

LA SEGURIDAD DE LAS CONEXIONES EN LAS ESTRUCTURAS DE MADERA.

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.

Ing. Sosa Zitto, M.A; Dr. Ing. Rougier, V.C; Dr. Ing. Piter, J.C.

Grupo de Estudio de Maderas (GEMA), Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional.

RESUMEN. Las estructuras reticuladas ejecutadas con tablas de *Eucalyptus grandis* y destinadas a salvar luces importantes han experimentado un gran crecimiento en el país. Sus conexiones constituyen el principal problema para su seguridad cuando están sometidas a la acción del viento. Las uniones clavadas tradicionales, ejecutadas manualmente, han sido las más utilizadas debido a su economía, pero el reducido espacio de que normalmente se dispone para colocar los clavos y la falta de resultados de ensayos normalizados han dificultado la tarea del proyectista estructural. Para solucionar esta problemática, se diseñó un programa empírico que abarcó un total de 322 ensayos con madera de esta especie orientados a determinar su aptitud para el clavado, su resistencia al aplastamiento, y el comportamiento mecánico de uniones múltiples materializadas con clavos de pequeño diámetro (2,2mm y 2,5mm) colocados neumáticamente. Los resultados mostraron que la utilización de estos elementos permite optimizar la geometría de las uniones, provee mayor resistencia que la obtenida aplicando las ecuaciones de diseño del Proyecto CIRSOC 601 y del Eurocódigo 5, y reduce la aparición de roturas frágiles. Estos resultados y las deformaciones que experimentan estas uniones fueron luego comprobados a través del análisis del comportamiento de un prototipo a escala natural.

ABSTRACT. Trusses built-up with boards of *E. grandis* and destined to cover long spans have acquired great importance in the country. The safety of these structures depends mainly on the design and execution of the connections. Due to economic reasons, joints with nails driven by hand have been widely used. However, the relatively small dimensions normally available at nodes as well as the lack of empirical results related to the mechanical behavior of this type of connections have hampered the achievement of a safe design. To solve this problem, an empirical research project enclosing 322 specimens of this timber species was design. The splitting tendency, the embedding strength and the mechanical behavior of multiple joints with nails of small diameter (2,2mm and 2,5mm) driven pneumatically were determined. Results showed that the use of this type of joints allows the improvement of the joint geometry and the diminution of brittle failures when compared to traditional joints. In addition, a high strength in comparison with that obtained according to the criterion of the Argentinean Project CIRSOC 601 and the Eurocode 5 was found. These results and the influence of connection slip on the truss deflection were checked through the analysis of the behavior of a prototype in structural sizes.

1- INTRODUCCIÓN.

Argentina cuenta con 1,15 millones de hectáreas de bosques cultivados, el 80 % de las plantaciones se encuentran en las provincias de Entre Ríos, Corrientes y Misiones, región geográfica conocida como la Mesopotamia Argentina. En la provincia de Entre Ríos, del total de plantaciones realizadas, el 90% corresponde al género *Eucalyptus*, siendo su principal exponente la especie *Eucalyptus grandis* y en menores cantidades *Eucalyptus glóbulus* y *Eucalyptus dunnii* del mismo género. El 10 % restante de las forestaciones corresponde a *Pinus elliottii/taeda*.

Las estructuras reticuladas ejecutadas con tablas de *Eucalyptus grandis* cultivado en la provincia de Entre Ríos y destinadas a salvar luces importantes han experimentado un gran crecimiento en el país. Dichas estructuras son utilizadas masivamente para la construcción de granjas avícolas al ser ésta una zona avícola por excelencia, según un estudio estadístico realizado por la Subsecretaría de Producción, Dirección General de Ganadería y Avicultura aquí se emplaza el mayor número de galpones de crianza del país.

Los medios de unión utilizados más comúnmente en estas estructuras son los clavos, tradicionalmente la tarea del clavado se hacía a mano y con clavos de mayor diámetro, actualmente se utilizan equipos neumáticos y clavos de pequeño diámetro. Uno de los puntos críticos en este tipo de construcciones son los nudos a los que concurren varias barras, ante esfuerzos de viento que son frecuentes en la región y con valores elevados, debido al poco espacio disponible para la colocación de los elementos de fijación.

Otra problemática es la ausencia de resultados de ensayos normalizados y la falta de normativa con que se encuentra el proyectista estructural para el cálculo de estas estructuras.

El proyecto que se encuentra actualmente en ejecución, tiene un gran desarrollo empírico con muestras representativas de la población de la especie *Eucalyptus grandis* cultivada en la Mesopotamia Argentina, ya que no pueden adoptarse valores obtenidos con otras especies o con la misma especie cultivada en otra región.

La investigación considera el estado del conocimiento a nivel mundial y normas de diseño, como el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005) ^[1] que tiene vigencia en los países de la Comunidad Europea y el Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[2], Reglamento Argentino de Estructuras de Madera, que recientemente ha finalizado su período de discusión pública nacional, ya que en el país no existía una norma para el diseño estructural en madera cultivada en nuestro país.

El modelo de Johansen ha sido adoptado por las principales reglas de diseño para estudiar el comportamiento de las uniones tipo clavija, las propiedades más influyentes en la determinación de la capacidad de carga son: la resistencia al aplastamiento de la madera, la geometría de la unión y el momento plástico del medio de unión.

El objetivo de éste trabajo es presentar y discutir los resultados parciales de un programa empírico orientado a determinar la resistencia al aplastamiento con 1 clavo rígido de diámetro 5,5mm y el comportamiento mecánico de uniones múltiples realizadas con clavos de pequeño diámetro, 2,2mm y 2,5mm, colocados neumáticamente.

2- MATERIALES Y MÉTODOS.

Para la realización del proyecto se empleó madera de *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia Argentina, que justamente es la zona de mayor producción de la

especie en el país (INTA, 1995) ^[3]. Más precisamente, se eligieron el azar tablas provenientes de una plantación forestada en la zona noreste de la provincia de Entre Ríos, en la región ubicada entre las ciudades de Concordia y Ubajay.

Para el diseño de las muestras se consideraron las secciones transversales de tablas de uso más frecuente en nuestro país en estructuras resistentes, con un tamaño nominal de 25mm de espesor y 100mm de ancho. Por otra parte, debido a que la presencia de médula no está permitida en tablas destinadas a propósitos estructurales (IRAM 9662-2, 2006) ^[4], las mismas fueron seleccionadas evitando la existencia de ésta.

Después del secado en horno las tablas fueron cepilladas y transportadas al laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay, donde se depositaron en la cámara de acondicionamiento con clima normal (20+/- 2°C de temperatura y 65+/- 5% de humedad relativa ambiente).

2.1- Resistencia al aplastamiento.

Para determinar la resistencia al aplastamiento, los elementos de unión utilizados fueron clavos lisos de diámetro 5,5 mm. La norma EN 383 (2007) ^[5] establece que el espesor de las probetas t debe estar comprendido entre $1,5d$ y $4d$, para evitar flexión en el elemento de unión y considerarlo un elemento rígido. El valor promedio del espesor de todas las probetas ensayadas fue de 22mm, que se encuentra entre 8,25mm y 22mm, rango recomendado por la norma.

Dado que no se conocen valores de resistencia al aplastamiento para esta especie se ensayaron un total de 97 cuerpos de prueba de manera de lograr resultados estadísticamente confiables conforme a la norma EN 384 (2004) ^[6].

En *Tabla 1* se observan las características de las muestras, la mitad de los ensayos se realizó sin pretaladrar ($n=47$) y la otra mitad con un pretaladrado ($n=50$), el motivo principal de esta división es encontrar si para la especie en estudio hay una mejora en la resistencia al aplastamiento para el caso de uniones pretaladradas, según lo establece el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1, 2005) ^[1]. El diámetro del orificio de pretaladrado fue del 80% (4,4 mm) del diámetro del clavo.

Por otra parte, los esfuerzos considerados son los que se presentan normalmente en las estructuras, compresión y tracción, en sentido paralelo a las fibras y solo compresión en el sentido perpendicular.

Tabla 1. Muestras preparadas para determinar la resistencia al aplastamiento con un clavo rígido.

Características de las muestras	Sub-muestras	Esfuerzo
PT	Paralela	Tracción ($n=13$)
		Compresion ($n=12$)
	Perpendicular	Compresion ($n=25$)
	Todos PT ($n=50$)	
NO PT	Paralela	Tracción ($n=11$)
		Compresion ($n=13$)
	Perpendicular	Compresion ($n=23$)
	Todos No PT ($n=47$)	

n: número de cuerpos de prueba.
PT: orificios pretaladrados
No PT: orificios no pretaladrados

Todos los ensayos se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento indicado en la norma EN 383 (2007) ^[5].

Para la realización de los ensayos de compresión, tanto en el sentido paralelo como perpendicular a las fibras, se utilizó un equipo triaxial CONTROLS T400, provisto de accesorios mecánicos de acero calidad F24 para la modificación de la aplicación de carga por cada requerimiento de ensayo. Además estos accesorios aseguraban la verticalidad de la probeta y aplicación homogénea de la carga.

Para el ensayo de tracción se llevó a cabo mediante una máquina de configuración mecánica, donde la aplicación de la carga se hizo manualmente. Dado que la máquina realiza ensayos a compresión, se diseñó un dispositivo mecánico que transformó el esfuerzo de compresión en tracción. La medición de la carga aplicada por la máquina se registró por medio de una celda de carga de 2mv/v – 350Ω.

En *Figura 1* pueden observarse fotos de los dispositivos empleados para la realización de los ensayos.

El registro de los desplazamientos producidos en los ensayos, como la deformación del aro dinamométrico para la determinación de la carga, se efectuó por medio de comparadores digitales marca Mitutoyo con una precisión 0,01mm.



Figura 1: Dispositivos empleados para los ensayos: Máquina CONTROLS T400 y Máquina manual.

La resistencia al aplastamiento de la madera se define como la tensión media de compresión correspondiente a la carga máxima en una pieza de madera, ejercida por un elemento de fijación recto y rígido. El eje del elemento de fijación es perpendicular a la superficie de la madera y la fuerza ejercida perpendicular a este eje. La máxima carga debe ser medida para una deformación igual o menor a 5 mm.

$$f_h = \frac{F_{\max}}{dt} \quad (1)$$

f_h : resistencia al aplastamiento de la madera.

$F_{m\acute{a}x}$: máxima carga medida para una deformación igual o menor a 5 mm;

d : diámetro del elemento de unión;

t : espesor del cuerpo de prueba.

2.2- Aptitud para el clavado.

Con el propósito de evaluar la aptitud para el clavado de la especie (ver *Figura 2*), se emplearon las mismas probetas que finalmente fueron destinadas a los ensayos mecánicos de uniones múltiples con clavos de pequeño diámetro colocados neumáticamente (apartado 2.3). Se confeccionaron en total 119 cuerpos de prueba divididos en 5 sub-muestras para cada uno de los diámetros adoptados (2,2mm y 2,5mm). Para ambos diámetros, la sub-muestra 1 cumplió los requisitos -de distancia entre clavos y hasta el borde cargado- recomendados por normas de relieve internacional como el Eurocódigo 5 (2005) ^[1]. Para analizar si esta especie admite una disminución del espaciamiento sin que vaya acompañado de un incremento excesivo de la fisuración, la distancias fueron disminuidas gradualmente para las restantes sub-muestras. La configuración más ambiciosa desde el punto de vista de la reducción de las dimensiones de la unión fue la correspondiente a la sub-muestra 5, ya que distancias menores que las adoptadas para ésta provocaron fisuras no admisibles para el uso estructural. La configuración geométrica estudiada para cada una de las sub-muestras se presenta en la *Tabla 2* del apartado 2.3



Figura 2: Cuerpos de prueba antes del ensayo mecánico, con fisuras debido al proceso de clavado.

2.3- Uniones múltiples con clavos de pequeño diámetro colocados neumáticamente.

Con el propósito de estudiar la influencia que la distancia entre clavos y hasta el borde cargado ejercen sobre el comportamiento mecánico de uniones múltiples solicitadas paralelamente a la dirección de las fibras, se prepararon las muestras y sub-muestras que se indican en la *Tabla 2*, las cuales fueron ensayadas conforme

las prescripciones de la norma EN 1380 (2009) [7]. En la *Figura 3* puede observarse el esquema de armado de las probetas y fotos de las mismas.

La sub-muestra 1 responde a los requerimientos de espaciamiento normalmente exigidos por las reglas de diseño de reconocimiento internacional antes citadas, en tanto que las restantes reducen tanto la separación entre clavos (a_1) como al borde cargado (a_3) en forma gradual hasta lograr la configuración 5, que es la que presenta las menores dimensiones y por lo tanto resulta conveniente a los fines de lograr la ejecución en obra en espacios reducidos, pero a su vez conlleva una elevada probabilidad de aparición de fisuras, como ya se expresó anteriormente.

Tabla 2. Muestras preparadas para determinar la resistencia de uniones múltiples.

Características de las muestras	Total (n)	Sub-muestras				
		1 $a_1=10d$; $a_3=15d$ (n)	2 $a_1=7d$; $a_3=12d$ (n)	3 $a_1=7d$; $a_3=10d$ (n)	4 $a_1=7d$; $a_3=7d$ (n)	5 $a_1=5d$; $a_3=7d$ (n)
21 clavos 2,5 mm de diámetro (7 filas de 3 clavos c/u) $a_2=a_4=5d$ en todos los casos	67	13	13	13	12	16
24 clavos 2,2 mm de diámetro (8 filas de 3 clavos c/u) $a_2=5d$; $a_4=5.2d$ en todos los casos	52	8	10	10	12	12

n : número de cuerpos de prueba.

a_1 : distancia entre elementos de fijación en sentido de las fibras.

a_3 : distancia al borde cargado.

a_2 : distancia entre elementos de fijación en sentido perpendicular a las fibras.

a_4 : distancia al borde descargado.

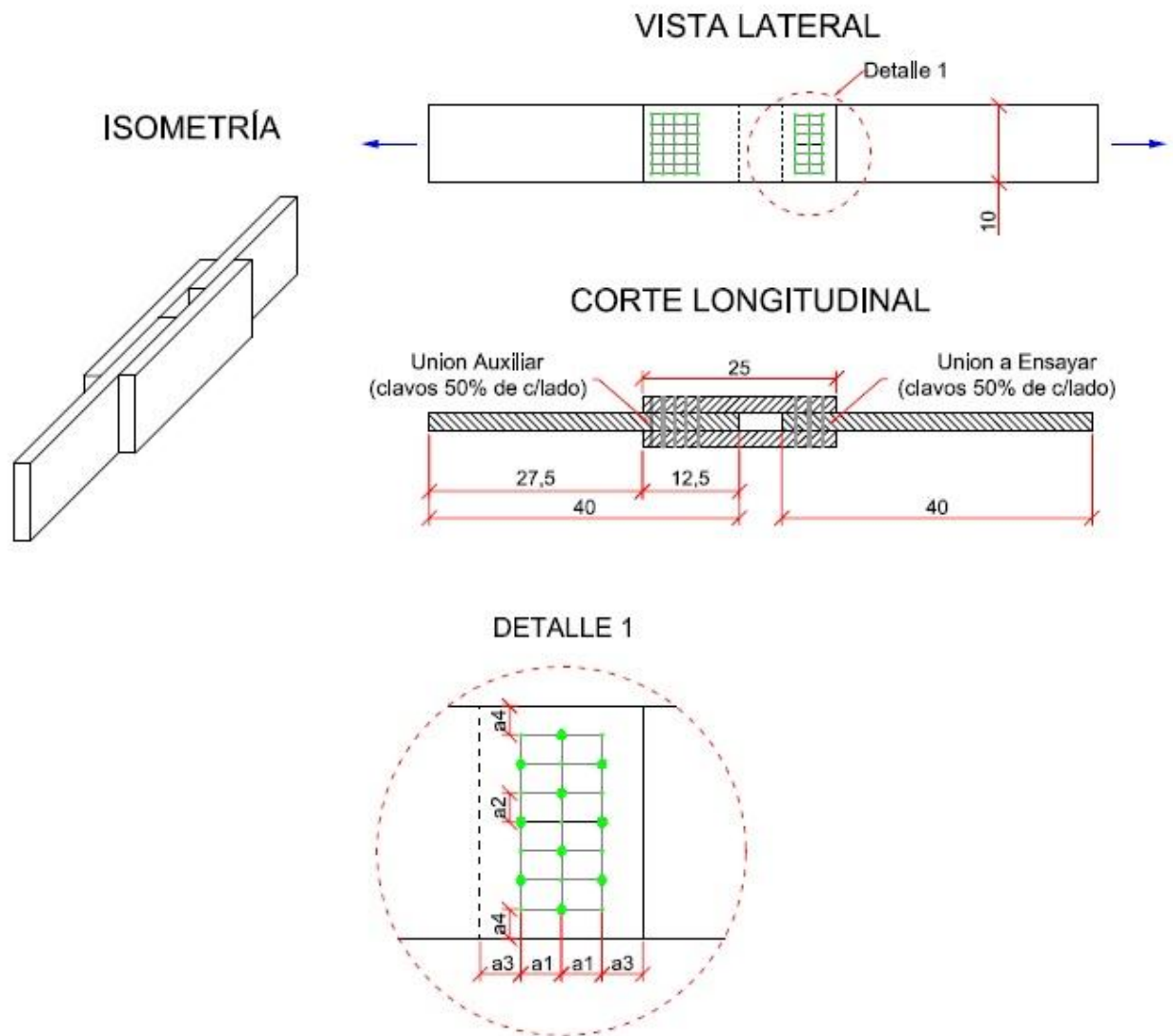


Figura 3- Esquema de armado y fotos de las probetas con uniones múltiples.

2.4- Ensayo de prototipo a escala real.

Como última parte del programa experimental se construyó y ensayó un prototipo a

escala natural de una estructura reticulada típica para viviendas, empleando tablas de *Eucalyptus grandis* y clavos nervurados de diámetro 2,2mm, se usaron 8 clavos por nudo, el esquema y las fotos pueden apreciarse en *Figura 4*. Tanto el cordón superior como el cordón inferior fueron construidos con 2 tablas cada uno, clavadas a una tabla central que constituyen las diagonales.

La luz total de la cabriada fue de 3,30m, la luz entre apoyos fue de 3,19m, la altura 29,8cm, con carga en los tercios.

Las determinaciones realizadas fueron carga de rotura, flecha en el centro de la luz y deslizamiento de las uniones clavadas en los extremos de una diagonal comprimida y de una diagonal traccionada.

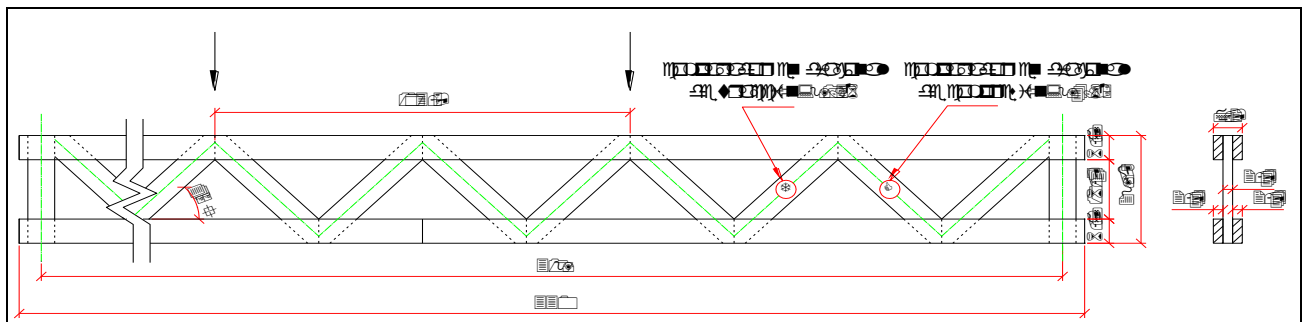


Figura 4: Esquema de armado y fotos del prototipo a escala natural.

3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1- Resistencia al aplastamiento.

Los resultados obtenidos de los ensayos llevados a cabo con el fin de determinar la resistencia al aplastamiento de la madera bajo la acción de un clavo rígido se presentan en la *Tabla 3*. Es de señalar que la resistencia obtenida para los cuerpos de prueba con orificios pretaladrados no resultó mayor a la correspondiente a los sin pretaladrar, lo cual es contrario a la experiencia europea (Hilson 1995) ^[8] y al criterio adoptado por el Eurocódigo 5 (2005) ^[1]. Los resultados obtenidos son congruentes con el criterio adoptado por las reglas de diseño chilenas NCh 1198 (2007) ^[9] y el Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[2], que recientemente ha finalizado su período de discusión pública nacional y está en línea con el NDS (2005) ^[10], los cuales proveen valores de diseño para la tensión de aplastamiento que son válidos tanto para uniones ejecutadas con pretaladrado como sin pretaladrar. La importancia del conocimiento del valor característico de la tensión de aplastamiento de una especie de madera, radica en que es un dato indispensable para calcular la capacidad portante de las uniones múltiples (ver las ecuaciones de la *Tabla 6*).

Tabla 3. Resultados obtenidos para la resistencia al aplastamiento (f_h) sobre 97 ensayos llevados a cabo con un clavo rígido conforme a la norma EN 383 (2007) ^[5].

Sub-muestras	f_h			
	Valor medio (N/mm ²)	COV (%)	Característico ⁽¹⁾ (N/mm ²)	n
Con orificios pretaladrados	34,6	26	21,3	50
Sin orificios pretaladrados	36,4	26	23,0	47

(1) Valor característico calculado según el criterio de la norma EN 14358 (2007) ^[5].
n: número de cuerpos de prueba.

f_h : resistencia al aplastamiento de la madera.

3.2- Aptitud para el clavado.

Los resultados obtenidos de la evaluación de la aptitud para el clavado mostraron que para el espaciamiento adoptado para las sub-muestras 1 la fisuración fue despreciable, confirmando que cuando se dispone del espacio suficiente, la

configuración geométrica recomendada por las normas de relieve internacional como el Eurocódigo 5 (2005)¹ resulta adecuada. Por su parte, con la disminución del espaciamiento –conforme la configuración adoptada para las sub-muestras 2 a 5- la fisuración se incrementó. Se registró la aparición de fisuras de extremo (desde el extremo de la probeta hasta el primer clavo), externas-internas (desde el extremo de la probeta hasta alguno de los 3 clavos de cada fila), e internas (dentro de las filas). Los resultados indicaron que la configuración geométrica de la sub-muestra 5 constituye el límite aceptable para la disminución del tamaño de las uniones mecánicas analizadas. Este límite aceptable desde el punto de vista del análisis visual de las dimensiones de las fisuras debe ser considerado simultáneamente con el estudio del comportamiento mecánico de cada sub-muestra, cuyos resultados se presentan en el apartado 3.3 siguiente.

3.3- Uniones múltiples ejecutadas con clavos de pequeño diámetro colocados reumáticamente.

En Tablas 4 y 5 se presentan los principales resultados obtenidos para la fuerza máxima alcanzada en cada clavo y el deslizamiento experimentado al producirse la rotura en las juntas construidas con clavos de 2,5mm y 2,2mm de diámetro, respectivamente.

Tabla 4. Resultados obtenidos para las uniones múltiples realizadas con clavos de 2,5 mm de diámetro.

		Sub-muestras				
		1 a ₁ =10d; a ₃ =15d (n=13)	2 a ₁ = 7d; a ₃ =12d (n=13)	3 a ₁ = 7d; a ₃ =10d (n=13)	4 a ₁ = 7d; a ₃ =7d (n=12)	5 a ₁ = 5d; a ₃ =7d (n=16)
Fuerza máxima por clavo (N)	Min	1714	1098	1429	1121	916
	Medio	2189	1583	1707	1454	1220
	Max	2560	1855	2041	1728	1626
	COV (%)	15%	13%	9%	13%	15%
	Caract. ⁽¹⁾	1586	1190	1410	1100	898
Deslizamiento para la fuerza máxima (mm)	Min	6.1	3.8	6.6	3.5	3.0
	Medio	10.9	8.6	10.2	9.2	8.2
	Max	16.8	12.6	12.5	12.9	11.3
	COV (%)	26%	33%	13%	27%	30%

(1) Valor característico calculado según el criterio de la norma EN 14358 (2007)¹¹.
n: número de cuerpos de prueba.

Tabla 5. Resultados obtenidos para las uniones múltiples realizadas con clavos de 2,2 mm de diámetro.

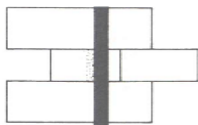
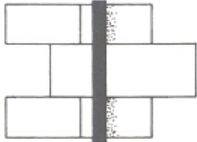
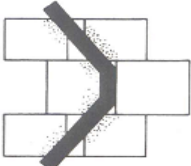
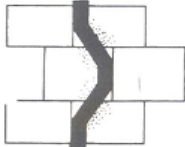
		Sub-muestras				
		1 a ₁ =10d; a ₃ =15d (n=8)	2 a ₁ = 7d; a ₃ =12d (n=10)	3 a ₁ = 7d; a ₃ =10d (n=10)	4 a ₁ = 7d; a ₃ =7d (n=12)	5 a ₁ = 5d; a ₃ =7d (n=12)
Fuerza máxima por clavo (N)	Min	1774	1202	1185	1001	867
	Medio	1895	1411	1359	1631	1103
	Max	1978	1570	1561	2391	1607
	COV (%)	4%	9%	8%	27%	15%
	Caract. ⁽¹⁾	1734	1188	1139	875	829
Deslizamiento para la fuerza máxima (mm)	Min	4.4	5.3	6.1	3.6	3.4
	Medio	9.1	10.7	10.4	8.6	7.5
	Max	12.0	14.5	13.1	12.6	11.7
	COV (%)	30%	29%	18%	34%	35%

(1) Valor característico calculado según el criterio de la norma EN 14358 (2007)¹¹.
n: número de cuerpos de prueba.

En ambas tablas se puede apreciar que la sub-muestra 1, con mayor distancia entre clavos y hasta el borde cargado, presenta la mayor resistencia característica por cada clavo.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en los ensayos con los valores que resultan de calcular la resistencia lateral de diseño de referencia para uniones de este tipo conforme a los lineamientos del Proyecto CIRSOC 601 (2011)², se presentan a continuación, en la *Tabla 6*, las ecuaciones que definen los 4 posibles modos de rotura según este Proyecto. Conforme a este criterio, conocido también como modelo de Johansen, el menor de los valores obtenidos con las 4 ecuaciones representa la resistencia máxima.

Tabla 6. Ecuaciones correspondientes a los modos de rotura para uniones con dos secciones de corte según el Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[2].

Modo de rotura	Ecuación	Esquema de rotura
I _m	$Z = \frac{D l_m F_{em}}{R_d}$	
I _s	$Z = \frac{2 D l_s F_{es}}{R_d}$	
III _s	$Z = \frac{2 k_3 D l_s F_{em}}{(2 + R_e) R_d}$	
IV	$Z = \frac{2 D^2}{R_d} \sqrt{\frac{2 F_{em} F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$	

donde:

D : diámetro nominal del clavo; F_{em} : resistencia al aplastamiento de referencia del miembro principal; F_{es} : resistencia al aplastamiento de referencia de los miembros laterales; F_{yb} : tensión de fluencia en flexión del elemento de fijación; l_m : longitud del elemento de fijación dentro del miembro principal; l_s : longitud del elemento de fijación dentro del miembro lateral; R_d : coeficiente de reducción; R_e : F_{em} / F_{es} ; R_t : l_m / l_s

Si se aplican estas ecuaciones al caso investigado para uniones con clavos de 2,5 mm de diámetro, sustituyendo los espesores de las piezas $l_m=l_s=22$ mm, y el valor obtenido para la tensión de aplastamiento $F_{em}=F_{es}=23,0$ N/mm² (ver Tabla 3), la tensión de fluencia en flexión del clavo $F_{yb}=690$ N/mm² y despreciando el coeficiente de seguridad es decir haciendo $R_d=1$, da por resultado un valor mínimo de 909 N, el cual corresponde al modo de rotura IV. Efectuando el mismo cálculo para los clavos de diámetro igual a 2,2mm el resultado obtenido es de 704 N, también correspondiente al modo IV. Estos resultados muestran que, con la única excepción de la sub-muestra 5 de las uniones realizadas con clavos de 2,5mm de diámetro (898 N, ver Tabla 4), los valores característicos obtenidos de los ensayos superan el valor estimado conforme al criterio del Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[2]. Es decir que es posible disminuir el espaciamiento y reducir el tamaño de las uniones empleando clavos de pequeño diámetro colocados neumáticamente, sin afectar la capacidad portante de las uniones cuando las mismas son diseñadas conforme al Proyecto antes mencionado.

Si se efectúa la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos con el criterio adoptado por el Eurocódigo 5 (2005) ^[1], se debe considerar que este reglamento incorpora a las ecuaciones que definen los modos de rotura del modelo de Johansen, antes detalladas, la resistencia a la extracción que oponen los clavos en la última fase de la rotura, es decir cuando se produce una componente de

tracción en dirección paralela a su eje. Efectuando los cálculos en forma similar a lo presentado en el párrafo anterior, las resistencias obtenidas por cada clavo según el Eurocódigo 5 ^[1] alcanzan 1222 N y 995 N para los clavos con diámetro igual a 2,5mm y a 2,2mm respectivamente, en ambos casos correspondientes al modo IV de rotura. El valor obtenido de este cálculo para los clavos de 2,5mm de diámetro (1222 N) es superado por la resistencia característica de las sub-muestras 1 y 3 de la *Tabla 4.*, en tanto que es similar al correspondiente a la sub-muestra 2 (1190 N), es un 11% superior al de la sub-muestra 4 y un 36% superior al de la sub-muestra 5. Es decir que, conforme al criterio del Eurocódigo 5 (2005) ^[1], los resultados obtenidos para las sub-muestras 1,2 y 3 satisfacen los valores requeridos pero la seguridad del diseño estructural estaría comprometida levemente si se emplease el espaciamiento de la sub-muestra 4 y severamente afectado si se emplease el espaciamiento de la sub-muestra 5. Efectuando la comparación para los clavos de 2,2mm de diámetro se encuentran similares resultados, ya que el valor obtenido por el cálculo según las reglas de diseño europeas (999 N por clavo) es superado por los valores característicos obtenidos en las sub-muestras 1, 2 y 3, pero resulta mayor a los correspondientes a las sub-muestras 4 (875 N) y 5 (829 N).

Desde el punto de la seguridad, es de destacar que el deslizamiento de las uniones obtenido en los ensayos en el momento de alcanzar la fuerza máxima fue similar para todas las sub-muestras, y la observación de sus valores medios, y sobre todo mínimos, indica que la fuerza máxima fue alcanzada sin la presencia de roturas frágiles. Estos datos son coherentes con el hecho que la capacidad portante calculada conforme al Proyecto CIRSOC 601 (2011)² y al Eurocódigo 5 (2005) ^[1] correspondió al modo de rotura IV, el cual se manifiesta con la aparición de rótulas plásticas en el clavo tanto dentro de la pieza central como de las laterales, indicando claramente un modo dúctil de rotura.

Es conocido que el deslizamiento de las uniones provoca deformaciones en las estructuras reticuladas que superan largamente a las producidas por el acortamiento o alargamiento de las barras. Con el propósito de evaluar este problema en el caso analizado, para la sub-muestra 1 de los clavos con diámetro igual a 2,2mm se determinó la relación entre la carga y el deslizamiento a un nivel de solicitación del orden del 40 % de la carga que produjo la rotura, es decir a un nivel compatible con las cargas de servicio en una estructura. Este valor, expresado por cada clavo y por cada una de las secciones de corte (en este caso 2), corresponde al módulo de deslizamiento instantáneo (γ) adoptado por el Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[2]. El valor medio encontrado en los ensayos para este módulo alcanzó 510 N/mm. El Proyecto antes mencionado recomienda calcular el valor del módulo de deslizamiento en forma diferenciada para el caso en que las deformaciones constituyen un requerimiento riguroso del proyecto y para cuando no lo son. Para el primer caso es $\gamma = p_{0,051,5} D_{0,8} / 25$, donde reemplazando el valor de la densidad aparente de esta especie al nivel del percentil 5% ($p_{0,05}=430 \text{ kg/m}^3$) y el diámetro del clavo ($D=2,2 \text{ mm}$) se obtiene $\gamma = 670 \text{ N/mm}$. Para el segundo caso es $\gamma = 246 D_{1,5} = 803 \text{ N/mm}$. La comparación del valor obtenido experimentalmente (510 N/mm) con los recomendados por el Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[2] indica que el cálculo según este proyecto puede conducir a una sobreestimación de la rigidez de las uniones construidas con clavos de pequeño diámetro y en consecuencia situar del lado contrario a la seguridad las deformaciones de la estructura.

3.4- Comprobación de los resultados a través del análisis de un prototipo.

Con el fin de comprobar en una estructura de tamaño real los resultados obtenidos sobre las probetas estandarizadas, se ensayó el prototipo descrito en el capítulo de Materiales y Métodos y a su vez se calcularon los esfuerzos y las deformaciones en sus barras empleando el código de elementos finitos no lineal ANSYS. En este último cálculo se consideró el valor del módulo de deslizamiento obtenido experimentalmente ($\gamma = 510 \text{ N/mm}$) en todas las uniones clavadas entre las diagonales y los cordones. Teniendo en cuenta investigaciones previas con esta especie (Piter et al. 2004) ^[12], el valor del módulo de elasticidad adoptado para las barras de madera fue de 12500 N/mm^2 . En el ensayo bajo cargas de 2750 N aplicadas en los tercios de la longitud de la viga, las cuales originaron un esfuerzo en cada clavo de aproximadamente el 40% de su valor de rotura, se registró una deformación de 10 mm en el centro de la viga. Por su parte, el resultado encontrado resolviendo el sistema con el código ANSYS mencionado anteriormente arrojó una deformación en el centro de aproximadamente $8,4 \text{ mm}$. Teniendo en cuenta la variabilidad natural de las propiedades de este material, la diferencia encontrada entre la deformación calculada y la medida experimentalmente para el prototipo resulta irrelevante, más si se tiene en cuenta que en este caso el deslizamiento de las uniones provoca aproximadamente el 80% de la deformación total en el centro de la viga. Consecuentemente puede considerarse que los resultados obtenidos para el coeficiente de deslizamiento en los ensayos estandarizados, que fueron presentados en las *Tablas 4 y 5*, resultan apropiados a los fines prácticos del diseño estructural.

4- CONCLUSIONES.

Los resultados de la resistencia al aplastamiento de la madera contra un clavo rígido no presentaron diferencias significativas entre los cuerpos de prueba con pretaladrado y los sin pretaladrar. Estos resultados son congruentes con el criterio adoptado por las reglas de diseño chilenas NCh 1198 (2007) ^[9] y el Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[2], que recientemente ha finalizado su período de discusión pública nacional y está en línea con el NDS (2005) ^[10], pero contradicen la experiencia europea y el criterio del Eurocódigo 5 (2005) ^[1] que considera una mayor resistencia al aplastamiento en uniones ejecutadas con pretaladrado.

Los valores característicos obtenidos experimentalmente para la resistencia máxima de cada clavo en uniones múltiples superan, con la única excepción de la sub-muestra 5 de las uniones con diámetro de $2,5 \text{ mm}$, a los calculados conforme al criterio del Proyecto de Reglamento CIRSOC 601 (2011) ^[2]. A su vez, ellos son similares o superan, con la excepción de las sub-muestras 4 y 5 a los obtenidos conforme al criterio del Eurocódigo 5 (2005) ^[1]. Considerando que la optimización de la geometría y la disminución del tamaño de las uniones es un objetivo permanente en la ejecución de las estructuras reticuladas de madera, estos resultados muestran que es posible disminuir el espaciamiento estándar empleando clavos de pequeño diámetro colocados neumáticamente. Las configuraciones de las sub-muestras 3 y 4 constituyen el límite admisible para la disminución del espaciamiento sin afectar la seguridad conforme al criterio de cálculo del CIRSOC 601 ^[2] y el Eurocódigo 5 ^[1], respectivamente.

El análisis del deslizamiento de las uniones al momento de alcanzar la carga máxima, junto al hecho de que la misma fue alcanzada en todos los casos con el modo de rotura IV, indican claramente la presencia de un modo dúctil de rotura

acompañado de la formación de rótulas plásticas en los medios de unión. Esta característica es un indicador claro de que la aparición de roturas frágiles, y por lo tanto repentinas, tiene una muy baja probabilidad de aparición.

El criterio de cálculo del módulo de deslizamiento instantáneo (γ) adoptado por el Proyecto CIRSOC 601 (2011) ^[2] fue comparado con los resultados experimentales. Los resultados indicaron que la estimación del valor del módulo de deslizamiento empleando las ecuaciones del Proyecto mencionado puede conducir a una sobrevaloración de la rigidez de las uniones materializadas con clavos de pequeño diámetro. Consecuentemente, su empleo puede situar del lado contrario a la seguridad el cálculo de las deformaciones de estructuras reticuladas cuyas uniones se materialicen con este tipo de clavos.

Los valores del deslizamiento de las uniones sometidas al 40% de su carga máxima, y su influencia sobre la deformación de una estructura real, fueron comprobados a través del análisis de un prototipo a escala natural. Los resultados determinados experimentalmente para la deformación en el centro de la viga fueron similares a los obtenidos resolviendo la estructura con el código de elementos finitos no lineal ANSYS, empleando en este último caso el valor obtenido experimentalmente para el módulo de deslizamiento instantáneo (γ).

5- COLABORADORES.

Participaron en éste trabajo con su invaluable colaboración en la realización de los ensayos mecánicos el Ing. Ricardo Gómez y en el procesamiento de resultados las Ing. Rocío Ramos y Alba Galcerán.

6- REFERENCIAS.

[1] Eurocode 1995-1-1 (2005) Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardisation, Brussels.

[2] CIRSOC 601 (2011) Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Buenos Aires, Instituto Nacional de Tecnología Industrial y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, 1 volumen de 129 pág. pdf (www.inti.gob.ar/cirsoc).

[3] INTA (1995) Manual para Productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. Grupo Forestal, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Concordia, Argentina.

[4] IRAM 9662-2 (2006) Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia, Parte 2: Tablas de *Eucalyptus grandis*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.

[5] EN 383 (2007) Timber structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners. European Committee for Standardisation, Brussels.

[6] EN 384 (2004) Bauholz für tragende Zwecke, Bestimmung charakteristischer Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtewerte. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin.

[7] EN 1380 (2009) Holzbauwerke – Prüfverfahren – Tragende Verbindungen mit Naegeln, Schrauben, Stabdübeln und Bolzen. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

- [8] Hilson B.O. (1995) Joints with dowel-type fasteners – Theory. En: Timber Engineering STEP 1, Centrum Hout, The Netherlands, pp. C3/1-C3/11.
- [9] NCh 1198 (2007) Madera – Construcciones en madera – Cálculo. Instituto Nacional de Normalización INN-Chile, Santiago.
- NDS (2005) National Design Specification for Wood Construction. American Forest & Paper Association, Washington.
- [10] NDS (2005) National Design Specification for Wood Construction. American Forest & Paper Association, Washington.
- [11] EN 14358 (2007) Holzbauwerke - Berechnung der 5%-Quantile für charakteristische Werte und Annahmekriterien für Proben. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [12] Piter J.C., Zerbino R. L., Blaß H. J. (2004). Visual strength grading of Argentinean *Eucalyptus grandis*. Strength, stiffness and density profiles and corresponding limits for the main grading parameters. Holz als Roh- und Werkstoff 62(1): 1-8.