

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL APLASTAMIENTO EN MADERA DE *POPULUS DELTOIDES* 'AUSTRALIANO 129/60', COMPARACIÓN CON LOS VALORES DADOS POR EL CIRSOC 601

DETERMINATION OF THE EMBEDMENT STRENGTH IN WOOD OF *POPULUS DELTOIDES* 'AUSTRALIANO 129/60', COMPARISON WITH VALUES GIVEN BY THE CIRSOC 601

Roberto D. Manavella ⁽¹⁾ (P), Alfredo A. Guillaumet ⁽²⁾, Cesar Alí Mossre ⁽³⁾, Patricio Arrien ⁽⁴⁾

(1) Ing. Civil, Profesor Titular, Investigador, Universidad Tecnológica Nacional FRVT. Argentina.

(2) Ing. en Construcciones, Profesor Titular, Investigador, Univ. Tec. Nacional FRVT y UNNOBA. Argentina.

(3) Ing. Mecánico, Jefe Trab. Práct., Investigador, Univ. Nac. del Noroeste de la Prov. de Bs As. Argentina.

(4) Ing. Mecánico, Investigador, Univ. Nac. del Noroeste de la Prov. de Bs As. Argentina.

Dirección de contacto: aaguillaumet@rec.utn.edu.ar; (P) Presentador

Código de identificación: T3-20

Resumen

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 especifica valores de diseño de referencia y factores de ajuste para el uso de la madera aserrada. En el capítulo 8 se establecen disposiciones de diseño para uniones mecánicas que se complementan con el aporte de la Tabla S.4.1.1-1 del Suplemento 4, basada en las NDS 2005, donde se presentan valores de referencia de la resistencia al aplastamiento en función de la gravedad anhidra y el diámetro del perno. En este trabajo se determinaron valores de resistencia al aplastamiento para madera de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' procedente del delta del río Paraná, Argentina. Se realizaron 571 ensayos de acuerdo a la norma UNE-EN 383:2007, utilizando pernos rígidos de 5, 6, 7, 8 y 10 mm, 303 en la dirección paralela a la fibra y 268 en la dirección perpendicular, obteniéndose valores de resistencia característica al aplastamiento percentil 5 % de 21,43 N/mm² y de 12,69 N/mm² respectivamente.

En este documento también se efectuó una importante evaluación de la influencia del diámetro del perno y la densidad anhidra en la resistencia al aplastamiento. Al comparar los resultados experimentales obtenidos con los de referencia presentados en el CIRSOC 601 se observan, para algunos diámetros, diferencias apreciables que coinciden con las expuestas en otras publicaciones. De acuerdo a esto, se sugiere que los valores especificados por el Reglamento Argentino sean utilizados con precaución, hasta tanto se ratifique o desestime la tendencia observada.

Palabras clave: resistencia al aplastamiento; uniones; álamo; influencia del diámetro; CIRSOC 601

Abstract

*The Argentine Regulation for Wooden Structures (CIRSOC 601), specifies reference design values and adjustment factors for the use of sawn timber. Chapter 8 establishes design directives for mechanical joints that are complemented by the contribution of Table S.4.1.1-1 of Supplement 4, based on the 2005 NDS, where reference values of embedment strength are given in function of the specific gravity and the bolt diameter. In this work, values of embedment strength were determined for wood of *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' of the delta of the Parana River, Argentina. A total of 571 tests were performed according to UNE-EN 383:2007, using rigid bolts with diameters 5, 6, 7, 8 and 10 mm, 303 in the parallel direction to the fiber and 268 in the perpendicular direction. The characteristic resistance values 5% percentile obtained were of 21,43 N/mm² and 12,69 N/mm² respectively.*

Also, in this paper, is made, an important evaluation of the influence of bolt diameter and specific gravity on embedment strength. When comparing the experimental results obtained with the reference values presented in CIRSOC 601, there are appreciable differences, for some diameters, which coincide with those shown in other publications. According to this, it is suggested that the values specified by the Argentine Regulation be used with caution, until the observed trend is ratified or rejected.

Keywords: embedment strength; joints; poplar; dowel bearing strength; CIRSOC 601

1. INTRODUCCIÓN

Los valores de la resistencia al aplastamiento de la madera y las propiedades mecánicas del elemento metálico utilizado, son parámetros básicos, aunque no únicos, para el cálculo de la capacidad portante de una unión, en cualquiera de los métodos usados en la actualidad.

A continuación se citan algunos ejemplos. Para la aplicación del Eurocódigo 5 es necesario conocer básicamente, el valor característico de la tensión al aplastamiento de la madera y los valores característicos tanto de la resistencia a la extracción como del momento plástico del elemento de unión. En la norma brasileña NBR 7190, según lo indicado en su capítulo “Ligações com pinos metálicos”, los datos de partida indispensables para realizar el cálculo de una unión con elementos metálicos, son la resistencia de cálculo al aplastamiento de la madera y la resistencia de cálculo a fluencia de la clavija. En tanto que para calcular según el Reglamento Argentino, se necesita conocer el valor característico de la resistencia al aplastamiento de la madera y el valor característico de la tensión de fluencia en flexión de la clavija.

Si no se disponen de valores de resistencia al aplastamiento el CIRSOC 601 permite obtenerla a partir de la Tabla S.4.1.1-1. En dicha tabla se presentan valores de resistencia al aplastamiento de referencia, F_e , en N/mm^2 , para uniones con elementos de fijación tipo clavija sometidas a carga lateral, en función de la gravedad anhidra de la madera y del diámetro de perno. Esta tabla tiene su origen en la publicada en las NDS 2005, como tabla 11.3.2, la cual sigue vigente como tabla 12.3.3. en la actualización 2015 (NDS 2015).

Existen trabajos de investigación previos sobre madera de álamo “*Populus deltoides* Australiano 129/60” (Manavella et al, 2016), (Manavella et al, 2014), y sobre el híbrido *Pinus Elliottii* var. *Elliottii* x *Pinus Caribaea* var. *Hondurensis* (Manavella et al, 2012), especies de densidades similares, donde se han comparado los valores de resistencia al aplastamiento experimentales con los presentados en el CIRSOC 601, observándose que los resultados de ensayo difieren sensiblemente de los valores de referencia indicados por el Reglamento. También se han realizado trabajos sobre madera de *Araucaria angustifolia* usando pasadores rígidos (Guillaumet et al, 2010) y pernos deformables (Guillaumet et al, 2011).

La correlación existente entre la resistencia al aplastamiento y la densidad de la madera ha sido motivo de investigación de varios autores que han corroborado la hipótesis de que a mayor densidad del material mayor resistencia. También han analizado la influencia del diámetro del elemento de fijación sobre la resistencia al aplastamiento paralela y perpendicular a la fibra, verificándose que para la dirección paralela no se manifiestan variaciones significativas, en tanto que se ha observado que para la dirección perpendicular la resistencia disminuye a medida que aumenta el diámetro. Sawata K. et al (2002), en su trabajo sobre *Picea jezoensis* y *Abies sachalinensis* madera de densidad media aproximada de $400 kg/m^3$ y para diámetros de pasadores de 8, 12, 16 y 20 mm, indica que existe una correlación significativa entre la resistencia al aplastamiento y la densidad, señalando además, que para ensayos realizados bajo norma EN 383, el valor de la resistencia paralela a la fibra es apenas influenciado por el diámetro de la clavija, en tanto que, para la dirección perpendicular aunque también afecta poco, se observa una disminución de la resistencia a medida que aumenta el diámetro.

El presente trabajo tiene como primer objetivo determinar la resistencia al aplastamiento en la dirección paralela y perpendicular a la fibra, en madera de álamo “*Populus deltoides* Australiano 129/60” procedente del delta del Río Paraná, Argentina usando pernos rígidos de 5, 6, 7, 8 y 10 mm de acuerdo a la norma UNE-EN 383:2007 y comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los valores de referencia propuestos en la Tabla S.4.1.1-1. del Reglamento Argentino, a fin de ratificar o desestimar las tendencias observadas en publicaciones anteriores. También se busca establecer la influencia del diámetro del pasador sobre la resistencia al aplastamiento en ambas direcciones.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Material de ensayo

El material de ensayo fue elaborado a partir de una selección aleatoria de madera aserrada procedente de una plantación de Álamo *Populus deltoides* ‘Australiano 129/60’ implantada en el delta del río Paraná, Argentina. El lote estaba compuesto de 200 piezas que fueron entregadas secas y aserradas en tablas de 1" x 4" x 2,2 m de largo. En el laboratorio de la UTN Facultad Regional Venado Tuerto se procedió a su acondicionamiento consistente en un canteado y un cepillado en ambas caras hasta un espesor de 23 mm. A continuación se separó el material libre de defectos y se fabricaron las probetas de acuerdo a la norma UNE-EN 383:2007. Se hace notar que sobre el material de ensayo destinado a la confección de las probetas para pasador 5 mm se realizó un segundo cepillado para llevarlo a un espesor de 20 mm. Por último, la piezas se almacenaron en cámara controlada para su estabilización, a una temperatura de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y a una humedad relativa ambiente de $(65 \pm 5) \%$ hasta su ensayo.

Se confeccionaron un total de 571 probetas, 303 para ensayar en la dirección paralela a las fibras y 268 para la dirección perpendicular. En la Figura 1 se muestra la geometría genérica de las probetas en función del diámetro de pasador, para la dirección paralela y perpendicular, establecida por la normativa de ensayo. En la Tabla 1 se indican los valores de los parámetros adoptados y las medidas finales de las probetas paracada diámetro de perno.

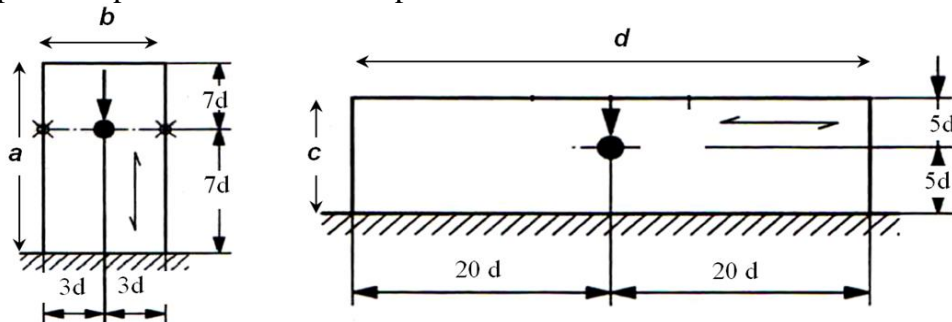


Figura 1: Dimensiones de las probetas

Como elementos de fijación se utilizaron pasadores rígidos confeccionados con acero trefilado de diámetro 5, 6, 7, 8, y 10 mm. La condición de perno rígido, según especifica la norma, viene dada por la relación entre el espesor de la pieza y el diámetro de la clavija y debe estar entre $1,5d$ y $4d$, condición que se cumple para todos los casos.

Tabla 1: Dimensiones de las probetas según diámetro de perno.

Dimensión	Unid.	Diámetro de pasador (d en mm)				
		5	6	7	8	10
$3.d$ (*)	mm	15	18	21	24	30
$5.d$ (*)	mm	25	30	35	40	50
$7.d$ (*)	mm	35	42	49	56	70
$20.d$ (*)	mm	100	120	140	160	200
a (**)	mm	70	84	98	112	140
b (**)	mm	30	36	42	48	60
c (**)	mm	50	60	70	80	100
d (**)	mm	200	240	280	320	400

(*) Dimensiones en función de d (diámetro del perno o pasador), según UNE-EN 383:2007
(**) Valores de a, b, c, d de acuerdo a lo indicado en la Figura 1

De acuerdo a la prescripción de la norma, la colocación de los elementos de fijación debe ser la misma que se utiliza en la práctica, para el caso de pernos se realiza con orificio sobredimensionado. En nuestro caso se taladraron orificios con una holgura de 0,25 mm, los que fueron realizados sobre

una perforadora de banco a fin de garantizar la perpendicularidad entre el eje del pasador y la cara de apoyo de la pieza.

2.2 Equipo y dispositivos

La carga fue aplicada con una máquina Universal de ensayos de accionamiento hidráulico marca Baldwin con capacidad máxima de 300 KN. La misma posee una válvula reguladora de caudal manual con la cual se puede variar según necesidad la velocidad de aplicación de la carga. La medición de las cargas se realizó a través de una celda y un transductor de registración continua con una capacidad máxima de 50 KN y precisión de 5 N. Entre la máquina y el dispositivo de ensayo se interpuso una rótula para garantizar la perpendicularidad de la aplicación de la carga. Se aseguró que la probeta estuviera colocada simétricamente en el dispositivo de ensayo. Las deformaciones fueron medidas usando dos relojes comparadores digitales marca Mitutoyo de rango 0-12,7 mm, y lectura de 0,01mm, dispuestos simétricamente.

Las lecturas de carga y deformación se realizaron a través de tres cámaras web, una para cada reloj comparador y una para el lector de la celda de carga. Usando el programa “Cerberus” se visualizó de manera simultánea en pantalla las cámaras y un cronómetro digital que indicaba el tiempo de ensayo. La imagen de cada escalón de carga se almacenó, previa captura de pantalla con el software apropiado. A posteriori se transfirieron manualmente los datos extraídos de las imágenes guardadas a una planilla de cálculo para su procesamiento final. En la Figura 2 se observa una probeta para ensayo paralelo a la fibra, ubicada en el dispositivo de ensayo. En la parte inferior puede verse la rótula interpuesta y la celda de carga y en el lateral derecho se distingue la cámara Web para la lectura de uno de los relojes comparadores.



Figura 2: Probeta y dispositivo de ensayo

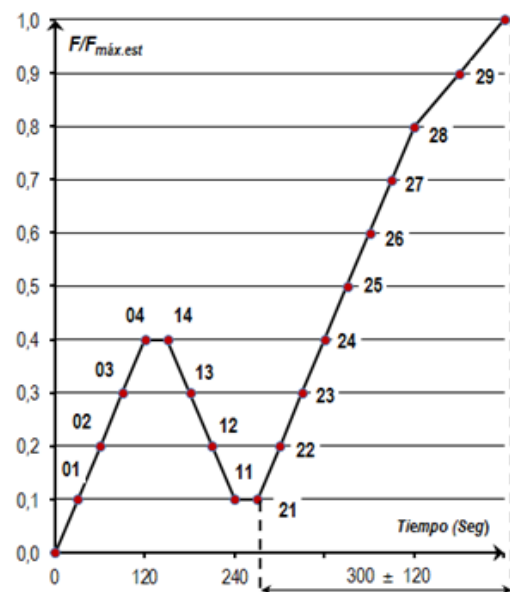


Figura 3: Procedimiento de carga, según UNE-EN 383:2007

2.3 Procedimiento de carga

La aplicación de la carga se ajusta al procedimiento dado por la Norma UNE-EN 383:2007, el cual puede observarse en la Figura 3 donde también se visualizan los puntos donde deben registrarse los desplazamientos. Mediante experiencias previas, cálculo o ensayos preliminares se debe establecer la carga máxima estimada $F_{máx,est}$, ya que a partir de ese valor se establecen los intervalos de cargas

a aplicar en el ensayo. En nuestro caso se ejecutaron ensayos previos a los efectos de determinar su valor.

El procedimiento de carga para cada probeta se visualiza en la Figura 3 y consta de dos ciclos. 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 que consiste en la aplicación de la carga en forma progresiva hasta la finalización del ensayo. El ensayo se detiene cuando se llegó a la carga máxima, por rotura física de la probeta, o cuando la deformación relativa alcanzó un valor de 5 mm. La carga se aumenta o disminuye con velocidad de deslizamiento constante del cabezal de carga y la fuerza máxima debe alcanzarse en un tiempo de 300 ± 120 segundos a partir del ciclo de carga previo (punto 21).

Para cada probeta se registró la fuerza aplicada, el tiempo y las deformaciones correspondientes a los puntos indicados en el procedimiento de carga, como la media entre las lecturas de los dos comparadores. La determinación de la humedad y de la densidad de cada probeta se realizó de acuerdo a las normas ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975). Se ajustaron los valores de densidad a la humedad de referencia del 12%, de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 384:2010.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Determinación de la resistencia al aplastamiento

La resistencia al aplastamiento se calculó usando la fórmula (1), dada por la Norma UNE-EN 383:2007.

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

f_h : Resistencia al aplastamiento, en N/mm^2 .

$F_{m\acute{a}x}$: 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.

Los valores de resistencia al aplastamiento en la dirección paralela a las fibras para pasadores de diámetros 5, 6, 7, 8 y 10 milímetros y para el total de la muestra se observan en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de resistencia al aplastamiento paralelo a las fibras

PARÁMETROS	UNIDAD	DIÁMETRO DE PERNO (mm)					Todas
		5	6	7	8	10	
Promedio	N/mm^2	28,87	27,03	31,11	26,56	24,04	27,53
Desvio STD	N/mm^2	4,07	3,58	4,39	3,24	3,02	4,41
Mínimo	N/mm^2	22,44	20,32	22,90	20,37	19,57	19,57
Máximo	N/mm^2	38,80	38,13	44,52	33,41	34,32	44,52
Percentil 5%	N/mm^2	23,23	21,94	25,22	21,69	20,05	21,43
COV %	%	14,1	13,3	14,1	12,2	12,6	16,0
Nro de Probetas (n)		60	57	64	57	65	303

La resistencia al aplastamiento paralelo promedio varía entre un valor mínimo de $24,04 N/mm^2$ y un valor máximo de $31,11 N/mm^2$ teniendo una variación del orden del 30 % entre dichos extremos. En tanto que si se analiza la resistencia paralela percentil 5 % la variación entre el mayor y el menor de los valores es del orden del 26 %.

Los mayores valores se dan para el pasador de diámetro 7 mm y los menores para el perno de diámetro 10 mm, tanto para la resistencia promedio como para la resistencia percentil 5%. La variación del COV se encuentra entre el 12,2% y el 14,1 %.

El valor de la resistencia al aplastamiento paralela a las fibras percentil 5 % para el total de la muestra es de 21,43 N/mm².

Tabla 3: Valores de resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras

PARÁMETROS	UNIDAD	DIÁMETRO DE PERNO (mm)					Todas
		5	6	7	8	10	
Promedio	N/mm ²	24,71	21,19	22,00	17,62	16,25	20,50
Desvio STD	N/mm ²	6,46	5,13	4,16	4,01	3,64	5,70
Mínimo	N/mm ²	16,08	13,01	12,03	11,85	10,79	10,79
Máximo	N/mm ²	45,75	34,94	33,29	28,31	26,70	45,75
Percentil 5%	N/mm ²	17,25	14,04	14,84	12,45	11,05	12,69
COV %	%	26,1	24,2	18,9	22,7	22,4	27,8
Nro de Probetas (n)		59	47	59	49	54	268

Los valores de resistencia al aplastamiento en la dirección perpendicular a las fibras para los cinco diámetros de pasador y para el total de la muestra se indican en la Tabla 3.

Se observa que los valores de resistencia al aplastamiento perpendicular promedios varían desde un mínimo de 16,25 N/mm² hasta un máximo de 24,71 N/mm² con una variación entre extremos de alrededor del 52 %. Esta variación entre valores extremos aumenta al 56 % al evaluar los resultados de la resistencia perpendicular percentil 5 %. En ambos casos el valor mayor se da para pasador de 5 mm de diámetro y el menor valor para el perno de diámetro 10 mm.

El valor de la resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras percentil 5 % para el total de la muestra es de 12,69 N/mm².

Se hace notar que los valores de resistencia al aplastamiento promedio y percentil 5%, obtenidos en los ensayos paralelos a las fibras son superiores a los valores de los ensayos perpendiculares, para todos los diámetros estudiados.

3.2 Determinación de la densidad 12 % y correlación con la resistencia al aplastamiento

Se calcularon los valores de densidad corregida a la humedad de referencia del 12% para cada uno de los diámetros ensayados y para el total de la muestra según las indicaciones dadas por la norma UNE-EN 384. Los resultados se muestran en la Tabla 4 y se aprecia que las diferencias entre valores máximos y mínimos tanto para la densidad media corregida al 12 % como para la densidad percentil 5 %, están por debajo del 5 %.

Tabla 4: Valores de densidad corregida al 12 %

PARÁMETROS	UNIDAD	DIÁMETRO DE PERNO (mm)					Todas
		5	6	7	8	10	
Promedio	Kg/m ³	400,07	393,00	408,92	397,05	394,03	398,87
Desvio STD	Kg/m ³	34,68	31,58	26,40	30,64	32,41	31,66
Mínimo	Kg/m ³	334,71	345,04	350,76	354,48	342,00	334,71
Máximo	Kg/m ³	502,06	496,60	475,33	483,61	520,73	520,73
Percentil 5%	Kg/m ³	352,17	357,53	363,85	360,20	348,13	356,96
COV %	%	8,7	8,0	6,5	7,7	8,2	7,9

Mediante un análisis de regresión lineal, se estableció la correlación existente entre la resistencia al aplastamiento en cada una de las direcciones y la densidad corregida al 12 %, para los cinco diámetros ensayados. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5. Para los diferentes diámetros y las distintas direcciones de ensayo se observa una relación de moderada a fuerte en los

coeficientes de correlación. La menor correlación se da para el perno de diámetro 7 mm y la mayor se obtiene para el pasador de diámetro 8 mm, ambos en la dirección paralela a las fibras.

Tabla 5: Coeficientes de correlación resistencia-densidad 12 %

PARÁMETROS	DIÁMETRO DE PERNO (mm)				
	5	6	7	8	10
Correlación Tensión Paralela -Densidad 12 %	0,675	0,610	0,563	0,800	0,799
Correlación Tensión Perpendicular -Densidad 12 %	0,790	0,567	0,657	0,734	0,633

3.3 Determinación de la densidad Anhidra según CIRSOC 601

De acuerdo a lo expresado en el Reglamento CIRSOC 601, 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 dada en (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.

Se calcularon los valores de densidad anhidra para su posterior uso en el cálculo de los valores de la resistencia al aplastamiento de referencia, de acuerdo al Reglamento Argentino. Los valores obtenidos para cada diámetro y para el total de la muestra se visualizan en la Tabla 6. Se observa que para la densidad anhidra percentil 5 % los valores para cada diámetro y para el total de la muestra, difieren en menos de un 5 % entre extremos.

El valor de densidad anhidra percentil 5 % para el total de la muestra es de muestra es de 329,52 Kg/m³.

Tabla 6: Valores de densidad anhidra según CIRSOC 601

PARÁMETROS	UNIDAD	DIÁMETRO DE PERNO (mm)					Todas
		5	6	7	8	10	
Promedio	Kg/m ³	370,75	363,61	379,59	367,98	364,84	369,61
Desvio STD	Kg/m ³	33,41	30,45	25,41	29,50	31,18	30,53
Mínimo	Kg/m ³	308,54	317,80	323,94	327,36	314,87	308,54
Máximo	Kg/m ³	469,58	464,04	443,70	451,77	487,82	487,82
Percentil 5%	Kg/m ³	324,67	330,08	336,22	332,63	320,88	329,52
COV %	%	9,0	8,4	6,7	8,0	8,5	8,3

3.4 Cálculo de la resistencia al aplastamiento de referencia según CIRSOS 601

3.4.1 Introducción

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera, permite calcular la resistencia al aplastamiento de referencia de la madera, F_e , en N/mm², en la dirección paralela y perpendicular, para uniones con elementos de fijación tipo clavijas sometidas a carga lateral, a partir de la densidad anhidra del material y del diámetro de perno. Estos valores se presentan en la Tabla S.4.1.1-1 del Suplemento 4. El CIRSOC 601 establece que "...Los valores de diseño de referencia para las tensiones, indicados en los Suplementos de este Reglamento, se refieren al material cuando es sometido a una carga que lo solicita al nivel de su tensión de diseño durante un tiempo acumulado

de aproximadamente 10 años, o al 90 % de una carga que solicita al material al nivel de su tensión de diseño en forma continua durante toda la vida útil de la estructura, sin que se afecte el coeficiente de seguridad adoptado. De acuerdo con este criterio y a los fines de este Reglamento, esta duración de la carga es considerada normal y, consecuentemente, para esta condición el factor de duración de la carga, C_D , será igual a 1...". La madera tiene la propiedad de soportar cargas máximas sustancialmente mayores cuando éstas actúan durante un tiempo breve que cuando lo hacen durante un tiempo prolongado. El Reglamento lo contempla a través de un *Factor de duración de la carga* (C_D) el cual está tabulado en el Capítulo 4 Tabla 4.3-2.

Los ensayos de resistencia al aplastamiento tienen una duración aproximada de 10 minutos, para efectuar la comparación con los valores de referencia propuestos en el CIRSOC 601, los resultados obtenidos de forma experimental se afectan con un factor de corrección por duración de la carga cuyo valor es $C_D=1,6$.

3.4.2 Cálculo de la resistencia al aplastamiento paralela a la fibra

El CIRSOC 601 establece que para diámetros de clavija menor a 6,35 mm, la resistencia al aplastamiento es independiente de la dirección de las fibras y del diámetro. De acuerdo a esto, para los pasadores de 5 mm y 6 mm los valores de resistencia al aplastamiento paralela y perpendicular a la fibra son iguales y se calculan a partir de una interpolación lineal entre los valores de densidades adecuados o aplicando la fórmula siguiente:

$$F_e = 114,4 * G^{1,84} \quad (3)$$

F_e: Resistencia al aplastamiento de referencia en N/mm^2 .

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

Por otra parte, indica que, para diámetros superiores a 6,35 mm, la resistencia al aplastamiento depende de la dirección de la fibra, estableciendo que para la dirección paralela el valor es independiente del diámetro de la clavija. La resistencia al aplastamiento paralela a la fibra para los pernos de 7 mm, 8 mm y 10 mm de diámetro tiene valores idénticos y se calcula por tabla, interpolando entre densidades o haciendo uso de la fórmula que a continuación se detalla:

$$F_{e//} = 77,2 * G \quad (4)$$

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

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

Tabla 7: Resistencia al aplastamiento paralela a las fibras. Comparación con CIRSOC 601

PARÁMETROS	Unidad	f _h //				
		DIÁMETRO DE PERNO (mm)				
		5	6	7	8	10
Resistencia Experimental 5 % Percentil (10 minutos) (1)	N/mm ²	23,23	21,94	25,22	21,69	20,05
Resistencia Experimental Corregida (con $C_D=1,6$ a 10 años) (2)	N/mm ²	14,52	13,71	15,76	13,55	12,53
Resistencia calculada según CIRSOC 601 (3)	N/mm ²	14,86	14,86	25,46	25,46	25,46
Relacion entre Valor Exp. Corregido y valor de CIRSOC 601	%	98%	92%	62%	53%	49%

(1) Resist.al aplastamiento Experimental paralela a la fibra Percentil 5% (Duración de carga 10 minutos)
(2) Resist.al aplastamiento Experimental paralela a la fibra Corregida por duracion de la carga con $C_D=1,6$ (Duración de carga 10 años)
(3) Resist.al aplastamiento de Referencia paralela (F_e), calculada de Tabla S.4.1.1-1 CIRSOC 601

En la Tabla 7, se indican los valores de resistencia al aplastamiento de referencia paralelo a las fibras calculados según el Reglamento Argentino, para cada diámetro de perno. También se muestran los resultados experimentales sin corregir con duración de carga de 10 minutos y los valores corregidos a 10 años donde se afectan los valores por el coeficiente de duración de la carga $C_D=1,6$, explicado anteriormente. Por último se presenta la relación entre los valores experimentales

corregidos y los calculados según CIRSOC. Se hace notar que se realizaron los cálculos por fórmula y por tabla, no existiendo diferencias apreciables entre los valores obtenidos interpolando en la Tabla S.4.1.1-1 y los calculados usando las expresiones dadas por el Reglamento.

Al analizar la relación entre los valores experimentales corregidos y la resistencia calculada según CIRSOC se observa que para diámetros menores a 6,35 mm, es decir para los pernos de 5 mm y 6 mm la coincidencia es alta, entre el 98% y el 92%. En tanto que si se comparan los diámetros mayores a 6,35 mm, dan valores notoriamente más bajos, entre el 62% y el 49%.

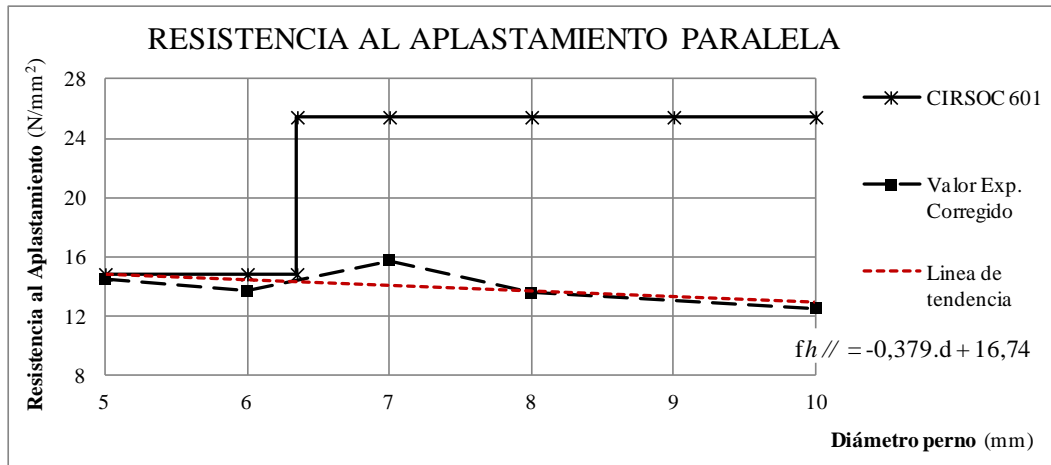


Figura 4: Gráfico comparativo de resistencia al aplastamiento paralela a las fibras

En la Figura 4 se muestra un gráfico con los valores de resistencia al aplastamiento paralela a las fibras dados por el Reglamento Argentino, los obtenidos experimentalmente afectados por el factor de duración de la carga y la línea de tendencia para estos últimos valores. El Reglamento propone dos valores constantes para la resistencia al aplastamiento de referencia paralela a las fibras con un corte bien definido en el diámetro de 6,35 mm, discontinuidad que no se visualiza en los valores experimentales. Al observar las curvas de la Figura 4 se aprecia que en el primer tramo del gráfico, hasta el diámetro de 6,35 mm, los valores experimentales copian con bastante similitud la ecuación propuesta por el CIRSOC, pero a partir de ese diámetro, el comportamiento de dichos valores se aleja notablemente de la expresión propuesta por el Reglamento, dando idea de que el comportamiento real para madera de esta densidad es una curva más continua y constante no compatible con el abrupto salto propuesto en la Tabla del Suplemento 4. Este comportamiento de la curva es similar al planteado por Sawata K. et al (2002), en su trabajo sobre *Picea jezoensis* y *Abies sachalinensis* donde señala que el valor de la resistencia paralela a la fibra es poco influenciado por el diámetro de la clavija. Para completar el análisis, se presenta una línea de tendencia para los resultados experimentales de resistencia al aplastamiento paralelo a las fibras corregidos con $C_D=1,6$. La ecuación lineal propuesta (5), tiene variaciones entre -5% y +12% respecto de los valores de ensayo.

$$fh // = -0,379. d + 6,74 \quad (5)$$

$fh//$: Resistencia al aplastamiento paralela a la fibra en N/mm^2

d : diámetro del pasador en mm

3.4.3 Cálculo de la resistencia al aplastamiento perpendicular a la fibra

Dado que el CIRSOC plantea que para diámetros menores a 6,35 mm, la resistencia al aplastamiento es independiente de la dirección de las fibras y del diámetro de perno, los valores de la resistencia al aplastamiento perpendicular a la fibra para los pernos de diámetro 5 mm y 6 mm son coincidentes con los calculados para la dirección paralela.

Para diámetros de clavija mayores a 6,35 mm el Reglamento indica que la resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras es función del diámetro y de la densidad anhidra. Su valor disminuye al aumentar el diámetro de perno y aumenta al aumentar la densidad. Se calcula a partir de la Tabla S.4.1.1-1. por interpolación entre diámetros y densidades o utilizando la expresión:

$$F_{e\perp} = 212 * G^{1,45} / D^{0,5} \quad (6)$$

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

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

D : Diámetro del perno en mm.

Tabla 8: Resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras. Comparación con CIRSOC 601

PARÁMETROS	Unidad	$f_{h\perp}$				
		DIÁMETRO DE PERNO (mm)				
		5	6	7	8	10
Resistencia Experimental 5 % Percentil (10 minutos) (1)	N/mm^2	17,25	14,04	14,84	12,45	11,05
Resistencia Experimental Corregida (con $Cd=1,6$ a 10 años) (2)	N/mm^2	10,78	8,77	9,27	7,78	6,91
Resistencia calculada según CIRSOC 601 (3)	N/mm^2	14,86	14,86	16,13	15,02	13,44
Relacion entre Valor Exp. Corregido y valor de CIRSOC 601	%	73%	59%	58%	52%	51%

(1) Resist. al aplastamiento experimental perpendicular a la fibra Percentil 5% (Duración de carga 10 minutos)

(2) Resist. al aplastamiento experimental perpendicular a la fibra Corregida por duracion de la carga con $CD=1,6$ (Duración de carga 10 años)

(3) Resistencia al aplastamiento de Referencia perpendicular (F_e), calculada de Tabla S.4.1.1-1 CIRSOC 601

En la Tabla 8, se indican, para cada diámetro, los valores de resistencia al aplastamiento de referencia perpendicular a las fibras calculados según el Reglamento Argentino, los resultados experimentales obtenidos para una duración de la carga de 10 minutos (tiempo de ensayo), los valores corregidos para una duración de carga de 10 años y la relación entre los valores experimentales corregidos y los dados por el Reglamento. Al examinar la relación entre los valores de resistencia calculados según CIRSOC 601 y los experimentales corregidos para una duración de la carga de 10 años, se observa que estos últimos son sensiblemente menores, entre el 73% y el 51% de los valores dados por la Norma. Se puede apreciar, además, que los valores de la relación van disminuyendo a medida que aumenta el diámetro de la clavija.

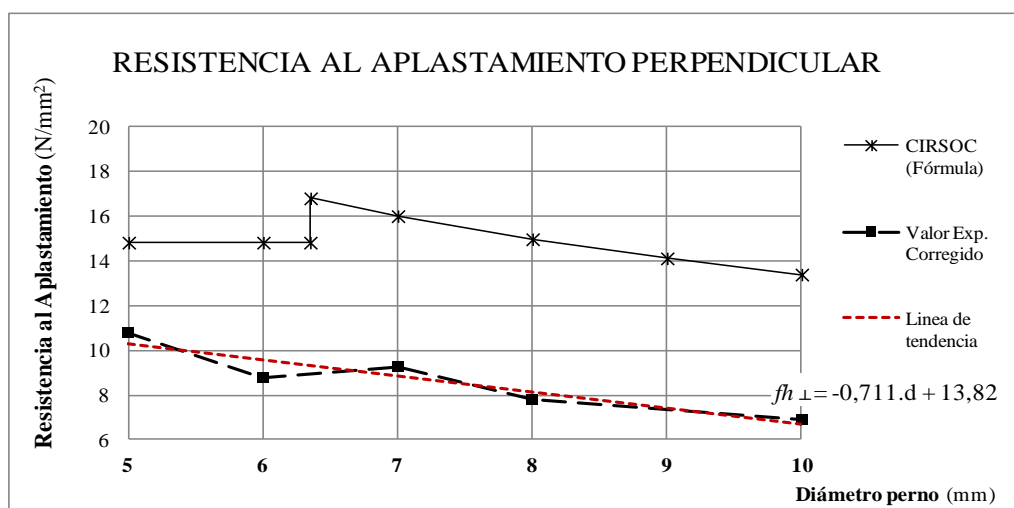


Figura 5: Gráfico comparativo de resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras

En la Figura 5 se visualiza un gráfico con los valores de resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras dados por el CIRSOC 601, los calculados experimentalmente afectados por el factor de duración de la carga y la línea de tendencia para estos últimos valores. Puede apreciarse que toda la

curva experimental está por debajo de la curva dada por el CIRSOC, indicando que los valores calculados experimentalmente y afectados por el factor de duración de la carga $C_D = 1,6$ son inferiores a los dados por el Reglamento. Para los pasadores de diámetro 7 mm, 8 mm y 10 mm se visualiza que las curvas son bastante paralelas pero desplazadas entre sí, lo que sugiere un comportamiento similar de la resistencia de ensayo al propuesto en la norma, pero con valores notoriamente menores, del orden del 58% al 51%.

La curva de valores experimentales se observa bastante continua, con disminución de los valores de resistencia al aplastamiento perpendicular a medida que disminuye el diámetro de clavija y sin apreciarse el corte bien definido que plantea el CIRSOC 601 en el diámetro de perno igual a 6,35 mm. Este comportamiento de la curva coincide con lo planteado por Sawata K. et al (2002) en su trabajo donde indica que para la dirección perpendicular, aunque la influencia también es poca, se observa una disminución de la resistencia a medida que aumenta el diámetro del pasador.

Los valores experimentales de resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras corregidos con $C_D=1,6$ responden a la ecuación lineal (7), con variaciones entre -8% y +5% respecto de los valores de ensayo.

$$fh_{\perp} = - 0,711. d + 13,82 \quad (7)$$

fh_{\perp} : Resistencia al aplastamiento perpendicular a la fibra en N/mm^2 .

d: diámetro del pasador en mm

4. CONCLUSIONES

1.- La resistencia característica al aplastamiento percentil 5%, en la dirección paralela a las fibras, para la madera de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' procedente del delta del río Paraná, Argentina, calculada según norma UNE-EN 383, tiene un valor de 21,43 N/mm^2 .

2.- La resistencia característica al aplastamiento percentil 5%, en la dirección perpendicular a las fibras, para la madera de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' procedente del delta del río Paraná, Argentina, calculada según norma UNE-EN 383, tiene un valor de 12,69 N/mm^2 .

3.- Para la resistencia al aplastamiento paralela a las fibras, los resultados obtenidos experimentalmente para diámetro de perno 5 mm y 6 mm se aproximan notoriamente a los propuestos en el CIRSOC 601, dando valores que no difieren en más de un 8 %. En tanto que para los diámetros 7 mm, 8 mm y 10 mm, los valores experimentales son sensiblemente menores con resultados entre el 62% y el 49% de los guarismos propuestos por el Reglamento.

4.- Los resultados obtenidos experimentalmente para la resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras, para todos los diámetros de perno estudiados, dan valores entre el 73% y el 51 % de los valores propuestos por el Reglamento Argentino. En particular, para los diámetros 7 mm, 8 mm y 10 mm, la curva experimental tienen un comportamiento muy similar a la curva dada por el CIRSOC 601 pero con valores sensiblemente menores.

5.- Los valores experimentales de resistencia al aplastamiento paralelo a la fibra son menos influenciados por el diámetro de perno que los resultados experimentales de la resistencia en la dirección perpendicular. Para ambas direcciones se evidencia una disminución de la resistencia al aumentar el diámetro del pasador, acentuándose esta tendencia en la dirección perpendicular.

6.- Tanto en la dirección paralela a la fibra como en la dirección perpendicular, se observa una correlación de moderada a fuerte entre la resistencia al aplastamiento y la densidad corregida al 12%.

7.- Se sugiere que los valores especificados por el Reglamento Argentino sean utilizados con cuidado, hasta tanto se ratifique o desestime la tendencia observada. En particular para la resistencia al aplastamiento en madera de Álamo puede ser conveniente utilizar, aunque con precaución y criterio, las ecuaciones (5) y (7) propuestas en el presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A los alumnos, becarios, graduados y docentes investigadores de UNNOBA y de UTN Facultad Regional Venado Tuerto por sus aportes en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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).
- [2] ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas, NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira, revisão ABNT NBR 7190. Brasil. (2011).
- [3] CIRSOC 601. Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad en Obras Civiles. (2016). Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Buenos Aires. (2016).
- [4] NDS 2005. 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] NDS 2015. American Wood Council. National Design Specification (NDS) for Wood Construction 2015 Edition. (2015).
- [6] Manavella R.D., Guillaumet A.A., Filippetti M.C., Tortoriello M., Alí Mossre C. Resistencia al aplastamiento en madera de álamo, influencia del diámetro de perno y la densidad. XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Asunción. Paraguay. (2016).
- [7] 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).
- [8] Sawata, K. & Yasumura M. “Determination of embedding strength of wood for dowel-type fasteners”, Journal of Wood and Sciences, Vol 48, Issue 2, pág 138-146. ISSN: 1435-0211. (2002).
- [9] Manavella R.D., Guillaumet A.A., Filippetti María C., Tortoriello M. Determinación de la Resistencia al Aplastamiento en Madera de Álamo para Uniones Tipo Clavija. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Montevideo. Uruguay. (2014).
- [10] Sosa Zitto, M.A; Dr. Ing. Rougier, V.C; Dr. Ing. Piter, J.C. Análisis comparativo de los resultados de un programa de ensayos sobre uniones ejecutadas con clavos de pequeño diámetro y el criterio de diseño del proyecto CIRSOC 601. 22º Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires. Argentina. (2012).
- [11] Guillaumet A.A., Manavella R.D; Filippetti M.C., Diab J. y Armas A. Comportamiento de uniones tipo clavija con pernos deformables en madera de Araucaria angustifolia. “1º Congresso Ibero-Latinoamericano Da Madeira Na Construção”. CIMAD 11. Coimbra. Portugal. (2011).
- [12] Manavella R.D., Guillaumet A.A., Filippetti M.C. Determinación de la resistencia al aplastamiento en madera de híbrido Pinus Elliottii var. Elliottii x Pinus Caribaea var. Hondurensis para uniones tipo clavija. 22º Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires. Argentina. (2012).
- [13] UNE-EN 383:2007. 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).
- [14] ISO 3130:1975. International Organization for Standardization. Wood-Determination of moisture content for physical and mechanical tests. (1975)
- [15] ISO 3131:1975. International Organization for Standardization. Wood-Determination of density for physical and mechanical tests. (1975)
- [16] UNE-EN 384:2010. Agencia Española de Normalización y Certificación. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. (2010).
- [17] UNE-EN 408:2011. Agencia Española de Normalización y Certificación. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. (2011).