

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UNIONES DENTADAS FINGER-JOINT CON MADERA DE *EUCALYPTUS GRANDIS* DE PROCEDENCIA URUGUAYA

STRENGTH EVALUATION OF FINGER-JOINT MADE OF URUGUAYAN *EUCALYPTUS GRANDIS* TIMBER

Abel Vega ⁽¹⁾, Vanesa Baño ⁽¹⁾ (P), Carolina Pérez Gomar ⁽²⁾, Andrea Cardoso ⁽³⁾, Daniel Godoy ⁽⁴⁾, Hugo O'Neill ⁽³⁾, Laura Moya ⁽²⁾

(1) Departamento de Estructuras. Instituto de Estructuras y Transporte. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

(2) Facultad de Arquitectura. Universidad ORT Uruguay. Montevideo, Uruguay

(3) Departamento de proyectos forestales, Laboratorio Tecnológico del Uruguay

(4) Instituto de Ensayos de Materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay

Dirección de contacto: avcueto@fing.edu.uy; (P) Presentadora

Código de identificación: T4-24

Resumen

El comportamiento de las uniones dentadas es un aspecto clave para las propiedades resistentes de la madera laminada encolada. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la resistencia estructural en uniones *finger-joint* de madera de *Eucalyptus grandis* de origen uruguayo, destinadas a la fabricación de madera laminada encolada estructural. Fueron fabricadas 140 uniones *finger-joint* con dos adhesivos diferentes: 80 con PUR (monocomponente de poliuretano) y 60 con EPI (polímero en emulsión de isocianato). Las uniones fueron ensayadas a flexión de acuerdo a la norma EN 408, obteniéndose las propiedades de resistencia y rigidez. Los valores de la resistencia característica (f_{05} entre 44 y 47 N/mm² en uniones fabricadas cumpliendo los requisitos de la norma EN 14080) concuerdan con los reportados en la literatura para la especie. Adicionalmente, los modos de fallo y los porcentajes de rotura por madera y adhesivo fueron analizados con el objetivo de evaluar la calidad de la unión. Estos resultados son una primera aproximación sobre el comportamiento estructural de las uniones *finger-joint* de madera de *Eucalyptus grandis*, y constituyen un punto de partida para la normalización del proceso de fabricación de madera laminada encolada estructural en Uruguay.

Palabras clave: madera laminada encolada; *Eucalyptus grandis*; finger-joint; resistencia a flexión

Abstract

Strength behavior of finger-joint is an important parameter in structural glue-laminated timber properties. The objective of this work was to evaluate the strength of finger-joints made from Uruguayan Eucalyptus grandis timber, intended for glue-laminated timber manufacturing. 140 samples of finger joint were manufactured with two adhesives: PUR (monocomponent polyurethane) and EPI (isocyanate emulsion polymer). Finger-joints samples were tested in bending according to EN 408, and characteristic values (f_{05}) of bending strength between 44 and 47 N/mm² were obtained. Additionally, failure mode of finger-joints was evaluated in order to study adhesive performance. Results from this study represent a first approximation to the structural behavior of Uruguayan Eucalyptus grandis finger-joint, and an initial step towards standardization of manufacturing process for structural glue-laminated timber in Uruguay.

Keywords: glue-laminated timber; *Eucalyptus grandis*; finger-joint; bending strength

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de fabricación de madera laminada encolada para uso estructural está definido por una serie de requisitos determinantes en la calidad final del producto. De este modo, existe una serie de parámetros clave con influencia directa en las características resistentes de la madera laminada; uno de los más relevantes es la unión dentada o *finger-joint*.

La EN 14080 [1] define ciertos requisitos en relación a las uniones dentadas. Parámetros como la geometría del diente o la presión en el ensamblaje están específicamente señalados en dicha norma y deben cumplirse para optimizar el comportamiento resistente de la unión. Sin embargo, existen múltiples incógnitas o variables menos conocidas cuya relevancia en la capacidad estructural final de la unión no puede despreciarse. Factores tales como contenido de humedad y temperatura, comportamiento del adhesivo, geometría del diente, presión aplicada, etc. y su influencia en la aptitud de las uniones dentadas y de la madera laminada, cuentan con antecedentes relevantes, especialmente en madera de coníferas [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Actualmente existen en el mercado diversos tipos de adhesivos para madera laminada calificados normativamente como válidos para uso estructural, con diferencias notables entre ellos en cuanto a su composición. Adhesivos basados en melamina urea formaldehído, resorcinol, isocianatos o poliuretanos se encuentran en mayor o menor medida extendidos dentro del mercado de madera laminada estructural. Por otro lado, la madera de coníferas (pino o picea especialmente) es empleada en la gran mayoría de la madera laminada encolada fabricada a nivel mundial, pero existen alternativas de productos con madera de otras especies (frondosas) cuya importancia es creciente especialmente en los últimos años. Concretamente, en relación a la madera laminada encolada de *Eucalyptus grandis* existen recientes trabajos de caracterización en Argentina [10] y Brasil [11]. Esta diversidad de adhesivos y nuevas especies empleadas en la fabricación de madera laminada encolada hace que sea necesario estudiar la interacción adhesivo/especie, aspecto fundamental y que se queda fuera del marco de fabricación definido en la EN 14080.

El objetivo del presente trabajo es la evaluación de la resistencia de uniones dentadas de madera de *Eucalyptus grandis* de procedencia uruguaya, fabricadas bajo distintas condiciones y con dos tipos de adhesivo, uno de isocianato y otro poliuretánico.

2. METODOLOGÍA

2.1 Madera y adhesivos

En el presente trabajo fue empleada madera de *Eucalyptus grandis* de procedencia uruguaya. Previamente a la fabricación de las uniones dentadas, la madera fue acondicionada hasta contenido de humedad constante con una diferencia entre tablas no superior al 4%, tal y como se exige en EN 14080. Fueron empleados dos adhesivos estructurales: isocianato bicomponente (EPI) y poliuretano monocomponente (PUR).

2.2 Fabricación de las uniones dentadas

Las uniones dentadas fueron fabricadas siguiendo dos procedimientos. Por un lado fueron fabricadas uniones según el procedimiento habitual de dos empresas productoras de madera laminada encolada de Uruguay. El proceso seguido en estas empresas no estuvo estrictamente ceñido a los requisitos de EN 14080 en cuanto a condiciones de temperatura y humedad ambiental, geometría del diente, presiones de ensamblaje, etc. Por otro lado, se fabricaron uniones dentadas en el laboratorio de Proyectos forestales del LATU, siguiendo todos los requisitos definidos en la normativa, siendo comprobada visualmente la aplicación del adhesivo sobre toda la superficie del dentado, según se especifica en la norma, y aplicando una presión de 10 N/mm². En todos los casos

(fabricación en empresa o en laboratorio) el tipo de madera y los adhesivos empleados fueron iguales.

Tabla 1: Parámetros geométricos de las uniones dentadas

Laboratorio	l_j	Longitud de diente	15 mm
	p	Paso	4 mm
	b_t	Anchura de diente	0,5 mm
Empresa	l_j	Longitud de diente	12 mm
	p	Paso	3 mm
	b_t	Anchura de diente	0,35 mm

La tabla 2 muestra el número de uniones dentadas (n) fabricadas en cada grupo.

Tabla 2: Número de uniones dentadas por tipo de fabricación y adhesivo

Adhesivo	EPI		PUR		Control (sin finger)
	Empresa	Laboratorio	Empresa	Laboratorio	Laboratorio
Fabricación					
n	20	40	20	60	20
Sección (mm²)	90x25	70x22	90x25	70x22	70x22
Longitud del diente (mm)	12	15	12	15	-
CH medio (%)	12.65	9.12	11.18	9.09	11.02

2.3 Ensayos mecánicos de flexión

Sobre todas las uniones dentadas fueron realizados ensayos a flexión de cara de acuerdo a EN 408 [12] (figura 1). Los ensayos fueron realizados en una máquina de ensayos universal modelo *Minebea* de 50 kN de carga máxima (figura 2).

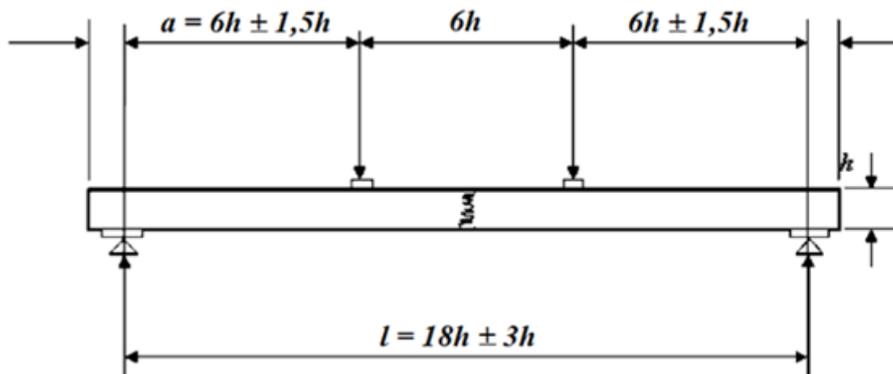


Figura 1: Configuración de ensayo a flexión para uniones dentadas (EN 408)



Figura 2: Ensayo a flexión de las uniones dentadas con máquina de ensayos universal *Minebea*

A partir de la carga máxima de rotura (F_{max}) obtenida en los ensayos, fue calculada la resistencia a flexión según la ecuación (1) (EN 408).

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

Además del valor de resistencia a flexión, fue evaluado el modo de fallo de las uniones dentadas. Para ello, fueron establecidas 3 categorías de fallo: Modo 1 cuando el fallo se produjo 100% por madera, Modo 2 cuando el fallo fue mixto entre madera y línea de adhesivo y Modo 3 cuando el fallo se produjo 100% por línea de adhesivo. La figura 3 muestra los tres tipos de fallo.



Figura 3: Modos de fallo de las uniones dentadas: Modo 1 Madera (izquierda), Modo 2 Mixto (centro) y Modo 3 Adhesivo (derecha)

El modo de fallo 1 es considerado como el más deseable, e indica que el adhesivo cuenta con una capacidad resistente mayor a la de la madera. Por otro lado, el modo de fallo 2 y, especialmente, el modo de fallo 3 indican un comportamiento deficiente del adhesivo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 3 se muestran los resultados de resistencia a flexión obtenidos a partir de los ensayos sobre las uniones dentadas.

Tabla 3: Valor medio (f_m), quinto percentil (f_{05}) de la resistencia a flexión y densidad media (ρ_m) de las uniones dentadas por tipo de adhesivo y condiciones de fabricación

	Adhesivo EPI		
	f_m (N/mm ²)	f_{05} (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)
Empresa	52.79 ^(a)	37.49	557
Laboratorio	59.96 ^(b)	47.40	524
	Adhesivo PUR		
Empresa	64.50 ^(a)	45.00	513
Laboratorio	65.47 ^(a)	43.59	546
	Control (láminas sin finger-joint)		
Laboratorio	91.88	64.85	556

Diferentes letras indican diferencias significativas al 95%

Tal y como era esperable, la resistencia de las muestras control sin uniones dentadas (tanto el valor medio como el 5° percentil) fue claramente superior a las láminas con uniones dentadas, tanto con EPI como con PUR). Dentro de las muestras con finger-joint, se observa que los valores de resistencia a flexión (tanto los medios como el quintos percentil) fueron superiores en las uniones fabricadas con PUR en relación a las fabricadas con EPI. Al comparar los resultados obtenidos en función de las condiciones de fabricación, se observan valores medios significativamente más altos en aquellas probetas con EPI ensambladas en laboratorio que las fabricadas en la empresa. En las uniones con PUR también se observa un mayor valor medio en condiciones de laboratorio, aunque las diferencias no resultaron significativas. La tabla 4 muestra el porcentaje de uniones con rotura en cada modo de fallo.

Tabla 4: Porcentaje de uniones por cada modo de fallo, para cada tipo de adhesivo y condición de fabricación

Condiciones de fabricación	Porcentaje de cada tipo de fallo			
	Adhesivo EPI		Adhesivo PUR	
	Empresa	Laboratorio	Empresa	Laboratorio
Modo 1 Madera	25 %	30 %	40 %	48 %
Modo 2 Mixto	30 %	40 %	25 %	27 %
Modo 3 Adhesivo	45 %	30 %	35 %	25 %

Se observa que el modo de fallo 1 (fallo por madera), aumenta ligeramente bajo condiciones de fabricación controladas en laboratorio, para ambos tipos de adhesivo. Del mismo modo, el porcentaje de fallo por adhesivo desciende con respecto a las uniones fabricadas en las empresas. A pesar de ello, aún los mejores resultados no resultan en un comportamiento óptimo de la unión. Considerando uniones con PUR y condiciones controladas en laboratorio, se observa un porcentaje de fallo por adhesivo del 25% y mixto del 27%, resultando en conjunto más del 50% del total de las probetas del grupo.

Los resultados de resistencia a flexión de las uniones dentadas en función del modo de fallo, tipo de adhesivo y fabricación se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Valores medios de resistencia a flexión por modo de fallo, adhesivo y condiciones de fabricación

	Resistencia a flexión media (f_m) (N/mm ²)			
	Adhesivo EPI		Adhesivo PUR	
	Empresa	Laboratorio	Empresa	Laboratorio
Madera	50.26 ^(a)	55.01 ^(a)	59.25 ^(a)	57.92 ^(a)
Mixto	49.90 ^(a)	59.60 ^(a)	64.60 ^{(a)(b)}	68.07 ^(b)
Adhesivo	56.12 ^(a)	65.38 ^(b)	70.43 ^(c)	77.30 ^(c)

Se observa cómo para todas las combinaciones (adhesivo y condiciones de fabricación), los valores medios de resistencia a flexión son superiores en aquellas muestras con modo de fallo 3 (adhesivo) (figura 4). Por consiguiente, los menores valores de f_m fueron observados, para ambos adhesivos y condiciones de fabricación, en los grupos de uniones dentadas con modo de fallo 1 (rotura 100% por madera). Este comportamiento, en un principio contradictorio con la idea de que el modo de fallo ideal y esperable es el 1 (rotura 100% por madera), puede tener su explicación en las propiedades intrínsecas de la madera. Aquellas probetas con madera de menor resistencia rompieron con un modo de fallo 1, mientras que en probetas con una resistencia de la madera mayor, la resistencia de la línea de adhesivo resultó ser el factor limitante de la unión.

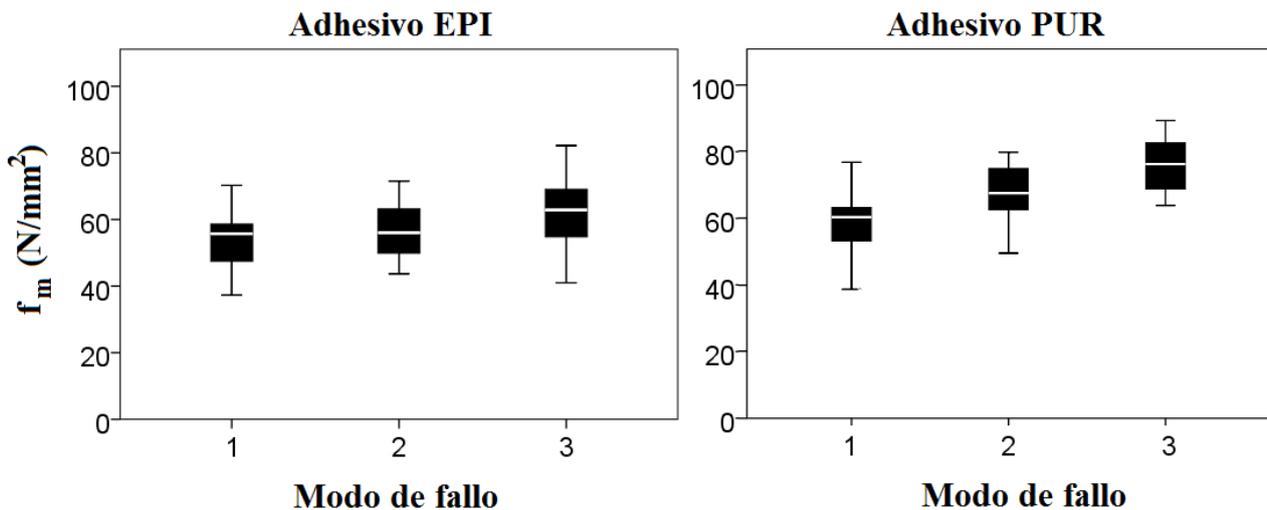


Figura 4: Resistencia a flexión por modo de fallo

4. CONCLUSIONES

En este trabajo fue analizada la resistencia a flexión de un total de 140 uniones dentadas *finger-joint* de madera de *Eucalyptus grandis* uruguayo, empleando dos adhesivos (PUR y EPI) y dos condiciones de fabricación diferentes (condiciones en empresa y condiciones controladas en laboratorio cumpliendo los requisitos de EN 14080).

Las uniones dentadas con adhesivo PUR mostraron valores de resistencia (65 N/mm^2) mayores que los de las uniones con adhesivo EPI ($53\text{-}60 \text{ N/mm}^2$). Por otro lado, tanto para adhesivo PUR como EPI, las uniones dentadas fabricadas bajo condiciones controladas cumpliendo los requisitos de EN 14080 y con longitud de diente de 15 mm presentaron valores de resistencia a flexión mayores que los de las uniones fabricadas en empresas sin control exhaustivo de las condiciones y con longitud de diente de 12 mm.

Las uniones dentadas fabricadas bajo condiciones controladas presentaron, además, un menor porcentaje de fallo por adhesivo. A pesar de ello, el porcentaje de fallo por adhesivo obtenido en el mejor grupo (uniones con adhesivo PUR en condiciones controladas) fue de 25%, demasiado alto para ser considerado aceptable. Por ello, el comportamiento de las uniones dentadas con madera de *Eucalyptus grandis* para madera laminada encolada estructural deberá continuar siendo estudiado, mediante la aplicación de nuevos adhesivos y de condiciones de fabricación, y así poder optimizar su aptitud estructural.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por su financiación a través del programa INNOVAGRO 2013, con el número de proyecto FSA_1_2013_1_12897.

REFERENCIAS

- [1] EN 14080. 'Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber-Requirements'. CEN/TC 124. 2013
- [2] Raknes, E. 'The influence of production conditions on the strength of finger-joints'. Proceedings of Production, Marketing and use of Finger-jointed Sawn wood. C.F.L. Prins, ed. Timber Committee of the United Nations Economic Commission for Europe. Martinus Nijhof/Dr. W. Junk Publishers. The Hague, Boston, London. pp.154-168. 1980
- [3] St-Pierre, B., Beaugard, R., Mohammad, M., Bustos, C. 'Effect of moisture content and temperature on the tension strength of finger jointed black spruce lumber'. Forest Prod. J. 55(12): 9-16. 2005
- [4] Bustos, C., Mohammad, M., Hernández, R.E., Beaugard, R. 'Effects of curing time and end-pressure on the tensile strength of finger-jointed black spruce lumber'. Forest Prod. J. 53 (11-12): 85-89. 2005
- [5] Özçifçi A, Yapıcı F. 'Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations'. Constr. Build. Mater. 22:1543–1550. 2008
- [6] Ayarkwa, J., Hirashima, Y., Sasaki, Y. 'Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of Finger-jointed tropical African hardwoods'. Forest Prod. J. 50 (11-12): 53-63. 2000
- [7] Vrazel, M., Sellers Jr., T. 'The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger joint'. Forest Products Journal 54 (3): 66-75. 2004
- [8] Vassiliou, V., Barboutis, I., Karastergiou, S. 'Effect of PVAc bonding on finger-joint strength of steamed and unsteamed beech wood (*Fagus sylvatica*)'. J Appl Polym Sci 103: 1664-1669. 2007
- [9] Volkmer, T., Lorenz, T., Hass, P., Niemz, P. 'Influence of heat pressure steaming (HPS. 249-259.) on the mechanical and physical properties of common oak Wood'. European J Wood Wood Prod 72(2). 2014
- [10] Piter, J. C., Cotrina, A. D., Sosa, M. A., Stefani, P.M., Torrán, E. A. 'Determination of characteristic strength and stiffness values in glued laminated beams of Argentinean *Eucalyptus grandis* according to European standards'. Holz Roh- Werkst 65: 261-266. 2007
- [11] Bourscheid, C., Terezo, R., Stüp, A.; Vanzella, D. 'Desempenho mecânico de madeira laminada colada de *Eucalyptus* spp'. II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, Belo Horizonte (Brasil). 2015
- [12] EN 408. 'Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties'. CEN/TC 124. 2010