

Rigidez de conexiones de madera de *Eucalyptus grandis* de Argentina con clavos de pequeño diámetro. Análisis del módulo de deslizamiento determinado para diversas configuraciones de uniones.

Sosa Zitto, María Alexandra^{(1) (*)}, alexandrasozitto@gmail.com

Ramos, María del Rocío⁽¹⁾, mrocio_ramos@hotmail.com

Torrán, Eduardo Antonio⁽¹⁾, etorran@gmail.com

Piter, Juan Carlos⁽¹⁾, piterj@frcu.utn.edu.ar

(1) Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional. Calle Ing. Pereira 676, (E3264BTD) Concepción del Uruguay, Entre Ríos Ríos, Argentina.

(*) autor para correspondencia.

Resumen

Este informe presenta los resultados de una investigación empírica orientada a analizar la rigidez de uniones de madera aserrada de *Eucalyptus grandis* de rápido crecimiento cultivado en Argentina. Las conexiones fueron clavadas con clavos de 2,5 mm de diámetro colocados neumáticamente y el proyecto experimental fue llevado a cabo siguiendo los lineamientos de la normativa europea. Los cuerpos de prueba fueron construidos con 2 secciones de corte para ser cargados lateralmente. En 3 sub-muestras la carga fue aplicada en dirección paralela a la fibra y en 2 sub-muestras en dirección perpendicular a la misma. Para la muestra preparada respetando el espaciamiento recomendado y cargada paralelamente a la fibra se comparó el valor medio del módulo de deslizamiento obtenido experimentalmente con el calculado según el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012) y según el Reglamento Argentino CIRSOC 601 (2016). El criterio europeo mostró una mayor precisión que el último. En las muestras con el espaciamiento reducido respecto del recomendado se encontró una disminución importante del módulo de deslizamiento instantáneo. Los resultados experimentales también revelaron que la rigidez de las conexiones estuvo relacionada con el ángulo de carga respecto a la dirección de la fibra, lo cual no es contemplado por el criterio europeo y tampoco por el criterio argentino.

Palabras clave: Conexiones clavadas. Rigidez. Deslizamiento. *Eucalyptus grandis*.

Abstract

This report presents the results of an empirical research aimed to study the stiffness of sawn timber joints of fast growing Argentinean *Eucalyptus grandis*. The connections were nailed with 2.5 mm diameter nails pneumatically driven and the experimental project was carried out according to European standards. The specimens were constructed with 2 shear sections to be laterally loaded. In 3 sub-samples the load was applied in the parallel to the grain direction and in 2 sub-samples perpendicular to it. The slip modulus mean value experimentally obtained for the sample prepared with the recommended spacing and loaded parallel to the grain was compared with that calculated according to Eurocode 5 (EN 1995-1-1 2012) and according to the Argentine Regulation CIRSOC 601 (2016). The European criterion showed greater precision than the last one. In the samples with the reduced spacing respect to the

recommended one, a significant decrease of the instantaneous slip modulus was found. The empirical results also revealed that the stiffness of the connections was related to the angle of load to grain direction which is not taken into account by the European design rule or by the Argentine criterion. The empirical results also revealed that the connections stiffness was related to the loading angle respect to the grain direction, which is not contemplated by the European criterion or by the Argentine criterion.

Keywords: Connections nailed. Stiffness. Slip. *Eucalyptus grandis*

1. Introducción

Las conexiones con clavos de pequeño diámetro en los nudos de las estructuras reticuladas construidas con tablas de *Eucalyptus grandis* de rápido crecimiento han adquirido gran importancia en Argentina. Este tipo de estructuras de madera se destina principalmente a construcciones industriales que exhiben luces que normalmente oscilan entre 12 y 16 m (Piter et al., 2014). La utilización de equipos neumáticos que utilizan aire comprimido permite una rápida instalación de los clavos, reduciendo el costo de ejecución.

La capacidad de carga de las conexiones con clavos de pequeño diámetro fue investigada por Sosa Zitto et al. (2014) para uniones donde se satisfacen los requisitos de espaciamiento adoptados por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012) y uniones donde se reducen el espaciamiento y la distancia al extremo en la dirección del grano. Los resultados informados en este documento mostraron una capacidad de carga especialmente alta de estas conexiones, que también exhibió un comportamiento dúctil. Los resultados publicados mostraron que el área de la junta puede reducirse hasta 31% -en relación con el área correspondiente a los parámetros geométricos recomendados- sin reducir la capacidad de carga por debajo del valor característico determinado de acuerdo con la regla de diseño europea. Los resultados informados por Sosa Zitto et al. (2014), que se obtuvieron a partir de pruebas realizadas según EN 1380 (2009) fueron confirmados posteriormente en conexiones con clavos de 2,5 mm de diámetro en nudos de vigas con tamaños estructurales (Piter et al., 2014). Estos resultados permiten a los diseñadores y constructores resolver el problema relacionado con las dimensiones relativamente pequeñas, normalmente disponibles para la colocación de los medios de unión en los nudos de las estructuras (Hartl 1995, Kessel 1995), sin afectar los requisitos de seguridad.

La deformación de las estructuras debido al deslizamiento en las conexiones con frecuencia puede exceder las deformaciones elásticas de los miembros (Hilson 1995) y el uso de conexiones con características de comportamiento rígido a menudo se recomienda para minimizar las mismas (Kessel 1995). Dado que se pueden esperar deformaciones significativas en las uniones con clavos delgados (Blaß 1995; Johnsson y Stehn 2004) y las conexiones en *Eucalyptus grandis* con clavos de pequeño diámetro exhiben un modo de falla con características comunes a los modos j y k del diseño europeo (Sosa Zitto et al., 2014), el estudio de la rigidez de este tipo de conexiones es muy importante para la verificación de los requisitos de servicio. Las mediciones realizadas en construcciones de tamaño estructural de *Eucalyptus grandis* cultivado en Argentina con este tipo de conexiones en los nudos, demostraron que se cumplían los requisitos de deformación bajo carga de servicio. Sin embargo, no se proporcionó información relacionada con la influencia del deslizamiento conjunto en la deformación de la estructura (Piter et al., 2014).

El Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012) proporciona una expresión para calcular el módulo de deslizamiento instantáneo (K_{ser}) de conexiones clavadas sin orificios pretaladrados. De acuerdo con este criterio, el valor de K_{ser} bajo carga de servicio se puede calcular como una función de la densidad media y el diámetro del clavo. Sin embargo, la conveniencia de llevar a cabo un proyecto empírico destinado a estudiar a fondo la rigidez de este tipo de conexiones se basa en las siguientes razones: i) estas uniones se utilizan con frecuencia en espacios reducidos aprovechando su especialmente alta capacidad de carga y ductilidad, ii) la carga en una estructura reticulada normalmente se transfiere desde un elemento de alma a través de una conexión clavada a un miembro externo, pero la influencia del ángulo -entre la dirección de la carga y la dirección de las fibras- en la rigidez de la junta no es explícitamente considerado por la regla de diseño europea.

El objetivo de este trabajo es presentar y discutir los resultados de un proyecto empírico destinado a conocer la rigidez de las conexiones con clavos de 2,5 mm de diámetro colocados neumáticamente, en juntas madera-madera de *Eucalyptus grandis* de Argentina, especie de rápido crecimiento. Se presenta una comparación entre los resultados empíricos y los valores de rigidez calculados con las expresiones adoptadas por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012) y por el CIRSOC 601 (2016), tanto para las uniones cargadas paralelamente a las fibras preparadas con los parámetros geométricos recomendados y reducidos, como para uniones cargadas perpendicularmente. Se discute la efectividad de dicha normativa para calcular el módulo de deslizamiento.

2. Materiales y Métodos

El trabajo experimental se realizó acorde al criterio adoptado por EN 1380 (2009). Las tablas de la especie considerada se producen comúnmente con espesores de 25,4 mm y anchos que oscilan entre 76,2 mm y 152,4 mm. Por este motivo tablas con tamaño nominal de 25,4 mm de espesor y 102 mm de ancho fueron seleccionadas al azar del material producido del aserrado de árboles cosechados en una plantación de *Eucalyptus grandis* cultivada en Concordia, Entre Ríos, que es una de las principales procedencias para esta especie en Argentina (INTA 1995). Una vez secado en horno, el material fue transportado al laboratorio y acondicionado en el clima requerido por la norma mencionada anteriormente para preparar las muestras de prueba. El espesor nominal y el ancho de todas las tablas después del cepillado fueron de 22 mm y 100 mm, respectivamente.

Con el propósito de estudiar exhaustivamente la rigidez para diferentes configuraciones de juntas normalmente utilizadas en los nudos de cerchas construidas con tablas de esta especie, se prepararon 5 submuestras que incluían un total de 53 probetas. Teniendo en cuenta que investigaciones previas con esta especie informaron valores característicos de la densidad ρ_k inferior a 420 kg / m³ (Sosa Zitto et al., 2012, 2014), fueron consideradas como valores de referencia el espaciamiento y las distancias al extremo recomendadas por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012) para madera con $\rho_k \leq 420$ kg / m³.

Tres submuestras fueron sometidas a ensayos de tracción paralela al grano, conformadas por tres tablas colocadas paralelas entre sí. El espaciamiento perpendicular al grano y la distancia al borde (5 d) fueron los mismos para las 3 submuestras pero con una separación paralela al grano (a_1) y una distancia al extremo (a_3) distinta (Figura 1). La submuestra Pa_{10/15-ref} (12 probetas) se preparó con la separación paralela al grano y la distancia al extremo recomendada por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012) para uniones clavadas con $d < 5$ mm y madera con $\rho_k \leq 420$ kg / m³: $a_1 = 10$ d, $a_3 = 15$ d; en lo sucesivo, ésta se considerará como

submuestra de referencia para la discusión. Las otras dos submuestras se prepararon con los parámetros geométricos a_1 y a_3 reducidos para disminuir el área requerida para la conexión (Sosa Zitto et al. 2014), la submuestra Pa_{7/12} (12 probetas) con $a_1 = 7 d$, $a_3 = 12 d$ y la submuestra Pa_{7/10} (13 probetas) con $a_1 = 7 d$, $a_3 = 10 d$.

Figura 1. Disposición de ensayo correspondiente a las 3 submuestras preparadas para ensayos paralelos al grano.

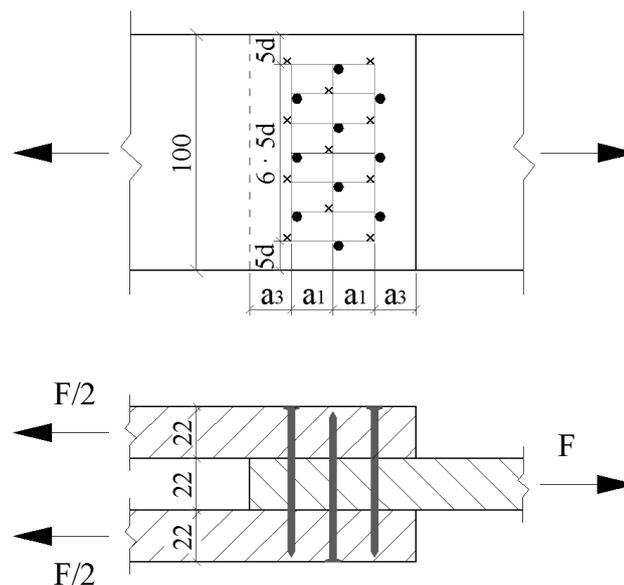
Número de clavos (2,5 mm de diámetro y 65 mm de largo) en cada conexión: 21 clavos (7 hileras de 3 clavos cada uno).

Espaciamiento en la dirección del grano (a_1) y entre el clavo y el extremo cargado (a_3).

Submuestra Pa_{10/15-ref} (12 probetas) ; $a_1 = 10 d$, $a_3 = 15 d$

Submuestra Pa_{7/12} (12 probetas) ; $a_1 = 7 d$, $a_3 = 12 d$

Submuestra Pa_{7/10} (13 probetas) $a_1 = 7 d$, $a_3 = 10 d$



Fuente: Los autores (2018)

Las dos submuestras restantes, fueron sometidas a ensayos de tracción perpendicular al grano (Figura 2), éstas exhiben configuraciones típicas de este tipo de estructuras. La submuestra Pe_{1b} (7 probetas) se preparó con una tabla central (horizontal) destinada a cargarse perpendicularmente al grano y dos tablas laterales (verticales). La submuestra Pe_{2b} (9 probetas) se preparó con dos tablas laterales destinadas a cargarse perpendicularmente al grano y una tabla central (vertical). Ambas submuestras se prepararon con los parámetros geométricos recomendados por la norma de diseño europea, exceptuando el espaciado a lo largo de las filas de las tablas verticales -cargadas paralelas al grano- (7 d en lugar de 10 d, ver Figura 2).

Figura 2. Disposição de ensayo correspondiente a las 2 submuestras preparadas para ensayos perpendiculares al grano.

Número de clavos (2,5 mm de diámetro y 65 mm de largo) en cada conexión: 25 clavos (5 hileras de 5 clavos cada uno)

a) Submuestra Pe_{1b} (7 probetas) b) Submuestra Pe_{2b} (9 probetas).

Figura 2a

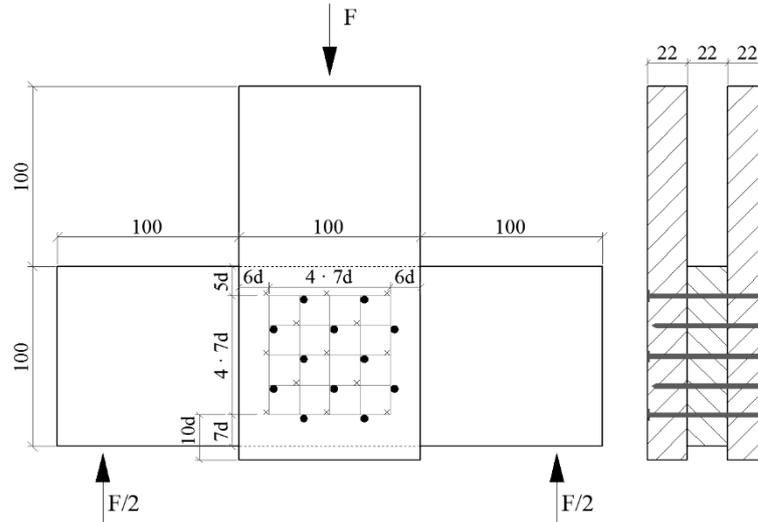
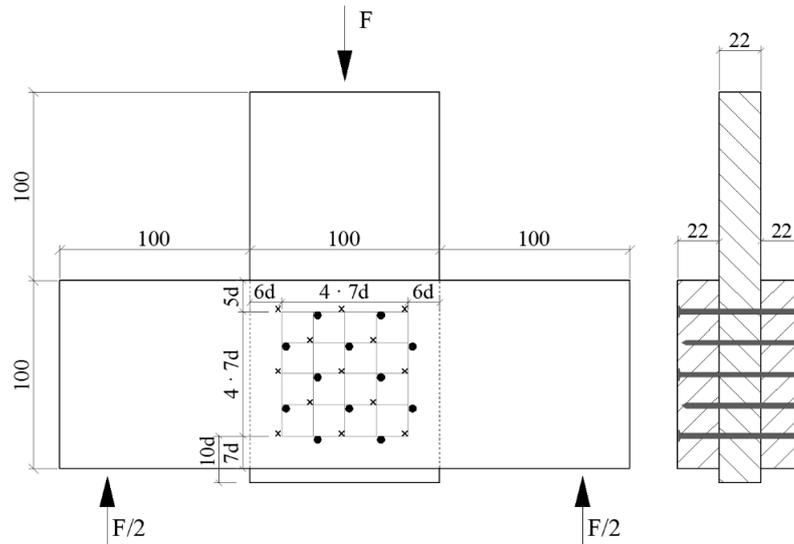


Figura 2b



Fuente: Los autores (2018)

Se usaron clavos helicoidales (2,5 mm de diámetro) colocados con clavadora neumática. Para cada muestra, la mitad de los clavos se introdujeron en un miembro lateral y la otra mitad en el otro. Los clavos se desplazaron una distancia de un diámetro respecto del eje de la fila, en forma alternada. Teniendo en cuenta que el espesor de las tablas era de 22 mm después de cepillada, para los clavos se seleccionó una longitud de 65 mm, que cumple los requisitos del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012) relacionados con la longitud de penetración del clavo en la última tabla. El número de clavos dispuestos en cada conexión se calculó para obtener conexiones con una capacidad de carga similar a la resistencia axial de las tablas utilizadas normalmente como miembros de cerchas construidas con esta especie de madera (Sosa Zitto et al. 2014), en línea con la práctica habitual adoptada por diseñadores y constructores. Después del montaje, las muestras fueron acondicionadas en un clima controlado a 20 +/- 2 °C y 65 +/- 5% de humedad relativa durante una semana. Se utilizó una máquina de ensayos Shimadzu UH 1000 kN, capaz de aplicar cargas con la velocidad de movimiento adecuada del cabezal de carga y una precisión del 1% de la carga aplicada. El deslizamiento se midió por medio de dos extensómetros capaces de registrar 0,001 mm que fueron colocados en puntos opuestos, para minimizar los efectos de la distorsión. El módulo de deslizamiento instantáneo (K_s) se calculó de acuerdo con el criterio adoptado por EN 26891 (1991) de la siguiente manera:

$$K_s = 0.4 F_{\max,est} / v_{i,mod}$$

donde:

$F_{\max,est}$: carga máxima estimada

$$v_{i,mod} = 4 (v_{04} - v_{01}) / 3$$

v_{04} and v_{01} : deslizamiento al 40 % y 10 % de $F_{\max,est}$, respectivamente

El contenido de humedad y la densidad (ρ) se calcularon de acuerdo con los procedimientos de las normas ISO 3130 (1975) e ISO 3131 (1975) respectivamente, después de todas las pruebas estáticas. Los valores de densidad se ajustaron a un contenido de humedad de referencia del 12% según EN 384 (2010) y el valor característico de esta propiedad (ρ_k) se calculó siguiendo los procedimientos de esta norma.

3 Resultados y Discusión

La densidad característica (ρ_k), obtenida según EN 384 (2010) para las muestras completas (ver *Tabla 1*), alcanzó 408 kg / m³. Este resultado confirma los parámetros geométricos adoptados para la submuestra Pa_{10/15-ref} -considerada como submuestra de referencia- de acuerdo con el criterio adoptado por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012) para madera con $\rho_k \leq 420$ kg / m³. Las muestras completas exhibieron un contenido medio de humedad del 11,1% con un coeficiente de variación (COV) del 5% y, consecuentemente, una influencia desigual del contenido de humedad en los resultados de las pruebas puede descartarse para este proyecto.

Los principales resultados correspondientes a las muestras cargadas lateralmente de acuerdo con EN 1380 (2009) se presentan en la *Tabla 1*. Dado que la rigidez de las uniones de tipo pasador se considera una propiedad altamente correlacionada con la densidad según las reglas de diseño consideradas, un resumen de los resultados para ambos, el módulo de deslizamiento instantáneo por clavo (K_s) y densidad (ρ) se presenta por separado para cada submuestra en esta tabla. Los resultados de un análisis de varianza demostraron que la hipótesis de que las submuestras presentadas en la *Tabla 1* tienen el mismo valor medio de densidad, no puede

rechazarse en un nivel de significancia de 0,05 y, por consiguiente, se asumió una influencia igual de esta propiedad en los resultados de K_s obtenido para las diferentes submuestras.

Tabla 1. Resumen de los resultados empíricos para el módulo de deslizamiento por clavo (K_s) y la densidad (ρ) correspondiente a las submuestras con clavos de 2,5mm de diámetro.

Sub muestras	n	$\rho^{(1)}$				K_s		K_{ser} por clavo (N/mm)	γ_1 por clavo (N/mm)	γ_2 por clavo (N/mm)
		(kg/m ³)		(kg/m ³)		por clavo (N/mm)				
		ρ_m	COV	$\rho_{0,05}$		medio	COV			
Paralela a la fibra	Pa _{10/15-ref}	12	495	13%	387	1652	45%	1528	1268	1945
	Pa _{7/12}	12	512	14%	392	1074	28%			
	Pa _{7/10}	13	510	13%	404	1082	25%			
Perpendicular a la fibra	Pe _{1b}	7	485	12%	394	636	32%			
	Pe _{2b}	9	486	15%	368	422	31%			

⁽¹⁾: corregida a un contenido de humedad de referencia del 12% según EN 384 (2010)

n: número de probetas

K_{ser} : módulo de deslizamiento instantáneo calculado según el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012)

γ_1 y γ_2 : módulo de deslizamiento instantáneo calculado según el CIRSOC 601 (2016), cuando el deslizamiento instantáneo es un requerimiento importante del proyecto y cuando no lo es respectivamente

Fuente: Los autores (2018)

3.1 Rigidez de las conexiones ensayadas paralelas al grano

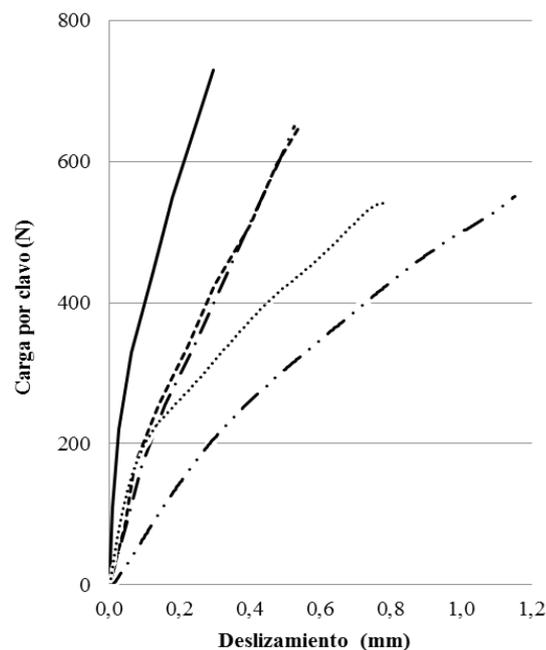
El valor medio máximo de K_s de los encontrados para las submuestras ensayadas paralela al grano (1652 N / mm) fue exhibido por la submuestra de referencia (Pa_{10/15-ref}). Curiosamente, esta submuestra mostró la dispersión máxima de los resultados de K_s (COV = 45%) mientras que las submuestras con parámetros geométricos reducidos mostraron una dispersión mucho menor con valores de COV de 28% para Pa_{7/12} y 25% para Pa_{7/10}. Sin embargo, la dispersión relativamente alta de los resultados de K_s encontrados para la submuestra de referencia no pudo explicarse por medio de un análisis detallado.

Los valores medios de K_s obtenidos para las submuestras con parámetros geométricos reducidos (Pa_{7/12} y Pa_{7/10}) fueron 35% más bajos que los encontrados para Pa_{10/15-ref}. El desarrollo de un pequeño número de grietas leves durante la penetración de los clavos -debido a los espaciamientos reducidos- puede explicar la disminución de la rigidez en las submuestras Pa_{7/12} y Pa_{7/10}. La presencia de estas pequeñas grietas observadas y registradas durante la preparación y ensayo de las muestras, es congruente con los resultados obtenidos por Sosa Zitto et al. (2014) a través de un análisis exhaustivo del desarrollo de fisuras en este tipo de conexiones.

El conocimiento de K_s permite a los diseñadores estructurales estimar el deslizamiento que ocurrirá cuando la carga de servicio se aplica a una conexión (Hilson 1995). Como las ecuaciones proporcionadas por las normas europeas (EN 1380 2009; EN 26891 1991) para calcular K_s se basan en la información de carga y deslizamiento entre el comienzo del ensayo y el 40% de la carga máxima estimada ($F_{\max,est}$), con el propósito de comprender mejor las diferencias encontradas entre los valores de K_s presentados en *Tabla 1*, se muestran en *Figura 3* las curvas de carga y deslizamiento correspondientes a las 5 submuestras (hasta 0,40 $F_{\max,est}$). Para aclarar el comportamiento típico de cada configuración, cada curva muestra la relación entre la carga aplicada (por clavo) y el deslizamiento promedio de las conexiones incluidas en la submuestra correspondiente. En relación con las submuestras ensayadas paralelamente al grano, es interesante observar que: i) las tres curvas muestran una forma similar, pero el deslizamiento de $Pa_{7/12}$ y $Pa_{7/10}$ es mayor que el de $Pa_{10/15-ref}$ para un valor de carga dado y, ii) las curvas correspondientes a $Pa_{7/12}$ y $Pa_{7/10}$ presentan una forma coincidente. Las relaciones de carga y deslizamiento que se muestran en esta figura son congruentes con los resultados de K_s presentados en la *Tabla 1* para las tres submuestras ensayadas paralelamente al grano. También confirma un comportamiento no lineal en este tramo de las curvas, aunque puede apreciarse un aumento relativamente rápido de la carga, principalmente para la submuestra de referencia, al comienzo de la prueba.

Figura 3. Curvas de carga y deslizamiento desde el comienzo de la prueba hasta $0,4 F_{\max, est}$ correspondiente a las 5 submuestras con clavos de 2,5 mm de diámetro.

—: $Pa_{10/15-ref}$; — —: $Pa_{7/12}$; — —: $Pa_{7/10}$; ····: Pe_{1b} ; — ···: Pe_{2b}



Fuente: Los autores (2018)

3.2 Rigidez de las conexiones ensayadas perpendicular al grano

Al comparar los resultados de rigidez obtenidos para las dos submuestras ensayadas perpendiculares al grano con las encontradas para las tres submuestras ensayadas paralelo al grano (*Tabla 1*), es posible apreciar que las primeras son significativamente más bajas que las últimas. Aunque las cinco submuestras incluyeron conexiones de tres miembros cargadas lateralmente en doble cizallamiento y construidas con tablas que presentan las mismas dimensiones de sección transversal, una comparación precisa requiere la consideración de los parámetros geométricos adoptados para cada submuestra. Dado que los cuerpos de prueba de las submuestras Pe_{1b} y Pe_{2b} se prepararon con los parámetros geométricos recomendados por la regla europea de diseño, exceptuando el espaciamiento a lo largo de las filas de las tablas verticales cargadas paralelas al grano (7 d en lugar de 10 d, ver *Figura 2*), se puede concluir que los resultados de K_s obtenidos para Pe_{1b} y Pe_{2b} pueden compararse adecuadamente con los determinados para $Pa_{7/10}$ (véase también la *Figura 1*). Según los datos proporcionados en la *Tabla 1*, los valores medios de K_s determinados para Pe_{1b} (636 N / mm) y Pe_{2b} (422 N / mm) muestran una disminución del 41% y del 61%, respectivamente, en relación con el resultado correspondiente encontrado para $Pa_{7/10}$ (1082 N / mm).

Teniendo en cuenta que dos tablas se cargaron perpendiculares al grano en las probetas correspondientes a Pe_{2b} (*Figura 2b*), solo se cargó una tabla perpendicular al grano en las incluidas en Pe_{1b} (*Figura 2a*) y no se cargó ninguna tabla perpendicular al grano en las de $Pa_{7/10}$ (*Figura 1*), estos resultados sugieren que la rigidez de las conexiones está fuertemente relacionada con el ángulo entre la carga aplicada y la dirección de la fibra de los miembros ensayados. Estos resultados se pueden apreciar claramente en la *Figura 3* al comparar el comportamiento de carga y deslizamiento de las submuestras $Pa_{7/10}$, Pe_{1b} y Pe_{2b} .

Con el fin de analizar si la diferencia entre los valores K_s obtenidos mediante pruebas paralelas y perpendiculares al grano (*Tabla 1*) estaba relacionada con el diámetro particularmente pequeño de los clavos usados en estas conexiones, se realizó un estudio particular de la rigidez en las conexiones de la misma especie de madera construida con un clavo rígido. Aunque no se detallarán en el presente las características de dicho ensayo, es importante mencionar que el valor medio K_s correspondiente a la submuestra ensayada perpendicularmente a la fibra resultó 42% menor que el de la submuestra ensayada paralelamente a la misma. Estos resultados confirman que la diferencia en la rigidez encontrada al probar conexiones múltiples paralelas y perpendiculares está precisamente relacionada con la dirección de las fibras y no con el pequeño diámetro de los clavos.

3.3 Rigidez de las conexiones calculadas según el criterio del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012)

Con el fin de comparar los resultados empíricos presentados en la *Tabla 1* con los calculados de acuerdo con el criterio del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012), se aplicó la expresión proporcionada por esta regla de diseño para calcular el módulo de deslizamiento instantáneo (K_{ser}) en juntas clavadas sin perforación previa. Según el criterio de ésta norma, el valor de K_{ser} por plano de corte y por clavo, bajo carga de servicio puede obtenerse en función de la densidad media (ρ_m en kg/m^3) y el diámetro del clavo (d en mm) de la siguiente manera: $K_{ser} = \rho_m^{1.5} d^{0.8}/30$. La expresión dada solo es aplicable a la submuestra de referencia ($Pa_{10/15-ref}$) que se preparó de acuerdo con los parámetros geométricos recomendados por ésta regla de diseño. Como los cuerpos de prueba ensayados presentaron dos planos de corte y sustituyendo $\rho_m = 495 kg / m^3$ (*Tabla 1*) y $d = 2,5 mm$, el valor del módulo de deslizamiento por clavo

resulta: $K_{ser} = 2 \cdot 495^{1.5} \cdot 2,5^{0.8} / 30 = 1528 \text{ N / mm}$. Este valor, que se incluyó en la *Tabla 1* para facilitar la comparación, resultó 9% inferior que el resultado empírico para la muestra de referencia, es decir nos ubica del lado de la seguridad y resulta suficientemente preciso.

3.4 Rigidez de las conexiones calculadas según el criterio del CIRSOC 601 (2016)

Con el fin de comparar los resultados empíricos presentados en la *Tabla 1* con los calculados de acuerdo con el criterio del CIRSOC 601 (2016), se aplicaron las ecuaciones adoptadas por este reglamento. La norma de diseño de Argentina, presenta 2 expresiones para el cálculo del módulo de deslizamiento instantáneo, por cada sección de corte y por cada elemento de fijación, según el deslizamiento instantáneo sea o no un requerimiento importante del proyecto. En el primer caso la expresión es: $\gamma_1 = \rho_{0,05}^{1.5} D^{0.8} / 25$ (para uniones con clavos sin orificios pre-perforados) siendo $\rho_{0,05}$ el valor característico de la densidad correspondiente al percentil 5%, con un contenido de humedad del 12% (en kg/m^3) y D el diámetro del clavo (en mm) y en el segundo caso es: $\gamma_2 = 246 D^{1.5}$ (para piezas laterales de madera) siendo D el diámetro del clavo (en mm). La primera expresión, si bien es similar a la provista por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012), difiere respecto de la misma en que involucra la densidad característica en lugar de la densidad media y el denominador es 25 en lugar de 30.

Este reglamento recomienda para uniones clavadas con $d < 6.35 \text{ mm}$, separación entre elementos en dirección paralela al grano $a_1 = 15 d$ y distancia al extremo cargado en dirección paralela al grano $a_3 = 15 d$; aunque ésta configuración no es exactamente la que presenta la submuestra Pa_{10/15-ref}, se considera útil para hacer una comparación.

Sustituyendo el valor de $\rho_{0,05}$ valor que aparece en la *Tabla 1* para la submuestra de referencia y $D = 2,5 \text{ mm}$ en las expresiones citadas, se determinó el módulo de deslizamiento instantáneo para cada caso. Como los cuerpos de prueba ensayados presentaron dos planos de corte y sustituyendo $\rho_{0,05} = 387 \text{ kg / m}^3$ (*Tabla 1*) y $D = 2,5 \text{ mm}$, el valor del módulo de deslizamiento por clavo resulta: $\gamma_1 = 2 \cdot 387^{1.5} \cdot 2,5^{0.8} / 30 = 1268 \text{ N / mm}$ y $\gamma_2 = 2 \cdot 246 \cdot 2,5^{1.5} = 1945 \text{ N / mm}$, valores incluidos en la *Tabla 1* para facilitar la comparación. El valor calculado mediante las ecuaciones proporcionadas por el CIRSOC 601 (2016) nos ubica del lado de la seguridad si el deslizamiento instantáneo es un requerimiento importante del proyecto, ya que resultó 23% inferior que el resultado empírico para la muestra de referencia, ésta norma resulta más conservadora que la europea para la cual la diferencia fue del 9%. Por otra parte, cuando el deslizamiento instantáneo NO es un requerimiento importante del proyecto, estamos del lado de la inseguridad ya que el valor calculado resulta 15% superior que el resultado empírico, justamente esa diferencia se presenta en la expresión donde la rigidez de la conexión no es considerada importante y es lógico porque la ecuación en éste caso contempla solo el diámetro del clavo y no la densidad de la madera, factor que tiene gran correlación con la rigidez.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos al probar conexiones múltiples con clavos de 2,5 mm de diámetro cargados paralelamente al grano mostraron una disminución importante en la rigidez de las juntas con parámetros geométricos reducidos. El valor medio del módulo de deslizamiento instantáneo obtenido para las conexiones que presentan una distancia al extremo reducida (10 d en lugar de 15 d) y espaciamiento lo largo de una fila en dirección del grano (7 d en lugar de 10 d) fue 35% menor que el encontrado para las uniones con los parámetros geométricos recomendados por la regla de diseño europea.

La investigación también reveló que el módulo de deslizamiento por clavo de las conexiones ensayadas estaba relacionado con el ángulo entre la carga aplicada y la dirección del grano de los miembros unidos. Se encontró una reducción del 41% y del 61% en la rigidez para las uniones de tres miembros con uno y dos miembros cargados lateralmente perpendiculares al grano, respectivamente, en relación con el obtenido para las conexiones cargadas paralelas al grano. La importante disminución de la rigidez en las conexiones múltiples con clavos de pequeño diámetro cargados perpendicularmente al grano también se confirmó para conexiones únicas de la misma especie de madera con un clavo rígido.

El valor calculado mediante la ecuación proporcionada por el Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 2012) fue similar al resultado empírico obtenido para conexiones múltiples cargadas paralelamente al grano y preparadas con las distancias recomendadas. Sin embargo, los requisitos de capacidad de servicio pueden ser sobrestimados para las conexiones con parámetros geométricos reducidos o cargados perpendicularmente al grano si se calcula aplicando los procedimientos adoptados por la norma europea.

El valor calculado mediante las expresiones proporcionadas por el CIRSOC 601 (2016) compara bien con el resultado empírico obtenido para conexiones múltiples cargadas paralelamente al grano y que exhibe las distancias recomendadas, si el deslizamiento instantáneo es un requerimiento importante del proyecto, no así si el deslizamiento instantáneo NO es un requerimiento importante del proyecto. También la capacidad de servicio puede verse afectada si el deslizamiento de las uniones con parámetros geométricos reducidos o cargados perpendicularmente al grano, se hallan aplicando las ecuaciones adoptadas por este reglamento.

Los resultados de esta investigación fomentan más estudios encaminados a diseñar un método simple que permita a los diseñadores estructurales estimar el deslizamiento instantáneo de las conexiones analizadas cuando la carga se aplica formando un ángulo con la dirección de las fibras y cuando los parámetros geométricos se reducen en relación con los recomendados por las reglas de diseño.

Bibliografía

Blaß HJ (1995) Multiple fastener joints. In: Timber Engineering STEP 1, pp. C15/1-C15/8. Centrum Hout, The Netherlands

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 1995-1-1 (2012) Eurocode 5: Design of timber structures—Part 1-1: General—Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardisation, Brussels

EN 26891 (1991) Timber structures—Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics. European Committee for Standardization, Brussels

Hartl H (1995) Truss connections with dowel-type fasteners. In: Timber Engineering STEP 2, pp. D1/1-1/13. Centrum Hout, The Netherlands

Hilson BO (1995) Nailed joints I. In: Timber Engineering STEP 1, pp. C4/1-C4/8. 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.

INTI CIRSOC (2016) Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Buenos Aires, 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 (<http://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/601/CIRSOC601-completo.pdf>)

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

Johnsson H, Stehn L (2004) Plug shear failure in nailed timber connections. Holz als Roh- und Werkstoff 62: 455-464

Kessel MH (1995) Trusses. In: Timber Engineering STEP 1, pp. B12/1-B12/8. Centrum Hout, The Netherlands

Piter J.C., Guillaumet A., Sosa Zitto A., Ramos R. (2014) Load-bearing capacity of connections with nails of small diameter. Comparative analysis of test results with those calculated according to the Eurocode 5, the Argentinean CIRSOC 601 and the Brazilian NBR 7190. XIV EBRAMEM, Natal, Brasil, Paper EST-07 (In Spanish)

Sosa Zitto, M.A., Köhler J., Piter J.C. (2012) 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

Sosa Zitto, M.A., Köhler J., Piter J.C. (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 72(1): 21-31