

Determinación de la Resistencia al Aplastamiento en Madera de Híbrido Pinus Elliottii var. Elliottii x Pinus Caribaea var. Hondurensis para Uniones Tipo Clavija *

Roberto Manavella, Alfredo Guillaumet, Maria Filippetti

UTN. Facultad Regional Venado Tuerto. Grupo GIDEC. Laprida 651. Venado Tuerto. Santa Fe. Argentina.
Tel (03462) 431013 - rdmvt@yahoo.com

Resumen - En este trabajo se ha determinado la resistencia al aplastamiento de la madera del Híbrido Pinus elliottii var. elliottii x Pinus caribaea var. hondurensis procedente de la Provincia de Misiones, Argentina, parámetro base para establecer la capacidad de carga de una unión.

Se han ensayado 118 probetas de 24 mm de espesor y demás dimensiones ajustadas a norma con perno rígido de 7 mm de diámetro de acuerdo a la Norma UNE-EN 383, de las cuales 74 probetas se ensayaron en dirección paralela a la fibra y 44 en dirección perpendicular. Los valores de resistencia característica al aplastamiento obtenidos fueron de 22 N/mm² y de 15 N/mm² para las direcciones paralela y perpendicular respectivamente.

Para el conjunto de probetas se determinó la densidad, encontrándose una alta correlación con las tensiones de aplastamiento. Se han calculado valores para las deformaciones esperables en distintas condiciones de carga. Se comparan los resultados obtenidos con las NDS.

Palabras claves: resistencia al aplastamiento, uniones, Pinus elliotti x caribaea, fijación tipo clavija, estructuras de madera

Determination of the Crushing Strength in Wood of the Hybrid Pinus Elliottii Var. Elliottii X Pinus Caribaea Var. Hondurensis with Dowel Type Fasteners

Abstract - In this work, the crushing strength of the hybrid wood Hybrid Pinus elliottii var. Elliottii x Pinus caribaea var. Hondurensis, coming from the Province of Misiones, Argentina, has been determined – a base parameter to establish the load capacity of a wood joints.

118 specimens of 24 mm of thickness and other dimensions adjusted to Norm, with rigid bolt of 7 mm of diameter have been tested, according to the UNE-EN 383 Norm, of which 74 specimens were tested in a direction parallel to the fiber and 44 in perpendicular direction. The values of characteristic resistance to the crushing obtained were of 22 N/mm² and 15 N/mm² for the parallel and perpendicular directions respectively.

For the set of test specimens, the density was determined, a high correlation with the crushing tensions being found. Values for the expected deformations in different loading conditions have been calculated. The results obtained were compared with the NDS values.

Keywords: crushing strength, wood joints, Pinus elliotti x caribaea, Dowel type Fasteners, timber structures

* Trabajo publicado en las "22° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural", bajo el Nro 22. 5, 6 y 7 de Septiembre de 2012. Ciudad autónoma de Buenos Aires.

INTRODUCCIÓN

En Argentina, a partir del mes de marzo de 2013, se ha puesto a discusión pública nacional el Proyecto de Reglamento CIRSOC 601 – “Reglamento Argentino de Estructuras de Madera”, (*Proyecto CIRSOC 601, 2011*). En la redacción de los suplementos se aprecia la falta de información confiable y comparable del comportamiento estructural de la madera de especies provenientes de bosques implantados lo que motiva generar, de manera urgente, más trabajos de investigación que aporten datos para la caracterización físico mecánica de las mismas.

El presente trabajo tiene como objetivo calcular la resistencia al aplastamiento y las deformaciones sobre los elementos de fijación tipo clavija, realizadas con pernos rígidos, para el Híbrido *Pinus elliotii* var. *elliotii* x *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*, cultivado en Misiones, Argentina, y luego comparar los resultados obtenidos con los valores obtenidos aplicando las National Design Specification (*NDS, 2005*).

Cada día se amplían las variedades para clasificar ya que el sector forestal trabaja intensamente en el aumento de la producción de madera y la mejora de sus propiedades usando como métodos efectivos la hibridación y la clonación.

“...Desde la década del 80 la Argentina cuenta con antecedentes de introducciones de materiales híbridos de *Pinus elliotii* x *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* provenientes de Australia. Sin embargo fue a principios de los 90 cuando se realizaron introducciones desde ese país a nivel comercial, las cuales dieron origen a las casi 6.000 has implantadas en la región...” (*Gauchat et al., 2005*).

La selección de este híbrido para el estudio se debe a su buen potencial de crecimiento y a su excelente aporte de volumen maderable.

“...el *Pinus elliotii* x *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*... aunque crece casi al mismo ritmo que el *P. caribaea* var. *Hondurensis* tiene un crecimiento volumétrico un 35 % en promedio superior al *Pinus elliotii*... produce madera de media a media-alta densidad y se obtiene una elevada proporción de madera de buena calidad...” (*Malan et al., 1995*).

El estudio de nuevas propiedades sobre este híbrido incrementa la base de datos para los suple-

mentos del proyecto CIRSOC 601, en particular se suman a los valores ya aportados en otros trabajos y amplían el campo de aplicación de la madera de este híbrido.

“...La especie produce un mayor volumen anual de madera que el *Pinus taeda* y *elliotii*, con similares propiedades resistentes lo que le otorga un buen potencial para su utilización en la fabricación de vigas de madera laminada encolada, ampliando el campo de aplicación del Híbrido hacia productos de mayor valor agregado...” (*Guillaumet et al., 2011*).

METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la realización de los ensayos es la exigida en la Norma Europea (*DIN EN 383, 2007*).

El sistema de aplicación de cargas consistió en un equipo hidráulico con válvula reguladora de caudal que permitía ajustar la velocidad de aplicación de la carga de acuerdo a lo especificado por la norma. La medición de cargas se complementó con una celda de carga de 50 kN de capacidad máxima con precisión de 10 N conectada a un transductor de registración continua de la lectura.

Para la medición de las deformaciones se usaron dos relojes comparadores mecánicos de capacidad 20 mm y lectura de 0,01mm dispuestos simétricamente.

Las probetas utilizadas fueron confeccionadas a partir de tablas de madera aserrada de Híbrido *Pinus elliotii* var. *elliotii* x *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* provenientes de árboles de 10 años implantados en la Localidad de Esperanza, Provincia de Misiones, Argentina, cosechados en operaciones de segundo raleo y de forestaciones que han tenido una poda (desrame) artificial hasta los 6 metros de altura.

Se realizó una selección aleatoria de un lote de 30 tablas de 1” x 5” x 2,5 m de largo y se confeccionaron un total de 118 probetas de 25 mm de espesor y demás dimensiones de acuerdo a Norma, de las cuales 74 probetas se ensayaron en dirección paralela a la fibra y 44 en dirección perpendicular.

Como elemento de fijación se utilizó un perno rígido de acero trefilado y diámetro 7 mm, lo que nos establece una relación de esbeltez aproximada

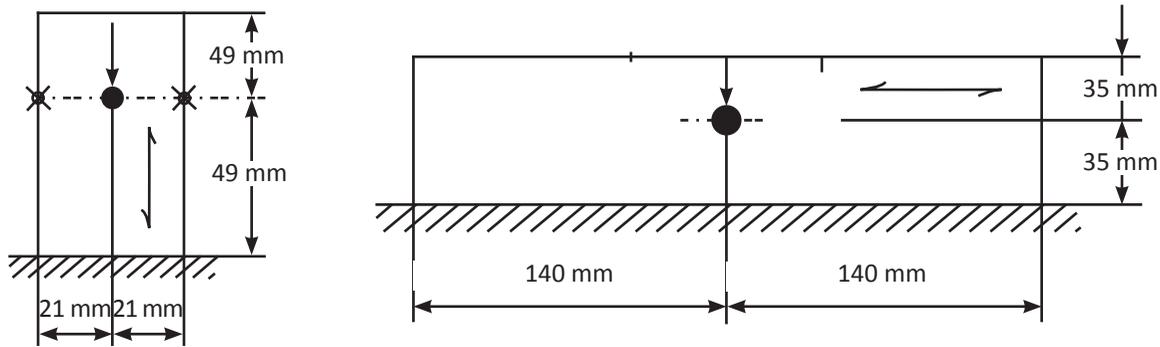


Fig. 1 - Dimensiones de las probetas

de 3.5 entre el largo del perno y el diámetro ajustándose a la normativa que establece esta relación entre 1,5 y 4. La colocación del elemento de fijación se hace con orificio sobre-dimensionado de 7,25 mm (EN 383, 1995).

Las dimensiones de las probetas utilizadas se visualizan en la Fig. 1.

En la Fig. 2 pueden apreciarse las probetas para ensayo perpendicular y paralelo a las fibras.



Fig. 2 - Conjunto de probetas

La Fig. 3 ilustra el dispositivo de ensayo. En la misma se aprecia la celda de cargas, la rótula, el dispositivo de aplicación de la fuerza y el sistema de medición de deformaciones.

PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DE LA FUERZA

Previo a los ensayos se estimó la carga de rotura para establecer el valor de los intervalos de carga a utilizar. En cada ensayo se incrementó la fuerza hasta alcanzar el 40% de la carga estimada, se man-

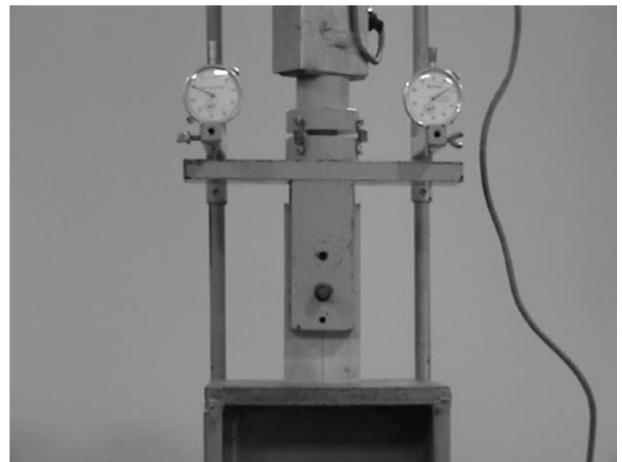


Fig. 3 - Dispositivo de carga, dirección paralela a las fibras

tuvo la misma por 30 segundos, a continuación se la redujo hasta el 10%, manteniéndola nuevamente durante 30 segundos y a continuación se la aumentó hasta que se produjo la rotura de la probeta o se alcanzó un desplazamiento de 5 mm.

En la Fig. 4 se muestra el procedimiento de carga.

Se registraron los valores de carga, los de desplazamiento de ambos comparadores y el tiempo de ensayo para cada uno de los puntos de la Fig. 4.

Para cada probeta ensayada se determinó su contenido de humedad y su densidad a partir de una porción aserrada luego del ensayo.

El diagrama ideal de Fuerza/Desplazamiento según EN 383 se muestra en la Fig. 5.

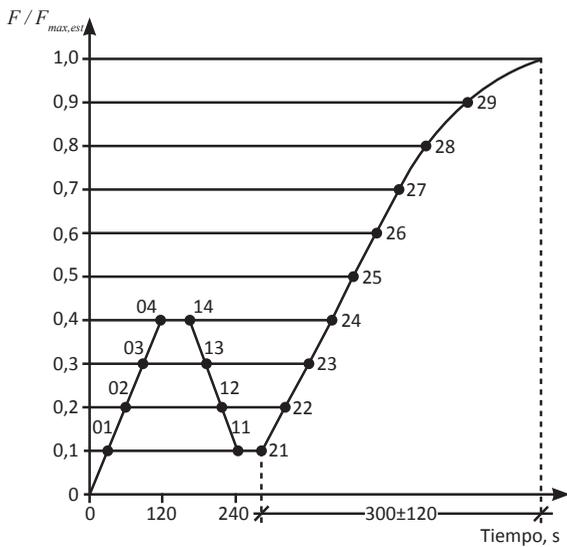


Fig. 4 - Procedimiento de carga

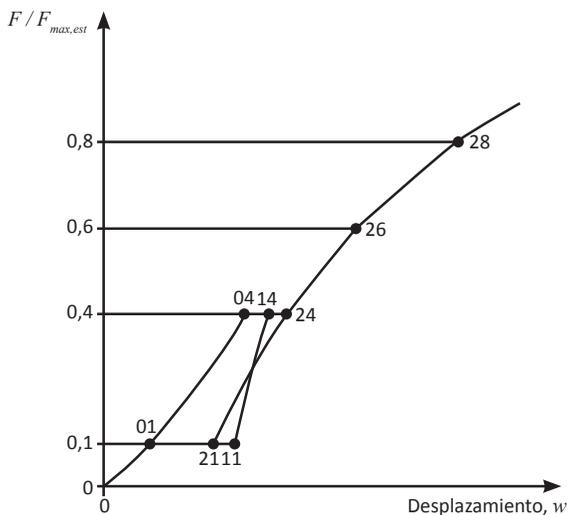


Fig. 5 - Diagrama ideal de Fuerza/Desplazamiento

CÁLCULOS

Para los cálculos se utilizaron las siguientes fórmulas dadas por la Norma EN 383.

Resistencia al aplastamiento

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

donde f_h es la resistencia al aplastamiento, en N/mm^2 , $f_{m\acute{a}x}$ la fuerza máxima correspondiente a la rotura o a 5 mm de deformación, en N, d el diámetro del perno, en milímetros y t el espesor de la probeta, en milímetros.

Resistencia Estimada al aplastamiento

$$f_{h,est} = \frac{f_{m\acute{a}x,est}}{d \times t} \quad (2)$$

donde $f_{h,est}$ es la resistencia estimada al aplastamiento, en N/mm^2 , $f_{m\acute{a}x,est}$ la carga máxima estimada, en N, d el diámetro del perno, en milímetros y t el espesor de la probeta, en milímetros.

Desplazamiento inicial

$$w_i = w_{04} \quad (3)$$

donde w_i es el desplazamiento inicial, en milímetros y w_{04} el desplazamiento correspondiente al punto 04 del procedimiento de carga de la Fig. 5, en milímetros.

Desplazamiento inicial modificado

$$w_{i,mod} = \frac{4}{3} (w_{04} - w_{01}) \quad (4)$$

donde $w_{i,mod}$ es el desplazamiento inicial modificado, en milímetros, w_{04} el desplazamiento correspondiente al punto 04 del procedimiento de carga de la Fig. 5, en milímetros y w_{01} el desplazamiento correspondiente al punto 01 del procedimiento de carga de la Fig. 5, en milímetros.

Desplazamiento Elástico

$$w_e = \frac{2}{3} (w_{14} + w_{24} - w_{11} - w_{21}) \quad (5)$$

donde w_e es el desplazamiento elástico, en milímetros, w_{14} el desplazamiento correspondiente al punto 14 del procedimiento de carga de la Fig. 5, en milímetros, w_{24} el desplazamiento correspondiente al punto 24 del procedimiento de carga de la Fig. 5, en milímetros, w_{11} el desplazamiento correspondiente al punto 11 del procedimiento de carga de la Fig. 5, en milímetros y w_{21} el desplazamiento correspondiente al punto 21 del procedimiento de carga de la Fig. 5, en milímetros.

Módulo de aplastamiento inicial

$$K_s = \frac{0,4 \times f_{h,est}}{w_{i,mod}} \tag{6}$$

donde K_s es el módulo de aplastamiento inicial, en N/mm^3 , $f_{h,est}$ la resistencia estimada al aplastamiento, en N/mm^2 y w_i el desplazamiento inicial, en milímetros.

Módulo de aplastamiento

$$K_s = \frac{0,4 \times f_{h,est}}{w_{i,mod}} \tag{7}$$

donde K_s es el módulo de aplastamiento, en N/mm^3 , $f_{h,est}$ la resistencia estimada al aplastamiento, en N/mm^2 y $w_{i,mod}$ el desplazamiento inicial corregido, en milímetros.

Módulo de aplastamiento elástico

$$K_e = \frac{0,4 \times f_{h,est}}{w_e} \tag{8}$$

donde K_s es el módulo de aplastamiento elástico, en N/mm^3 , $f_{h,est}$ la resistencia estimada al aplastamiento, en N/mm^2 y w_e el desplazamiento elástico, en milímetros.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Determinación de la resistencia al aplastamiento

En la Tabla 1 se muestran para cada caso los valores de resistencia al aplastamiento para las direcciones paralela y perpendicular a la fibra y la densidad de la madera calculada según Norma (UNE-EN 384, 2010).

Parámetros	fh //	fh ⊥	γ //	γ ⊥
	N/mm ²	N/mm ²	Kg/m ³	Kg/m ³
PROMEDIO	34,37	27,16	446,08	452,42
DESVÍO STD	9,13	7,41	63,99	48,90
COV	27%	27%	14%	11%
MÁXIMO	61,48	49,19	623,15	556,52
MÍNIMO	21,73	13,73	303,00	354,12
PERCENTIL 5%	23,19	16,39	361,78	379,75

Tabla 1 - Valores de Resistencia al Aplastamiento y Densidad

Se realizó un análisis de regresión por separado en cada dirección para establecer la correlación existente entre las resistencias al aplastamiento y la densidad.

En la Tabla 2 se presentan los valores de correlación para ambas series y la ecuación de la regresión lineal. Se puede observar una alta correlación entre ambas propiedades, particularmente en el caso de tensión paralela a la fibra.

En las Figs. 6 y 7 se muestra la relación entre los valores de densidad y resistencia al aplastamiento para ambas direcciones y la recta de regresión lineal en cada caso.

Análisis de los desplazamientos

En la Fig. 8 se visualiza una gráfica relacionando la variación de la resistencia al aplastamiento en la dirección paralela a las fibras y su desplazamiento para el ciclo de carga completo.

En la Fig. 9 se presenta la variación entre el desplazamiento y la resistencia al aplastamiento graficado solamente para el segundo período de carga.

Se puede apreciar en el gráfico bajos valores

Parámetros	Coef. de Correlación	Ecuación de la regresión lineal
Correlación Tensión Paralela - Densidad	0,860	$y = 0.1225x - 20.254$
Correlación Tensión Perpendicular - Densidad	0,788	$y = 0.1184x - 26.393$

Tabla 2 - Coeficientes de correlación

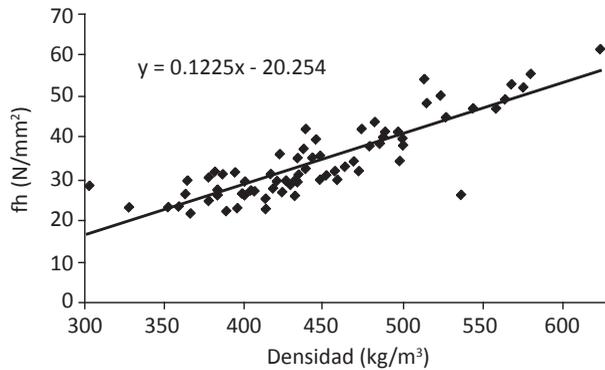


Fig. 6 - Correlación Densidad-Resistencia al aplastamiento paralelo a la fibra

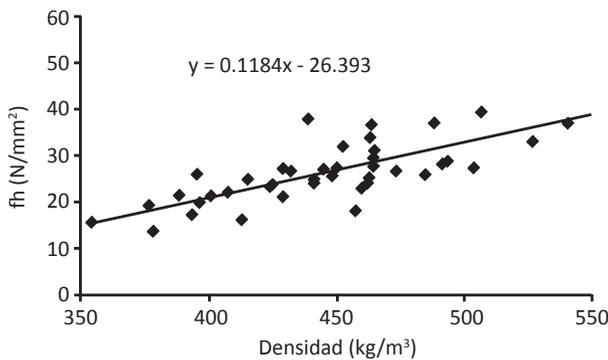


Fig. 7 - Correlación Densidad-Resistencia al aplastamiento perpendicular a la fibra

de desplazamiento con un comportamiento lineal de la curva hasta un valor levemente superior a la resistencia característica percentil 5%. A partir de ese punto se produce un fuerte incremento de los desplazamientos con menor incremento de las tensiones.

También se puede estimar el valor del desplazamiento esperado para la resistencia al aplastamiento característica percentil 5% siendo su valor

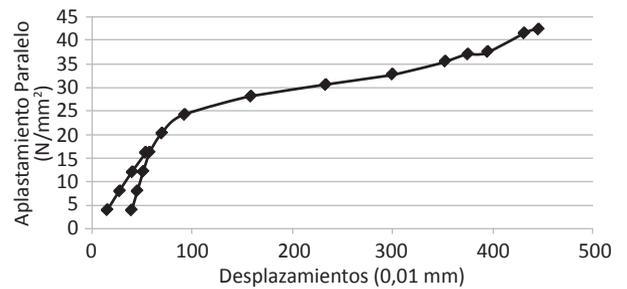


Fig. 8 - Gráfico desplazamiento-Resistencia al aplastamiento paralelo a la fibra

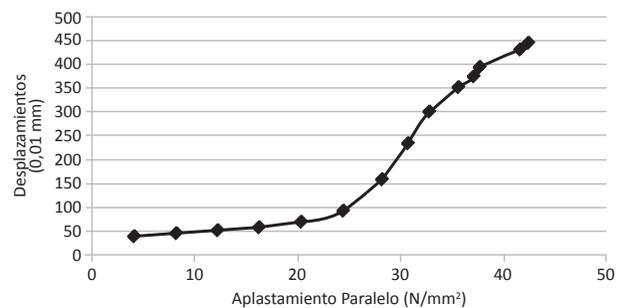


Fig. 9 - Gráfico Resistencia al aplastamiento-desplazamiento paralelo a la fibra

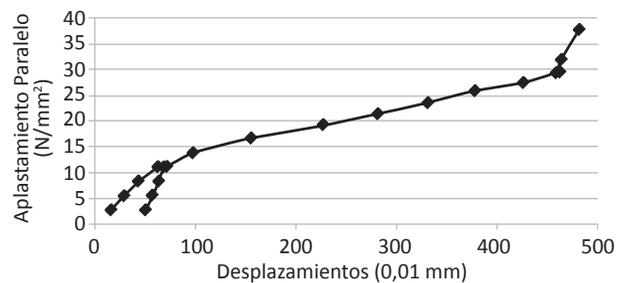


Fig. 10 - Gráfico desplazamiento - Resistencia al aplastamiento perpendicular a la fibra

aproximado de 1 mm.

Un análisis similar al anterior puede hacerse relacionando la variación de la resistencia al aplastamiento perpendicular a la fibra y el desplazamiento, tal como se presenta en la Fig. 10.

En la Fig. 11 se presenta la variación entre el desplazamiento y la resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras graficado solamente para el segundo período de carga.

En este caso también se observa una baja deformación, con un comportamiento casi lineal hasta la tensión de aplastamiento característica percentil 5% y un aumento considerable de las deformaciones a partir de ese punto.

El desplazamiento esperado para la resistencia al aplastamiento característica percentil 5% es de 1,50 mm según se aprecia en la Fig. 11.

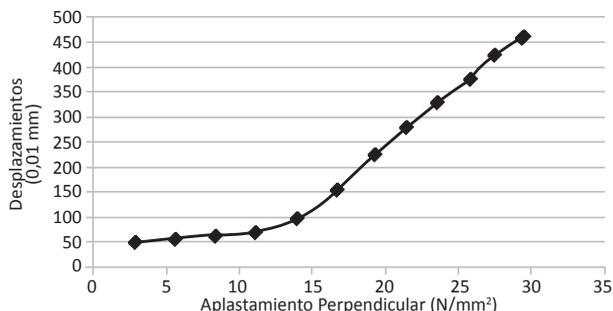


Fig. 11 - Gráfico Resistencia al aplastamiento - Desplazamiento perpendicular a la fibra

En los casos analizados se observa que para valores de resistencia al aplastamiento del orden de los valores característicos percentil 5% las deformaciones adquieren valores bajos y la curva tensión-desplazamiento tiene una tendencia de tipo lineal.

En la Tabla 3 se muestran los valores de desplazamientos para los ensayos paralelos a las fibras definidos por la EN 383 y calculados a partir de los resultados de las mediciones de acuerdo a las ecuaciones (3), (4) y (5).

W_i	$W_{i,mod}$	W_e	$W_{0.6}$	$W_{0.8}$
mm	mm	mm	mm	mm
0,54	0,51	0,23	0,93	2,34

Tabla 3 - Desplazamientos paralelo a las fibras

Del mismo modo se procede para calcular los valores de desplazamientos en la dirección perpendicular a las fibras, los que se muestran en la Tabla 4.

Con los valores de desplazamientos obtenidos se puede calcular el módulo de aplastamiento inicial (K_i), el módulo de aplastamiento (K_s) y el módulo de aplastamiento elástico (K_e) para ambas direcciones usando las ecuaciones (6), (7) y (8).

La Tabla 5 presenta los módulos de aplastamiento para la dirección paralela a la fibra.

K_i (N/mm³)	K_s (N/mm³)	K_e (N/mm³)
25,50	26,96	59,15

Tabla 5 - Módulos de Aplastamiento Paralelos

En la Tabla 6 se muestran los valores de los módulos en dirección perpendicular a las fibras.

K_i (N/mm³)	K_s (N/mm³)	K_e (N/mm³)
17,29	17,41	40,65

Tabla 6 - Módulos de Aplastamiento Perpendiculares

Comparación con las NDS

Las NDS 2005 proponen una tabla (TABLE 11.3.2) para calcular los valores de resistencia al aplastamiento en función del diámetro del perno y de la gravedad anhidra.

La comparación con los valores de esta tabla tiene suma importancia porque la misma se propone como valor de diseño de referencia para la resistencia al aplastamiento en el suplemento 4 del proyecto CIRSOC 601 “Reglamento Argentino de Estructuras de Madera” en discusión pública.

La gravedad anhidra de 5° percentil de las probetas ensayadas se determinó de acuerdo a lo expresado en la norma, partiendo de la gravedad específica a un determinado contenido de humedad G_{mc} .

$$G = \frac{G_{mc}}{(1 + mc) - 0.84 \cdot mc \cdot G_{mc}} \quad (9)$$

donde G_{mc} es la gravedad específica a un determinado contenido de humedad, G la gravedad anhidra y mc el contenido de humedad expresado como cociente entre el peso del agua contenida y el peso anhidro.

El valor de la gravedad anhidra para el híbrido es de $0,337 \text{ g/cm}^3$ calculado sobre el total de las probetas analizadas.

Para un perno de 7 mm los valores aportados por la tabla de las NDS es de $25,97 \text{ N/mm}^2$ en la dirección paralela a la fibra y de $16,69 \text{ N/mm}^2$ para la dirección perpendicular.

Las NDS y el proyecto CIRSOC 601 presentan coeficientes de ajuste por duración de la carga considerando como carga normal la correspondiente a 10 años.

La tabla 2.3.2 de las NDS indica que para cargas de distinta duración acumulada se deben multiplicar las tensiones de diseño de referencia con los valores de C_D con el fin de tener en cuenta el cambio en la resistencia del material en función del tiempo de actuación de la carga. Como los ensayos de resistencia al aplastamiento tienen una duración aproximada de 10 minutos, los valores se afectaron con un factor de corrección $C_D = 1,6$.

En la Tabla 7 se indican los valores comparativos.

Si se comparan los valores dados por las NDS con los valores experimentales corregidos por el factor de duración de la carga C_D se aprecia que los valores experimentales obtenidos son sensiblemente menores a los valores dados por las NDS.

Parámetros	Unidades	fh //	ft⊥
Resist. Experimental Percentil 5%	N/mm ²	23,19	16,39
Resist. determinada con NDS	N/mm ²	25,97	16,69
Resist. Experimental corregida con Factor $C_D=1,6$	N/mm ²	14,50	10,25
Relación entre valor experimental corregido y valor NDS	%	56%	61%

Tabla 7 - Comparación con valores de la NDS

CONCLUSIONES

Para el Híbrido *Pinus elliotii* var. *elliotii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* cultivado en la provincia

de Misiones, Argentina, se obtuvieron los siguientes valores:

- Una resistencia característica al aplastamiento paralelo a las fibras percentil 5% de $23,19 \text{ N/mm}^2$ para desplazamientos del orden de 1 mm.

- Una resistencia característica al aplastamiento perpendicular a las fibras percentil 5% de $16,39 \text{ N/mm}^2$ para desplazamientos del orden de 1,5 mm.

Las deformaciones resultaron bajas para la resistencia al aplastamiento percentil 5% tanto para la dirección paralela como para la perpendicular a la fibra. La curva desplazamiento - resistencia presentó un comportamiento casi lineal en ese intervalo.

Los resultados experimentales de las resistencias al aplastamiento corregidos por el factor de duración de la carga son del orden del 60 % de los valores determinados a partir de la NDS, usando como parámetros de entrada el diámetro del perno y la densidad anhidra.

AGRADECIMIENTOS

A la firma Pindó de la Localidad de Esperanza, Provincia de Misiones, Argentina, que colaboró con el proyecto aportando la madera para los estudios. A los alumnos, becarios y graduados de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Venado Tuerto de la Universidad Tecnológica Nacional que participaron activamente del grupo GIDEC, colaborando con los ensayos.

REFERENCIAS

Proyecto CIRSOC 601 Reglamento Argentino de Estructuras de Madera –En discusión Pública–, 2011.

NDS. National Design Specification for Wood Construction American Forest & Paper Association. American Wood Council. Washington DC. USA, 2005.

Gauchat, Rodríguez, Belaver, Bischof, *Pinus elliotii* var. *elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*. Híbridos de alta productividad combinando crecimiento y forma”. Revista IDIA XXI, Nro. 8. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 2005.

Malan, “The Basic Wood Properties and Sawtimber Quality of South African Grown *Pinus elliotii* x *Pinus caribaea*” South African Forestry Journal Volume 173,

Issue 1, pag. 35-41, 1995.

Guillaumet, Manavella, Filippetti, Diab y Armas, "Caracterización del híbrido *Pinus elliotti* var. *elliotti* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* "F2" para su utilización en vigas laminadas encoladas". *Actas del CIMAD 11 – 1º Congreso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção*, 7al 9 de junio de 2011, Coimbra, Portugal, 2011.

DIN EN 383. *Deutsches Institut Für Normung. Bes-*

timung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel. Berlin, 2007.

EN 383. *Determinación de la resistencia al aplastamiento y módulo de aplastamiento para elementos de fijación tipo clavija. Agencia Española de Normalización y Certificación, 1995.*

UNE-EN 384. "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad". *Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid. España, 2010.*