

DISTANCIAS A LOS EXTREMOS EN CONEXIONES PERNADAS DE MADERA

✉ BEATRIZ ADELA ECHAVARRÍA LÓPEZ*
CÉSAR AUGUSTO ECHAVARRÍA LÓPEZ**

RESUMEN

En este artículo se estudia la influencia de las distancias a los extremos en la aparición de concentraciones de tensiones en las conexiones pernadas de madera. La importancia de la anisotropía y de las propiedades elásticas de la madera en las distribuciones de tensiones es también analizada. Se presenta un modelo teórico basado en el método de las funciones complejas que permite calcular las tensiones en una unión de madera. Se muestran también las distancias recomendadas por diversos códigos para conexiones pernadas de madera cargadas en tracción paralela a las fibras. Se comparan las concentraciones de tensiones en tracción perpendicular a las fibras para algunas maderas blandas y duras. Las distancias a los extremos reducidas modifican la magnitud de las concentraciones de tensiones. Analíticamente, se evidencia que el comportamiento de las conexiones pernadas cuando se usan distancias a los extremos adecuadas es plástico.

PALABRAS CLAVES: conexiones pernadas de madera; falla por tracción perpendicular a las fibras; falla por desgarramiento en cizalladura.

+ ABSTRACT

This paper examines the influence of the end distances on the occurrence of stress concentrations in timber bolted joints. The effect of the anisotropic character of the wood on the stress distributions was also analyzed. The use of a theoretical model based on the method of the complex functions to calculate the stresses in a timber joint is presented. Minimum edge and end distances as identified in various design codes for timber bolted joints loaded parallel-to-grain are shown. Perpendicular-to-grain tensile stress concentrations for some softwoods and hardwoods are presented. Reducing the end distance does influence the magnitude of the tensile stress concentrations. It is established analytically that when adequate distances are used at the sides of the bolted timber joint its behavior is explicitly ductile.

KEYWORDS: Bolted Timber Joints; Splitting Failure Mode; Shear-plug Failure Mode.

DISTÂNCIAS AOS EXTREMOS EM CONEXOES PERNADAS DE MADEIRA

SUMÁRIO

Neste artigo estuda-se a influência das distâncias aos extremos na aparição de concentrações de tensões na conexões pernadas de madeira. A importância da anisotropia e das propriedades elásticas da madeira nas distribuições de tensões é também analisada. Apresenta-se um modelo teórico baseado no método das funções complexas que permite calcular as tensões numa união de madeira. Mostra-se também as distâncias recomendadas por diversos

* Candidata Maestría en Construcción, Universidad Nacional de Colombia. Ingeniera Departamento de Estructuras, Integral S.A. Medellín, Colombia.

** Ph.D., École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suiza. Profesor Asociado Escuela de Construcción, Universidad Nacional de Colombia. Medellín Colombia.

✉ *Autor de correspondencia:* (B. Echavarría). Calle 37 Sur
43A-204, Envigado, Colombia. Tel: 270 97 49
Correo electrónico: baechava@unal.edu.co

Historia del artículo:
Artículo recibido: 22-I-2013 / Aprobado: 25-X-2013
Discusión abierta hasta diciembre 2014

códigos para conexões pernadas de madeira carregadas em tração paralela às fibras. Comparar-se as concentrações de tensões em tração perpendicular às fibras para algumas madeiras brandas e duras. As distâncias aos extremos reduzidas modificam a magnitude das concentrações de tensões. De maneira analítica, evidencia-se que o comportamento das conexões pernadas quando se usam distâncias aos extremos adequadas é plástico.

PALAVRAS-CHAVE: conexões pernadas de madeira; falha por tração perpendicular às fibras; falha por rasgamento em cisalhamento.

1. INTRODUCCIÓN

Las conexiones pernadas de madera están sometidas a altas concentraciones de tensiones localizadas en la vecindad de las perforaciones. Concentraciones de tensiones perpendiculares a las fibras de la madera, de cizalladura y de aplastamiento, se presentan en las zonas de contacto entre el perno y la madera en el perímetro de la perforación. La intensidad de las tensiones está enormemente influenciada por las distancias a los extremos, medidas desde el extremo del elemento de madera cargado hasta el centro de la perforación, entre los pernos y la sección conectada.

La mayoría de los procedimientos de diseño existentes en los códigos de estructuras de madera están basados en el *European yield model* (Eurocode 5 1995). El modelo representa una extensión de la teoría de análisis límite de Johansen, también conocida como *European yield model*, para conectadores metálicos. Dichos análisis no contemplan las rupturas frágiles. No consideran, por lo tanto, las concentraciones de tensiones en tracción perpendicular a las fibras de la madera y en cizalladura. Estos procedimientos de diseño consideran únicamente el comportamiento plástico de la conexión pernada de madera.

Excluir las rupturas frágiles exige entonces el uso de distancias a los extremos adecuadas que garanticen un comportamiento dúctil de la conexión.

Las conexiones de madera con conectadores metálicos y los límites entre el comportamiento frágil y dúctil han sido estudiados usando métodos analíticos (Echavarría 2007), numéricos (Kharouf, *et al.*, 2005, Jorissen 1998, Moses, *et al.*, 2004) y experimentales (Haller, *et al.*, 2001).

Kharouf, *et al.* (2001) desarrollaron un modelo numérico no lineal para estudiar el comportamiento de

conexiones pernadas de madera con relaciones de diámetro de conector a espesor de miembro conectoro relativamente bajas.

Jorissen (1998) intentó explicar la falla de tipo frágil en conexiones pernadas de madera, mediante el uso del *European yield model*, al calcular las tensiones a lo largo de trayectorias de ruptura potencialmente críticas dentro del miembro de madera conectoro. Las tensiones promedio de tracción perpendicular a las fibras de la madera y de cizalladura fueron comparadas con las de un modelo de mecánica de la fractura para predecir la capacidad resistente de la conexión.

Moses, *et al.* (2004) emplearon un modelo numérico que está basado en la elasticidad ortotrópica, en la plasticidad anisotrópica no lineal para evaluar el comportamiento de la madera en compresión y en la teoría de Weibull del eslabón débil para predecir la ruptura frágil de la conexión. Un comportamiento elástico fue asumido en tracción y cizalladura. Este modelo tridimensional fue implementado mediante el uso de elementos finitos para una conexión pernada simple (con un conector).

Echavarría (2007) desarrolló un modelo teórico que puede usarse en conexiones pernadas de materiales ortotrópicos. La madera se considera como un material ortotrópico con un eje principal paralelo a las fibras y otro perpendicular a las mismas. Además de determinar analíticamente las tensiones, se optimizó el comportamiento mecánico de la conexión de madera eliminando las rupturas de tipo frágil.

En general, estos modelos y otros encontrados en la literatura coinciden en el uso de distancias a los extremos adecuadas para eliminar la posibilidad de rupturas de tipo frágil en las conexiones pernadas de madera.

En la primera parte de este artículo, se resumen entonces las distancias a los bordes sugeridas por los



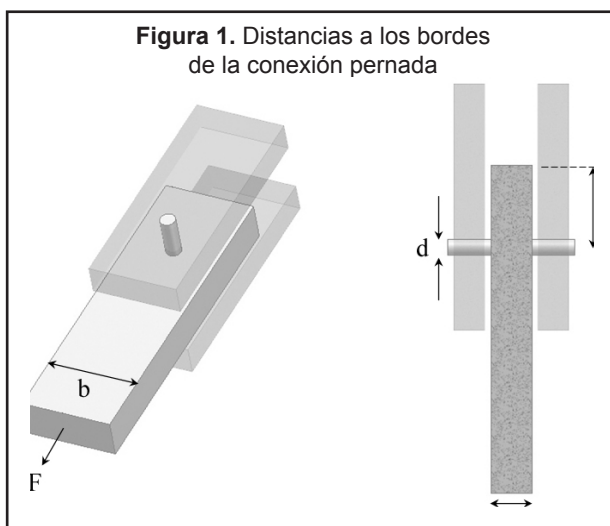
códigos de diseño Eurocode 5 (1995) y National Design Specification NDS (2012) basados en el comportamiento plástico de la conexión pernada de madera. Se indican también las distancias recomendadas por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) (2010).

En la segunda parte, se muestra la importancia de la evaluación analítica de las tensiones en una conexión de un material anisotrópico para la determinación teórica de las distancias a los extremos requeridas y para una optimización de las conexiones pernadas de madera.

2. DISTANCIAS A LOS BORDES SEGÚN CÓDIGOS DE DISEÑO EUROCODE 5, NDS

Los códigos de diseño de estructuras de madera (Eurocode 5 1995, NDS 2012) consideran rupturas de tipo dúctil y usan correcciones empíricas aproximadas para posibles fallas frágiles de las conexiones con varias filas de conectadores y disminución de sección neta de la pieza de madera conectada. Las distancias a los bordes sugeridas garantizan, sin embargo, un comportamiento plástico de una conexión simple. Se recomienda entonces el uso de distancias mínimas del conectador al extremo cargado y al borde no cargado. Igualmente, se aconseja un espaciado mínimo entre conectadores.

En la **Figura 1** se muestran las distancias al extremo cargado e y a los bordes no cargados $b/2$ en conexiones pernadas sometidas a tracción paralela a las fibras de la madera.



Según el Eurocode 5 (1995):

8.1.2 (1) *The arrangement and sizes of the fasteners in a connection, and the fastener spacings, edge and end distances shall be chosen so that the expected strength and stiffness can be obtained.*

Las distancias a los bordes no cargados y a los extremos cargados se indican en la *Table 8.4 – Minimum values of spacing and edge and end distances for bolts.*

- Loaded end: max (7 d ; 80 mm).
- Unloaded edge: 3d.

El Eurocode 5 da igual tratamiento a todas las especies de madera en lo relativo a las distancias a los extremos y bordes.

Según la NDS (2012):

M10.4 Connections must obviously provide the structural strength necessary to transfer loads. Well-designed connections hold the wood members in such a manner that shrinkage/swelling cycles do not induce splitting across the grain. Well-designed connections also minimize regions that might collect moisture – providing adequate clearance for air movement to keep the wood dry. Finally, well-designed connections minimize the potential for tension perpendicular to grain stresses – either under design conditions or under unusual loading conditions.

Las distancias a los bordes no cargados se especifican en la *Table 11.5.1A – Edge distance requirements for parallel to grain loading.*

- Unloaded edge: 1.5d.

Y las distancias a los extremos cargados se indican en la *Table 11.5.1B – End distance requirements for parallel to grain loading.*

- *Minimum end distance for softwoods loaded parallel to grain in tension (fastener bearing toward member end): 7d.*
- *Minimum end distance for hardwoods loaded parallel to grain in tension (fastener bearing toward member end): 5d.*

En el código NDS (2012) y en el Wood Handbook (2010) se enumeran las maderas blandas (baja densidad) y duras (alta densidad). Asumen implícitamente que las maderas duras tienen una resistencia apreciable en tracción perpendicular a las fibras y en cizalladura.

3. DISTANCIAS A LOS BORDES SEGÚN CÓDIGO DE DISEÑO NSR-10

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) (2010) recomienda en su capítulo G:

G.6.13.14 – *El espaciamiento de los pernos y las distancias entre éstos y los bordes de los elementos de madera deberán ser suficientes para permitir que cada perno desarrolle toda su capacidad resistente. Los valores admisibles de la tabla G.6.13-3 se dan bajo el supuesto que han sido respetados los requisitos mínimos dados a continuación, referentes a distancias a la punta, a un borde o arista lateral, y separación centro a centro de los pernos, según las tablas G.6.13-5 y G.6.13-6.*

- *Distancia al extremo en tracción a lo largo del grano en elementos cargados paralelamente al grano 5d.*
- *Distancia a los bordes perpendicularmente a la dirección del grano en elementos cargados paralelamente al grano 2d.*

La NSR-10 considera un comportamiento equivalente en todas las especies de madera en lo relativo a las distancias a los bordes no cargados y a los extremos cargados.

En la **Tabla 1**, se presenta una comparación de las distancias entre los diferentes códigos analizados.

Tabla 1. Distancias a los bordes y a los extremos en conexiones pernadas sometidas a tracción paralela a las fibras de la madera

Código de diseño	Distancia al extremo cargado e	Distancia al borde no cargado b/2
Eurocode 5	<i>Máx (7d ; 80mm)</i>	3d
NDS softwoods	7d	1.5d
NDS hardwoods	5d	1.5d
NSR	5d	2d

4. DISTANCIAS A LOS EXTREMOS REDUCIDAS

La falla frágil puede ocurrir, generalmente, en conexiones con distancias a los extremos insuficientes y en secciones con un alto grado de anisotropía (maderas duras con una alta resistencia paralela a las fibras y relativamente baja resistencia perpendicular a las fibras).

Las distancias a los extremos reducidas, menores a 7 veces el diámetro del perno d , son insuficientes y generan concentraciones de tensiones en tracción perpendicular a las fibras y en cizalladura que producen la ruptura de la conexión en el rango elástico. Las distancias reducidas no garantizan una ruptura dúctil de la conexión pernada.

En Echavarría (2007), un modelo analítico que usa funciones complejas de tensión se desarrolla para ser utilizado en conexiones de materiales ortotrópicos con conectadores.

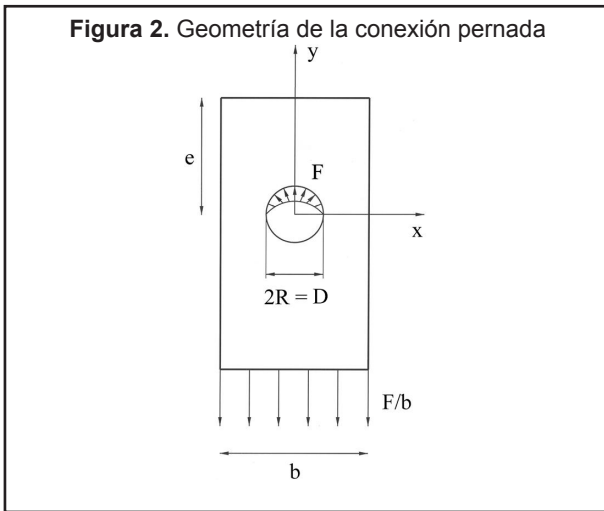
Se resumen a continuación las ecuaciones y las consideraciones generales del modelo analítico que permiten verificar la importancia de las distancias a los bordes en la predicción de la capacidad resistente de la conexión pernada de madera. Se considera una sección ortotrópica y homogénea de anchura b con una perforación circular de diámetro D como se muestra en la **Figura 2**. Sean x y y los ejes principales de la sección.

La carga actuante en la conexión F actúa en la dirección longitudinal (eje y). El eje longitudinal y puede ser, en las conexiones de madera, perpendicular o paralelo a las fibras. La perforación está localizada a una distancia e del extremo cargado de la sección. La holgura entre el conectador y la perforación se denomina λ .

Se asume además que la perforación es cargada sin fricción sobre una parte de su borde por un conectador infinitamente rígido de diámetro d . La fuerza resultante en la conexión F es igual a $2pRt$, donde p es la compresión localizada o aplastamiento promedio, R es el radio de la perforación y t es el espesor de la sección.

Para obtener las tensiones, se emplea el método de funciones complejas (Lekhnitskii 1968, Muskhelishvili 1953) para materiales anisotrópicos. El desarrollo completo de cada ecuación se puede encontrar en Echavarría (2007).

Con el método analítico es posible estimar las tensiones en cualquier punto de la conexión. Las tensiones pueden ser calculadas para diferentes materiales ortotrópicos siempre y cuando las constantes elásticas básicas sean conocidas. Aunque fue desarrollado para materiales compuestos ortotrópicos, el modelo analítico es igualmente eficaz para evaluar las conexiones de madera o paneles (OSB, Plywood, LVL, LSL) con conectadores metálicos (pernos, clavos y tornillos).



$$k = \sqrt{\frac{E_x}{E_y}} ; n = \left[2(k - v_{xy}) + \frac{E_x}{G_{xy}} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{1 - \text{sen } \alpha}{\text{cos } \alpha} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{5} \left\{ \frac{e - 2d}{d} \right\} - \frac{\pi}{30} \left\{ \frac{e - 2d}{d} \right\}^2 \quad (4)$$

$$2d \leq e \leq 5d$$

$$\alpha = \frac{3\pi}{10} + \frac{\pi}{45} \left\{ \frac{e - 5d}{d} \right\} \quad 5d \leq e \leq 14d \quad (5)$$

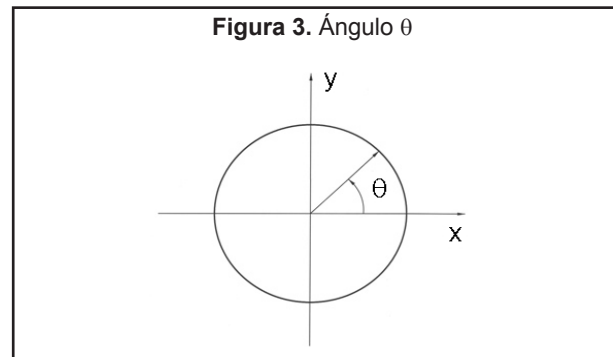
La forma y la magnitud de las tensiones depende, en principio, de las propiedades elásticas de la madera (grado de anisotropía) y de las distancias a los bordes.

Las tensiones alrededor de la perforación varían suavemente. En contraste, las tensiones tienen concentraciones extremas a lo largo de los ejes principales x y y (Echavarría 2007).

La máxima tensión perpendicular a las fibras de la madera se localiza en el intervalo $y=R$ a $y=1.2R$, donde R es el radio de la perforación.

La tensión perpendicular a las fibras de la madera en la posición $\theta=90^\circ$, definida en la **Figura 3**, en $y=R$ es:

$$\sigma_x = \left[\frac{(4 + \pi)Fn\omega}{2R\pi^2} \right] - \left(\frac{Fk}{2b} + \frac{3Fk}{2R\pi} \right) - \frac{v_{xy}F}{2R\pi} \quad (1)$$



En la **Tabla 2**, se presentan las propiedades elásticas (para un contenido de humedad del 12 %) de varias especies de madera con diferentes grados de anisotropía y densidad ρ (en estado verde) usadas en el análisis. Se consideran maderas de diferentes densidades y se listan desde la más blanda hasta la más dura.

Tabla 2. Constantes elásticas de diferentes especies de madera

Especie	E_y [MPa]	E_x [MPa]	G_{xy} [MPa]	v_{yx}	ρ [kg/m ³]
Balsa	3400	50	120	0,49	160
Pine Radiata	10200	390	490	0,34	420
Douglas-fir	12600	630	980	0,45	460
Birch Yellow	13900	700	950	0,45	550
Oak Red Cherrybark	15700	1290	1270	0,45	610

Fuente: Wood Handbook: Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory, U.S. Department of Agriculture. Madison, SI, 2010

La **Tabla 3** resume las tensiones máximas perpendiculares a las fibras de la madera para las especies de madera analizadas.

Las tensiones calculadas han sido normalizadas usando el valor de la compresión localizada promedio $p = F/d$. Las tensiones de tracción se consideran positivas. Se utiliza un espesor t (unitario para el análisis) y una anchura de sección $b = 4d$ (distancia al borde no cargado equivalente a $2d$). Se consideran 6 distancias al extremo cargado e .

Siendo $e = 2d$ la distancia reducida más pequeña y $e = 10d$ la distancia más grande. En este caso, las conexiones están sometidas a tracción paralela a las fibras de la madera (la carga longitudinal actuante en el eje y coincide con las fibras longitudinales de la madera).

La magnitud de las concentraciones de tracción perpendicular a las fibras aumenta drásticamente cuando la distancia al extremo cargado e es menor que 4 veces el diámetro del perno d .

Los resultados teóricos sugieren que no hay diferencia entre conexiones con maderas blandas (baja densidad) o duras (alta densidad) pues las concentraciones en tracción perpendicular a las fibras son idénticas.

Teniendo en cuenta que la resistencia de la madera en tracción perpendicular a las fibras es casi nula en todas las especies y con el criterio de falla de máxima tensión, se infiere que la conexión debe diseñarse de tal forma que se obtenga una concentración de tensiones perpendiculares a las fibras en compresión. Esto último se garantiza, sin importar la especie de madera analizada, cuando se utiliza una adecuada distancia al extremo cargado e mayor o igual a $7d$.

5. CONCLUSIONES

Los códigos de diseño de estructuras de madera generalmente no recomiendan las distancias al extremo cargado reducidas. Las distancias menores a 7 veces el diámetro del perno d son insuficientes y generan concentraciones de tensiones en tracción perpendicular a las fibras que producen la ruptura frágil de la conexión en el rango elástico. Las distancias reducidas no garantizan una ruptura dúctil de la conexión pernada.

Los resultados de ensayos y las predicciones analíticas indican que se puede apreciar un comportamiento netamente dúctil para conexiones de madera sin reforzar con distancias al extremo cargado $e > 7d$.

El análisis teórico indica que las concentraciones de tensiones dependen de la ortotropía de la sección de madera conectada. La intensidad de las concentraciones de tensión en tracción perpendicular a las fibras es idéntica para especies de madera de alta densidad (duras) y de baja densidad (blandas).

El uso de distancias al extremo cargado reducidas, en maderas blandas y duras, podría conducir a un comportamiento heterogéneo y a rupturas frágiles de las conexiones. Las rupturas de tipo frágil son de carácter repentino y por consiguiente deben ser evitadas en cualquier tipo de estructura.

La NSR-10 recomienda 5 veces el diámetro del perno, para todas las especies de madera, como distancia al extremo cargado en conexiones sometidas a tracción paralela a las fibras de la madera. Esta distancia podría considerarse como una distancia reducida y no garantiza, en ciertos casos, una ruptura dúctil de la conexión pernada.

Tabla 3. Tensiones máximas pronosticadas para diferentes especies de madera (valores normalizados)

e/d	Tensión perpendicular a las fibras en $\varphi=90^\circ$ $y=R$ s_x/p				
	Balsa	Pine Radiata	Douglas-fir	Birch Yellow	Oak Red Cherrybark
2	0,45	0,56	0,49	0,52	0,57
3	0,20	0,23	0,18	0,20	0,19
4	0,09	0,08	0,04	0,05	0,02
5	0,06	0,04	-0,01	0	-0,03
7	0	-0,02	-0,06	-0,06	-0,10
10	-0,05	-0,11	-0,15	-0,14	-0,20



La desventaja de utilizar una conexión de madera no reforzada con distancias a los bordes inadecuadas sería notable en términos de seguridad y de economía.

NOTACIÓN

b anchura de la placa
 d diámetro del perno
 D diámetro de la perforación
 e distancia al extremo cargado
 E_x módulo de elasticidad perpendicular
 E_y módulo de elasticidad longitudinal

F carga actuante en la conexión
 k constante elástica del material conectado
 G_{xy} módulo de cortante
 n constante elástica del material conectado
 p tensión de compresión localizada o aplastamiento promedio
 R radio de la perforación
 λ holgura entre la perforación y el conector
 ν_{yx} relación de Poisson
 σ_x tensión perpendicular
 σ_y tensión longitudinal
 τ_{xy} tensión de cortante

REFERENCIAS

- Eurocode 5, *Design of timber structures* (1995). EN 1995-1-1:2004 (E).
- Echavarría, C. (2007). Bolted Timber Joints with Self-Tapping Screws. *Revista EIA*, 8 June-December, pp. 37-47.
- Echavarría, C., Haller, P., Salenikovich, A. (2007). Analytical Study of a Pin-Loaded Hole in Elastic Orthotropic Plates. *Composite Structures*, 79, pp. 107-112.
- Kharouf, N., McClure, G. and Smith, I. (2005). Postelastic Behavior of Single- and Double-Bolt Timber Connections. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 131(1) January, pp. 188-196.
- Jorissen, A. (1998). *Double Shear Timber Connections with Dowel Type Fasteners*. Delft: Delft University Press.
- Moses, D. and Prion, H. (2004). Stress and Failure Analysis of Wood Composites: a new model. *Composites Part B* 35, pp. 251-261.
- Haller, P., Wehsener, J. and Birk, T. (2001). Embedding characteristics of fibre reinforcement and densified timber joints. *Paper CIB/W18/34-7-7, Proceedings of Meeting 34*, Venice, Italy.
- National Design Specification (NDS) for Wood Construction* (2012). Washington: American Forest and Paper Association, American Wood Council.
- NSR-10, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente* (2010). Decreto 926 del 19 de marzo de 2010. Colombia: Diario Oficial.
- Lekhnitskii, S. (1968). *Anisotropic plates*. New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Muskhelishvili, N. (1953). *Some Basic problems of the Mathematical Theory of Elasticity*. Noordhoff: Groningen.
- Wood Handbook: Wood as an engineering material*, (2010). Forest Products Laboratory, U.S. Department of Agriculture. Madison, WI.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
 TO REFERENCE THIS ARTICLE /
 PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Echavarría-López, B.A. y Echavarría-López, C.A. (2013). Distancias a los extremos en conexiones pernadas de madera. *Revista EIA*, 10(20), pp. 55-61. [Online] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2013.10.20.55-61>