

## Resistencia al cizalle de la madera de *Prosopis laevigata* encolada con melamina formaldehído y acetato de polivinilo

### Shear strength of *Prosopis laevigata* wood glued with melamine formaldehyde and polyvinyl acetate

Artemio Carrillo Parra<sup>1\*</sup>, Rahim Foroughbakhch<sup>2</sup>, Sadoth Sandoval Torres<sup>3</sup>, Verónica Bustamante García<sup>4</sup>, Christian Wehenkel<sup>4</sup>, Fortunato Garza Ocañas<sup>1</sup>

Carrillo Parra, A., Foroughbakhch, R., Sandoval Torres, S., Bustamante García, V., Wehenkel, C., Garza Ocañas, F. Resistencia al cizalle de la madera *Prosopis laevigata* encolada con melamina formaldehído y acetato de polivinilo. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. Número 63: 12-17, septiembre-diciembre 2014.

#### RESUMEN

La madera de *Prosopis laevigata* (Willd.) M.C. Johnst es ampliamente utilizada en México. Los muebles unidos con clavos o tornillos pueden presentar rajaduras que reducen el valor estético y la resistencia mecánica. En el presente estudio se midió la resistencia al cizallamiento por tracción (MPa) y el porcentaje de ruptura (%) de las fibras de uniones de madera para determinar si el adhesivo melamina-formaldehído (MF) es más resistente que el acetato de polivinilo (PVAc) en las condiciones de atmósfera normalizada ( $A_1$ ), húmeda ( $A_2$ ) y seca ( $A_3$ ), según la norma UNE-EN 301. La resistencia al cizallamiento presentó diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0.0001$ ) entre adhesivos y condiciones de deterioro. La madera encolada con MF presentó mayor resistencia al cizallamiento que el PVAc, excepto en la condición  $A_2$ . El desgarramiento de fibras varió de 0% a 66%.

**Palabras clave:** adhesivos, desgarre de fibra, encolado, mezquite, tracción, uso exterior.

**Keywords:** adhesives, fibers tear, glued, mezquite, strength, outdoors use.

Recibido: 6 de septiembre de 2013, aceptado: 12 de septiembre de 2014

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.

<sup>3</sup> Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional.

<sup>4</sup> Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango.

\* Autor para correspondencia: artemio.carrillopr@uanl.edu.mx

#### ABSTRACT

The wood of *Prosopis laevigata* (Willd.) M.C. Johnst is used in several industries in Mexico. When furniture is jointed with nails or screws, cracks may appear that reduce the aesthetical and mechanical strength values. The shear strength (MPa) and fiber tear (%) were determined in wood jointed with melamine formaldehyde (MF) and polyvinyl acetate (PVAc). The glued samples were submitted to environment weakening under a normalized atmosphere ( $A_1$ ), wet ( $A_2$ ) and dry ( $A_3$ ) atmosphere according to UNE-EN 301. The results of shear strength showed highly significant differences ( $p < 0.0001$ ) between adhesive and weakening conditions, with the exception of glued samples with PVAc and tested at  $A_2$  condition. The fibers tear ranged from 0% to 66%.

#### INTRODUCCIÓN

*Prosopis laevigata* es un árbol con una amplia distribución natural en las zonas áridas y semiáridas de México. Se desarrolla en forma natural desde el centro hasta el noreste del país (Alden, 1995; Juárez-Muñoz et al., 2002). Los bosques donde domina esta especie son denominados mezquitales, cuyos árboles pueden presentar alturas de 10 m y diámetros de 0.3 a 0.5 m (Meza-Sánchez y Osuna-Leal, 2003).

Las características anatómicas, químicas, físicas y mecánicas de la madera de *P. laevigata* han sido ampliamente descritas; por citar algunas, se puede señalar la diferencia en el color entre la albura y el duramen. La porosidad clasificada como semiporosa, la longitud media de la fibra de 975  $\mu\text{m}$  y la pared de la fibra con espesor de 13  $\mu\text{m}$  (Carrillo et al., 2008). El porcentaje de extractivos del duramen puede

**MATERIALES Y MÉTODOS**

alcanzar hasta 16%. La densidad a un contenido de humedad de 12% varía de 0.72 g/cm<sup>3</sup> a 0.91 g/cm<sup>3</sup>. El módulo de elasticidad en dirección perpendicular a las fibras es de 6,580 MPa a 9,669 MPa y el módulo de ruptura oscila entre 97 MPa y 126 MPa.

Como resultado de las condiciones semiáridas donde se desarrolla *P. laevigata*, presenta un crecimiento pausado e irregular del fuste, que puede ser simple o múltiple, y en muchas ocasiones es curvo. Los árboles jóvenes o sobremaduros pueden ser susceptibles al ataque de insectos u otros organismos que forman galerías, manchas y pudriciones en los fustes. Por los factores anteriormente señalados, un pequeño porcentaje del fuste puede ser utilizado para la fabricación de muebles, parquet, puertas, ventanas y mangos de herramientas. El mayor porcentaje que corresponde a las secciones dañadas es generalmente de menor calidad y se emplea para elaborar leña y carbón vegetal.

La unión de piezas de madera de *P. laevigata* para la fabricación de muebles mediante el empleo de clavos y tornillos puede propiciar la formación de rajaduras y como consecuencia la reducción de la calidad estética y la resistencia mecánica. Una alternativa para solucionar este problema es realizar las uniones con adhesivos. Según Song y Lim (2001) y Frihart y Hunt (2010), los adhesivos han jugado un papel importante en la industria de los productos forestales al ser la clave tecnológica para la elaboración de la mayoría de los productos a base de madera (Follrich et al., 2010). El uso de adhesivos en los productos con madera como base proporciona una mayor uniformidad a sus propiedades físicas y mecánicas (Vick, 1999; Kurt et al., 2003). Por otra parte, las especies de árboles de porte bajo como el caso de *P. laevigata* y los residuos de madera se pueden utilizar más eficientemente con el empleo de adhesivos (McKeever, 1997; Tout, 2000).

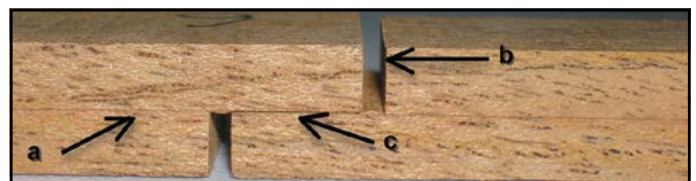
No obstante que la madera de *P. laevigata* ha sido una especie ampliamente estudiada, existen pocas investigaciones que muestren la eficacia de uniones encoladas con adhesivos comerciales, por lo que el objetivo de este estudio fue determinar si el adhesivo melamina-formaldehído (MF) es más resistente al cizallamiento y presenta mayor desgarramiento de las fibras en uniones encoladas de madera de *P. laevigata* que el acetato de polivinilo (PVAc) en diferentes condiciones de deterioro.

La madera utilizada en el presente estudio se obtuvo de áreas naturales bajo aprovechamiento forestal en Linares, Nuevo León, México. La ubicación geográfica es de 24° 42' 05" N y 99° 32' 05" O. Para la obtención de las probetas se seleccionaron al azar tres árboles con un diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 0.3 m. De cada árbol se tomó una troza de la sección comprendida entre 0.3 m y 1.3 m de altura.

Las tablas se obtuvieron del duramen y se prepararon de acuerdo a la norma UNE-EN-302-1 (2005). Las dimensiones de las probetas fueron 600 mm x 50 mm x 8 mm en las direcciones longitudinal, radial y tangencial, respectivamente; y se prepararon como se señala en la Figura 1. Se colocaron en una cámara climatizada a una atmósfera normalizada de 20 ± 2 °C y 65 ± 5% de humedad relativa (H. R.) hasta presentar peso constante. Antes de realizar el encolado, la madera fue cepillada por ambos lados hasta alcanzar un espesor de 5 mm.

**Adhesivos**

Para determinar la resistencia al cizallamiento por tracción de las uniones encoladas de la madera *P. laevigata* se utilizaron los adhesivos melamina-formaldehído (MF, Cascomin Synteko 1247 con endurecedor 2526, Casco Adhesivos, Alemania) clasificado como adhesivo estructural, de uso exterior con periodos prolongados de exposición a la humedad y al ambiente seco (Frihart y Hunt, 2010) y acetato de polivinilo (PVAc, Jowacoll D4 con 5% de endurecedor 195.35, Jowat AG, Alemania) clasificado como un adhesivo no estructural y de uso interior (Frihart y Hunt, 2010). Las características y especificaciones de uso recomendadas por los fabricantes se muestran en la Tabla 1.



**Figura 1.** Probeta elaborada para la prueba de cizallamiento de acuerdo a la norma UNE-EN-302-1 (2005). a) Línea de adhesivo; b) Corte para separar las piezas de madera; c) Superficie de contacto (4 cm<sup>2</sup>) entre las dos piezas de madera, donde es probada la resistencia del adhesivo para mantener unidas ambas piezas.

**Tabla 1.** Características y especificaciones de los adhesivos utilizados

Adhesivo	Acetato de polivinilo <sup>1</sup>	Melamina formaldehído <sup>1</sup>
Relación resina/endurecedor (partes)	100/5	100/50
Distribución (g/m <sup>2</sup> )	250	350
Tiempo para adhesión (min) <sup>2</sup>	7-10	5
Tiempo de prensado (min)	120	75
Presión (MPa)	0.5	0.7
Viscosidad de la resina (mPa) <sup>3</sup>	8,000	15,000
Densidad (g/m <sup>3</sup> )	1.04	Resina 10, endurecedor 1.7
pH	5.2	-

<sup>1</sup> Kurt et al. (2008), <sup>2</sup> minutos, <sup>3</sup> viscosidad en milipascales.

### Encolado

Las piezas de madera acondicionada y cepillada hasta 5 mm de espesor se encolaron en ambas caras de la unión con un rodillo de esponja. La tasa de distribución del adhesivo y la presión utilizada se especifican en la Tabla 1. Después del curado, las probetas se colocaron en una cámara climatizada a una atmósfera normalizada de  $20 \pm 2$  °C y  $65 \pm 5\%$  H. R., se dimensionaron a 150 mm x 20 mm y 10 mm en dirección longitudinal, radial y tangencial, respectivamente; según la norma europea UNE-EN-302-1 (2005).

### Tratamientos

Se evaluaron seis tratamientos, los cuales se obtuvieron al someter las probetas encoladas a dos tipos de adhesivos y a tres condiciones de deterioro. La Tabla 2 muestra las condiciones a las que fueron sometidas las uniones de madera encolada de *P. laevigata*.

### Resistencia al cizallamiento

Las piezas encoladas fueron sometidas a la fuerza de cizalle en una máquina universal Zwick/Roell Z100, como se muestra en la Figura 2. La fuerza aplicada fue paralela a la fibra a una velocidad constante de 2 kN/min hasta la ruptura, la resistencia al cizallamiento de las probetas de cada condición se expresó en MPa. Los valores de la resistencia al cizallamiento obtenidos se compararon con los establecidos por la norma europea UNE-EN-301 (2007), la cual establece los valores mínimos de resistencia al cizallamiento de uniones encoladas de *Fagus sylvatica* de 10 MPa para la condición normalizada ( $A_1$ ), 6 MPa para la condición húmeda ( $A_2$ ) y 8 MPa para la condición seca ( $A_3$ ). El desgarramiento de las fibras

**Tabla 2.** Condiciones de deterioro a las que fueron sometidas las uniones de madera de *P. laevigata*

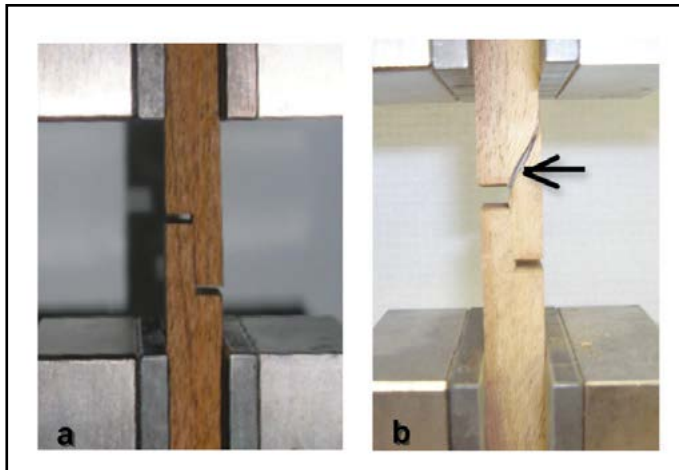
Tratamiento	Descripción
$A_1$ (Normal)	7 días en atmósfera normalizada <sup>1</sup>
	Las probetas se someten a ensayo en estado normalizado.
$A_2$ (Húmeda)	7 días en atmósfera normalizada
	4 días sumergidas en agua ( $15 \pm 5$ °C)
	Las probetas se someten a ensayo en estado húmedo.
$A_3$ (Seca)	7 días en atmósfera normalizada
	4 días sumergidas en agua ( $15 \pm 5$ °C)
	7 días en atmósfera normalizada
	Las probetas se someten a ensayo en estado normalizado.

<sup>1</sup>Atmósfera normalizada (20 °C, 65% H.R.).

se determinó en porcentaje, con valores que van desde 0% cuando no presentó desgarramiento de fibra (la falla se presentó en el adhesivo), hasta 100%, que corresponde al desgarramiento total de las fibras.

### Número de probetas y análisis estadísticos

Se utilizaron 96 probetas de madera de *P. laevigata*, de las cuales se asignaron 16 probetas a cada adhesivo y condición. Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente con el procedimiento PROC GLM del sistema estadístico. La significancia de los resultados obtenidos se determinó mediante un diseño experimental con un criterio de clasificación



**Figura 2.** a) Probeta de *Prosopis laevigata* antes de ser sometida a la prueba de cizallamiento; b) Probeta de *P. laevigata* después de ser sometida a la prueba de cizallamiento. La flecha indica el punto de ruptura.

con arreglo factorial, en donde A y B son los tipos de adhesivos (MF y PVAc) y tres condiciones de deterioro ( $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$ ). Posteriormente se realizó una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey.

## RESULTADOS

### Resistencia al cizallamiento

La resistencia al cizallamiento de las fibras de la madera de *P. laevigata* presentaron diferencias altamente significativas ( $p < 0.001$ ) entre los adhesivos, las condiciones, e interacciones (Tabla 3). Los resultados forman los grupos estadísticos A, BA y C (Tabla 4).

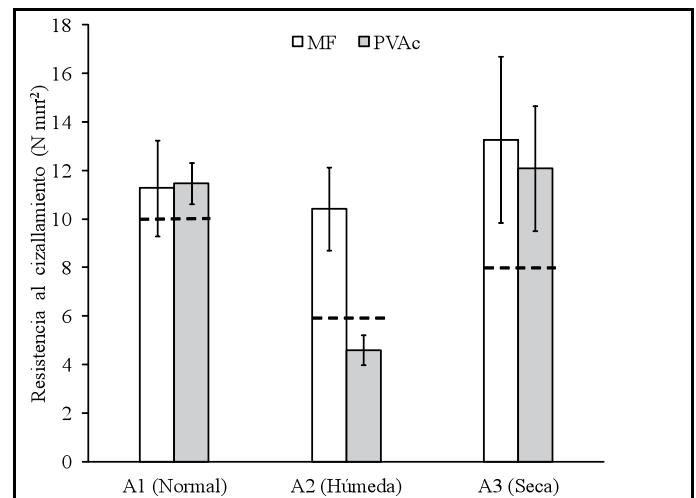
En la Figura 3 se observa que la mayor resistencia al cizallamiento se presentó en la madera encolada con MF bajo la condición seca que corresponde al grupo estadístico A. Una resistencia media se presentó en los tratamientos con MF en las condiciones normal

y húmeda y PVAc en las condiciones normal y seca que corresponden al grupo estadístico BA. La menor resistencia se obtuvo con el tratamiento PVAc en la condición humedad correspondiente al grupo estadístico C (Tabla 4).

En condiciones de humedad las uniones de madera de *P. laevigata* encoladas con MF fueron más resistentes que las encoladas con PVAc (Tabla 4). También se presentaron valores mayores de resistencia al cizallamiento en encolados con MF en comparación con PVAc en condición seca (Figura 1).

### Porcentaje de desgarramiento

El porcentaje de desgarramiento de las fibras de la madera de *P. laevigata* presentó diferencias altamente significativas ( $p < 0.001$ ) entre los adhesivos (Tabla 4). Los resultados forman los grupos



**Figura 3.** Resistencia al cizallamiento de uniones de madera de *P. laevigata* encolada con MF y PVAc en tres diferentes condiciones. Las líneas punteadas indican los valores medios mínimos aceptados por la norma UNE-EN 301 (2007).

**Tabla 3.** Análisis de la resistencia al cizallamiento y desgarramiento de la fibra en uniones de *P. laevigata* encolada con MF y PVAc sometidas a tres diferentes condiciones de deterioro,  $n=16$

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	F	p
Adhesivo (A)	124.41	1	124.41	20.72	<0.001
Condición (C)	459.75	2	229.87	38.29	<0.001
Interacción A×C	10623.43	1	10623.43	1769.30	<0.001
Error	552.40	92	6.00		

**Tabla 4.** Resistencia al cizallamiento y desgarramiento de la fibra en uniones de *P. laevigata*

Adhesivo	Condición	Resistencia al cizallamiento		Desgarramiento de fibra	
		Promedio (Mpa)	Grupo estadístico*	Promedio (%)	Grupo estadístico*
MF	A <sub>1</sub>	11.3±2**	BA	65.9±35	A
	A <sub>2</sub>	10.4±2	BA	61.6±42	A
	A <sub>3</sub>	13.3±3	A	65.6±40	A
PVAc	A <sub>1</sub>	11.5±1	BA	40.3±36	A
	A <sub>2</sub>	4.6±1	C	0.0±0	B
	A <sub>3</sub>	12.1±3	BA	60.6±41	A

\* Grupos estadísticos con diferente letra en la columna son diferentes estadísticamente.

\*\* Desviación estándar.

estadísticos A y B (Tabla 4). El mayor porcentaje de desgarramiento de las fibras para cada adhesivo en la condición normal fue de 65.9 % y de 40.3 %, respectivamente (Tabla 4), pertenecientes al grupo estadístico A. La Figura 4 muestra la superficie de desgarramiento de una probeta. El tratamiento de PVAc en condición húmeda presentó el valor de desgarramiento más bajo, el grupo estadístico B. El porcentaje de desgarramiento de las fibras en condición seca fue mayor para MF que para PVAc.

## DISCUSIÓN

Los resultados de resistencia al cizallamiento de la madera encolada con MF y PVAc sometidas a condición normal fueron 13% y 15% superiores a los mínimos establecidos por la norma UNE-EN-301 (2007) y superiores a los reportados por Carrillo et al. (2008), Carrillo et al. (2010) y Frihart y Hunt (2010) en uniones de *Fagus sp.* (7.5 MPa) y *Picea sp.* (8 MPa). Por otra parte, el valor medio de la unión de *P. laevigata* con PVAc en condición normal fue 18% inferior a lo reportado por Alamsyah et al. (2007) en uniones de madera laminada de *Acacia mangium*.

El valor medio de las uniones con MF en condición húmeda fue 74% superior al establecido por la norma UNE-EN-301 (2007). Según Frihart y Hunt (2010), la alta resistencia al cizallamiento en condición húmeda es una de las ventajas que proporciona el uso de este tipo de adhesivo. En contraste, el valor medio de resistencia al cizallamiento de la madera encolada con PVAc fue menor en un 23% a lo establecido por la norma UNE-EN-301 (2007). Según Zhao et al.

(2011), uniones encoladas con PVAc presentan baja resistencia e inestabilidad mecánica al ser expuestas a la humedad y al calor.

Por otra parte, los valores de resistencia al cizallamiento de MF y PVAc en condición seca fueron 74% y 51% superiores a los establecidos por la norma UNE-EN-301 (2007). En un ensayo para determinar el efecto de impregnadores de la madera de *Fagus sylvatica*, Kurt et al. (2008) reportaron un valor medio de 7.73 MPa para las probetas testigo encoladas con PVAc. Los valores relativamente altos de resistencia al cizallamiento de la madera de *P. laevigata* pueden ser resultado de algunos factores físicos de la madera como la alta densidad (0.7 g/cm<sup>3</sup> a 0.91 g/cm<sup>3</sup>), porosidad semianular y difusa que puede facilitar la penetración del adhesivo durante el proceso de encolado al aumentar la superficie de contacto entre el adhesivo y la madera.

Los porcentajes de desgarramiento fueron inferiores en todos los tratamientos a lo reportado por Alamsyah et al. (2007) en madera de *A. mangium*, cuyo valor fue de 100%. El alto porcentaje de desgarramiento para esta especie fue relacionada



**Figura 4.** Secciones de la probeta de *P. laevigata* después de la prueba de cizallamiento. La flecha señala la sección de la madera que sufrió el desgarramiento de las fibras.

por estos autores con la densidad y la facilidad de absorción del pegamento.

## CONCLUSIONES

La madera de *Prosopis laevigata* puede ser unida en forma exitosa con los adhesivos melamina-formaldehído y acetato de polivinilo. Las uniones con estos adhesivos presentan valores de resistencia

al cizallamiento superiores a los mínimos establecidos por la norma europea UNE-EN-301 (2007) en las condiciones normal y seca. La madera encolada de *Prosopis laevigata* puede ser utilizada de forma eficiente en condición húmeda sólo si se emplea el adhesivo melamina-formaldehído, el adhesivo acetato de polivinilo en condición húmeda no superó el valor establecido por la norma.

## LITERATURA CITADA

- ALAMSYAH, E. et al. Bondability of Tropical Fast-growing Tree Species I: Indonesian Wood Species. *Journal of Wood Science*, 53(1): 41-45, 2007.
- ALDEN, H. *Hardwoods of North America*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-83. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 136 pp., 1995.
- CARRILLO, A. et al. Wood Anatomical Characteristics and Chemical Composition of *Prosopis laevigata* Grown in the Northeast of Mexico. *IAWA Journal*, 29(1): 25-32, 2008.
- FOLLRICH, J. et al. Bond Strength of End-grain Joints and its Dependence on Surface Roughness and Adhesive Spread. *Journal of Wood Science*, 56(5): 429-434, 2010.
- FRIHART, C. R. y HUNT, C. G. Adhesives with Wood Materials Bond Formation and Performance. Chapter 10. En *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-190 (pp. 10-1-10-24). Madison, WI: USDA, Forest Serv., Forest Products Laboratory, 2010.
- JUÁREZ-MUÑOZ, J. et al. Inter- and Intra-genetic Variation of Four Wild Populations of *Prosopis* Using RAPD-PCR Fingerprints. *Biodiversity and Conservation*, 11: 921-930, 2002.
- KURT, R. et al. Hydroxymethylated Resorcinol (HMR) Priming Agent for Improved Bondability of Wax-treated Wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 66(5): 335-338, 2008.
- KURT, R. et al. The Introduction of Engineered Wood Products (EWPs) for the Earthquake Resistant Building Construction in Turkey. *Fifth National Conference on Earthquake Engineering*. Istanbul, Turkey. 012, 26-30 May. 2003.
- MCKEEVER, D. B. Engineered Wood Products: a Response to the Changing Timber Resource. *Pacific Rim Wood Market Report*, 5(15), 1997.
- MEZA-SÁNCHEZ, R. y OSUNA-LEAL, E. *Estudio dasométrico de mezquite en la zona de las pocitas, B.C.S.* Vol. 3. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 52, 2003.
- SONG, J. y LIM, J. Bonding Strength in Structural Adhesive Bonded Joint. *Metals and Materials International*, 7(5): 469-470, 2001.
- TOUT, R. A Review for Adhesives for Furniture. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(4): 269-272, 2000.
- UNE-EN-301, Adhesivos fenólicos y aminoplásticos para estructuras de madera bajo carga. Clasificación y requisitos de comportamiento. 2007.
- UNE-EN-302-1, Adhesivos para madera de uso estructural. Parte 1: Determinación de la resistencia de la unión al cizallamiento por tracción longitudinal. 2005.
- VICK, C. Adhesive Bonding of Wood Materials. En *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. General Technical Report (pp. 1-24). Forest Service, 1999.
- ZHAO, L. F. et al. State of Research and Trends in Development of Wood Adhesives. *Forestry Studies in China*, 13(4): 321-324, 2011.