

Identificación del Trabajo	
Área:	Materiales
Categoría:	Alumno / Graduado
Regional:	Venado Tuerto

Tensiones de aplastamiento en uniones tipo clavija en madera de *Populus deltoides* Australiano 129/60

Sabrina B. RABOLINI, Facundo E. LERDA, Antonella C. PORTA, Ayelén S. RIEPPI GODOY

Grupo de Investigación de Estructuras Civiles (G.I.D.E.C.) (Laprida N° 651, Venado Tuerto), Facultad Regional Venado Tuerto, UTN

E-mail de autores: sabrinarabolini@gmail.com, facundolerda@gmail.com, antonellaporta@hotmail.com, ayelenriepi@hotmail.com

*Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Ing. Alfredo A. Guillaumet, en el marco del proyecto "Caracterización de *Populus deltoides* australiano 129/60, tensiones de aplastamiento y evaluación de propiedades mediante ultrasonido". (01/01/2013 – 31/12/2015)*

Resumen

El CIRSOC 601 presenta valores de resistencia al aplastamiento en función de la gravedad anhidra y el diámetro del perno, con origen en la norma americana NDS 2005. En este trabajo se determina la resistencia al aplastamiento para madera de álamo "*Populus deltoides* Australiano 129/60" procedente del Delta del Río Paraná, Argentina. Para ello se realizaron 106 ensayos, 57 en la direcciones paralela y 49 perpendicular a la fibra, con un perno rígido de 8 mm de diámetro, de acuerdo a las prescripciones de la Norma UNE-EN 383:2007. Los valores obtenidos para ambas direcciones resultaron sensiblemente inferiores respecto a los propuestos en la tabla S.4.1.1-1 del suplemento 4 del Reglamento CIRSOC 601. Publicaciones anteriores para otras especies cultivadas en la Argentina presentan comportamientos similares, por lo que los valores con origen en las NDS 2005 deben ser utilizados con precaución.

Palabras Claves: *Resistencia al aplastamiento, Álamo, Unión tipo clavija, Paralelas, Perpendicular.*

1- Introducción

En Argentina, los estudios sobre caracterización de la madera para uso estructural de especies de rápido crecimiento, han mejorado notablemente en este último tiempo; sin embargo aún existe un marcado déficit de información confiable, especialmente para completar los suplementos del Reglamento Argentino con valores de diseño de referencia para las diferentes especies utilizadas en nuestro país.

En el Suplemento Número 4 del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601; en particular, en la Tabla S.4.1.1-1. se muestran valores de la resistencia al aplastamiento de referencia F_e , en N/mm^2 , para uniones con elementos de fijación tipo clavija sometidas a carga lateral. Esta tabla se basa en la Tabla 11.3.2 publicada inicialmente en las NDS

2005 y que mantiene su vigencia en la actualización 2015 (como Tabla 12.3.3), donde se expresan valores de la resistencia al aplastamiento en función de la gravedad anhidra de la madera y del diámetro del elemento de fijación.

Existen trabajos de investigación sobre el Álamo (Manavella et al, 2014) y sobre el híbrido *Pinus Elliottii* var. *Elliottii* x *Pinus Caribaea* var. *Hondurensis* (Manavella et al 2012), especie de densidades similares, donde se han comparado los valores de resistencia al aplastamiento experimentales con los calculados a partir de la Tabla incluida en el CIRSOC 601, observándose que los valores obtenidos de manera experimental están entre el 55% y el 61 % de los valores dados en el CIRSOC 601.

Este trabajo determina la resistencia al aplastamiento para madera de *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' procedente del delta del río Paraná, Argentina, en las direcciones paralela y perpendicular a la fibra, con un pasador rígido de 8 mm de diámetro. Se procede, además, a realizar la comparación de los resultados experimentales con los dados en el Suplemento 4 del Reglamento Argentino CIRSOC 601.

2- Metodología

2.1- Material de ensayo, confección y preparación de probetas.

El material de ensayo fue elaborado a partir de tablas de madera aserrada de Álamo *Populus deltoides* 'Australiano 129/60' procedente del delta del río Paraná, Argentina. Se realizó una selección aleatoria a partir de un lote de 200 tablas de 1" x 4" x 2,2 m de largo, las cuales fueron canteadas y cepilladas en ambas caras a un espesor de 23 mm. Una vez acondicionado el lote se separó el material libre de defectos con el que se confeccionaron las probetas a ensayar de acuerdo a la norma UNE-EN 383:2007. Una vez finalizada la fabricación de las probetas, el material se almacenó en condiciones controladas de humedad (65 ± 5) % y temperatura (20 ± 2) °C hasta su ensayo.

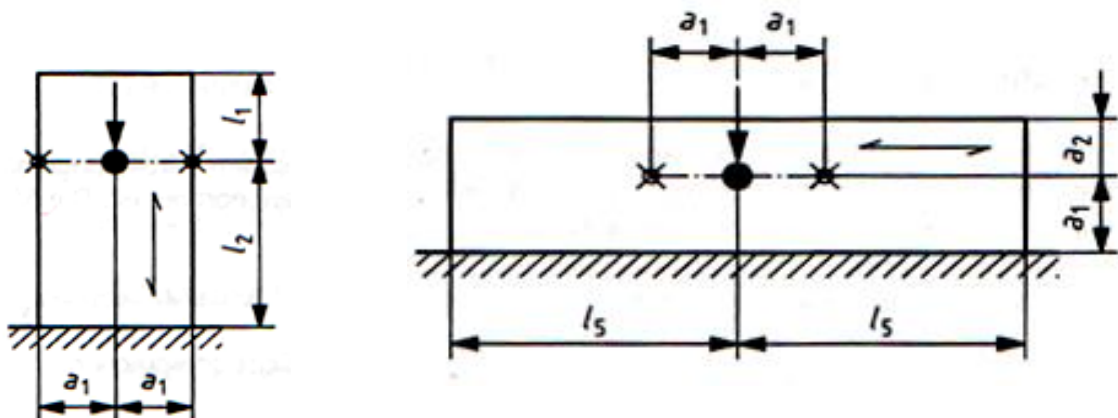


Figura 1. Dimensiones de las probetas

En la Figura 1, se muestran las dimensiones genéricas de las probetas dadas por la Norma.

En la Tabla I se muestran los valores adoptados para el diámetro en estudio.

Tabla I. Dimensiones de las probetas según diámetro

Parámetros (*)	a_1	a_2	l_1	l_2	l_5
Medidas (**)	$5.d$	$5.d$	$7.d$	$7.d$	$20.d$
D (mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
8	40	40	56	56	160

(*) Los parámetros son los que se muestran en la Figura 1.

(**) Las medidas dadas son en función de d (diámetro del perno o pasador), según UNE-EN 383

El elemento de fijación utilizado es un perno rígido de acero trefilado. Según indica la Norma el valor del espesor de la pieza debe estar entre $1,5 d$ y $4 d$ para considerar la condición de perno rígido, valor que se cumple ya que es de $2,88$. La colocación de los elementos de fijación se realiza en orificios pre-taladrados con una holgura de $0,25$ mm. Las perforaciones se ejecutan en una agujereadora de banco de manera de garantizar la perpendicularidad entre el eje del elemento de fijación y la cara de apoyo de la probeta.

2.2- Equipo y dispositivos utilizados

La carga fue aplicada con una máquina Universal de ensayos de accionamiento hidráulico marca Baldwin con capacidad máxima de 300 KN. La misma posee una válvula reguladora de caudal manual con la cual se puede variar a voluntad la velocidad de aplicación de la carga. La medición de las cargas se realizó a través de una celda y un transductor de registración continua con una capacidad máxima de 50 KN y precisión de 5 N. Entre la máquina y el dispositivo de ensayo se interpuso una rótula para garantizar la perpendicularidad de la aplicación de la carga.

Las deformaciones fueron medidas usando dos relojes comparadores digitales dispuestos simétricamente marca Mitutoyo de rango $0-12,7$ mm, y lectura de $0,01$ mm.



Figura 2. Dispositivo de ensayo

2.3- Procedimiento operatorio.

Previo a la realización de los ensayos se ejecuta la calibración del equipo de acuerdo a lo establecido por Norma. A continuación se procede a la ejecución de ensayos preliminares a los efectos de estimar la carga de rotura o fuerza máxima, ya que a partir de este valor se establecen los intervalos de cargas a usar.

La aplicación de la carga se ajusta al procedimiento dado por la Norma UNE-EN 383:2007, el cual puede observarse en la Figura 3.

El procedimiento de ensayo aplicado a cada probeta es de la siguiente manera: se incrementa la fuerza hasta alcanzar el 40% de la carga máxima estimada, se mantiene ese valor durante 30 segundos, a continuación se reduce la fuerza hasta el 10 % de la fuerza máxima estimada y se mantiene constante nuevamente durante 30 segundos, a partir de ese momento la aplicación de la carga es progresiva hasta la finalización del ensayo. El ensayo se da por finalizado cuando se produce la rotura física de la probeta o cuando el desplazamiento alcanzó un valor de 5 mm.

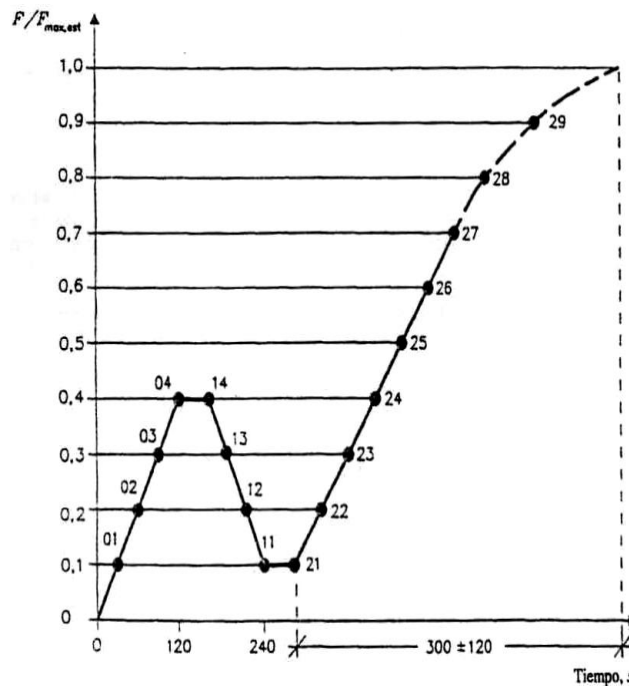


Figura 3. Procedimiento de carga

Luego de realizado el primer período de carga, la fuerza máxima debe alcanzarse en un tiempo de 300 ± 120 segundos, de acuerdo a lo establecido en el procedimiento de carga. Para cada uno de los puntos indicados en la Figura 3 se registraron los valores de carga, los valores de desplazamiento de ambos comparadores y el tiempo.

Finalizado el ensayo, para cada probeta, se determina la humedad de acuerdo a la norma ISO 3130/1975 y la densidad según norma ISO 3131/1975 ajustándose los valores de densidad a la humedad de referencia del 12% de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 384:2010.

3- Análisis de resultados.

3.1- Determinación de la resistencia al aplastamiento.

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

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

Donde:

f_h : Resistencia al aplastamiento, en N/mm².

$F_{m\acute{a}x}$: Fuerza máxima correspondiente a la rotura o a 5 mm de deformación, en N.

d : Diámetro del perno, en milímetros.

t : Espesor de la probeta, en milímetros.

En la Tabla II se muestran los valores de resistencia al aplastamiento en la dirección paralela a las fibras.

Tabla II. Valores de Resistencia al Aplastamiento Paralelo a las fibras

Parámetros	Unidad	Diámetro de perno
		D= 8 mm
Promedio	N/mm ²	26,56
Desvío STD	N/mm ²	2,82
Mínimo	N/mm ²	20,37
Máximo	N/mm ²	33,41
Percentil 5%	N/mm ²	21,69
COV %	%	10,6

En la Tabla III se muestran los valores de resistencia al aplastamiento en la dirección perpendicular a las fibras.

Tabla III. Valores de Resistencia al Aplastamiento Perpendicular a las fibras

Parámetros	Unidad	Diámetro de perno
		D= 8 mm
Promedio	N/mm ²	17,62
Desvío STD	N/mm ²	4,01
Mínimo	N/mm ²	11,85
Máximo	N/mm ²	28,31
Percentil 5%	N/mm ²	12,45

COV %	%	22,7
-------	---	------

Al comparar las resistencias al aplastamiento promedio y percentil 5%, se observa que los valores de los ensayos paralelos a las fibras dan resultados superiores a los resultados de los ensayos perpendiculares.

3.2- Determinación de la densidad y su correlación con la Resistencia al aplastamiento.

En la Tabla IV se muestran los valores de densidad corregidas a la humedad de referencia del 12%, de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 384.

Tabla IV. Valores de Densidad corregida a la humedad de referencia 12 %

Parámetros	Unidad	Diámetro de perno
		D= 8 mm
Promedio	Kg/m ³	395,77
Desvio STD	Kg/m ³	30,38
Mínimo	Kg/m ³	352,76
Máximo	Kg/m ³	479,33
Percentil 5%	Kg/m ³	358,80
COV %	%	7,7

Se establece la correlación existente entre la resistencia al aplastamiento en cada una de las direcciones ensayadas y la densidad corregida al 12 %. En la Tabla V se visualizan los resultados.

Tabla V. Coeficientes de Correlación Resistencia - Densidad

Parámetros	Coef. De Correlación
	D = 8 mm
Correlación Tensión Paralela - Densidad	0,793
Correlación Tensión Perpendicular - Densidad	0,74

Los coeficientes de correlación en las distintas direcciones de ensayo muestran una relación de moderada a fuerte entre las variables analizadas.

Si se comparan las correlaciones del Álamo con otras especies, se observa que son inferiores a las obtenidas para el Híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *pinus* *Caribaea* var. *Hondurensis*, que dan valores de 0,86 para la dirección paralela a las fibras y de 0.79 para la dirección perpendicular (Manavella et al ,2012) y para la *Araucaria Angustifolia* que presentan valores de 0,84 y de 0,93 para la tensión paralela y perpendicular respectivamente (Guillaumet et al ,2010).

3.3- Comparación de los valores experimentales obtenidos con el Reglamento CIRSOC 601

3.3.1 Introducción.

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601, en la Tabla S.4.1.1-1 del Suplemento 4 aporta valores de la resistencia al aplastamiento de referencia, F_e , en N/mm^2 , para uniones con elementos de fijación tipo clavija sometidas a carga lateral, en función de la gravedad anhidra de la madera usada en la unión y del diámetro de perno. Esta tabla incluida en el Reglamento se basa en la publicada en las NDS 2005 (National Design Specification For Wood Construction, edición 2005), página 73 como Tabla 11.3.2 y con vigencia en la actualización 2015 como Tabla 12.3.3.

A partir de la gravedad específica a un determinado contenido de humedad G_{mc} , se puede determinar el valor de la gravedad anhidra 5 % percentil de la madera ensayada, usando la fórmula (2), de acuerdo a lo expresado en el Reglamento CIRSOC 601.

$$G = \frac{G_{mc}}{(1 + mc) - 0.84 \cdot mc \cdot G_{mc}} \quad (2)$$

Donde:

G = Gravedad anhidra

G_{mc} = Gravedad específica a un determinado contenido de humedad

mc = contenido de humedad expresado como cociente entre el peso del agua contenida y el peso anhidro.

Los valores obtenidos de gravedad anhidra se visualizan en la Tabla VI.

Tabla VI. Valores de Densidad Anhidra según CIRSOC 601

Parámetros	Unidad	Diámetro de perno
		D= 8 mm
Promedio	Kg/m ³	367,98
Desvío STD	Kg/m ³	29,50
Mínimo	Kg/m ³	327,36
Máximo	Kg/m ³	451,77
Percentil 5%	Kg/m ³	332,63
COV %	%	8,0

Se adopta el valor de 333 Kg/m³ como valor de cálculo para la gravedad anhidra percentil 5 % del Álamo, *Populus deltoides* Australiano 129/60.

La madera tiene la propiedad de soportar cargas máximas sustancialmente mayores cuando éstas actúan durante un tiempo breve que cuando lo hacen durante un tiempo prolongado. Este fenómeno está contemplado en el Reglamento CIRSOC 601 a través de un factor de ajuste CD por duración de la carga, el cual está tabulado en el Capítulo 4 Tabla 4.3-2.

Los valores de diseño de referencia para las tensiones dadas por el Reglamento CIRSOC 601, se refieren al material cuando es sometido a una carga que lo solicita al nivel de su tensión de diseño durante un tiempo acumulado de aproximadamente 10 años, o al 90 % de una carga que solicita al material al nivel de su tensión de diseño en forma continua durante toda la vida útil de la estructura, sin que se afecte el coeficiente de seguridad adoptado. De acuerdo con este criterio, esta duración de la carga es considerada normal y para esta condición el factor de duración de la carga, CD es igual a 1. Para cargas de distinta duración a la normal, se deben afectar las tensiones de diseño de referencia con los valores de CD correspondientes a fin de tener en cuenta el cambio en la resistencia del material en función del tiempo de actuación de la carga.

De lo expuesto y dado que los ensayos de resistencia al aplastamiento tienen una duración aproximada de 10 minutos, los valores obtenidos experimentalmente se deben afectar con un factor de corrección $CD = 1,6$ para hacerlos comparables con los resultados obtenidos usando el Reglamento.

3.3.2- Cálculo de la resistencia al aplastamiento Paralela a la fibra.

Para diámetros superiores a 6,35 mm el CIRSOC 601 estipula que la resistencia al aplastamiento depende de la dirección de la fibra, estableciendo que para la dirección paralela el valor es independiente del diámetro del pasador. De acuerdo a esto, la resistencia paralela a la fibra para la clavija de diámetro 8 mm tienen igual valor y se calculan a partir de la densidad 0,33. También puede calcularse usando la fórmula que a continuación se detalla:

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

Donde:

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

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

Los valores calculados según CIRSOC se presenta en la Tabla VII, donde se muestran además, los resultados experimentales, los resultados experimentales corregidos por el factor de duración de la carga $CD = 1,6$ y la relación entre los valores.

Tabla VII. Comparación de los valores de resistencia al aplastamiento paralelo según CIRSOC 601 y experimental

Parámetros	Unidad	fh //
		D= 8 mm
Resistencia propuesta según CIRSOC 601	N/mm^2	25,63
Resistencia Experimental 5 % Percentil (10 minutos)	N/mm^2	21,69
Resistencia Experimental Corregida con $Cd=1,6$ (a 10 años)	N/mm^2	13,55
Relación entre Valor Exp. Corregido y valor de CIRSOC 601	%	53%

Se visualiza que los valores experimentales corregidos para lo diámetro 8 mm presenta un resultado de $13.55 N/mm^2$ comparado con la resistencia propuesta según CIRSOC 601 de 25.63, se aprecia una diferencia del orden del 53 %. Según el Reglamento, los valores deberían ser iguales ya que considera que la resistencia paralela es independiente del diámetro de pasador, para diámetros superiores a 6,35 mm.

3.3.2- Cálculo de la resistencia al aplastamiento Perpendicular a la fibra.

Para diámetros de pasadores superiores a 6,35 mm la resistencia al aplastamiento perpendicular a las fibras es función del diámetro y de la densidad anhidra, disminuyendo progresivamente su valor al aumentar el diámetro de perno y aumentando al aumentar la densidad. Su valor se puede obtener de la Tabla 4.3-2. Interpolando entre diámetros y entre densidades o a partir de la fórmula siguiente:

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

Donde:

$F_{e\perp}$: Resistencia al aplastamiento de referencia perpendicular a la fibra en N/mm².

G: Valor característico (5 %) de la gravedad específica anhidra en Kg/dm³.

D: Diámetro del perno en mm.

En la Tabla VIII, se presentan los valores de resistencia perpendicular calculados y se muestran además, los resultados experimentales sin corregir y corregidos por el factor de duración de la carga CD = 1,6 y la relación entre los valores.

Tabla VIII. Comparación de los valores de resistencia al aplastamiento perpendicular según CIRSOC 601 y experimental

Parámetros	Unidad	$f_{h\perp}$
		D= 8 mm
Resistencia propuesta según CIRSOC 601	N/mm ²	15,16
Resistencia Experimental 5 % Percentil (10 minutos)	N/mm ²	12,45
Resistencia Experimental Corregida con Cd=1,6 (a 10 años)	N/mm ²	7,78
Relación entre Valor Exp. Corregido y valor de CIRSOC 601	%	51%

Se puede observar que los valores de resistencia al aplastamiento experimentales 5 % percentil referenciados a una duración de la carga de 10 años, son sensiblemente menores a los valores propuestos por el Reglamento CIRSOC 601. La variación está en el 51 %.

4- Conclusiones

La resistencia característica al Aplastamiento 5% percentil, en la dirección paralela a las fibras calculada a partir de las prescripciones de la Norma UNE-EN 383 es de 21,69 N/mm², para una duración de la carga de 10 minutos.

La resistencia característica al Aplastamiento 5% percentil, en la dirección perpendicular a las fibras calculada a partir de las prescripciones de la Norma UNE-EN 383 es de 12,45 N/mm² para una duración de la carga de 10 minutos.

Los valores de resistencia al aplastamiento, tanto paralelo como perpendicular a la fibra, aumentan al aumentar la densidad anhidra del material, confirmando el comportamiento establecido en la Tabla S.4.1.1-1 del suplemento 4 del CIRSOC 601.

Los resultados experimentales de la resistencia al aplastamiento, en la dirección paralela y perpendicular a las fibras para diámetro de perno 8 mm corregidos por el factor de duración de la carga, dan valores del orden de 53 % de los determinados con la metodología establecida por el Reglamento CIRSOC 601. Esto se condice con otros resultados ya expuestos en otras publicaciones y para otras especies.

Reconocimientos.

A los alumnos, becarios, graduados y docentes investigadores del GIDEC por su valioso trabajo en el desarrollo de los ensayos realizados.

Referencias bibliográficas.

- UNE-EN 383:2007. Agencia Española de Normalización y Certificación (2007). Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia al aplastamiento y del módulo de aplastamiento para los elementos de fijación tipo clavija.
- UNE-EN 384:2010. Agencia Española de Normalización y Certificación (2010). Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.
- UNE-EN 408:2011. Agencia Española de Normalización y Certificación (2011). Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- NDS 2005. American Forest & Paper Association. American Wood Council. (2005). National Design Specification (NDS) for Wood Construction with commentary and Supplement: Design Values for Wood Construction 2005 Edition. Washington.
- NDS 2015. American Wood Council. (2015). National Design Specification (NDS) for Wood Construction 2015 Edition.
- Guillaumet A.A., Manavella R.D; Filippetti M.C., Diab J. y Armas A. (2010) Tensiones de aplastamiento en uniones tipo clavija en madera de Araucaria Angustifolia .XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural .San Juan. Argentina.
- CIRSOC 601(2013). Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad en Obras Civiles. Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Buenos Aires.
- CIRSOC 601(2013). Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad en Obras Civiles. Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados por el Reglamento CIRSOC 601. Buenos Aires.
- Manavella R.D. Guillaumet A.A., Filippetti M.C. (2012). Determinación de la resistencia al aplastamiento en madera de híbrido Pinus Elliottii var. Elliottii x Pinus Caribaea var. Hondurensis para uniones tipo clavija. 22º Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires, Argentina.
- Manavella R.D., Guillaumet A.A., Filippetti María C., Tortoriello M. (2014). Determinación de la Resistencia al Aplastamiento en Madera de Álamo para Uniones Tipo Clavija. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural .Montevideo. Uruguay.