

## RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO PARA UNIONES TIPO CLAVIJA EN EUCALYPTUS GRANDIS

Filippetti, Ma. Cecilia <sup>a</sup>; Tosco, Andrea D. <sup>b</sup>; Meyer, Lía C. <sup>c</sup>; Oliva, Lucas <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Universidad Tecnológica Nacional FRVT GIDEC, [mcfilippetti@frvt.utn.edu.ar](mailto:mcfilippetti@frvt.utn.edu.ar)

<sup>b</sup> Universidad Tecnológica Nacional FRVT GIDEC, [atosco@frvt.utn.edu.ar](mailto:atosco@frvt.utn.edu.ar)

<sup>c</sup> Universidad Tecnológica Nacional FRVT GIDEC, [lmeyer@frvt.utn.edu.ar](mailto:lmeyer@frvt.utn.edu.ar)

<sup>d</sup> Universidad Tecnológica Nacional FRVT GIDEC, [luoliva@frvt.utn.edu.ar](mailto:luoliva@frvt.utn.edu.ar)

**Palabras clave:** uniones, Eucalyptus grandis, aplastamiento, clavija

### RESUMEN

En las uniones tipo clavija su vástago está sometido a esfuerzos de flexión y cortante, generando tensiones de aplastamiento en las piezas de madera que une. El Reglamento de Estructuras de Madera de Argentina INTI-CIRSOC 601:2016 propone valores para las tensiones de aplastamiento en función del diámetro, la densidad y la dirección del esfuerzo extrapolados de las National Design Specification for Wood Construction NDS:2005, estudios realizados sobre algunas especies y diámetros en Argentina indican que los valores propuestos no representan el comportamiento de las principales maderas cultivadas en Argentina. El objetivo de este trabajo es proponer valores de resistencia al aplastamiento para madera de Eucalyptus grandis y diámetros de clavija de 5, 7, 8 y 10 mm. Los ensayos se realizaron de acuerdo con la norma UNE EN 383:2007. Para la dirección paralela a las fibras los valores resultaron independientes del diámetro del perno, mientras que para la dirección perpendicular la influencia del diámetro resultó significativa. En todos los casos los valores hallados resultaron menores a los propuestos en el Reglamento Argentino.

### ABSTRACT

*In dowel-type joints, the dowel shank is subjected to bending and shear stresses, generating bearing stresses in the wood members they connect. The Argentine Wood Structures Code INTI-CIRSOC 601:2016 proposes bearing stress values as a function of dowel diameter, wood density, and load direction, extrapolated from the National Design Specification for Wood Construction (NDS, 2005). Studies conducted on some Argentine species and dowel diameters indicate that the proposed values do not represent the behavior of the main cultivated wood species in Argentina. The objective of this work is to propose bearing strength values for Eucalyptus grandis wood and dowel diameters of 5, 7, 8, and 10 mm. The tests were carried out in accordance with UNE EN 383:2007. For loading parallel to the grain, the values were independent of dowel diameter, whereas for loading perpendicular to the grain, the influence of diameter was significant. In all cases, the values obtained were lower than those proposed in the Argentine Code.*

## INTRODUCCIÓN

En las estructuras de madera, del 20 al 25 % del costo está vinculado con el diseño y construcción de las uniones entre sus diferentes elementos, y requieren una gran dedicación en tiempo (Argüelles et al, 2003)<sup>(1)</sup>. Se ha estimado que, de un cálculo estructural completo, el diseño de las uniones puede representar hasta el 70 % del tiempo total de cálculo para una estructura de madera (Rodd & Leijten, 2003)<sup>(2)</sup>. Por tanto, es relevante la capacidad portante de las uniones para garantizar la seguridad estructural del conjunto.

Las uniones tipo clavija se corresponden con los clavos, grapas, tornillos, pernos y pasadores. El vástago de estos elementos está sometido a esfuerzos de flexión y cortante, generando tensiones de aplastamiento y plastificación en las piezas de madera que une.

Distintos reglamentos Eurocódigo 5:2005<sup>(3)</sup>, National Design Specification for Wood construction NDS:2005<sup>(4)</sup> han tomado como base para determinar la capacidad de carga límite de uniones tipo clavija la teoría de Johansen, que está basada en tensión de aplastamiento en la madera o la formación de rótulas plásticas en el medio de unión. La resistencia al aplastamiento es uno de los parámetros más importantes dentro del cálculo de la capacidad portante de una conexión y está incluida dentro de los posibles modos de falla. El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>, redactado sobre la base de las especificaciones de la norma NDS:2005<sup>(4)</sup> sigue el mismo modelo y adecuando las unidades propone los mismos valores de resistencia al aplastamiento en función del diámetro del perno, la dirección de la fuerza respecto a la dirección de la fibra y la densidad anhidra. Al haber escasos estudios de valores de tensión de aplastamiento para maderas de uso estructural provenientes de bosques implantados de Argentina, esto expone una situación de incerteza a los profesionales, al momento de calcular uniones utilizando los suplementos del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera.

Existen trabajos de investigación previos sobre diferentes especies de madera, donde se han calculado los valores de resistencia al aplastamiento y que fueron comparados con los propuestos por el Reglamento Argentino, observándose que los resultados experimentales difieren sensiblemente de los valores de referencia indicados por el INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>. Entre estos trabajos se pueden mencionar los efectuados sobre madera de álamo (Manavella et al 2017)<sup>(6)</sup>, Eucalyptus grandis (Sosa Zitto 2015)<sup>(7)</sup>, con madera de Araucaria angustifolia (Guillaumet et al 2010)<sup>(8)</sup>. y algunas comparaciones de diferentes especies con el Reglamento Argentino (Manavella et al 2018)<sup>(9)</sup>, (Manavella et al 2022)<sup>(10)</sup>

La correlación existente entre la resistencia al aplastamiento y la densidad de la madera ha sido desarrollada en diversos trabajos de investigación confirmando la hipótesis de que a mayor densidad de la madera mayor resistencia al aplastamiento. También existen estudios de la influencia del diámetro del elemento de fijación sobre la resistencia al aplastamiento paralela y perpendicular, donde se ha verificado que para la dirección paralela no se manifiestan variaciones significativas, mientras que, para la dirección perpendicular a medida que aumenta el diámetro disminuye la resistencia.

El objetivo del trabajo es proponer valores, a partir de determinaciones experimentales, para la resistencia en madera de eucalipto grandis, en conexiones

simples sometidas a esfuerzos de aplastamiento a compresión bajo la acción de un único elemento de fijación rígido tipo clavija en varios diámetros de 5, 7, 8 y 10 mm, siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN 383:2007<sup>(11)</sup> en la dirección paralela y perpendicular a la fibra. Se compararon los resultados experimentales con los valores de referencia propuestos en el suplemento 4 Tabla S.4.1.1-1. del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>, para contrastar los valores corroborando o planteando nuevos valores que den seguridad al cálculo de uniones en Argentina.

## MATERIAL Y MÉTODO.

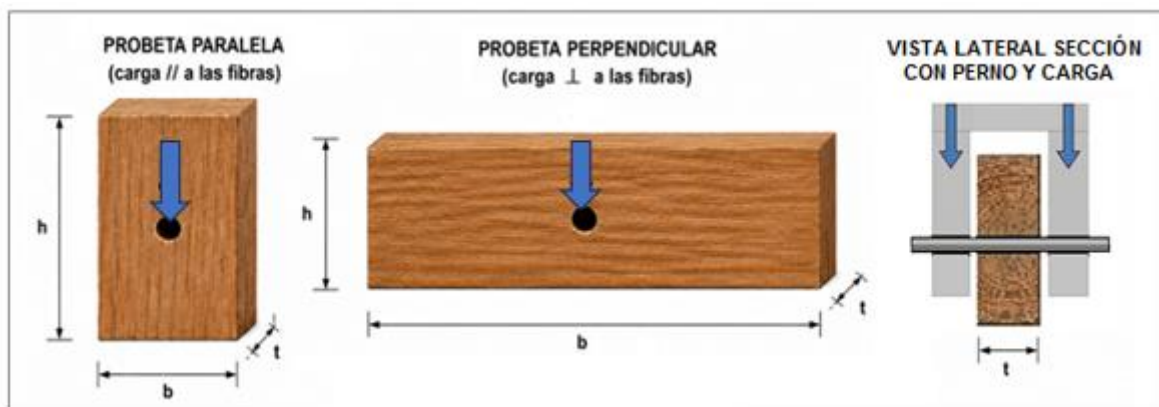
### Material

Se utilizó madera de eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis Hill ex Maiden*) provenientes de bosques implantados de la Provincia de Misiones, Argentina. La madera fue remitida al Laboratorio de la Facultad Regional Venado Tuerto, en tablas de 1" x 4" x 2,5 m de largo donde se acondicionó para su posterior uso. Los cuerpos de prueba se prepararon con las dimensiones exigidas por la norma UNE-EN 383:2007<sup>(11)</sup> según muestra la Tabla 1. Las piezas se almacenaron en cámara controlada a una temperatura de  $(20 \pm 2)$  °C y a una humedad relativa ambiente de  $(65 \pm 5)$  % para ser estabilizadas. Los elementos de fijación elegidos fueron pernos rígidos de acero trefilado de 5, 7, 8 y 10 mm de diámetro. La esbeltez en cada caso cumplía con la condición de perno rígido exigida por la norma, que establece que el espesor de la pieza (t) debe ser de 1,5 a 4 veces el diámetro de perno.

| Dirección de<br>las fibras | Diámetro del<br>perno<br>(d)mm | Cantidad<br>(n) | Dimensión de las probetas |                |                |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------------|----------------|----------------|
|                            |                                |                 | Espesor(t)<br>mm          | Ancho(b)<br>mm | Alto (h)<br>mm |
| Paralela<br>(1)            | 5                              | 59              | 20                        | 30             | 70             |
|                            | 7                              | 61              | 24                        | 42             | 98             |
|                            | 8                              | 42              | 24                        | 48             | 112            |
|                            | 10                             | 61              | 24                        | 60             | 140            |
| Perpendicular<br>(2)       | 5                              | 62              | 20                        | 200            | 50             |
|                            | 7                              | 52              | 24                        | 280            | 70             |
|                            | 8                              | 55              | 24                        | 320            | 80             |
|                            | 10                             | 62              | 24                        | 400            | 100            |

Tabla 1- Detalle de las dimensiones de las probetas

Para la colocación del perno se realizó un pre-taladrado del orificio con una holgura de 0,25 mm, con una perforadora de banco que asegura la perpendicularidad entre la probeta y el eje de la clavija. La figura 1 muestra una probeta de eucalipto grandis en dirección paralela y otra perpendicular.



*Figura 1- Probeta en eucalipto grandis paralela y perpendicular*

## Método

El dispositivo de aplicación de carga consta de un cilindro hidráulico instalado en un marco de cargas accionado con una central hidráulica con control de velocidad, una celda de carga y en los laterales los relojes comparadores sobre una probeta, ubicada en el dispositivo de ensayo como se muestra en la figura 2 para la dirección perpendicular y paralela. La carga debe aplicarse sobre el eje de la probeta. El deslizamiento relativo del elemento de fijación respecto de la probeta debe medirse entre el dispositivo de acero que sujeta la clavija y los puntos situados en los cantos de la probeta, a la altura del eje central de la clavija.



Probeta perpendicular



Probeta paralela

*Figura 2 - Dispositivo de carga*

La medición de la carga se realizó con una celda de carga de 10 kN de capacidad interpuesta entre el cilindro y el dispositivo. Las deformaciones fueron medidas usando dos relojes comparadores digitales “Mitutoyo” de rango 0-12,7 mm, y lectura de 0,01 mm, dispuestos simétricamente a cada lado de la probeta. Para la aplicación de la carga se interpuso una rótula para garantizar la perpendicularidad, evitando desviaciones o excentricidades para asegurar el cumplimiento de lo solicitado en la norma UNE-EN 383:2007<sup>(11)</sup>.

El procedimiento de carga del ensayo requiere estimar la carga máxima ( $F_{\max \text{ est}}$ ) que se obtuvo con ensayos previos y luego aplicar cargas, realizando lecturas de las deformaciones en cada uno de los puntos asociados a un porcentaje de esta carga máxima estimada hasta llegar a la rotura, como se puede observar en el esquema de la figura 3, según la norma UNE-EN 383:2007<sup>(11)</sup>.

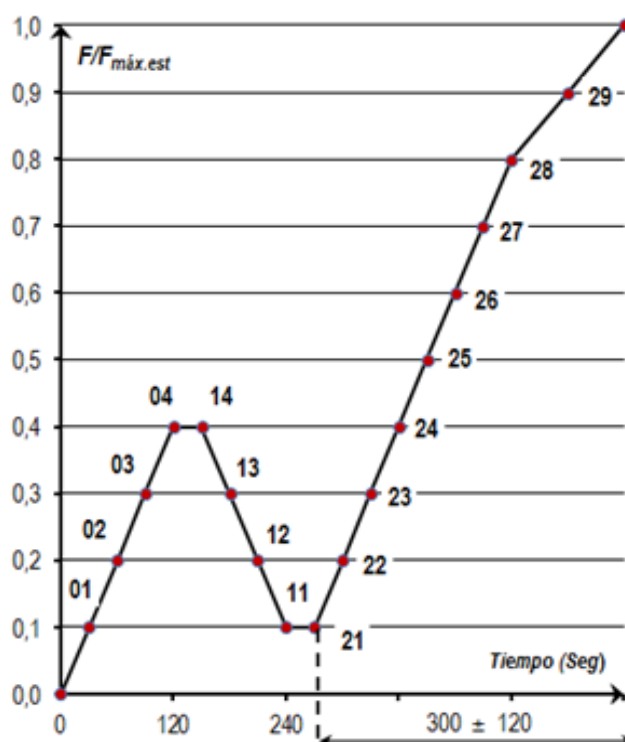


Figura 3- Esquema de carga

El ciclo de carga previo (desde el punto 0 al 21) que consiste en incrementar la fuerza hasta alcanzar el 40% de la carga máxima estimada en un tiempo de 120 segundos, mantener dicho valor durante 30 segundos, descargar hasta el 10 % de la fuerza máxima estimada en un tiempo de 90 segundos y volver a mantener constante ese valor durante 30 segundos. A partir de ese punto se inicia el ciclo de carga final progresiva hasta la finalización del ensayo, que se produce cuando se llegó a la carga máxima, por rotura física de la probeta, o cuando la deformación relativa alcanzó un valor de 5 mm, según se observa en la figura 4. Para cada probeta se registró la fuerza

aplicada, el tiempo y la media de las deformaciones de las lecturas de los comparadores para cada punto del esquema de carga.

La determinación del contenido de humedad y la densidad aparente de cada probeta se realizó de acuerdo a las normas ISO 3130 (1975)<sup>(12)</sup> e ISO 3131 (1975)<sup>(13)</sup> respectivamente. Se ajustaron los valores de densidad a la humedad de referencia del 12%, según la norma UNE-EN 384:2010<sup>(14)</sup>.

### Determinación de la resistencia al aplastamiento.

La Norma UNE-EN 383:2007<sup>(11)</sup> calcula la resistencia al aplastamiento con la fórmula (1), siendo

$$f_h = \frac{F_{m\acute{a}x}}{d \times t} \quad (1)$$

$f_h$  : Resistencia al aplastamiento, en N/mm<sup>2</sup>.

$F_{m\acute{a}x}$  : Fuerza máxima correspondiente a la rotura o a 5 mm de deformación en N.

$d$  : Diámetro del perno, en milímetros.

$t$  : Espesor de la probeta, en milímetros.

### Determinación de la densidad Anhidra según CIRSOC 601

En el suplemento 4 del Reglamento INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>, si se dispone del valor de la gravedad específica a un determinado contenido de humedad  $G_{mc}$  el valor en el estado anhidro (madera seca en horno)  $G$ , puede obtenerse con la expresión (2):

$$G = \frac{G_{mc}}{(1 + mc) - 0.84 \cdot mc \cdot G_{mc}} \quad (2)$$

$G$  = Gravedad anhidra

$G_{mc}$  = Gravedad específica a un determinado contenido de humedad

$mc$  = Contenido de humedad como cociente entre el peso del agua contenida y el peso anhidro.

### Cálculo de la resistencia al aplastamiento de referencia según INTI-CIRSOC 601

Con las ecuaciones dadas por el INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>, se puede determinar la resistencia al aplastamiento de referencia de la madera ( $F_e$ ) en N/mm<sup>2</sup>, para uniones con elementos de fijación tipo clavijas sometidas a carga lateral en la dirección paralela y perpendicular, a partir de la densidad anhidra de la madera y del diámetro del elemento de sujeción. En el suplemento 4 del reglamento, se establece que para diámetros menores a 6,4 mm, la resistencia al aplastamiento ( $F_e$ ) es independiente de la dirección de la fibra y se determina por la ecuación (5). Para valores de diámetro de clavija mayores a 6,4 mm se comportan de forma diferenciada; en la dirección paralela el valor es independiente del diámetro y se aplica la ecuación (6), y para la

dirección perpendicular la resistencia al aplastamiento de referencia ( $F_{e\perp}$ ) se calcula con la ecuación (7) y depende del diámetro de la clavija.

$$F_e (D < 6,4 \text{ mm}) = 114,4 G^{1,84} \quad (5)$$

$$F_{e\parallel} (D \geq 6,4 \text{ mm}) = 77,2 G \quad (6)$$

$$F_{e\perp} (D \geq 6,4 \text{ mm}) = 212 G^{1,45} / D^{0,5} \quad (7)$$

Siendo:

$F_{e\parallel}$ : Resistencia al aplastamiento de referencia paralela a la fibra en  $N / mm^2$ .

$F_{e\perp}$ : Resistencia al aplastamiento de referencia perpendicular a la fibra en  $N / mm^2$ .

$G$ : Valor característico (5 %) de la gravedad específica anhidra en  $Kg/m^3$ .

$D$ : Diámetro del perno en mm

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Resistencia al aplastamiento en la dirección paralela a las fibras

Los valores de resistencia al aplastamiento ( $f_h$ ) en la dirección paralela a las fibras en probetas con diámetros de perno de 5, 7, 8 y 10 mm se presentan en la Tabla 2. Para el conjunto total de muestras analizadas ( $n=223$ ) de eucalipto grandis, se obtuvo un valor medio de resistencia de  $51,6 N/mm^2$ , con un valor correspondiente al percentil 5% :  $37 N/mm^2$ . Este último representa el valor característico de la resistencia de este material. La variabilidad de los resultados la indican los coeficientes de variación (COV) de entre 16% y 20% indicando una adecuada homogeneidad de los datos experimentales. El análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar la incidencia del diámetro del perno sobre la resistencia al aplastamiento mostró un  $p > 0,05$ , por lo que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para los distintos diámetros. En consecuencia, para los diámetros estudiados (5 a 10mm) la resistencia al aplastamiento paralela a las fibras puede considerarse independiente del diámetro.

| Diámetro<br>(d) | Valor<br>medio | Percentil<br>5% | Mínimo      | Máximo      | COV %       | Cantidad<br>(n) |
|-----------------|----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| 5               | 50,7           | 35,8            | 35,3        | 70,9        | 19          | 59              |
| 7               | 55,6           | 41,0            | 37,0        | 81,8        | 18          | 61              |
| 8               | 50,2           | 35,6            | 33,3        | 81,5        | 20          | 42              |
| 10              | 49,5           | 36,7            | 34,8        | 66,4        | 16          | 61              |
| <b>Total</b>    | <b>51,6</b>    | <b>37,0</b>     | <b>33,3</b> | <b>81,8</b> | <b>18,6</b> | <b>223</b>      |

Tabla 2- Valores de resistencia al aplastamiento paralelo a la fibra en  $N/mm^2 (f_h)$

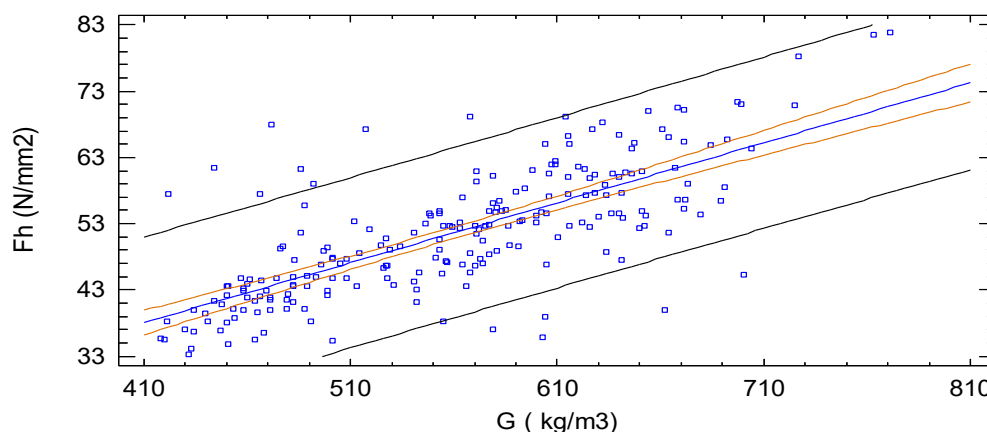
Los valores de densidad anhidra (G) correspondientes a las probetas ensayadas se presentan en la Tabla 3. Para el conjunto total de muestras (n=222) se obtuvo una densidad media de 560 kg/m<sup>3</sup> y un percentil 5%: 444 kg/m<sup>3</sup>, con un coeficiente de variación (COV) de 14 %, indicando una dispersión moderada de esta propiedad.

| Diámetro<br>(d) | Valor<br>medio | Percentil<br>5% | Mínimo     | Máximo     | COV %     | Cantidad<br>(n) |
|-----------------|----------------|-----------------|------------|------------|-----------|-----------------|
| 5               | 557            | 464             | 422        | 725        | 13        | 59              |
| 7               | 577            | 442             | 421        | 771        | 14        | 61              |
| 8               | 545            | 433             | 418        | 763        | 15        | 42              |
| 10              | 555            | 448             | 420        | 679        | 13        | 61              |
| <b>Total</b>    | <b>560</b>     | <b>444</b>      | <b>418</b> | <b>771</b> | <b>14</b> | <b>222</b>      |

*Tabla 3- Valores de densidad anhidra "G" en dirección paralela en Kg/m3*

Al analizar los resultados según el diámetro del perno, se observa que la serie correspondiente a 7 mm presentó la mayor densidad media (577 kg/m<sup>3</sup>), aproximadamente un 5% superior respecto al promedio de las restantes series. Este incremento de densidad coincide con el mayor valor medio de resistencia al aplastamiento paralelo a las fibras obtenido para dicho diámetro (55,6 N/mm<sup>2</sup>), observado en la Tabla 2. Este comportamiento sugiere que la mayor resistencia registrada en las probetas con perno de 7 mm estaría asociada a la mayor densidad del material y no al efecto directo del diámetro del perno.

Del análisis de regresión lineal simple entre la resistencia al aplastamiento paralelo a las fibras (Fh<sup>//</sup>) y la densidad anhidra (G), el coeficiente de correlación R = 0,74 indica una relación positiva moderadamente fuerte entre ambas variables. Este resultado evidencia que, a medida que aumenta la densidad del material, se incrementa la resistencia al aplastamiento, confirmando la influencia de esta propiedad física sobre el comportamiento mecánico de la madera, como se observa en la figura 4.



*Figura 4- Correlación entre la resistencia al aplastamiento paralelo (Fh) y la densidad anhidra (G)*

El análisis de varianza asociado al modelo de regresión presentó un valor de significancia  $p < 0,05$ , indicando que la relación entre  $f_h^{\parallel}$  y  $G$  es estadísticamente significativa, por lo que la densidad anhidra constituye una variable explicativa relevante para estimar la resistencia al aplastamiento paralelo a las fibras.

El coeficiente de determinación obtenido  $R^2$  indica que el modelo ajustado permite explicar aproximadamente el 54,73% de la variabilidad observada en la resistencia al aplastamiento. La ecuación del modelo de regresión ajustado se expresa mediante:

$$f_h^{\parallel} = 0,921293 + 0,0905585 \cdot G \quad (3)$$

### Resistencia al aplastamiento en la dirección perpendicular a las fibras

Los resultados correspondientes a la resistencia al aplastamiento en la dirección perpendicular a las fibras ( $f_h^{\perp}$ ) para los diferentes diámetros de perno se presentan en la Tabla 4. Para el conjunto total de muestras analizadas ( $n = 231$ ) en eucalipto grandis, se obtuvo un valor medio de resistencia de 44,3 N/mm<sup>2</sup>, con un valor correspondiente al percentil 5% de 22,4 N/mm<sup>2</sup>.

| Diámetro<br>(d) | Valor<br>medio | Percentil<br>5% | Mínimo | Máximo | COV % | Cantidad<br>(n) |
|-----------------|----------------|-----------------|--------|--------|-------|-----------------|
| 5               | 56,8           | 34,1            | 29,7   | 92,9   | 28    | 62              |
| 7               | 43,9           | 22,4            | 14,0   | 75,0   | 30    | 52              |
| 8               | 41,6           | 21,2            | 18,6   | 80,2   | 31    | 55              |
| 10              | 34,6           | 17,9            | 14,4   | 61,1   | 29    | 62              |
| Total           | 44,3           | 22,4            | 14,0   | 92,9   | 35    | 231             |

*Tabla 4: Valores de resistencia al aplastamiento perpendicular a la fibra en N/mm<sup>2</sup>*

Al analizar los resultados en función del diámetro del perno, se observa una disminución progresiva de la resistencia con el incremento del diámetro. El mayor valor medio de 56,8 N/mm<sup>2</sup> se obtuvo para el diámetro de 5 mm, mientras que para el diámetro de 10 mm la resistencia media disminuyó hasta 34,6 N/mm<sup>2</sup>, representando una reducción aproximada del 39%. Una tendencia similar se observa en los valores característicos del percentil 5%, que disminuyen desde 34,1 N/mm<sup>2</sup> para el diámetro menor hasta 17,9 N/mm<sup>2</sup> para el diámetro mayor. La dispersión de los resultados fue superior a la observada en los ensayos de aplastamiento paralelo a las fibras, con coeficientes de variación (COV) entre 28% y 31% para las distintas series, alcanzando un valor global de 35%.

Los valores de densidad anhidra correspondientes a las probetas de eucalipto grandis ensayadas en dirección perpendicular se presentan en la Tabla 5. La densidad media global fue de 562 kg/m<sup>3</sup>, con un coeficiente de variación de 13 %. Los valores característicos percentil 5% para los distintos diámetros se encontraron dentro de un

rango reducido (410 a 431 kg/m<sup>3</sup>), evidenciando que no existen diferencias significativas de densidad entre las series evaluadas. Por lo tanto, las variaciones observadas en la resistencia al aplastamiento perpendicular no pueden atribuirse a cambios en la densidad del material y si al diámetro del perno, para esta especie-procedencia.

| Diámetro<br>(d) | Valor<br>medio | Percentil<br>5% | Mínimo     | Máximo     | COV %     | Cantidad<br>(n) |
|-----------------|----------------|-----------------|------------|------------|-----------|-----------------|
| 5               | 565            | 456             | 410        | 765        | 13        | 62              |
| 7               | 567            | 442             | 420        | 727        | 13        | 52              |
| 8               | 559            | 439             | 412        | 704        | 13        | 55              |
| 10              | 558            | 447             | 431        | 704        | 13        | 62              |
| <b>Total</b>    | <b>562</b>     | <b>446</b>      | <b>410</b> | <b>765</b> | <b>13</b> | <b>231</b>      |

*Tabla 5- Valores de densidad anhidra “G” en dirección perpendicular en Kg/m<sup>3</sup>*

El análisis de regresión simple entre la resistencia al aplastamiento perpendicular ( $f_{h\perp}$ ) y la densidad anhidra (G) presentó un coeficiente de correlación  $R = 0,68$ , indicando una relación positiva moderadamente fuerte entre ambas variables. Esto confirma que, al igual que en el comportamiento paralelo a las fibras, la densidad constituye un parámetro relevante para explicar la resistencia mecánica del material.

Por otra parte, la relación entre la resistencia al aplastamiento y el diámetro del perno presentó un coeficiente de correlación  $R = 0,52$ , indicando una influencia significativa, aunque de menor intensidad que la observada con la densidad.

En el análisis de regresión múltiple considerando simultáneamente la densidad anhidra (G) y el diámetro del perno (d) presentó un valor de significancia  $p < 0,05$  en el análisis de varianza (ANOVA), confirmando que ambos parámetros tienen una influencia estadísticamente significativa sobre la resistencia al aplastamiento perpendicular. El modelo ajustado obtenido se expresa mediante la ecuación:

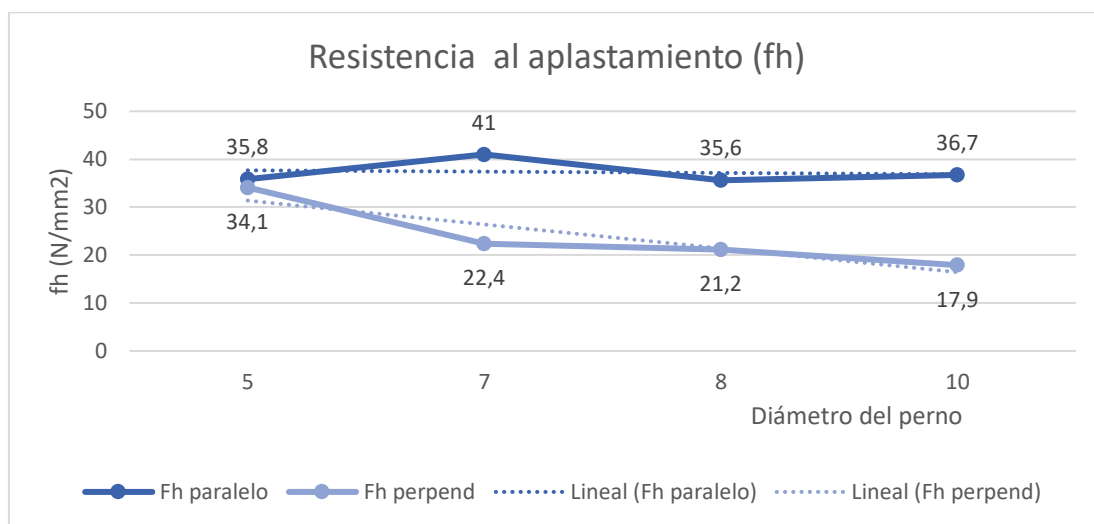
$$f_{h\perp} = -3,44637 + 0,140449 \cdot G - 4,15487 \cdot d \quad (4)$$

El coeficiente de determinación obtenido  $R^2$  indica que el modelo explica el 72% de la variabilidad observada en la resistencia al aplastamiento perpendicular, evidenciando un adecuado nivel de ajuste. El coeficiente positivo asociado a la densidad confirma que un aumento de esta propiedad produce un incremento de la resistencia, mientras que el coeficiente negativo asociado al diámetro indica que el aumento del diámetro del perno genera una disminución de la resistencia perpendicular a las fibras.

Los resultados muestran que en la dirección perpendicular ambos factores analizados (densidad y diámetro del perno) intervienen conjuntamente en la respuesta resistente. Esto pone de manifiesto la mayor sensibilidad del comportamiento perpendicular a las fibras frente a la geometría del elemento de unión.

## Comparación de la resistencia al aplastamiento paralela y perpendicular a la fibra en función del diámetro

La figura 5 presenta la comparación de los valores de resistencia al aplastamiento correspondientes al percentil 5% para las direcciones paralela y perpendicular a las fibras (fh), en función del diámetro del perno.



*Figura 5- Comparación de la resistencia al aplastamiento (fh) paralela y perpendicular a la fibra*

En términos generales, los valores característicos de resistencia al aplastamiento obtenidos en la dirección paralela a las fibras resultaron superiores a los determinados en la dirección perpendicular, evidenciando la marcada anisotropía del comportamiento mecánico de la madera. Esta diferencia se debe principalmente a que, en la dirección paralela, la carga es soportada fundamentalmente por la estructura longitudinal de las fibras, mientras que en la dirección perpendicular predomina la deformación por compresión transversal de los tejidos leñosos, con menor capacidad resistente.

Para el diámetro de perno de 5 mm se observa un comportamiento particular, donde los valores de resistencia al aplastamiento paralelo (35,8 N/mm²) y perpendicular (34,1 N/mm²) presentan diferencias reducidas, pudiendo considerarse prácticamente equivalentes. Para los restantes diámetros analizados (7, 8 y 10 mm), la resistencia al aplastamiento perpendicular presenta valores significativamente inferiores, alcanzando aproximadamente entre el 50% y 60% de la resistencia obtenida en dirección paralela para cada diámetro equivalente. Esta reducción confirma la menor capacidad resistente de la madera frente a solicitaciones transversales a la orientación de las fibras.

En consecuencia, los resultados confirman que la dirección de aplicación de la carga constituye un factor determinante en la resistencia al aplastamiento, siendo la resistencia paralela a las fibras la condición más favorable y la dirección perpendicular la más crítica para el diseño de uniones mecánicas en madera.

## Comparación de los valores experimentales de resistencia al aplastamiento con el INTI-CIRSOC 601:2016

Con el objetivo de evaluar la correspondencia entre los resultados experimentales obtenidos para eucalipto grandis y los valores de referencia establecidos en el reglamento INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>, se realizó una comparación entre las resistencias al aplastamiento determinadas experimentalmente y las calculadas mediante las expresiones propuestas en el Suplemento 4 del mencionado reglamento.

Los valores de referencia indicados por el reglamento corresponden a una duración de carga de aproximadamente 10 años. Debido a que los ensayos experimentales de aplastamiento presentan una duración significativamente menor (aproximadamente 10 minutos), los valores obtenidos fueron ajustados considerando el factor de duración de carga recomendado por el reglamento ( $CD = 1,6$ ).

Por lo tanto, las resistencias experimentales fueron reducidas mediante la división por dicho coeficiente, permitiendo una comparación equivalente con los valores normativos. Los valores de resistencia de referencia ( $F_e$ ) fueron calculados para cada probeta mediante las expresiones propuestas por el INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>, considerando la densidad anhidra y el diámetro del perno, y posteriormente se realizaron los análisis estadísticos correspondientes para obtener los valores medios y los percentiles 5%.

### Comparación en dirección paralela a las fibras

Los resultados presentados en la Tabla 6 muestran que, para la dirección paralela a las fibras, los valores medios experimentales ajustados por duración de carga ( $f_{h//}$ ) resultaron inferiores a los valores de referencia calculados según el reglamento ( $F_{e//}$ ) para todos los diámetros analizados.

| Diámetro perno d (mm) | Cantidad n | Resistencia experimental ajustada ( $f_{h//}$ ) |                                   | Resistencia de referencia CIRSOC 601 ( $F_{e//}$ ) |                                   |
|-----------------------|------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|
|                       |            | Valor medio (N/mm <sup>2</sup> )                | Percentil 5% (N/mm <sup>2</sup> ) | Valor medio (N/mm <sup>2</sup> )                   | Percentil 5% (N/mm <sup>2</sup> ) |
| 5                     | 59         | 31,7 ( <b>80%</b> )                             | 22,4 ( <b>80%</b> )               | 39,5                                               | 28                                |
| 7                     | 60         | 34,7 ( <b>78%</b> )                             | 25,6 ( <b>75%</b> )               | 44,6                                               | 34                                |
| 8                     | 42         | 31,3 ( <b>74%</b> )                             | 22,3 ( <b>67%</b> )               | 42,1                                               | 33                                |
| 10                    | 61         | 31,0 ( <b>72%</b> )                             | 23,0 ( <b>65%</b> )               | 42,9                                               | 35                                |

Tabla 6- Comparación de la resistencia al aplastamiento paralela en N/mm<sup>2</sup>

Siendo:

- Los valores experimentales de  $f_{h//}$  corregidos considerando la duración de carga mediante el factor  $CD = 1,6$ .
- Los valores de referencia  $F_{e//}$  calculados según las expresiones del Suplemento 4.1.1 del INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>, considerando la densidad anhidra y el diámetro del perno.

- Los valores entre paréntesis, la relación porcentual entre los valores experimentales respecto del calculado según el reglamento

La resistencia experimental media alcanza para el diámetro de 5 mm, aproximadamente el 80% del valor calculado por el INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>. Esta relación disminuye progresivamente con el aumento del diámetro del perno, alcanzando aproximadamente el 72% para el diámetro de 10 mm. Este comportamiento indica que las expresiones normativas tienden a predecir valores superiores a los obtenidos experimentalmente para los diámetros mayores.

El análisis basado en los valores característicos correspondientes al percentil 5% presenta una tendencia similar. Los valores experimentales ajustados alcanzan entre el 80% y 65% de los valores de referencia normativos, observándose una reducción más pronunciada a medida que aumenta el diámetro del perno.

### Comparación en dirección perpendicular a las fibras

La Tabla 7 presenta la comparación entre los valores experimentales y los valores de referencia del INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup> para la dirección perpendicular a las fibras. En este caso también se observa que las resistencias experimentales ajustadas por duración de carga resultan inferiores a los valores calculados mediante el reglamento. Para los valores medios, la relación entre resistencia experimental y normativa alcanza el 87% para el diámetro de 5 mm, reduciéndose para los diámetros restantes hasta valores comprendidos entre 74% y 80%.

| Diámetro perno d (mm) | Cantidad n | Resistencia experimental ajustada ( $f_h^\perp$ ) |                                   | Resistencia de referencia CIRSOC 601 ( $F_e^\perp$ ) |                                   |
|-----------------------|------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
|                       |            | Valor medio (N/mm <sup>2</sup> )                  | Percentil 5% (N/mm <sup>2</sup> ) | Valor medio (N/mm <sup>2</sup> )                     | Percentil 5% (N/mm <sup>2</sup> ) |
| 5                     | 62         | 35,5 ( <b>87%</b> )                               | 21,3 ( <b>78%</b> )               | 40,5                                                 | 27                                |
| 7                     | 52         | 27,4 ( <b>77%</b> )                               | 14,0 ( <b>58%</b> )               | 35,4                                                 | 24                                |
| 8                     | 55         | 26,0 ( <b>80%</b> )                               | 13,2 ( <b>57%</b> )               | 32,4                                                 | 23                                |
| 10                    | 62         | 21,6 ( <b>74%</b> )                               | 11,2 ( <b>53%</b> )               | 29,0                                                 | 21                                |

*Tabla 7- Comparación de la Resistencia al aplastamiento perpendicular en N/mm<sup>2</sup>*

Siendo:

- Los valores experimentales de  $f_h^\perp$  corregidos considerando la duración de carga mediante el factor CD = 1,6.
- Los valores de referencia  $F_e^\perp$  calculados según las expresiones del Suplemento 4.1.1 del INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>, considerando la densidad anhidra y el diámetro del perno.
- Los valores entre paréntesis, la relación porcentual entre los valores experimentales respecto del calculado según el reglamento

Al analizar los valores correspondientes al percentil 5%, se observa que para el diámetro de 5 mm la resistencia experimental alcanza aproximadamente el 78% del valor normativo, mientras que para los diámetros mayores la relación disminuye hasta

aproximadamente el 53%. La mayor diferencia observada en los valores característicos evidencia una mayor dispersión de los resultados experimentales en la dirección perpendicular a las fibras, situación que se refleja también en los coeficientes de variación (COV) obtenidos previamente. Este comportamiento está asociado a la naturaleza anisotrópica de la madera, donde la resistencia transversal depende en mayor medida de la estructura interna del material y presenta una mayor sensibilidad frente al diámetro del elemento de unión.

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados experimentales obtenidos sobre la resistencia al aplastamiento del eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*) para uniones con pernos rígidos, se establecen las siguientes conclusiones:

- La resistencia característica al aplastamiento en la dirección paralela a las fibras determinada mediante el percentil 5%, presenta valores comprendidos entre 35,6 y 36,7 N/mm<sup>2</sup> para el rango de pernos estudiados (5 a 10 mm). Indicando que el diámetro del elemento de unión no constituye un factor determinante para esta condición de carga.
- En la dirección perpendicular a las fibras, la resistencia característica al aplastamiento presenta una marcada dependencia con el diámetro del perno. Los valores correspondientes al percentil 5% disminuyen desde 34,1 N/mm<sup>2</sup> para el diámetro de 5 mm hasta 17,9 N/mm<sup>2</sup> para el diámetro de 10 mm, evidenciando una reducción significativa de la capacidad resistente con el incremento del diámetro del elemento de unión.
- Para el perno de 5 mm de diámetro, los valores característicos de resistencia al aplastamiento en las direcciones paralela y perpendicular resultan similares (35,8 N/mm<sup>2</sup> y 34,1 N/mm<sup>2</sup>, respectivamente). Este comportamiento coincide con lo establecido en el Suplemento 4 del INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup>, donde para diámetros menores a 6,4 mm se considera un comportamiento equivalente entre ambas direcciones de carga.
- El análisis estadístico confirmó la existencia de una relación positiva y estadísticamente significativa entre la resistencia al aplastamiento y la densidad anhidra para ambas direcciones de carga. Los coeficientes de correlación obtenidos ( $R = 0,74$  para la dirección paralela y  $R = 0,68$  para la dirección perpendicular) evidencian que la densidad constituye una variable relevante para estimar el comportamiento resistente del material.
- El efecto del diámetro del perno sobre la resistencia al aplastamiento depende de la dirección de carga. Para la dirección perpendicular a las fibras, el diámetro presentó una influencia estadísticamente significativa, mientras que para la dirección paralela a las fibras no se observaron diferencias significativas entre los diámetros analizados.
- La comparación de los resultados experimentales ajustados por duración de carga con los valores de referencia calculados mediante las expresiones del Suplemento 4.1.1 del INTI-CIRSOC 601:2016<sup>(5)</sup> mostró que los valores experimentales resultan inferiores para todas las configuraciones analizadas. La diferencia es más significativa al considerar los valores característicos

(percentil 5%) y los mayores diámetros de perno, indicando que las expresiones reglamentarias podrían sobreestimar la resistencia al aplastamiento del eucalypto grandis para las condiciones experimentales estudiadas.

- Los resultados muestran que las expresiones del Reglamento argentino, basadas en la densidad y el diámetro del perno, no reflejan fielmente la variabilidad experimental observada en los diámetros estudiados para esta especie y procedencia. Esto evidencia la necesidad de expandir la base de datos empíricos para validar esta tendencia. Asimismo, resalta la importancia de integrar estos valores específicos de resistencia al aplastamiento en la normativa argentina, con el fin de otorgar mayor precisión y seguridad al diseño de uniones.

## **AGRADECIMIENTOS.**

A los alumnos, becarios, graduados y docentes investigadores del Grupo de Investigaciones de Estructuras Civiles (GIDEC) de la UTN Facultad Regional Venado Tuerto por sus aportes en la realización de este trabajo.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- (1) Argüelles, R., F. Arriaga y J. J. Martínez, Estructuras de madera. Diseño y cálculo, 2ª edición, 307-320, AITIM, Madrid, España (2003).
- (2) Rodd P.D. y Leijten A.J.M., High-performance dowel-type joints for timber structures Prog. Struct. Engng Mater.5, 77-89 (2003).
- (3) European Committee for standardization. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. EN 1995-1-1. Brussels. (2005).
- (4) NDS. American Forest & Paper Association.American Wood Council.National Design Specification (NDS) for Wood Construction with commentary and Supplement.Design Values for Wood Construction. 2005 Edition. Washington.(2005).
- (5) INTI-CIRSOC 601. Instituto Nacional de Tecnología Industrial - Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones. Buenos Aires.(2016)
- (6) Manavella R.D, Alfredo A. Guillaumet; Cesar Alí Mossre; Patricio Arrien. Determinación de la Resistencia al Aplastamiento en Madera de Populus Deltoides 'Australiano 129/60', Comparación con los Valores dados por el CIRSOC 601. CLEM +CIMAD 2017. Junín. Buenos Aires. Argentina. (2017).
- (7) Sosa Zitto Alexandra. Tesis doctoral. Comportamiento resistente y elástico de uniones construidas con elementos de fijación de acero tipo clavija en piezas aserradas de Eucalyptus grandis cultivado en Argentina. (2015).

- (8) Guillaumet A.A., Manavella R.D.; Filippetti M.C., Diab J. y Armas A. Tensiones de aplastamiento en uniones tipo clavija en madera de Araucaria Angustifolia .XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural .San Juan. Argentina. (2010).
- (9) Manavella R.D.; Guillaumet A.A.; Filippetti M.C.; Sosa Zitto A.. Comparación de la resistencia al aplastamiento de especies de reforestación, con valores del CIRSOC 601.XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Lima. Perú. (2018).
- (10) Manavella R.D.; Guillaumet A.A.; Filippetti M.C.; Meyer L.C. Determinación de la resistencia al aplastamiento en madera de pinus elliotti y de Eucaliptus grandis. XXVII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural .Rosario. Argentina. (2022)
- (11) UNE-EN 383. Agencia Española de Normalización y Certificación. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia al aplastamiento y del módulo de aplastamiento para los elementos de fijación tipo clavija. (2007).
- (12) ISO 13061-1. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.(2014)
- (13) ISO 13061-2. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.(2014)
- (14) UNE-EN 384 Agencia Española de Normalización y Certificación. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. (2010).