



EBRA14 - EST - 520 - CAPACIDAD PORTANTE DE UNIONES CON CLAVOS DE PEQUEÑO DIÁMETRO. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON LOS CALCULADOS SEGÚN LAS REGLAS DE DISEÑO DEL EUROCÓDIGO 5, DEL REGLAMENTO CIRSOC 601 Y DE LA NORMA NBR 7190

¹**Piter J.C.** (piterj@frcu.utn.edu.ar), ²**Guillaumet A.** (aaguillaumet@rec.utn.edu.ar), ¹**Sosa Zitto A.** (sosazitto@frcu.utn.edu.ar), ¹**Ramos R.** (mrocio_ramos@hotmail.com)

¹**Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Concepción del Uruguay (Argentina)**

Departamento de Ingeniería Civil – Grupo de Estudio de Maderas (GEMA)

Profesor Investigador

²**Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Venado Tuerto (Argentina)**

Departamento de Ingeniería Civil

Profesor Investigador

RESUMEN: Las conexiones con clavos de pequeño diámetro son fáciles de ejecutar, requieren espacios reducidos y, adicionalmente, han probado desarrollar una elevada resistencia. La elevada esbeltez de los clavos ocasiona un comportamiento dúctil, que es congruente con los modernos criterios de seguridad estructural. Para analizar el comportamiento mecánico de estas conexiones se diseñó un proyecto experimental donde la capacidad portante de los cuerpos de prueba fue determinada a través de ensayos normalizados en laboratorio y de cálculos empleando reglas de diseño. Los resultados experimentales mostraron un valor característico de 1592N por cada clavo y los calculados alcanzaron valores de 1014N, 746N y 633N según el Eurocódigo 5, el Reglamento CIRSOC 601 y la norma NBR 7190, respectivamente. El modo de rotura y las importantes diferencias encontradas entre los resultados empíricos y los calculados son analizados en el marco de la normativa y las experiencias publicadas en el plano internacional. También se describe y analiza el desempeño de estas uniones en nodos de estructuras reticuladas construidas recientemente.

Palabras Clave: uniones, capacidad portante, clavos esbeltos, rotura dúctil, *Eucalyptus grandis*

LOAD-CARRYING CAPACITY OF JOINTS WITH NAILS OF SMALL DIAMETER. COMPARISON BETWEEN EMPIRICAL RESULTS AND THOSE OBTAINED ACCORDING TO THE DESIGN RULES OF THE EUROCODE 5, CIRSOC 601 AND NBR 7190

ABSTRACT: Joints with nails of small diameter are easy to make, require small geometrical parameters and, in addition, they have exhibited a high load-carrying capacity. The relatively high slenderness of the nails provokes a ductile behaviour which is line with the modern safety requirements. With the aim of studying the mechanical behaviour of these connections, and empirical project was designed. The load-carrying capacity of the specimens was determined by means of both standardized tests and design rules. The empirical results showed a characteristic value of 1592N per nail and those calculated reached values of 1014N, 746N y 633N according to the Eurocode 5, CIRSOC 601 and NBR 7190 respectively. The modes of failure and the important differences found between the empirical and the calculated results are analysed. The performance of these connections at nodes of trusses in structural sizes is also described and analysed.

Keywords: joints, load-carrying capacity, slender nails, ductile failure, *Eucalyptus grandis*

1. INTRODUCCIÓN

Las uniones clavadas han adquirido una importancia creciente en Argentina, principalmente en la construcción de estructuras reticuladas destinadas al soporte de techos. El diseño de este tipo de estructuras se ha optimizado empleando tablas para conformar las barras del reticulado, y en la actualidad se salvan con facilidad luces de 16m en construcciones para uso industrial, las cuales presentan numerosas ventajas relacionadas a aspectos tanto técnicos como económicos y al escaso mantenimiento que requiere la madera en ambientes corrosivos. Estas estructuras pueden soportar satisfactoriamente, además del peso propio, las sobrecargas de uso y la acción de vientos con una velocidad superior a los 100km/h. En numerosas ocasiones los problemas críticos se encuentran en el diseño de las uniones, ya que es ampliamente conocido que en los nudos de las estructuras reticuladas normalmente se dispone de un espacio reducido para resolver adecuadamente las conexiones mecánicas (Hartl 1995; Kessel 1995).

El modelo de Johansen (Hilson 1995a) ha sido adoptado por las reglas de diseño de numerosos países para estimar la capacidad portante de estas conexiones. Este modelo está basado -además de la configuración geométrica de la unión- sobre dos propiedades de los materiales que la integran: la resistencia al aplastamiento de la madera y el momento plástico de los elementos de fijación (INTI CIRSOC 2013; EN 1995-1-1 2005; NDS 2005; NCh 1198 2007). El comportamiento dúctil es preferido frente al frágil porque permite el desarrollo de articulaciones plásticas que facilitan la redistribución de los esfuerzos dentro de los elementos de la conexión, incrementando su capacidad portante y maximizando la disipación de energía. Contrariamente, la presencia de una rotura frágil, caracterizada por el desarrollo de fisuras y bloques de corte a niveles de carga inferiores a la máxima capacidad potencial de una unión múltiple, reduce su resistencia y su capacidad de disipar energía. Esta reducción ocurre porque las fisuras y los bloques de corte impiden una completa redistribución del esfuerzo entre los elementos de fijación (Blaß 1991, 1995; Johnsson and Stehn 2004; Stehn and Börjes 2004). En cambio, el criterio de diseño adoptado en Brasil (ABNT 2010) considera dos posibles modos de rotura de la conexión, estando uno caracterizado por el aplastamiento de la madera y el otro por la flexión del elemento de fijación. Este criterio, que redundaba en una mayor facilidad para el cálculo, no contempla la totalidad de los modos de rotura previstos en el modelo de Johansen antes mencionado.

Los resultados de una investigación experimental (Sosa Zitto et al. 2013) mostraron que el uso de uniones con clavos de pequeño diámetro colocados neumáticamente constituye una excelente alternativa para reducir el tamaño de las conexiones de tablas de *Eucalyptus grandis* que conforman las barras de estructuras reticuladas. La capacidad portante encontrada fue superior a la calculada según reglas de diseño de relevancia internacional y el modo de rotura exhibió un comportamiento dúctil. Considerando que la ejecución de estas conexiones es simple y rápida, las mismas presentan también una ventaja desde el punto de vista económico. En consecuencia, resulta de interés conocer el grado de precisión con el cual las reglas de diseño interpretan la capacidad portante real de este tipo de conexiones.

El objetivo de este trabajo es presentar y discutir los resultados de un proyecto orientado a investigar la capacidad portante de conexiones materializadas con tablas de *Eucalyptus grandis* unidas con clavos de 2,5mm de diámetro colocados neumáticamente. Los resultados obtenidos experimentalmente sobre uniones sometidas a corte doble por una fuerza lateral son presentados y discutidos en comparación con los valores calculados siguiendo los lineamientos de diseño del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005), del Reglamento CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2013) y de la norma NBR 7190 (ABNT 2010).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Programa experimental para determinar el comportamiento mecánico de las conexiones

Los cuerpos de prueba destinados a los ensayos de laboratorio fueron preparados con

tablas aserradas de *Eucalyptus grandis* cultivado en Concordia, provincia de Entre Ríos, una de las regiones más importantes para el cultivo de la especie en Argentina (INTA 1995). Considerando que usualmente las tablas de esta especie presentan un espesor nominal de 25,4mm y un ancho variable entre 76,2mm and 152,4mm, piezas con dimensiones nominales iguales a 25,4mm para el espesor, 101,6mm para el ancho, y una longitud variable entre 1,5m y 1,8m, fueron seleccionadas al azar. Como la presencia de médula es aceptada solamente en las tablas asignadas a la clase resistente de menor calidad por la norma IRAM 9662-2 (2006), para este proyecto se seleccionó material libre de médula. Luego de su secado, las tablas fueron trasladadas al laboratorio de la Facultad.

Luego de cepilladas, las tablas adquirieron un espesor de 22mm y de ellas se obtuvo el material libre de defectos destinado al programa experimental. Como elementos de fijación fueron colocados neumáticamente clavos espiralados de diámetro igual a 2,5mm y longitud de 65mm, con una resistencia característica a tracción mínima de 600N/mm². Una muestra conteniendo 12 cuerpos de prueba, cada uno con 21 clavos, fue preparada respetando el espaciamiento adoptado por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005) para maderas con una densidad característica menor o igual a 420kg/m³, ya que valores oscilando entre 375kg/m³ y 388kg/m³ fueron publicados recientemente para esta especie (Sosa Zitto et al. 2012). Una vez preparados, los cuerpos de prueba fueron colocados en una cámara climatizada con una temperatura igual a 20+/-2°C y una humedad relativa ambiente igual a 65+/-5%. Un detalle de los mismos puede apreciarse en la Fig. 1.

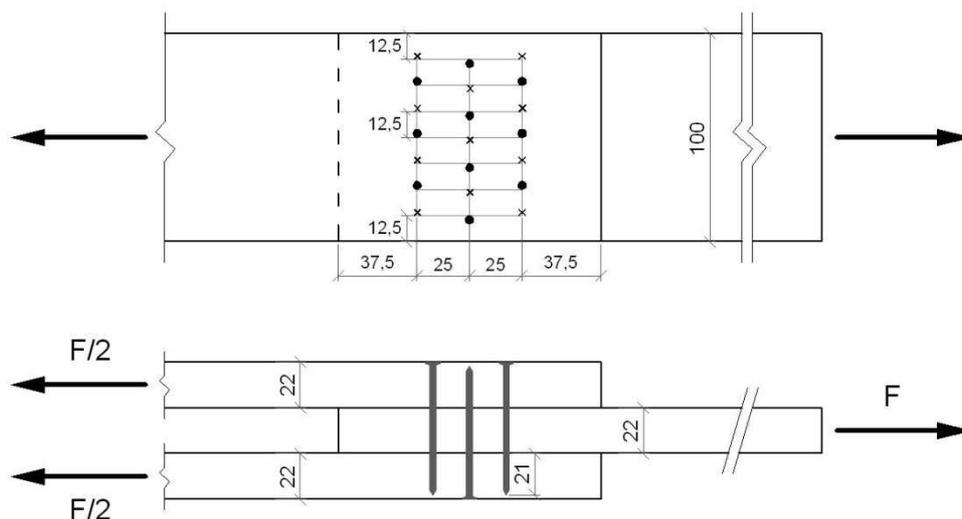


Figura 1. Características de los cuerpos de prueba, dimensiones en mm.

Para todas las pruebas se utilizó una máquina de ensayos universales Shimadzu UH 1000kN, con capacidad para aplicar cargas según los requisitos establecidos en las normas antes mencionadas y una precisión del 1% de la carga aplicada. El deslizamiento de las tablas integrantes de las conexiones fue medido con dos extensómetros capaces de registrar 0,001mm y colocados según lo indicado en la norma EN 1380 (2009) para minimizar los efectos de las distorsiones. Todos los ensayos fueron ejecutados cargando en la dirección de las fibras conforme al procedimiento adoptado por las normas EN 1380 (2009) y EN 26891 (1991). En cada prueba se registró la carga máxima alcanzada y el deslizamiento entre los miembros de la conexión, admitiéndose 15mm como máximo deslizamiento. Se determinó la máxima carga alcanzada por cada clavo dividiendo la carga registrada por el número de clavos de la unión. El correspondiente valor característico fue calculado conforme al criterio de la norma EN 14358 (2007).

Luego de finalizado cada ensayo, en todos los casos se determinó el contenido de humedad y la densidad aparente del cuerpo de prueba siguiendo los lineamientos establecidos en las normas ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975) respectivamente.

2.2 Empleo de reglas de diseño para determinar el comportamiento mecánico de las conexiones

Con el propósito de facilitar la revisión de los procesos de cálculo por parte del lector, las ecuaciones que se presentan a continuación contienen en todos los casos los símbolos originales adoptados por las correspondientes reglas de diseño.

2.2.1 Cálculo mediante las ecuaciones provistas por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005)

El valor característico ($F_{v,Rk}$) de la capacidad portante de la unión, por cada clavo y por cada una de las dos secciones de corte, corresponde al menor de los cuatro resultados obtenidos con las ecuaciones indicadas a continuación y se relaciona con un determinado modo de rotura de la conexión como se indica en la Tab. 2.

$$f_{h,1,k} t_1 d \quad (1)$$

$$0,5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (2)$$

$$1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (3)$$

$$1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{(1+\beta)}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,1,k} d + \frac{F_{ax,Rk}}{4}} \quad (4)$$

Donde:

$f_{h,1,k}$: el valor característico de la resistencia al aplastamiento de la tabla lateral.

t_1 : el menor valor entre el espesor de la tabla lateral y la penetración del clavo en la misma.

d : el diámetro del clavo

$f_{h,2,k}$: el valor característico de la resistencia al aplastamiento de la tabla central.

t_2 : el espesor de la tabla central.

$\beta = f_{h,2,k} / f_{h,1,k}$.

$M_{y,Rk}$: el valor característico del momento plástico del clavo.

$F_{ax,Rk}$: el valor característico de la resistencia a la extracción del clavo

2.2.2 Cálculo mediante las ecuaciones provistas por el Reglamento CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2013)

Se emplearon las expresiones de este Reglamento para representar los cuatro modos de rotura posibles en uniones simétricas con dos secciones de corte sometidas a carga lateral.

Considerando que este Reglamento provee un procedimiento para el diseño estructural en tensiones admisibles, y con el fin de que los resultados obtenidos sean comparables con los valores característicos determinados experimentalmente y con los calculados conforme al criterio del Eurocódigo 5, en las ecuaciones originales fue suprimido el coeficiente de reducción (R_d) a través del cual este reglamento incorpora el coeficiente de seguridad.

El valor característico (Z_{car}) de la capacidad portante de la unión, por cada clavo con dos secciones de corte, corresponde al menor de los cuatro resultados obtenidos con las ecuaciones indicadas a continuación y se relaciona con un determinado modo de rotura de la conexión como se indica en la Tab. 2.

$$2 D I_s F_{es} \quad (5)$$

$$D I_m F_{em} \quad (6)$$

$$2 \frac{k_3 D l_s F_{em}}{(2 + R_e)} \quad (7)$$

$$2 D^2 \sqrt{\frac{2 F_{em} F_{yb}}{3(1 + R_e)}} \quad (8)$$

Donde:

D: el diámetro del clavo

l_s : la longitud del clavo dentro de la tabla lateral

F_{es} : el valor característico de la resistencia al aplastamiento de la tabla lateral.

l_m : la longitud del clavo dentro de la tabla central

F_{em} : el valor característico de la resistencia al aplastamiento de la tabla central.

F_{yb} : el valor característico de la tensión de fluencia en flexión del clavo

$R_e = F_{em} / F_{es}$.

$$k_3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1+R_e)}{R_e} + \frac{2 F_{yb} (2+R_e) D^2}{3 F_{em} l_s^2}}$$

2.2.3 Cálculo mediante las ecuaciones provistas por la norma NBR 7190 (ABNT 2010)

Esta norma provee un procedimiento para obtener el valor de cálculo de la resistencia por cada clavo y por cada sección de corte, el cual depende del parámetro:

$$\beta = \frac{t}{d}$$

Donde:

t: el espesor de la madera

d: el diámetro del clavo

Estas reglas consideran dos modos posibles de rotura, definidos a través del valor límite del parámetro β (β_{lim}) y proveen las ecuaciones para determinar el valor de cálculo de la resistencia ($R_{vd,1}$) por cada clavo y por cada sección de corte. El valor límite de β es:

$$\beta_{lim} = 1,25 \sqrt{\frac{f_{yd}}{f_{e\theta,d}}}$$

Donde:

f_{yd} : la resistencia de cálculo a fluencia del clavo

$f_{e\theta,d}$: la resistencia de cálculo al aplastamiento de la madera

Conforme a este criterio, si $\beta \leq \beta_{lim}$ la rotura se produce por aplastamiento de la madera y es $R_{vd,1} = 0,50 t d f_{e\theta,d}$ en tanto que si $\beta > \beta_{lim}$ la rotura se produce por flexión del clavo y es $R_{vd,1} = 0,625 (d^2 / \beta_{lim}) f_{yd}$.

El propósito de este trabajo es comparar los resultados calculados según estas reglas de diseño con los valores característicos determinados experimentalmente y con los calculados conforme a los criterios expuestos anteriormente. Con ese fin, las resistencias de cálculo f_{yd} y $f_{e\theta,d}$ fueron reemplazadas en las expresiones originales por los correspondientes valores característicos. En consecuencia se obtienen las siguientes que expresan el valor característico de la resistencia por cada clavo y por cada sección de corte:

$$R_{vk,1} = 0,50 t d f_{e\theta,k} \quad (9)$$

$$R_{vk,1} = 0,625 \frac{d^2}{\beta_{lim}} f_{yk} \quad (10)$$

Donde:

f_{yk} : la resistencia característica a fluencia del clavo

$f_{e0,k}$: la resistencia característica al aplastamiento de la madera

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Resultados del programa experimental

La capacidad portante –por cada clavo- determinada experimentalmente osciló entre un valor mínimo de 1714N y uno máximo de 2560N, mostrando un valor medio igual a 2213N con un coeficiente de variación igual a 15%. El valor característico, calculado conforme al criterio de la norma EN 14358 (2007), alcanzó 1592N. El contenido de humedad mostró un valor medio de 11% con un coeficiente de variación de 3%. La densidad, ajustada a un contenido de humedad de referencia del 12% conforme a la norma EN 384 (2010), alcanzó un valor medio de 495kg/m³ con un coeficiente de variación igual a 13%, lo cual confirma que fue correcto adoptar para el clavado (ver la Fig. 1) el espaciamiento estipulado en el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005) para maderas con una densidad característica inferior a 420kg/m³. Por su parte, la ausencia de fisuras luego del clavado prueba la aptitud de este espaciamiento para las conexiones investigadas. El deslizamiento relativo de las tablas unidas, determinado en el momento en que se registró la máxima carga, osciló entre un valor mínimo de 6,1mm y uno máximo de 16,8mm, con un valor medio de 10,9mm.

3.2 Resultados obtenidos aplicando reglas de diseño

La aplicación de las reglas de diseño requiere -además de la definición de la configuración geométrica que se exhibe en la Fig. 1- del conocimiento de las propiedades de la madera y de los clavos empleados en el proyecto.

La resistencia al aplastamiento de la especie fue determinada experimentalmente. Sosa Zitto et al. (2012) publicaron un valor característico de 23,0N/mm² obtenido según la norma europea EN 383 (2007) para clavos de 5,5mm de diámetro colocados sin perforación previa en cuerpos de prueba con densidad característica de 388kg/m³.

Conforme a la información provista por el fabricante, los clavos empleados en este proyecto presentan una resistencia característica en tracción ($f_{u,k}$) superior a 600N/mm² y un valor característico de la tensión de fluencia ($f_{y,k}$) mayor a 300N/mm². Ante la ausencia de resultados experimentales publicados, y con el propósito de verificar la información provista por el fabricante, se ensayó en el laboratorio una muestra de 40 clavos pertenecientes al mismo lote que los empleados en las conexiones (ver 2.1). Los resultados experimentales mostraron valores de $f_{u,k} = 628\text{N/mm}^2$ y $f_{y,k} = 303\text{N/mm}^2$.

El valor característico del momento de plastificación del elemento de fijación ($M_{y,Rk}$) desempeña un rol importante en las expresiones provistas por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005). Esta propiedad fue determinada experimentalmente por Sosa Zitto et al. (2013) sobre una muestra de 49 clavos del mismo tipo que los empleados en este proyecto, ensayados conforme a la norma europea EN 409 (2009). Los autores reportaron $M_{y,Rk} = 1044\text{Nmm}$.

Las reglas europeas tienen en cuenta la resistencia adicional proporcionada por la resistencia a la extracción del elemento de fijación y la fricción entre las piezas unidas -rope effect- (Bejtka y Blaß 2002; Hilsen 1995a). Para su consideración incluyen el sumando $F_{ax,Rk} / 4$ en las Ec. (3) y (4). Sosa Zitto et al. (2013) informaron un valor $F_{ax,Rk} / 4 = 59\text{N}$, determinado experimentalmente sobre 21 ensayos de extracción llevados a cabo conforme a la norma EN 1382 (2000), empleando tanto la misma especie de madera como clavos del mismo tipo que los utilizados en este proyecto.

3.2.1 Resultados obtenidos aplicando las ecuaciones provistas por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005)

Estas reglas de diseño asumen que la resistencia al aplastamiento de la madera crece linealmente con la densidad característica (ρ_k). A su vez consideran que esta propiedad

crece cuando decrece el diámetro del clavo (d) según el factor $d^{-0.3}$ cuando el clavo es colocado sin perforación previa.

Teniendo en cuenta que el valor característico de la resistencia al aplastamiento ($f_{h,k} = 23,0\text{N/mm}^2$) publicado por Sosa Zitto et al. (2012) fue obtenido sobre una muestra con densidad característica $\rho_k = 388\text{kg/m}^3$, valor casi coincidente con el encontrado en este proyecto donde -como se mencionó anteriormente- el valor medio alcanzó 495kg/m^3 y el coeficiente de variación 13%, puede desprejarse el ajuste de $f_{h,k}$ en función de la densidad.

Por el contrario, la influencia del diámetro del clavo debe considerarse, ya que el empleado en este proyecto (2,5mm) es considerablemente menor al utilizado por Sosa Zitto et al. (2012) para la determinación de la resistencia al aplastamiento (5,5mm). Aplicando el factor $d^{-0.3}$ se obtiene $f_{h,1,k} = f_{h,2,k} = 23,0\text{N/mm}^2 (2,5^{-3} / 5,5^{-3}) = 29,1\text{N/mm}^2$.

En consecuencia, los valores a emplear en las ecuaciones adoptadas por el Eurocódigo 5 son: $f_{h,1,k} = f_{h,2,k} = 29,1\text{N/mm}^2$; $t_1 = 21\text{mm}$; $d = 2,5\text{mm}$; $t_2 = 22\text{mm}$; $\beta = f_{h,2,k} / f_{h,1,k} = 1$; $M_{v,Rk} = 1044\text{Nmm}$; $F_{ax,Rk} / 4 = 59\text{N}$ (ver Fig. 1 y 3.2).

Los resultados de la capacidad portante de cada clavo, obtenidos resolviendo las Ec. (1), (2), (3) y (4) y duplicando los valores calculados pues las conexiones analizadas presentan dos secciones de corte, alcanzaron 3056N, 1601N, 1289N y 1014N respectivamente. Considerando que según este modelo de cálculo el valor característico ($F_{v,Rk}$) corresponde al menor resultado de los calculados, resulta $F_{v,Rk} = 1014\text{N}$ (Ec. 4) el cual se corresponde con un modo de rotura que presenta el desarrollo de rótulas plásticas tanto en la tabla central como en las laterales (ver Tab. 2).

3.2.2 Resultados obtenidos aplicando las ecuaciones provistas por el Reglamento CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2013)

Estas reglas de diseño no consideran la influencia del diámetro del clavo sobre la resistencia al aplastamiento de la madera cuando el diámetro es menor que 6,35mm. En consecuencia, para este caso es de aplicación el valor característico de $23,0\text{N/mm}^2$ publicado por Sosa Zitto et al. (2012) ya mencionado anteriormente.

Con relación a las propiedades mecánicas del clavo, el Reglamento CIRSOC 601 -en línea con el criterio vigente en EEUU de Norteamérica (NDS 2005), adopta un valor característico de la tensión de fluencia en flexión del clavo (F_{yb}) que representa un promedio entre los valores característicos correspondientes a la fluencia y a la resistencia última en tracción. Considerando los valores obtenidos experimentalmente para estas propiedades (ver 3.2) se obtiene $F_{yb} = (f_{y,k} + f_{u,k}) / 2 = (303\text{N/mm}^2 + 628\text{N/mm}^2) / 2 = 465\text{N/mm}^2$.

En consecuencia, los valores a emplear en las ecuaciones adoptadas por estas reglas (ver también la Fig. 1) son: $D = 2,5\text{mm}$; $l_s = 21\text{mm}$; $F_{es} = F_{em} = 23,0\text{N/mm}^2$; $l_m = 22\text{mm}$; $F_{yb} = 465\text{N/mm}^2$; $R_e = F_{em} / F_{es} = 1$.

Los resultados de la capacidad portante de cada clavo, obtenidos resolviendo las Ec. (5), (6), (7) y (8), alcanzaron 2415N, 1265N, 916N y 746N respectivamente. Teniendo en cuenta que según este modelo de cálculo el valor característico (Z_{car}) corresponde al menor resultado de los calculados, resulta $Z_{car} = 746\text{N}$ (Ec. 8) el cual se corresponde con un modo de rotura que presenta la formación de rótulas plásticas tanto en la tabla central como en las laterales (ver Tab. 2).

3.2.3 Resultados obtenidos aplicando las ecuaciones provistas por la norma NBR 7190 (ABNT 2010)

Estas reglas de diseño no consideran la influencia del diámetro del clavo sobre la resistencia al aplastamiento de la madera en dirección paralela a las fibras. En consecuencia, para este caso también es de aplicación el valor característico publicado por Sosa Zitto et al. (2012) para la especie (ver 3.2), resultando $f_{e0,k} = 23,0\text{N/mm}^2$.

En relación al valor característico de la resistencia a fluencia del clavo, como el mismo fue comprobado experimentalmente (ver 3.2), resulta $f_{y,k} = 303\text{N/mm}^2$.

Teniendo en cuenta que conforme al criterio de estas reglas el espesor nominal de la madera (t) en conexiones sometidas a doble cortadura debe considerarse como el menor valor entre la mitad del espesor de la pieza central y el espesor de cada pieza lateral, en este caso es $t = 22\text{mm} / 2 = 11\text{mm}$ (ver también la Fig. 1).

Siendo el diámetro del clavo (d) igual a $2,5\text{mm}$ resulta $\beta = 11\text{mm} / 2,5\text{mm} = 4,4$. Para calcular el valor de β_{lim} (ver 2.2.3) es necesario determinar la resistencia de cálculo a fluencia del clavo $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$. Siendo $f_{yk} = 303\text{N/mm}^2$ y $\gamma_s = 1,1$ resulta $f_{yd} = 275\text{N/mm}^2$. Por su parte, para determinar la resistencia de cálculo al aplastamiento de la madera en la dirección de las fibras ($f_{e0,d} = k_{mod} f_{e0,k} / \gamma_{wc}$) se debe considerar que $k_{mod} = k_{mod1} \cdot k_{mod2} \cdot k_{mod3}$. Como las conexiones investigadas fueron ensayadas durante un tiempo comprendido entre 10 y 15 minutos (EN 1380 2009 y EN 26891 1991), su contenido de humedad promedio fue 11% con un coeficiente de variación de 3% (ver 3.1) y se construyeron con tablas clasificadas y exentas de defectos en la zona de la conexión (ver 2.1) resulta $k_{mod1} = k_{mod2} = k_{mod3} = 1$. Siendo $\gamma_{wc} = 1,4$ (ABNT 2010), se obtiene $f_{e0,d} = 23,0\text{N/mm}^2 / 1,4 = 16,4\text{N/mm}^2$. Finalmente resulta $\beta_{lim} = 1,25 (275\text{N/mm}^2 / 16,4\text{N/mm}^2)^{0,5} = 5,1$.

Como $\beta = 4,4 < \beta_{lim} = 5,1$ el valor característico de la capacidad portante de la conexión por cada clavo se obtiene aplicando la Ec. (9) y duplicando el resultado calculado para considerar las dos secciones de corte, resultando: $R_{vk,1} = 633\text{N}$. Conforme al criterio de estas reglas, el resultado se corresponde con un modo de rotura que implica el aplastamiento de la madera.

3.3 Análisis comparativo de los resultados

La Tabla 1 exhibe los valores característicos de la capacidad portante -por cada clavo- de las conexiones analizadas. En la misma se puede apreciar que los valores calculados según el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005), el Reglamento CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2013) y la norma NBR 7190 (ABNT 2010) representan el 64%, el 47% y el 40%, respectivamente, del valor determinado experimentalmente.

Tabla 1. Valor característico de la capacidad portante por cada clavo

Determinación experimental	Calculado según reglas de diseño		
	Eurocódigo 5	CIRSOC 601	NBR 7190
1592N	1014N	746N	633N

3.3.1 El programa experimental

Los resultados experimentales (ver 3.1) mostraron un comportamiento dúctil en todas las conexiones, las cuales alcanzaron la máxima carga desarrollando rótulas plásticas en los clavos. La Figura 2 exhibe un cuerpo de prueba abierto luego del ensayo, donde se ven las características del tipo de rotura alcanzado y el deslizamiento entre las piezas unidas.



Figura 2. Cuerpo de prueba abierto luego del ensayo

Por su parte, la Figura 3 muestra una curva carga-deslizamiento representativa de las encontradas en este proyecto para los cuerpos de prueba unidos con 21 clavos (ver Fig. 1), donde se aprecia con claridad la elevada cantidad de energía disipada antes de alcanzar la máxima carga. Un análisis detallado de este tipo de conexiones, que incluye el estudio de distancias entre clavos menores a las recomendadas por las normas europeas, puede consultarse en Sosa Zitto et al. (2013).

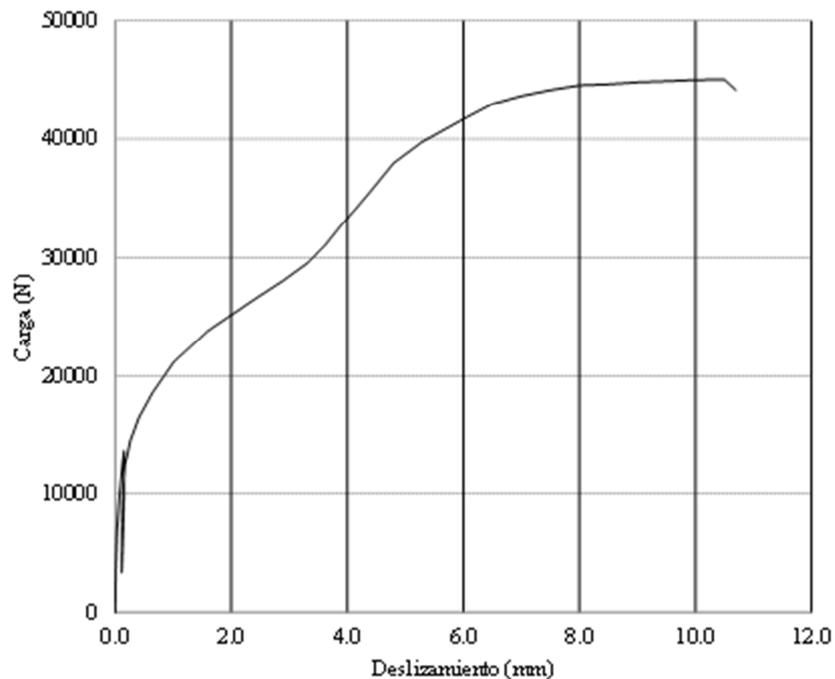


Figura 3. Curva carga-deslizamiento obtenida en el programa experimental

3.3.2 El Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005)

Si bien el valor característico calculado aplicando las reglas europeas (1014N) es el más cercano al determinado empíricamente (1592N), la importante diferencia encontrada no puede ser explicada en este caso si se tiene en cuenta que el programa experimental (ver 2.1 y 3.1) y el proceso de cálculo (ver 2.2.1, 3.2 y 3.2.1) se desarrollaron conforme a los lineamientos de las normas europeas.

No obstante, es necesario destacar las siguientes particularidades que evidencian congruencia en el criterio europeo. En primer lugar, el modo de rotura encontrado experimentalmente que exhibe la formación de rótulas plásticas tanto en la tabla central como en las laterales (Fig. 2), es coincidente con el correspondiente a la expresión 4 que determinó el valor característico de 1014N (ver Tab. 2). Por otra parte, la observación de una curva carga-deslizamiento típica para un cuerpo de prueba ensayado, como la exhibida en la Fig. 3, indica que luego de un rápido incremento inicial -hasta aproximadamente 35% / 40% de la carga máxima- comienza una disminución progresiva de la pendiente de la curva, lo cual es congruente con la formación de las rótulas plásticas en los clavos. Luego, aproximadamente para el 65% de la carga máxima, la pendiente vuelve a incrementarse, lo cual evidencia la aparición de la capacidad portante adicional debida a la resistencia a la extracción de los clavos y a la fricción entre las piezas unidas (rope effect). Las reglas de diseño europeas son las únicas -dentro de las analizadas en este trabajo- que contemplan esa resistencia adicional que se suma a la contemplada en el modelo inicial de Johansen (Bejtka y Blaß 2002; Hilson 1995a) y que se puso en evidencia en los resultados experimentales de este proyecto.

Tabla 2. Correspondencia entre los modos de rotura y la capacidad portante según el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005) y el CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2013)

Modo de Rotura				
Eurocódigo 5^(*)	Ec. (1)	Ec. (2)	Ec. (3)	Ec. (4)
CIRSOC 601^(**)	Ec. (5)	Ec. (6)	Ec. (7)	Ec. (8)

(*) por cada clavo y cada sección de corte (ver 2.2.1); (**) por cada clavo con 2 secciones de corte (ver 2.2.2).

3.3.3 El Reglamento CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2013)

El valor característico calculado mediante la aplicación de estas reglas (746N) es significativamente menor al obtenido aplicando las ecuaciones provistas en el Eurocódigo 5 (1014N). La diferencia encontrada entre los resultados puede ser explicada por las tres causas que se analizan a continuación.

Un análisis detallado de la Ecuación (8), que definió el valor característico de la capacidad portante según el Reglamento de Argentina, muestra que la misma se diferencia de la Ec. (4), que lo definió según el Eurocódigo 5, porque no ha incorporado el término $F_{ax,Rk} / 4$ ni el factor 1,15 que afecta al primer sumando de la Ec. (4). Como se expresó anteriormente, las reglas europeas incorporaron el término y el factor mencionados para considerar la resistencia adicional que es producida por la oposición a la extracción del elemento de fijación y por la fricción entre las piezas unidas (Bejtka y Blaß 2002; Hilson 1995a), la cual se suma a la contemplada en el modelo inicial de Johansen. Si bien en ambos casos la capacidad portante se corresponde con un modo de rotura que presenta el desarrollo de rótulas plásticas tanto en la tabla central como en las laterales (ver la Tab. 2), la diferencia señalada en la estructura de las Ec. (8) y (4) constituye una de las causas que explica la razón por la cual el cálculo de la capacidad portante conforme a las reglas adoptadas en Argentina condujo a un resultado más conservador que el obtenido con las reglas europeas.

Otra parte de la diferencia es explicada por la adopción de criterios distintos en cuanto a la consideración de la influencia del diámetro del clavo sobre la resistencia al aplastamiento de la madera. El CIRSOC 601 no tiene en cuenta esta influencia cuando el diámetro es menor que 6,35mm. Por su parte, el Eurocódigo 5 asume que la resistencia al aplastamiento aumenta con la disminución del diámetro según el factor $d^{-0,3}$ cuando los clavos son colocados sin perforación previa como en el presente caso (ver 3.2.1). La no consideración del incremento en la resistencia al aplastamiento de la madera en función de la disminución del diámetro del clavo es otra causa que explica la razón por la cual el cálculo de la capacidad portante conforme a las reglas adoptadas en Argentina condujo a un resultado más conservador.

La tercera causa que participa en la explicación de la diferencia obtenida es el criterio para considerar el valor del momento de plastificación del clavo ($M_{y,Rk}$) en las reglas europeas y el de la tensión de fluencia en flexión en el Reglamento de Argentina. Conforme a la teoría clásica de la resistencia de materiales, por tener los clavos una sección circular, estos valores están relacionados por la expresión $F_{yb} = 18,9 M_{y,Rk} / \pi D^3$, aunque los criterios de obtención de los mismos a través de estas normativas arrojan resultados que no satisfacen esta relación. En este proyecto se utilizó $M_{y,Rk} = 1044\text{Nmm}$ conforme a determinaciones experimentales (ver 3.2 y 3.2.1). Por su parte, se adoptó $F_{yb} = 465\text{N/mm}^2$ respetando el criterio de las reglas de Argentina (ver 3.2.2). Es fácil comprobar que si se hubiese aplicado la expresión $F_{yb} = 18,9 M_{y,Rk} / \pi D^3$ para el presente caso (con $M_{y,Rk} = 1044\text{Nmm}$) se habría obtenido $F_{yb} = 402\text{N/mm}^2$ y, en consecuencia, la diferencia entre los

valores característicos de la capacidad portante presentados en la Tab. 1 (1014N y 746N) hubiese sido aún mayor que la encontrada. Es decir que el efecto provocado por esta causa se contrapone en este caso a los dos señalados anteriormente.

Las restantes diferencias entre las expresiones provistas por ambas reglas de diseño son solo aparentes y se deben al empleo de distintos símbolos o a la adopción de distintos parámetros que en definitiva conducen a resultados equivalentes.

3.3.4 La norma NBR 7190 (ABNT 2010)

El valor característico calculado mediante la aplicación de estas reglas (633N) es el menor de todos los obtenidos en este trabajo y representa el 40% del determinado experimentalmente (1592N). A diferencia del Eurocódigo 5 y del CIRSOC 601 que tienen en cuenta cuatro modos de rotura posibles para las conexiones sometidas a doble corte como las estudiadas en este proyecto (ver la Tabla 2), el modelo adoptado por la norma de Brasil considera que la resistencia de la conexión puede definirse de dos modos distintos: por aplastamiento de la madera o por flexión del clavo (ver 2.2.3).

Según el criterio de esta norma, la resistencia de las conexiones investigadas queda definida por el aplastamiento de la madera y no por la flexión del clavo (ver 3.2.3) pues $\beta = 4,4 < \beta_{lim} = 5,1$. Esta consideración es contradictoria tanto con la evidencia empírica (ver Fig. 2 y 3) como con las ecuaciones que definen la resistencia según el Eurocódigo 5 y el CIRSOC 601 –Ec. (4) y (8) respectivamente- las cuales se corresponden con la formación de rótulas plásticas en los clavos tanto dentro de la tabla central como de las laterales y la consecuente presencia de un comportamiento dúctil (ver 3.3.1).

Un análisis del significado de los términos incluidos en la expresión que define el valor del parámetro $\beta = t / d$ puede explicar este curioso resultado referido al modo de rotura. Conforme al criterio de estas reglas de Brasil, el espesor nominal de la madera (t) en conexiones sometidas a doble cortadura es el menor valor entre la mitad del espesor de la pieza central y el espesor de cada pieza lateral. Como en las uniones analizadas el espesor de la tabla central es igual al de las laterales (ver Fig. 1), el criterio adoptado conduce a un valor $t = 22\text{mm} / 2 = 11\text{mm}$ (ver 3.2.3). Este valor no conduce a expresar en forma adecuada la relativamente elevada esbeltez de los clavos empleados y, en consecuencia, provoca la consideración de un comportamiento mecánico que resulta contradictorio con los resultados obtenidos tanto en forma experimental como a través de la aplicación del modelo de Johansen.

El criterio para considerar el espesor nominal de la madera (t), en forma conjunta con la observación de la Ec. (9), pueden explicar también el relativamente bajo valor obtenido para la resistencia por cada clavo según esta norma (633N). En efecto, la expresión mencionada multiplica el valor de la tensión de aplastamiento por el diámetro (d), por el espesor nominal (t) y por el factor 0,5. Siendo $t = 11\text{mm}$, aplicando este criterio se acepta que el aplastamiento de la madera se extiende a un cuarto del espesor de la tabla central por cada sección de corte. Para conexiones con dos secciones de corte el resultado de la Ec. (9) se debe duplicar, lo que implica aceptar que el aplastamiento se manifiesta solamente sobre la mitad del espesor de la tabla central, lo cual no parece coherente con el comportamiento mecánico de las uniones estudiadas. Resulta interesante efectuar una comparación con el valor calculado con la Ec. (6) del CIRSOC 601 que también se corresponde con un modo de rotura por aplastamiento de la tabla central (ver 3.2.2 y Tab. 2). En este caso el valor encontrado (1265N) duplica al calculado según la NBR 7190, lo que implica aceptar que las tensiones de aplastamiento se extienden a todo el espesor de la tabla central.

Más allá de las particularidades del modo de rotura y del relativamente bajo valor calculado para la resistencia, ya mencionados en los párrafos anteriores, resulta de interés estudiar el valor de la capacidad portante que se obtendría con la aplicación de estas reglas si la resistencia de las uniones investigadas estuviese definida por la flexión del clavo, es decir si fuese $\beta > \beta_{lim}$. Esto puede lograrse simplemente aumentando el espesor de la tabla central de 22mm a 26mm, de manera que sea $t = 26\text{mm} / 2 = 13\text{mm}$ y en consecuencia $\beta = 13\text{mm} / 2,5 = 5,2 > \beta_{lim} = 5,1$. Aplicando la Ec. (10) (ver 2.2.3) se obtiene un valor

característico de la resistencia por clavo igual a 464N, el cual resulta aún menor al de 633N que ya fue presentado y analizado en los párrafos anteriores. Es decir que un pequeño aumento del espesor de la tabla central, y consecuentemente de la sección transversal de la misma, conduce a una disminución de la capacidad portante de la conexión. Estos resultados alientan la preparación de un proyecto específico orientado a investigar las aparentes contradicciones vinculadas a la determinación tanto del modo de rotura como de la capacidad portante de estas uniones a través de la aplicación de estas reglas.

Un análisis detallado de la configuración de las uniones que son objeto de estudio, indica que no se cumplieron todos los requisitos establecidos en la norma NBR 7190. Esta norma prescribe una penetración mínima de la punta del clavo en la tabla que la contiene igual al espesor de ésta o a 12 veces el diámetro del clavo (d). La razón de la falta de cumplimiento de este requisito es que el programa empírico fue desarrollado conforme a las normas europeas, que exigen una penetración mínima de la punta del clavo igual a $8d = 20\text{mm}$ el cual se satisface (ver Fig. 1). No obstante, esta circunstancia no invalida la discusión presentada en los párrafos anteriores sino que, por el contrario, confirman la necesidad de esclarecer las aparentes inconsistencias encontradas en los resultados. Esta afirmación se basa en que el programa experimental mostró un valor característico de la capacidad portante muy superior al calculado con estas reglas de diseño aun cuando los cuerpos de prueba presentaron una penetración de los clavos menor a la exigida por las mismas. Similares reflexiones pueden hacerse sobre las referencias de la norma con relación al diámetro mínimo del clavo (d) y a la resistencia característica en fluencia del mismo (f_{yk}).

3.4 Desempeño de las conexiones investigadas en estructuras reales

La Figura 4 exhibe la estructura reticulada de un galpón de 16m de ancho y 150m de longitud. El mismo, fotografiado en etapa de construcción, está destinado a la producción avícola. Cada cordón del reticulado está constituido por dos tablas con sección transversal de dimensiones nominales iguales a 127mm x 25,4mm. La separación entre ejes de los cordones es de 738mm. Las diagonales, inclinadas 45° respecto de los cordones, están conformadas por una tabla con sección transversal de dimensiones nominales 101,6mm por 25,4mm. En todos los casos se utilizó madera de *Eucalyptus grandis* cultivado en la Mesopotamia de Argentina (INTA 1995). La tipología estructural adoptada permitió distribuir racionalmente los esfuerzos producidos por los distintos estados de carga que incluyen el peso propio, la sobrecarga de uso y la acción del viento.



Figura 4. Estructura reticulada de 16m cuyas conexiones se materializaron con clavos de pequeño diámetro colocados neumáticamente

La Figura 5 muestra el detalle de conexiones típicas entre dos diagonales y el cordón inferior, las cuales presentan similitudes con el modelo analizado en este trabajo, ya que en cada caso tienen dos secciones de corte y vinculan tres tablas con el mismo espesor. El empleo de clavos de 2,5mm de diámetro y 76,2mm de largo colocados neumáticamente permitió resolver satisfactoriamente el diseño y la ejecución de estas uniones, que tradicionalmente han constituido un tema de difícil solución debido al reducido espacio de que se dispone en los nodos.

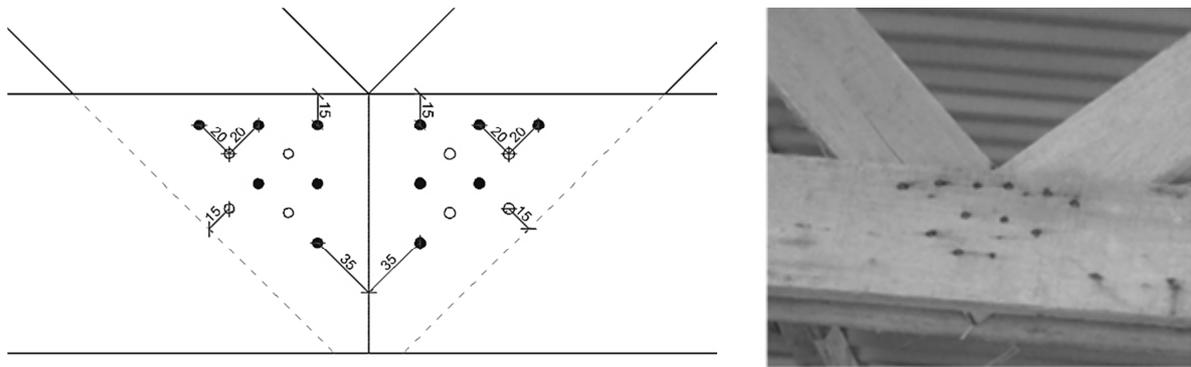


Figura 5. Diagrama de clavado (izquierda, dimensiones en mm) y ejecución (derecha) de las conexiones de dos diagonales con el cordón inferior

Como puede apreciarse claramente en el diagrama, cada unión se materializó con 10 clavos, 6 colocados de un lado y 4 desde el otro. Esta configuración provee una resistencia característica de 15920N conforme a los resultados obtenidos en el programa empírico (ver la Tab. 1), resultados que fueron confirmados por (Sosa Zitto et al. 2013) empleando una base estadística más amplia que incluyó el análisis de clavos con diámetro aún más pequeño (2,2mm), así como distintas distancias entre clavos y a los bordes de las piezas.

Además de su elevada capacidad portante y sus reducidas dimensiones, estas uniones presentan otra importante ventaja para su uso en estructuras reticuladas. Esta ventaja radica en que la resistencia al aplastamiento de la madera no varía con la dirección de las fibras en uniones clavadas, lo cual fue probado por la experiencia europea (EN 1995-1-1 2005; Hilson 1995b) para clavos con diámetro menor o igual a 8mm y fue verificado -empleando clavos con diámetro de 5,5mm- para la especie investigada en este trabajo por Sosa Zitto et al. (2012). En consecuencia, las uniones de barras que concurren a un nodo con distintas direcciones (ver Fig. 5) pueden calcularse con independencia del ángulo entre la dirección del esfuerzo y la de las fibras, lo que facilita el diseño en comparación con el de uniones que emplean elementos de mayor diámetro como los bulones.

El desempeño desde el punto de vista de las deformaciones -aspecto que suele ser decisivo en el diseño de estructuras de madera- fue también analizado para este tipo de conexiones. La particular ductilidad encontrada lleva implícita la presencia de elevados deslizamientos al alcanzar la rotura. No obstante, éstos son significativamente menores hasta un valor de la carga del orden del 40% de su máxima capacidad como puede apreciarse en la Fig. 3. Es conocido que el deslizamiento de las conexiones puede tener mayor influencia que las deformaciones axiales de las barras sobre la deflexión final de una estructura reticulada. En consecuencia, y con el objetivo de evaluar experimentalmente el comportamiento mecánico de estructuras con las características exhibidas en la Fig. 4, se ejecutó un ensayo sobre un prototipo a escala natural. Los detalles y resultados de la prueba fueron publicados por Gómez et al. (2012) y mostraron que la deformación vertical del punto central alcanzó 1 / 245 de la longitud de la estructura bajo la acción del peso propio y del viento de diseño para la región, combinación que resultó crítica para el diseño. Por su parte, bajo la acción del peso propio y la sobrecarga de uso el correspondiente valor fue 1 / 1500.

Teniendo en cuenta que las construcciones analizadas están destinadas a uso industrial con bajo factor de ocupación, los valores encontrados pueden considerarse muy satisfactorios.

4. CONCLUSIONES

La capacidad portante por cada clavo de las conexiones investigadas alcanzó valores característicos iguales a 1592N, 1014N, 746N y 633N según la determinación experimental y los cálculos efectuados conforme a las reglas de diseño del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2005), del CIRSOC 601 (INTI CIRSOC 2013) y la norma NBR 7190 (ABNT 2010), respectivamente. Los resultados experimentales confirmaron un comportamiento dúctil de todas las conexiones, las cuales alcanzaron la máxima carga desarrollando rótulas plásticas tanto en la pieza central como en las laterales y disipando una elevada cantidad de energía. Este modo de rotura está en línea con el que se obtiene aplicando las reglas de diseño del Eurocódigo 5 y del CIRSOC 601, pero no es congruente con el que surge de la aplicación de la norma NBR 7190. La diferencia encontrada entre los resultados experimentales y los calculados conforme al Eurocódigo 5 no pudo ser explicada ya que el programa empírico y el proceso de cálculo se desarrollaron conforme a las normas europeas. Los cálculos efectuados conforme al CIRSOC 601 mostraron resultados más conservadores que los obtenidos a través del Eurocódigo 5 porque el primero no considera la influencia del diámetro del clavo sobre la resistencia al aplastamiento de la madera ni el incremento de la capacidad portante por efecto de la fricción entre las piezas unidas y de la resistencia a la extracción del clavo. La norma NBR 7190 condujo a los resultados más conservadores de la capacidad portante y, según su criterio -en contraposición a los resultados experimentales y al criterio del Eurocódigo 5 y del CIRSOC 601- la resistencia de las conexiones investigadas queda definida por el aplastamiento de la madera sin considerar la flexión del clavo. El desempeño de las conexiones investigadas fue también comprobado en reticulados con dimensiones estructurales donde su elevada capacidad portante y el reducido espacio que requieren permitieron resolver las uniones de barras que concurren a los nodos con distintas direcciones. En consecuencia, estos resultados alientan la preparación de un proyecto específico orientado a investigar las aparentes contradicciones vinculadas a la determinación del modo de rotura y de la capacidad portante de estas uniones a través de la aplicación de las reglas de diseño consideradas, y en particular de la norma NBR 7190.

5. REFERENCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **Projeto de revisão NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira**, Brasil, 2010.
- BEJTKA I, BLAß HJ. **Joints with inclined screws**, Paper 35-7-5, Proceedings, CIB-W18 Meeting, Kyoto, Japan, 2002.
- BLAß HJ. Untersuchungen zur Lastverteilung in Nagel verbindungen. **Holz als Roh- und Werkstoff** 49: 21-26, 1991.
- BLAß HJ. Multiple fastener joints. In: **Timber Engineering STEP 1**, pp. C15/1-C15/8. Centrum Hout, The Netherlands, 1995.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, **EN 383 - Timber structures—test methods—determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners**, Brussels, 2007.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, **EN 384 - Structural timber—Determination of characteristic values of mechanical properties and density**, Brussels, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, **EN 409 -Timber structures—Test methods—Determination of the yield moment of dowel type fasteners**, Brussels, 2009.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, **EN 1380 - Timber structures—Test methods—Load bearing nails, screws, dowels and bolts**, Brussels, 2009.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, **EN 1382 - Timber structures—Test**

- methods–Withdrawal capacity of timber fasteners**, Brussels, 2000.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, **EN 1995-1-1 Eurocode 5: Design of timber structures–Part 1-1: General–Common rules and rules for buildings**, Brussels, 2005.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, **EN 14358 - Timber structures–Calculation of characteristic 5-percentile values and acceptance criteria for a sample**, Brussels, 2007.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, **EN 26891 - Timber structures–Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics**, Brussels, 1991.
- GOMEZ R, RAMOS R, VILLALBA I, VIVIAN A, CUFFRÉ A, PITER JC, Estructuras reticuladas de madera para establecimientos avícolas. Análisis de la resistencia y la deformación de un prototipo bajo la acción del peso propio, la sobrecarga de uso y la acción del viento. En: XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, E.R. **Anales**. Código 551.26.TE en 8 pág pdf, CD ROM ISSN 1667-9253, 2012.
- HARTL H, Truss connections with dowel-type fasteners. In: **Timber Engineering STEP 2**, pp. D1/1-1/13. Centrum Hout, The Netherlands, 1995.
- HILSON BO, Joints with dowel-type fasteners – Theory. In: **Timber Engineering STEP 1**, pp. C3/1-C3/11. Centrum Hout, The Netherlands, 1995a.
- HILSON BO Nailed joints I. In: **Timber Engineering STEP 1**, pp. C4/1-C4/8. Centrum Hout, The Netherlands, 1995b.
- INTA, **Manual para productores de eucalyptus de la Mesopotamia Argentina**, Grupo Forestal, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEAConcordia, Argentina, 1995.
- INTI CIRSOC, **Reglamento Argentino de Estructuras de madera CIRSOC 601**. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, 2013.
- INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, **IRAM 9662-2, Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 2: tablas de *Eucalyptus grandis***, Buenos Aires, 2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 3130 - Wood–Determination of moisture content for physical and mechanical tests**, 1975.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 3131 - Wood–Determination of density for physical and mechanical tests**, 1975.
- JOHNSSON H, STEHN L, Plug shear failure in nailed timber connections. **Holz als Roh- und Werkstoff** 62: 455-464, 2004.
- KESSEL MH, Trusses. In: **Timber Engineering STEP 1**, pp. B12/1-B12/8. Centrum Hout, The Netherlands, 1995.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN INN-CHILE, **NCh 1198 – Madera – Construcciones en madera – Cálculo**, Santiago, 2007.
- AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION, **NDS National Design Specification for Wood Construction**, Washington, 2005.
- SOSA ZITTO, MA, KÖHLER J, PITER JC, Embedding strength in joints of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis* with dowel-type fasteners. Analysis according to the criterion adopted by European standards, **European Journal of Wood and Wood Products** 70(4): 433-440, 2012.
- SOSA ZITTO, MA, KÖHLER J, PITER JC, Load-carrying capacity of timber-to-timber joints of fast-growing Argentinean *Eucalyptus grandis* with nails of small diameter laterally loaded in double shear. Analysis according to the criterion adopted by European standards, **European Journal of Wood and Wood Products** (en prensa, publicado “online first” DOI 10.1007/s00107-013-0748-6), 2013.
- STEHN L, BÖRJES K, The influence of nail ductility on the load capacity of a glulam truss structure. **Engineering Structures** 26: 809-816, 2004.

6. NOTA DE RESPONSABILIDAD

Los autores son los únicos responsables por el contenido de este trabajo.