DLT), en particular, ha ganado popularidad internacionalmente, especialmente por:

- Su facilidad de fabricación, ya que su proceso constructivo puede ser completamente automatizado, disminuyendo errores y tiempos de fabricación.
- Su composición exclusivamente de madera, sin adhesivos ni elementos contaminantes, lo convierte en una opción atractiva para la construcción sostenible.

En el contexto de la evaluación del DLT en Chile, se busca determinar sus características mecánicas y compararlas con productos convencionales, como el Nail Laminated Timber (NLT). Se utilizan normativas europeas para ensayar y caracterizar las muestras (EN 26891 y EN 408), lo que proporciona datos precisos sobre su resistencia y comportamiento bajo carga. Destacando:

- En probetas pequeñas, el DLT muestra un 40% más de resistencia a la rotura que el NLT, mientras que en probetas grandes la diferencia es solo del 0.3% en este mismo ítem.
- Se observa una gran diferencia en las deformaciones que sufren ambos elementos antes de alcanzar la tensión de rotura, siendo el NLT el que presenta mayores deformaciones.

Los resultados muestran que el DLT presenta desempeños mecánicos comparables e incluso superiores a los productos convencionales como el NLT. La madera utilizada, principalmente pino radiata y coihue, demuestra su idoneidad para aplicaciones estructurales, con beneficios adicionales en términos de huella de carbono negativa debido a su capacidad de absorción de CO<sub>2</sub>.

Por último, considerando los resultados anteriores, en Chile el DLT se podría perfilar como un elemento de exportación y una opción para la innovación en la construcción, combinando ecología e ingeniería.

## 6. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mis padres, Luzmira Cárcamo y Víctor Fuentes, por apoyarme completamente en este largo camino, desde el inicio tomando mi mano y guiándome, recalcando los buenos valores y siempre, por sobre todo, ser una buena persona.

A mis hermanas, Scarlett y Katherine por su apoyo incondicional, comprensión y fortaleza que me brindaron en cada momento.

Mis abuelos, Samuel y Angélica, que sin ellos nada sería igual, son la luz que guía mi camino.

Mi familia, tías, tíos, prima y sobrinas, que sin ustedes muchos momentos de frustración no habrían sido lo mismo.

Mi pareja, C.M. quien me ha acompañado en esta etapa de mi vida, ayudando y preocupándose en cada momento que he requerido, mi gratitud hacia ti es eterna.

A quienes son la familia que escogí, en especial Y. C., G, F. alentándome en todo momento, su cariño, atención, comprensión y escucha activa mejora mis días, los aprecio enormemente.

A Srta. Javiera Padilla, profesora guía, por cada ayuda, clarificando mis momentos de confusión, gracias por su alegría, empatía y entrega en este proyecto. De igual forma mis agradecimientos a mi profesor informante, Sr. Nelson Maureira.

Muchas gracias al Instituto Forestal, a Don Gonzalo Hernández, por brindar toda la ayuda necesaria en conjunto a su gran equipo de ingenieros, otorgando a disposición todos los elementos que fueron requeridos para la elaboración de esta tesis.

## REFERENCIAS

1. Acero sostenible: ¿qué tiene que ver el cambio climático con el acero? (s/f). Climatescience.org. Recuperado el 15 de febrero de 2024, de <https://climatescience.org/es/advanced-steel-climate>
2. ASTM, 2020. Standard test methods for mechanical fasteners in wood and wood-based materials. <https://www.astm.org/d1761-20.html>
3. *Coigüe*. (s/f). GoChile. Recuperado el 11 de febrero de 2024, de <https://www.gochile.cl/es/flora-fauna/coigue.htm>
4. Dowel laminated timber (DLT) design + construction. (2020). Think Wood. Recuperado el 03 de Octubre 2023 de <https://www.thinkwood.com/mass-timber/dowel-laminated-timber-dlt>
5. Ensayo de Propiedades mecánicas de Materiales. (s. f.). *INFINITIA Industrial Consulting*. Recuperado el 09 de Mayo 2024 de <https://www.infinitiaresearch.com/laboratorio-ingenieria-industrial/propiedades-mecanicas/#:~:text=Gracias%20a%20los%20ensayos%2C%20se,fuerzas%20y%20tensiones%2C%20y%20corregirlos.>
6. Gallardo Lara, C. (2020). Productos de Ingeniería en madera. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/30395>
7. INN, 2008. NCh3028/2:2008. Madera estructural- Determinación de propiedades físicas y mecánicas de la madera clasificada por su resistencia- Parte 2: Muestreo y evaluación de los valores característicos de piezas en tamaño estructural. Instituto Nacional de Normalización, Chile. <https://ecommerce.inn.cl/nch30282200845229>



8. INN, 2014. NCh1198:2014. Construcciones en madera- Cálculo. Instituto Nacional de Normalización, Chile. <https://ecommerce.inn.cl/nch1198201447941>
9. Maderera Nacional Limitada. (s/f). Coigüe (Zona Sur). Madereranacional.cl. Recuperado el 11 de febrero de 2024, de <https://www.madereranacional.cl/productos/maderas-nativas-nacionales-cepilladas-calibradas/coigue-zona-sur/>
10. Maderera Nacional Limitada. (s/f-b). *Pino Insigne*. Madereranacional.cl. Recuperado el 11 de febrero de 2024, de <https://www.madereranacional.cl/productos/maderas-nativas-nacionales-cepilladas-calibradas/pino-insigne/>
11. Maderero, D. D. F. (2022, febrero 16). *¿Cuánto CO2 se almacena en 1 kg de madera?* Forestal Maderero; Directorio Forestal Maderero. <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/cuanto-co2-se-almacena-en-1-kg-de-madera.html>
12. Mass timber. (2020). Think Wood. Recuperado el 03 de Octubre 2023 de <https://www.thinkwood.com/mass-timber>
13. Nail-laminated timber (NLT) design + construction. (2020). Think Wood. Recuperado el 03 de Octubre 2023 de <https://www.thinkwood.com/mass-timber/nail-laminated-timber-nlt>
14. Parques Nacionales, A. (s/f). *Nothofagus dombeyi*. Sistema de Información de Biodiversidad. Recuperado el 11 de febrero de 2024, de <https://sib.gob.ar/especies/nothofagus-dombeyi?tab=info-general>
15. Reyes Riquelme, C., Vásquez V., L., Mardones Díaz, P., et al (2022). Caracterización mecánica de la madera laminada clavada fabricada con madera aserrada estructural de Pino radiata. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/32538>
16. UNE, 1991. EN 26891. Estructuras de madera- uniones realizadas con sujetadores mecánicos. Principios generales para la determinación de las características de resistencia y deformación. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0011097>
17. UNE, 1995. Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0056510>
18. UNE, 2010. EN 408. Estructuras de madera. Madera laminada encolada y madera maciza encolada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Normalización Española. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0049928>