



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

CONEXIONES CON CARGA PERPENDICULAR A LAS FIBRAS. CRITERIOS DE DISEÑO Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

LOAD PERPENDICULAR TO THE GRAIN IN CONNECTIONS. DESIGN CRITERIA AND EMPIRICAL RESULTS

M. Alexandra Sosa Zitto (P) (1), M. Rocío Ramos (2); Eduardo A. Torrán (3); Juan C. Piter (4)

(1) Dr. Ing. Civil Prof., Universidad Tecnológica Nacional, Fac. Reg. C. del Uruguay, C. del Uruguay, Argentina

(2) Ing. Civil Prof., Universidad Tecnológica Nacional, Fac. Reg. C. del Uruguay, C. del Uruguay, Argentina

(3) Mg. Ing. Civil Prof., Universidad Tecnológica Nacional, Fac. Reg. C. del Uruguay, C. del Uruguay, Argentina

(4) Dr. Ing. Civil Prof., Universidad Tecnológica Nacional, Fac. Reg. C. del Uruguay, C. del Uruguay, Argentina

Dirección para correspondencia: alexandrasosazitto@gmail.com; (P) Presentador

Resumen

Las conexiones con clavos de pequeño diámetro han mostrado un excelente comportamiento mecánico en estructuras de madera debido a su elevada resistencia y ductilidad, en línea con los modernos requerimientos de seguridad estructural. El uso de clavadoras neumáticas ha facilitado y economizado su ejecución, impulsando su desarrollo en Argentina como medio de vincular los nodos en estructuras reticuladas planas construidas con tablas de *Eucalyptus grandis* de rápido crecimiento, principalmente destinadas a instalaciones industriales. En estas estructuras, las cargas transmitidas por los montantes a los cordones exteriores pueden producir la rotura prematura de éstos debido al desarrollo de tensiones de corte combinadas con tensiones de tracción perpendicular a la fibra. Este tipo de falla frágil se manifiesta antes que la conexión haya desarrollado toda su capacidad plástica y afecta la seguridad estructural. Para investigar la capacidad portante y el modo de rotura de estas conexiones, se desarrolló un programa empírico que involucró 38 cuerpos de prueba con las configuraciones usuales. El proyecto se ejecutó siguiendo los lineamientos de las normas europeas. Los resultados mostraron que la rotura del miembro cargado perpendicularmente a las fibras se produjo al alcanzar su máxima capacidad de absorber esfuerzo de corte, determinada considerando como altura efectiva de la sección transversal a la distancia entre su borde cargado y el clavo más alejado. Estos resultados son congruentes con el criterio adoptado por las reglas de diseño de Brasil, en tanto que las reglas de EEUU, Chile y Argentina sitúan al diseño en una posición más conservadora.

Palabras-clave: uniones clavadas, carga normal a la fibra, rotura frágil, tensiones de corte

Abstract

The joints with nails of small diameter have demonstrated an excellent mechanical behaviour in timber structures due to its high resistance and ductility, in line with the modern requirements of structural safety. The utilization of power-driving equipment using compressed air allows fast installation of nails reducing the cost of execution. Consequently, the use of these connections at nodes of plane trusses built-up with boards of fast-growing *Eucalyptus grandis*, and mainly destined to industrial buildings, have acquired importance in Argentina. In this type of structures, the loads applied by the vertical web members to the external chords may cause early failures in the latter due to the development of shear stresses combined with tension perpendicular-to-grain stresses. This type of brittle failure occurs before the development of the full plastic capacity of the connection and affects the structural safety. With the purpose of studying the load-carrying capacity and the failure mode of these connections, an empirical project with 38 test specimens was carried out according to European standards. Results showed that the failure of the member loaded perpendicular to the grain occurred when it reached its full shear capacity considering the depth of the cross sections as the distance from the loaded edge and the furthest nail. These results are congruent with the criterion adopted by the Brazilian design rules whereas the rules adopted by EEUU, Chile and Argentina situate the design on the conservative side.

Keywords: nailed joints; load perpendicular to the grain; brittle failure; shear stress



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

1. INTRODUCCIÓN

La capacidad de carga de las uniones de *Eucalyptus grandis* de rápido crecimiento cultivado en Argentina, construidas con clavos de pequeño diámetro y cargadas paralelamente al grano fue estudiada detalladamente por Sosa Zitto et al. (2014). Esta publicación describe el comportamiento mecánico de este tipo de uniones cuando se satisfacen los requisitos de espaciamiento adoptados por reglas de diseño y para valores reducidos del espaciamiento recomendado. Los resultados reportados, obtenidos a partir de ensayos realizados de acuerdo a la norma europea EN 1380 (2009), muestran una capacidad de carga particularmente alta y un modo de falla dúctil, provocado por la formación de rótulas plásticas en los clavos y, consecuentemente, de importantes deslizamientos entre las piezas unidas. Este comportamiento puede considerarse muy ventajoso desde el punto de vista de la seguridad estructural.

Los resultados de la capacidad de carga obtenidos de ensayos de laboratorio para este tipo de uniones cargadas en dirección paralela a las fibras fueron confirmados luego en conexiones materializadas en cerchas de tamaño estructural construidas con tablas de *Eucalyptus grandis* (Piter et al. 2014). Además del ventajoso comportamiento mecánico de estas uniones, la utilización de clavadoras neumáticas permite una rápida ejecución reduciendo los costos. Estas conclusiones permitieron a los diseñadores y constructores resolver el problema derivado del relativamente escaso espacio generalmente disponible para la ubicación de los clavos en los nodos estructurales (Hartl 1995) sin afectar los requisitos de seguridad.

Tanto la experiencia europea (EN 1995-1-1 2005), como la norteamericana (NDS 2012) y la sudamericana (NBR 7190 2010; CIRSOC 601 2013; NCh 1198 2007) indican que la capacidad de carga de las uniones clavadas puede considerarse independiente del ángulo entre la recta de acción de la carga y la dirección de las fibras. No obstante, el diseño de las uniones mecánicas no siempre es controlado por la capacidad de carga de la conexión propiamente dicha. Los esfuerzos suplementarios como el corte y la tracción perpendicular a la fibra -que pueden ser inducidos por excentricidades y por la inclinación de la carga respecto a las fibras- pueden conducir a una falla frágil a niveles de carga inferiores a la capacidad estimada de acuerdo al modelo de Johansen (Ehlbeck & Görlacher 1995; Racher 1995). Este problema está particularmente presente en las conexiones de cerchas destinadas a cubrir edificios industriales, debido a que las acciones transferidas entre los miembros conectados son usualmente significativas debido a que cubren vanos de dimensiones importantes (Piter et al. 2014).

Las reglas de diseño de Argentina (CIRSOC 601 2013) y de otros países sudamericanos como Brasil (NBR 7190 2010) y Chile (NCh 1198 2007), proveen una guía para el diseño de miembros estructurales sometidos a esfuerzo de corte provocado por acciones transmitidas en conexiones con una carga inclinada respecto de la dirección de las fibras. Estas reglas aplican un criterio común cuando la fuerza transmitida por la conexión está ubicada a una distancia desde el extremo del miembro estructural que es mayor a 5 veces su altura, pero el criterio adoptado por Brasil difiere significativamente de los restantes cuando la carga se aplica a una distancia desde el extremo del miembro menor a 5 veces su altura. La conveniencia de desarrollar un proyecto experimental destinado al estudio específico de las conexiones investigadas está fundamentado en las siguientes razones: i) las excentricidades usualmente no pueden ser evitadas en los nudos de las cerchas



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

construidas con tablas de la especie analizada debido a la disposición adoptada tanto para el sistema estructural como para la unión clavada; ii) los esfuerzos suplementarios en los nudos adquieren importancia porque las tablas de madera de esta especie son producidas usualmente en espesores relativamente pequeños (25,4 mm); y iii) tanto la relativamente alta esbeltez de los clavos como la habitual adopción de espaciamientos reducidos –aprovechando la alta capacidad de carga y ductilidad de estas conexiones– tienen relevancia en la conveniencia de verificar para este caso la efectividad de los distintos criterios adoptados por las reglas de diseño.

El objetivo de este trabajo es presentar y discutir los resultados de un proyecto experimental orientado a conocer el comportamiento mecánico de conexiones de tablas de *Eucalyptus grandis* cultivado en Argentina materializadas con clavos de 2,5 mm de diámetro y cargadas en dirección perpendicular a las fibras. La capacidad de carga y el modo de falla son analizados considerando el desempeño del miembro horizontal sometido a esfuerzos de corte. La efectividad de las reglas de diseño adoptadas para estimar la capacidad portante de estas uniones en Argentina, Brasil y Chile es comprobada en comparación con los resultados experimentales.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

El trabajo experimental fue llevado a cabo según los lineamientos de la norma europea EN 1380 (2009). Esta decisión se tomó ante la inexistencia de una norma nacional que contemple el tipo de ensayos a realizar, y considerando las virtudes propias del moderno cuerpo normativo europeo. Para la selección del material, se tuvo en cuenta que las tablas de madera de esta especie son comúnmente producidas con espesores de 25,4 mm y ancho comprendidos en el rango de 76,2 mm y 152,4 mm. Por este motivo, tablas de dimensiones nominales de 25,4 mm de espesor y 102 mm fueron seleccionadas al azar del material producido por el aserrado de la cosecha de una plantación de *Eucalyptus grandis* cultivada en Concordia, Entre Ríos, que es una de las principales proveniencias de esta especie en Argentina (INTA 1995). Una vez secado en horno, el material fue transportado al laboratorio y acondicionado según los requisitos de la norma mencionada. El espesor y ancho nominal de todas las tablas luego de cepilladas fue de 22 mm y 100 mm, respectivamente.

Con el propósito de estudiar exhaustivamente el comportamiento de diferentes configuraciones utilizadas normalmente en los nudos de las cerchas, fueron preparadas 4 muestras incluyendo un total de 38 cuerpos de prueba. Las muestras 1 y 2 se prepararon con una tabla central horizontal destinada a ser cargada perpendicularmente a las fibras y dos tablas laterales verticales transmitiendo una carga en dirección paralela a las fibras (Figura 1). Las muestras 3 y 4 se prepararon con dos tablas laterales horizontales destinadas a ser cargadas perpendicularmente a las fibras y una tabla central vertical transmitiendo la carga (Figura 2). Con el propósito de evaluar la influencia de la distancia entre los clavos y el borde cargado del miembro transversal ($a_{4,t}$) sobre la capacidad portante, las muestras 1 y 3 se prepararon con $a_{4,t} = 5d$ y para las muestras 2 y 4 se adoptó $a_{4,t} = 7d$. Las restantes distancias entre clavos y entre éstos y los bordes de las piezas fueron adoptadas teniendo en cuenta los resultados de anteriores investigaciones (Sosa Zitto et al. 2014) y la práctica habitual adoptada para este tipo de conexiones en estructuras reales (Piter et al. 2014). Las Figuras 1 y 2 y la Tabla 1 proveen detalles de los cuerpos de prueba preparados para el programa experimental.

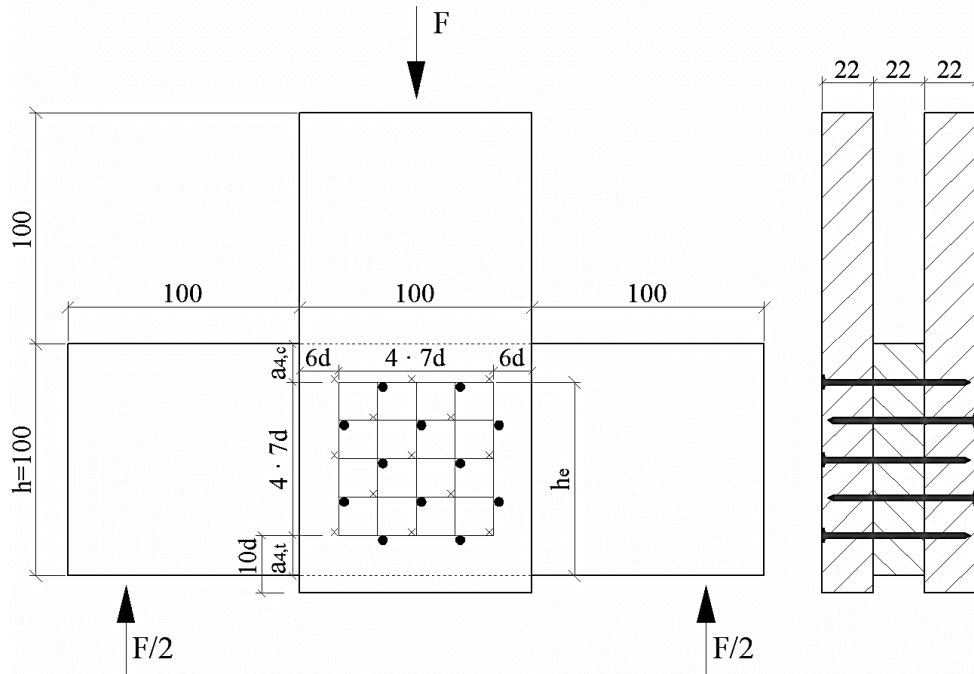


Figura 1. Configuración de los cuerpos de prueba preparados para las muestras 1 y 2 (dimensiones en mm)

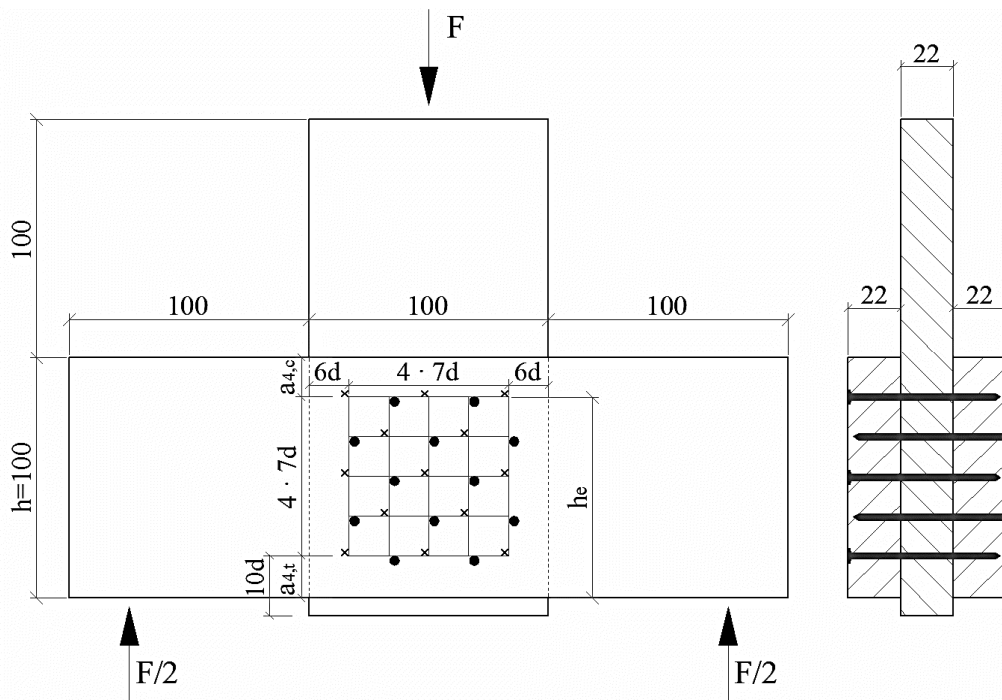


Figura 2. Configuración de los cuerpos de prueba preparados para las muestras 3 y 4 (dimensiones en mm)

Se utilizaron clavos helicoidales de 2,5 mm de diámetro colocados con una clavadora neumática. Considerando que el espesor de todas las tablas fue de 22 mm luego del cepillado, se adoptó una longitud de 65 mm para todos los clavos, lo cual aseguró una adecuada penetración de la punta en la tabla lateral. El número de clavos en cada unión (25) fue adoptado en función de resultados obtenidos de investigaciones previas, con el propósito de obtener conexiones con una capacidad de carga similar a la resistencia axial de las tablas utilizadas habitualmente como miembros de cerchas construidas con madera de esta especie (Sosa Zitto et al. 2014) y está en línea con la práctica usualmente adoptada por proyectistas y constructores. En cada cuerpo de prueba, 13 clavos fueron colocados desde un lateral y 12 clavos desde el otro lateral. Cada clavo fue desplazado un diámetro respecto del próximo a lo largo cada fila. Luego de ensamblados, los especímenes fueron acondicionados durante una semana en clima controlado a 20 \pm 2 °C de temperatura y 65 \pm 5 % de humedad relativa.

Tabla 1. Tamaño y características particulares de cada muestra

		Muestra			
		1	2	3	4
Distancia al borde cargado	a _{4,t}	5 d (12,5 mm)	7 d (17,5 mm)	5 d (12,5 mm)	7 d (17,5 mm)
Distancia al borde descargado	a _{4,c}	7 d (17,5 mm)	5 d (12,5 mm)	7 d (17,5 mm)	5 d (12,5 mm)
Altura efectiva	h _e	33 d (82,5 mm)	35 d (87,5 mm)	33 d (82,5 mm)	35 d (87,5 mm)
Cantidad de cuerpos prueba	n	10	10	7	11

Para la realización de los ensayos se utilizó una máquina de ensayos universales Shimadzu UH1000 kN, capaz de aplicar cargas con velocidad controlada y con precisión del 1 % en el valor de la misma. Las cargas fueron aplicadas siguiendo el procedimiento de la norma EN 26891 (1991) y se registró en cada caso el valor máximo alcanzado dentro de 15 mm de deslizamiento de la unión. El deslizamiento de las conexiones fue medido por medio de dos extensómetros con precisión de 0,001 mm dispuestos en caras opuestas para minimizar los efectos de distorsiones. Una fotografía tomada durante uno de los ensayos se muestra en la Figura 3.

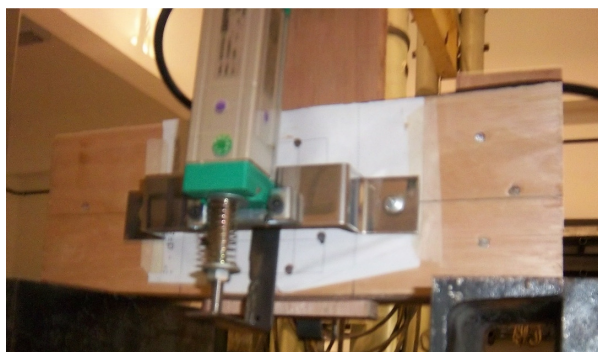


Figura 3. Fotografía de un cuerpo de prueba durante el ensayo



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

El contenido de humedad y la densidad (ρ) fueron calculados de acuerdo a los procedimientos de ISO 3130 (1975) y de ISO 3131 (1975), respectivamente, luego de cada ensayo estático. Los valores de densidad fueron ajustados al contenido de humedad de referencia de 12 %, de acuerdo con EN 384 (2010).

A partir del valor de la máxima carga alcanzada en cada cuerpo de prueba ($F_{\text{máx}}$) se determinó el valor de la máxima carga por clavo ($F_{\text{máx}} / 25$) y del máximo esfuerzo de corte actuante sobre el miembro horizontal cargado perpendicularmente a la dirección de las fibras ($F_{\text{máx}} / 2$). Los valores característicos fueron calculados para cada muestra según el criterio de la norma EN 14358 (2007).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados del programa experimental

El contenido de humedad medio fue de 11,5 %, 11,3 %, 10,9 % y 10,9 % en las muestras 1, 2, 3 y 4, respectivamente. El promedio total fue igual a 11,2 % con un COV igual al 7 %. Los valores medios de la densidad para las muestras señaladas alcanzaron 505 kg/m³, 507 kg/m³, 501 kg/m³ y 487 kg/m³, respectivamente, en tanto que el valor medio general fue igual a 500 kg/m³ con un coeficiente de variación igual a 13 %. Estos resultados indican que puede descartarse una influencia desigual de estas variables sobre el comportamiento mecánico de las conexiones estudiadas.

Los principales resultados obtenidos para la carga máxima por cada clavo y el correspondiente deslizamiento de la conexión se presentan en la Tabla 2. En esta tabla se puede apreciar que los valores característicos de la carga máxima por clavo en las conexiones de las muestras 3 y 4 prácticamente duplican a los obtenidos en las muestras 1 y 2 y que el valor medio del deslizamiento registrado en las primeras prácticamente cuadruplica al de las segundas. Estos resultados sugieren que las conexiones de las muestras 1 y 2 experimentaron una falla repentina sin desarrollar su máximo potencial. Contrariamente, se puede afirmar que las conexiones de las muestras 3 y 4 se encontraban en el nivel de su máxima capacidad portante al alcanzar la rotura, ya que los valores característicos de la máxima carga por clavo en las mismas (1358 N y 1370 N, ver la Tabla 2) son similares al de 1354 N encontrado por Sosa Zitto et al. (2014) a través de un minucioso estudio sobre cuerpos de prueba con similares características a las estudiadas en este trabajo. El deslizamiento a carga máxima en las muestras 3 (14,1 mm) y 4 (14,7 mm) es también congruente con esta aseveración, ya que sus valores ponen en evidencia la formación de rótulas plásticas en los clavos y el desarrollo de la resistencia adicional final debida a la oposición al arrancamiento de los clavos y a la fricción entre las piezas unidas (Bejtka & Blaß 2002).

Lo afirmado en el párrafo anterior está en línea con las observaciones efectuadas durante la realización de los ensayos, las cuales revelaron que la máxima carga se alcanzó al producirse -en el miembro horizontal- deslizamientos típicos de una rotura originada por las tensiones rasantes debidas al esfuerzo de corte (ver las Figuras 1 y 2). Teniendo en cuenta que la sección transversal del miembro horizontal en los cuerpos de prueba de las muestras 3 y 4 duplicó a la correspondiente a los cuerpos de prueba de las muestras 1 y 2 (ver las Figuras 1 y 2), estos resultados ponen en evidencia que en las muestras 1 y 2 la rotura de la tabla horizontal fue provocada por el esfuerzo de corte cuando la unión propiamente dicha desarrollaba aproximadamente la mitad de su capacidad potencial. Por su parte, en los cuerpos de prueba de las muestras 3 y 4 la rotura

ocasionada por el esfuerzo de corte en el miembro horizontal -conformado por dos tablas- fue prácticamente coincidente con el desarrollo pleno de la capacidad resistente de la conexión clavada. La información exhibida en la Tabla 3 confirma esta afirmación, y pone en evidencia que los valores característicos del esfuerzo de corte al alcanzar la carga máxima en las muestras 3 y 4 aproximadamente duplican a los existentes en las muestras 1 y 2.

Tabla 2. Valores de la máxima carga por clavo y deslizamiento de la unión al alcanzar la misma

		Muestra			
		1	2	3	4
		(n = 10)	(n = 10)	(n = 7)	(n = 11)
Máxima carga por clavo	Valor medio (N)	951	1119	1693	1863
	Coefficiente de variación (%)	13	19	10	14
	Valor característico (N)	709	715	1358	1370
Deslizamiento a Máxima carga	Valor medio (mm)	3,3	3,4	14,1	14,7
	Coefficiente de variación (%)	76	42	28	36

Tabla 3. Valores del esfuerzo de corte en el miembro transversal al alcanzar la máxima carga

		Muestra			
		1	2	3	4
		(n = 10)	(n = 10)	(n = 7)	(n = 11)
Valor medio	N/mm ²	11885	13989	21169	23285
Coefficiente de variación	(%)	13	19	10	14
Valor característico	N/mm ²	8863	8933	16973	17123

Los resultados mostrados en la Tabla 3 también ponen de manifiesto diferencias entre los valores del esfuerzo de corte de las muestras 1 y 2, y entre los correspondientes a las muestras 3 y 4. Como ya se mencionó anteriormente (ver las Figuras 1 y 2 y la Tabla 1), las muestras 1 y 2 se construyeron con la misma configuración general pero con diferente distancia entre los clavos y el borde cargado del miembro transversal ($a_{4,i}$), siendo esta última igual a 5 veces el diámetro del clavo (12,5 mm) en la muestra 1, y 7 veces el diámetro (17,5 mm) en la muestra 2. Iguales consideraciones corresponden a las muestras 3 y 4. La observación de la Tabla 3 muestra un mayor valor medio y característico del esfuerzo de corte en la muestra 2 que en la muestra 1, y a su vez en la muestra 4 que en la muestra 3. Estos resultados prueban que una mayor distancia de los elementos de fijación (clavos) al borde cargado del miembro transversal provoca un aumento de la capacidad de absorber esfuerzo de corte en el miembro transversal. También evidencian que ese aumento es congruente con el incremento del valor de su altura efectiva h_e (ver las Figuras 1 y 2 y la Tabla 1).

3.2. Aplicación de criterios de diseño y comparación con los resultados experimentales

De acuerdo al criterio de las reglas de diseño de Brasil (NBR 7190 2010) la capacidad de un miembro estructural de tomar esfuerzo de corte cuando es sometido a una carga transversal (inclinada respecto de la dirección de sus fibras) a través de una conexión mecánica, queda definida



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

en su valor característico como $V_k = 2 \times f_{v,k} \times b \times h_e / 3$. En esta expresión, $f_{v,k}$ es el valor característico de la resistencia a cortante (en dirección paralela a las fibras), b es el ancho del miembro y h_e es su altura efectiva, la cual es definida como la distancia entre el borde cargado del miembro y el elemento de fijación más alejado del mismo (ver las Figuras 1 y 2 y la Tabla 1). Evidentemente, este criterio adopta una distribución de tensiones cortantes que coincide con la aplicación de la teoría clásica a una sección transversal rectangular de ancho b y altura h_e .

Por su parte, las reglas de diseño de Argentina (CIRSOC 601 2013) y Chile (NCh 1198 2007), en línea con las de Estados Unidos de Norteamérica (NDS 2012), aplican el mismo criterio que las de Brasil (NBR 7190 2010) solamente cuando la distancia entre la conexión y el extremo del miembro estructural cargado normalmente a la dirección de las fibras es mayor a 5 veces su altura (h). Cuando esta distancia es menor a 5 h , su capacidad de tomar esfuerzo de corte queda definida en su valor característico como $V_k = (2 \times f_{v,k} \times b \times h_e / 3) \times (h_e^2 / h^2)$. La introducción del factor (h_e^2 / h^2) disminuye sensiblemente la capacidad asignada al miembro estructural y muchas veces el diseño queda fuertemente condicionado por el criterio de estas reglas cuando la conexión introduce su esfuerzo a una distancia menor a 5 h del extremo del miembro. Es de destacar que las expresiones mencionadas son de validez no solo para clavos de pequeño diámetro, sino también para otro tipo de conexiones mecánicas.

Con el propósito de aplicar los dos diferentes criterios de diseño ya descriptos a las conexiones ensayadas, se adoptó $6,9 \text{ N/mm}^2$ como valor de la resistencia característica a cortante en dirección paralela a las fibras, el cual fue obtenido experimentalmente para la madera empleada en este trabajo y publicado por Belvisi et al. (1998). Los resultados obtenidos se exhiben en la Tabla 4, en la cual también se indica el valor que cada variable interviniente en el cálculo adquiere para cada muestra. Debido a que la carga transmitida al miembro transversal se ubicó –en todos los cuerpos de prueba ensayados- a una distancia desde su extremo menor que 5 h (ver las Figuras 1 y 2), los resultados obtenidos ponen en evidencia las importantes diferencias que en el diseño estructural son provocadas por la discrepancia entre los criterios adoptados. En efecto, el cálculo efectuado según el criterio adoptado por Brasil arroja un valor 47 % superior al llevado a cabo según el criterio adoptado en Argentina, Chile y EEUU para las muestras 1 y 3, y esa diferencia es de 31 % para las muestras 2 y 4.

La Figura 4 permite comparar con claridad los resultados obtenidos en el programa empírico con los calculados según las reglas de diseño y, consecuentemente, posibilita conocer el criterio de diseño que mejor interpreta el comportamiento mecánico investigado en este trabajo. En la figura se despliega el valor del máximo esfuerzo de corte alcanzado en cada uno de los 38 cuerpos de prueba ensayados, y el valor característico experimental determinado para cada una de las 4 muestras según el criterio de la norma EN 14358 (2007). También se exhibe el valor característico calculado para los cuerpos de prueba de cada muestra según los dos criterios de diseño analizados. Es de destacar que el valor calculado según el criterio adoptado en Brasil es prácticamente coincidente con el determinado experimentalmente en las 4 muestras. Por su parte los resultados revelan que las reglas de Argentina, Brasil y Chile conducen a un diseño conservador, subestimando la capacidad de absorber esfuerzo de corte del miembro transversal cuando la distancia entre la carga transmitida por la conexión y su extremo es menor que 5 veces su altura.

Tabla 4. Valor característico del esfuerzo de corte (V_k) que pueden absorber los cuerpos de prueba de las 4 muestras calculado según distintos criterios de diseño

Criterio de diseño	Muestra			
	1	2	3	4
	(b = 22 mm) ($h_e = 82,5$ mm) (h = 100 mm)	(b = 22 mm) ($h_e = 87,5$ mm) (h = 100 mm)	(b = 44 mm) ($h_e = 82,5$ mm) (h = 100 mm)	(b = 44 mm) ($h_e = 87,5$ mm) (h = 100 mm)
Brasil ⁽¹⁾	8349 N	8855 N	16698 N	17710 N
Argentina, Chile, EEUU ⁽²⁾	5683 N	6780 N	11365 N	13559 N

(1): $V_k = 2 \times f_{v,k} \times b \times h_e / 3$; (2): $V_k = (2 \times f_{v,k} \times b \times h_e / 3) \times (h_e^2 / h^2)$

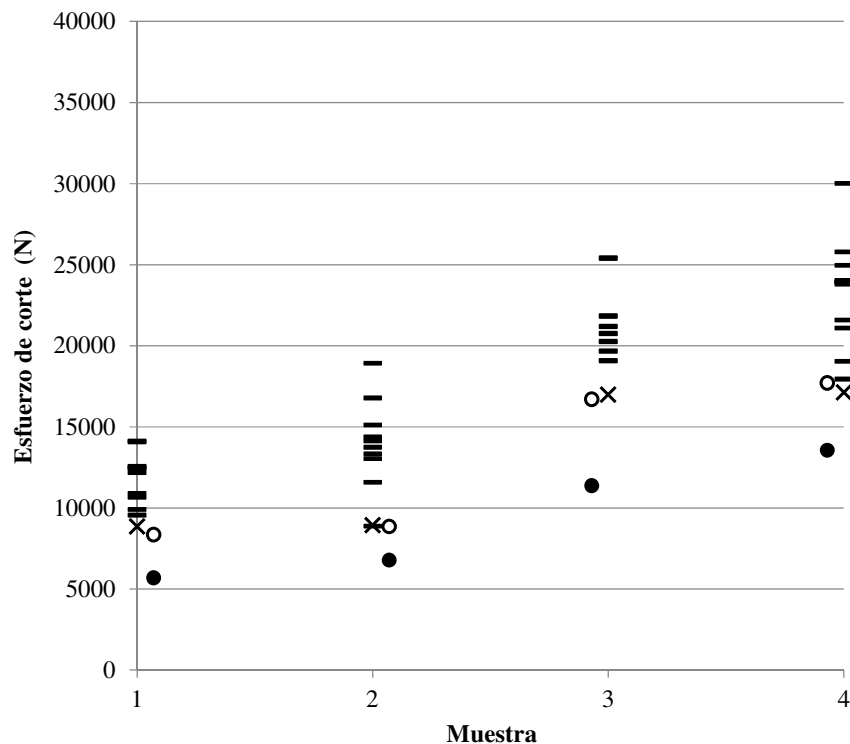


Figura 4. Esfuerzo de corte en los cuerpos de prueba al alcanzar la máxima carga. Resultados experimentales y valores calculados según reglas de diseño para las 4 muestras investigadas
—: valor de rotura experimental en cada cuerpo de prueba; **x**: valor característico experimental en cada muestra determinado según EN 14358 (2007); **o**: valor característico calculado según el criterio adoptado en Brasil (NBR 7190 2010); **•**: Valor característico calculado según el criterio adoptado en Argentina (CIRSOC 601 2013), Chile (NCh 1198 2007) y EEUU (NDS 2012)

3.3. Desempeño de las conexiones investigadas en estructuras reales

Los resultados observados en el presente estudio se han aplicado exitosamente en el diseño y ejecución de uniones de cerchas reticuladas que forman parte de la estructura de galpones destinados a la producción avícola, que salvan vanos importantes como se muestra en la fotografía presentada en Figura 5, correspondiente a un galpón de 16m de ancho y 150m de longitud construido con madera de *Eucalyptus grandis*. La separación entre ejes de los cordones es de 738mm, cada uno de los cuales está constituido por dos tablas con sección transversal de dimensiones nominales iguales a 127mm x 25,4mm. Las diagonales, inclinadas 45° respecto de los cordones, están conformadas por una tabla con sección transversal de dimensiones nominales 101,6mm x 25,4mm, cuyas uniones se materializaron con clavos de 2,5mm de diámetro colocados neumáticamente.



Figura 5. Estructura reticulada cuyas uniones se materializaron con clavos de pequeño diámetro

Estas estructuras se encuentran sometidas a cargas producidas por el peso propio y la acción del viento, que inducen esfuerzos axiales particularmente elevados en las diagonales ubicadas en los extremos y el centro de la estructura, los cuales se transmiten como esfuerzos de corte a los cordones. En la Figura 6 se presenta un detalle de la conexión entre una diagonal y el cordón superior. El análisis del comportamiento mecánico del cordón en el cual se introducen los esfuerzos de corte se basó en los resultados experimentales presentados y discutidos anteriormente.

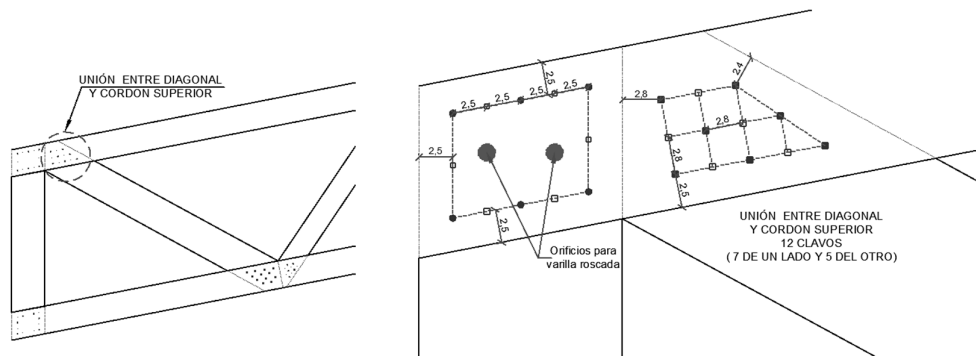


Figura 6. Diagonal que transmite al cordón un esfuerzo inclinado respecto de la dirección de sus fibras a través de la conexión



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

4. CONCLUSIONES

Los resultados del programa experimental mostraron que la carga máxima que produjo la rotura estuvo determinada por la capacidad del miembro horizontal de absorber esfuerzo de corte. En las muestras 3 y 4, la carga máxima alcanzada provocó el desarrollo de prácticamente todo el potencial resistente de las conexiones clavadas. Por su parte, en las muestras 1 y 2, donde el miembro horizontal presentó una sección transversal igual a la mitad de los anteriores, las uniones propiamente dichas alcanzaron a desarrollar aproximadamente la mitad de su capacidad potencial.

El criterio adoptado por las reglas de diseño de Brasil para calcular la capacidad de un miembro estructural de tomar esfuerzo cortante cuando es sometido a una carga transversal a través de una conexión, demostró su eficiencia para interpretar el comportamiento mecánico de las muestras ensayadas.

El programa empírico también demostró que la aplicación de las reglas de diseño de Argentina y Chile, que están en línea con las de EEUU, subestiman la capacidad de absorber esfuerzo de corte y conducen a un diseño conservador cuando el miembro estructural es sometido a una carga transversal ubicada a una distancia de su extremo menor que 5 veces su altura, en este tipo de conexiones.

Los resultados experimentales probaron que la distancia entre el borde cargado del miembro transversal y los clavos puede reducirse a 5 veces el diámetro de éstos sin que se evidencie una disminución de la capacidad portante, siempre que en el cálculo se adopte la altura efectiva apropiada.

REFERENCIAS

Bejtka I. & Blaß H.J. (2002) Joints with inclined screws. Proceeding, CIB - W18 Meeting Kyoto, Japan. Paper 35-7-5.

Belvisi et al. (1998) Utilización de nuestras maderas con fines estructurales. Análisis y propuesta. XVI Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires, 22 al 25 de setiembre de 1998. Publicado completo en CD ROM pág. 293-317, resumen en anales pág. 41.

CIRSOC 601 (2013) Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. INTI CIRSOC Instituto Nacional de Tecnología Industrial y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, 1 volumen de 176 pág. pdf , Buenos Aires. (<http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>).

Ehlbeck J. & Görlacher R. (1995) Tension perpendicular to the grain in joints. Timber Engineering STEP 1, pp C2/1-C2/7. Centrum Hout, The Netherlands.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

EN 1995-1-1 (2005) Eurocode 5: Design of timber structures- Part 1-1: General. Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels.

EN 384 (2010) Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. European Committee for Standardization, Brussels.

EN 1380 (2009) Timber structures. Test methods. Load bearing nails, screws, dowels and bolts. European Committee for Standardization, Brussels.

EN 14358 (2007) Timber structures. Calculation of characteristic 5-percentile values and acceptance criteria for a sample. European Committee for Standardization, Brussels.

EN 26891 (1991) Estructuras de madera. Uniones realizadas con elementos de fijación mecánicos. Principios generales para la determinación de las características de resistencia y deslizamiento. AENOR, Madrid.

Hartl H. (1995) Connector joints in trusses. Timber Engineering STEP 2, pp D2/1-D2/12. Centrum Hout, The Netherlands.

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

ISO 3130 (1975) Wood. Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.

ISO 3131 (1975) Wood. Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization.

NBR 7190 (2010) Projeto de revisão. ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. Brasil.
NCh 1198 (2007) Madera. Construcciones en madera. Cálculo. Instituto Nacional de Normalización INN. Santiago.

NDS (2012) National Design Specification for Wood Construction. American Wood Council. Leesburg.

Piter et al. (2014) 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. XIV Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira (XIV EBRAMEM). Realizado por el Departamento de Arquitetura de la Universidade Federal do Rio Grande do Norte con el apoyo institucional del Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira (IBRAMEM). Natal, Brasil, 28 al 30 de abril de 2014. Publicado completo en CD ROM con el código EST-07 en 15 pág. pdf, resumen en anales pág. 44 (ISBN 978-85-67531-04-5).

Racher P. (1995) Mechanical timber joints- General. Timber Engineering STEP 1, pp C1/1- C1/10. Centrum Hout, The Netherlands.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

Sosa Zitto et al. (2014) 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 (ISSN 0018-3768, revista científica editada por Springer Verlag, Alemania) 72(1): 21-31.