

EMPLEO DE BIOADHESIVO PARA LA ELABORACIÓN DE MADERA MICROLAMINADA: FABRICACIÓN Y PROPIEDADES MECÁNICAS

USE OF BIO-ADHESIVE IN THE MANUFACTURE OF LAMINATED VENEER LUMBER: PRODUCTION AND MECHANICAL PROPERTIES

Ana Cruz-Valdivieso^{*(1)}, Francisco J. Rescalvo⁽¹⁾, Yaiza Fuentes-García⁽¹⁾, Carlos Cruz⁽¹⁾, Javier Lafuente⁽¹⁾,
Lois Denaud⁽²⁾, Antolino Gallego⁽¹⁾

¹ UIMA-Universidad de Granada, Carretera de Málaga, 172, 18015, Granada, España [*anacru@ugr.es](mailto:anacru@ugr.es)

² LaBoMaP, Arts Et Metiers Institute of Technology, HESAM Université, 71250 Cluny, Francia

RESUMEN

En este trabajo se recogen los resultados de fabricación y propiedades mecánicas a compresión y flexión de nuevos paneles de madera microlaminada estructural 100% ecológica hecha de chapa de chopo y adhesivo biológico y libre de formaldehídos procedente de la lignina de eucalipto. Se recoge un estudio de fabricación así como resultados sobre su comportamiento mecánico, demostrando que la lignina tiene capacidades adherentes notables con un control exhaustivo de la humedad. La reducción de la polaridad permitirá su uso a nivel estructural.

Palabras clave: bioadhesivo, lignina, compresión, flexión, LVL

ABSTRACT

This work presents the manufacturing process and the mechanical properties in compression and bending of new structural laminated veneer lumber (LVL) panels, made from poplar veneer and a 100% ecological, formaldehyde-free bio-adhesive derived from eucalyptus lignin. The study includes both the manufacturing process and the mechanical performance results, showing that lignin exhibits remarkable adhesive capacity when moisture is strictly controlled. Reducing its polarity will enable its use for structural applications.

Keywords: bio-adhesive, lignin, compression, bending, LVL

1. INTRODUCCIÓN

Según Architecture2030.org (<https://www.architecture2030.org>), los edificios generan alrededor del 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero. A diferencia del resto de materiales, la madera absorbe CO₂ para producir oxígeno, quedándose almacenado durante la vida útil del producto. A grandes rasgos, se diferencian dos grupos de productos de madera técnica: basados en madera aserrada y en chapa. Del primero se desarrollan productos como la madera laminada (GLT) o contralaminada (CLT). Del segundo, productos como la madera microlaminada (LVL).

El CLT ha permitido dar el salto en altura a la edificación con madera, pero con un crecimiento del 300% anual, ejerce presión sobre el recurso maderero. Por ello, el uso de especies de rápido crecimiento pueden permitir reducir dicha presión y valorizar esta madera. El LVL es un producto de alta resistencia con el mayor consumo de adhesivo para su elaboración (6% en peso frente al 3,5% de la madera laminada) (Hemmilä et al., 2017). Por ello, en este trabajo se estudia el uso de un bioadhesivo que sustituya el adhesivo químico empleado actualmente (Winandy & Morrell, 2027) (Hass et al., 2012). En concreto, un adhesivo desarrollado en colaboración con la empresa Betanzos HB, mezclando lignina de eucalipto y agua. En este trabajo se presentan los resultados de fabricación y propiedades mecánicas a compresión y flexión (plana y de canto).

Se observa que la lignina es altamente dependiente del contenido de humedad, aspecto clave para la evaluación de resultados.

2. METODOLOGÍA

2.1 Chapa de chopo

Para la elaboración de los paneles microlaminados, se empleó madera de chopo del clon I-214 de la Vega de Granada, comúnmente utilizado en la industria del contrachapado. Toda la madera se extrajo de la misma plantación, desenrollándose con un espesor de chapa de 2,8 mm y un largo de 900 mm. El desenrollo fue llevado a cabo en el laboratorio del grupo de LaBoMaP en la universidad de Arts et Métiers – Sciences et Technologies en Cluny (Francia). Toda la chapa fue secada en una cámara de secado bajo control de temperatura y humedad. Posteriormente se envió a la Unidad de Ingeniería de la Madera de Andalucía en Granada (España), donde se lleva a cabo la elaboración de paneles de madera microlaminada.

2.2 Bioadhesivo

El bioadhesivo empleado en la elaboración de paneles 100% ecológicos proviene de un residuo de la empresa Betanzos HB, la lignina. La lignina es un polímero orgánico que forma parte de la pared celular del tejido vascular de las plantas y las provee de rigidez estructural. Durante la evolución de estos organismos, la lignina fue la promotora de que las plantas alcanzaran altura, alejándose del suelo. Deja por tanto patente su importancia a nivel estructural y de adherencia en plantas y árboles.

Durante el proceso de densificación de sus tableros de eucalipto, se produce un excedente de lignina, la cual actualmente carece de valor comercial. Por ello, mezclando lignina con agua en ciertas proporciones se puede obtener un compuesto viscoso que puede ser aplicado como adhesivo 100% natural.

2.3 Adhesivo químico

Como adhesivo de control, se ha empleado un adhesivo químico de poliuretano estructural. En concreto, se ha usado el adhesivo PURBOND HB S709 de Loctite®. El rendimiento empleado ha sido de 180 g/m².

2.4 Elaboración de paneles microlaminados

La lignina ha presentado dos retos fundamentales en la elaboración de paneles microlaminados: 1) la variación de su viscosidad con respecto de su temperatura; 2) alta dependencia de la humedad de la lignina. Respecto de 1), se ha llevado a cabo un control exhaustivo de la temperatura del adhesivo en la elaboración de paneles mediante un baño termostático (Figura 1). Respecto de 2) se ha llevado a cabo un estudio detallado de la relación entre humedad de la lignina y capacidad adherente tanto durante el estudio de fabricación de paneles, así como en su relación con las propiedades mecánicas que se incluyen en el presente trabajo.

Teniendo en cuenta lo anterior, el trabajo se divide en dos fases: Fase 1) Fabricación y ensayos a compresión: Determinación de rendimiento y humedad óptima; Fase 2) Ensayos de línea de cola y flexión.

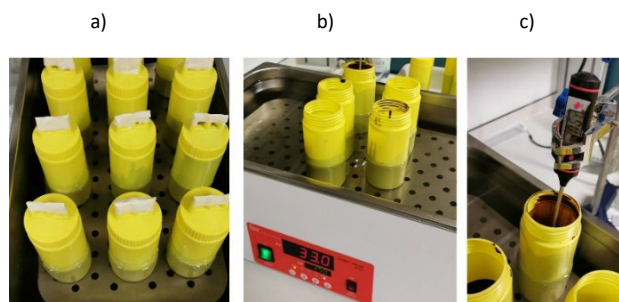


Figura 1. Control de temperatura de aplicación de la lignina mediante un baño termostático. a) Dosificadores de lignina: b) control de la temperatura del agua: c) control con termómetro digital de la temperatura real de la lignina.

Respecto de la Fase 1, la elaboración empleando lignina ha incluido los siguientes aspectos: 1) Trabajabilidad y aplicabilidad; 2) rendimiento o consumo (g/m^2); 3) tiempo de prensado; 4) temperatura de prensado; 5) tiempo de curado; y 6) consumo energético.

Para ambos adhesivos, se han elaborado paneles de 15 capas con un espesor total de 42 mm. Las dimensiones de panel han sido de 260 mm de ancho y 1100 mm de largo. Para el prensado se ha empleado una prensa de platos calientes de 6 cilindros ORMA MACHINE® NPC. De estos paneles se extrajeron probetas de compresión en dirección de la fibra de sección 42 x 42 mm y una longitud de 250 mm, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 408:2011. A efectos de comparativa y control, se elaboraron 2 paneles empleando el adhesivo tradicional de poliuretano (PUR) de la marca LOCTITE HB S709 PURBOND, extrayendo probetas de la misma dimensión que para el caso de la lignina.

Una vez se determinó la humedad y el rendimiento óptimo, para la Fase 2 se elaboraron 8 paneles, 4 empleando el adhesivo tradicional de poliuretano (PUR) y 4 empleando el bioadhesivo en base lignina (LIG) suministrado por la empresa Betanzos HB. En el caso del adhesivo PUR, se aplicó según indicaciones del fabricante con un rendimiento de 180 kg/m^2 . En el caso de la lignina, basándose en estudios previos del grupo de investigación UIMA, se aplicó con un rendimiento de 500 g/m^2 y una temperatura de aplicación del adhesivo de 30°C . En ambos casos, se aseguró que el tiempo de curado fuera suficiente para que el contenido de humedad del panel fuera inferior al 16%.

En el caso de las vigas a flexión, es necesario evaluar las diferentes propiedades mecánicas en dos direcciones de sección: viga plana o flatwise (FW-chapas horizontales) y viga de canto o edgewise (EW-chapas verticales). Se estableció una dimensión de viga de $52 \times 52 \text{ mm}^2$ en sección y una longitud de 1040 mm. De cada panel se extrajeron 5 vigas, siendo ensayadas en FW o EW de forma alterna con el fin de evitar posibles efectos locales del panel en los resultados mecánicos.

2.5 Ensayos mecánicos

En ambos casos, los ensayos mecánicos se llevaron a cabo utilizando una máquina de ensayos universal del fabricante MICROTTEST®, modelo EM2/200, equipada con un actuador eléctrico con capacidad máxima de 200 kN. Para el ensayo de compresión, se estableció un control de posición con una velocidad de $0,7 \text{ mm/min}$.

En el caso de las vigas a flexión a 4 puntos, en primer lugar, se realizaron ensayos no destructivos empleando el método de resonancia (Rescalvo et al., 2020), obteniendo el módulo de elasticidad dinámico (MoE_{din}) y posteriormente ensayos a flexión a 4 puntos (Figura 2-b) según la norma UNE-EN 408:2011 para obtener la tensión máxima de rotura y el módulo de elasticidad estático (MoE_{est}). El ensayo se llevó a cabo por control de posición con una velocidad de 9 mm/min .

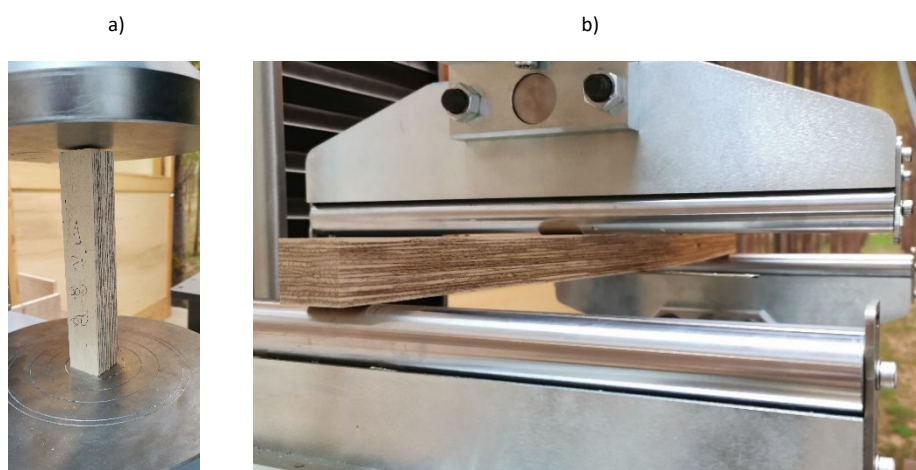


Figura 2. Imagen de ensayos en máquina multiensayos. a) Ensayo a compresión con bioadhesivo. b) Ensayo a flexión a 4 puntos en posición plana o FW con bioadhesivo

3. RESULTADOS

En primer lugar, se presentan los resultados de la Fase 1. En concreto, el estudio de calidad del proceso de elaboración para el cual se han estudiado los parámetros descritos en el Apartado 2.4. La Figura 3 muestra el análisis de contenido de humedad sobre un panel con los parámetros de fabricación descritos en la Tabla 1. Además, se recoge un ejemplo de fabricación con adhesivo tradicional.

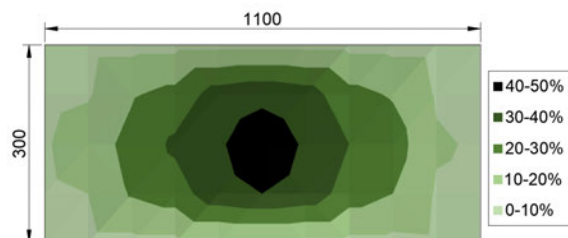


Figura 3. Valores de humedad del panel descrito en la Tabla 1 (1 día de curado). Medidas tomadas cada 100 mm en largo y ancho y en el centro de la sección. Dimensiones en mm

Tabla 1. Parámetros de fabricación de un panel con lignina frente al adhesivo tradicional

Tipo de adhesivo	Número de capas	Consumo (g/m ²)	Temperatura de aplicación (°C)	Temperatura de prensado (°C)	Tiempo de prensado (h)	Tiempo de curado (días)
Lignina	15	700	35	105	48	1
Tradicional	15	200	T. ambiente	T. ambiente	4	1

Se ha comprobado que la lignina adquiere capacidad adherente por debajo del 18% de humedad. La Figura 3 muestra sin lugar a dudas como únicamente las partes externas del panel se encuentran bajo dicho valor. Esto conlleva a una deslaminación del panel durante su mecanizado. Este estudio ha permitido establecer el tiempo de curado óptimo para que todo el panel se encuentre por debajo del citado 18% de humedad.

Por último, en la Fase 1, la Figura 4 muestra los resultados de resistencia a compresión de madera microlaminada elaborada con adhesivo de poliuretano y con lignina a diferentes contenidos de humedad (siempre por debajo del 18%). En el caso de la lignina, se observa una excelente relación entre humedad y resistencia, alcanzado valores medios similares al adhesivo tradicional cuando su contenido de humedad se encuentra por debajo del 12%.

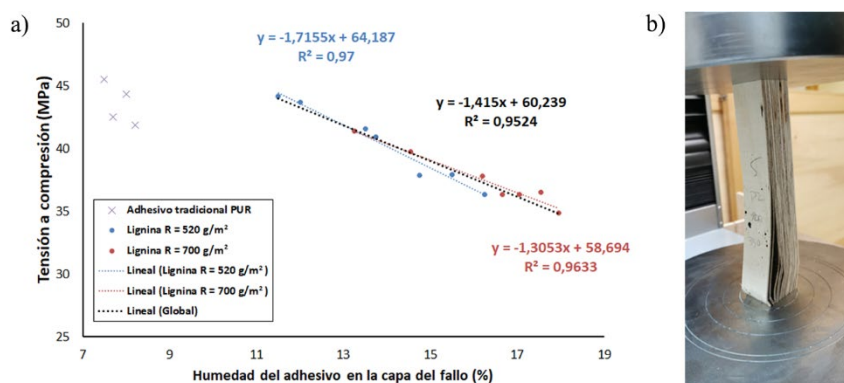


Figura 4. a) Resistencia a compresión frente al contenido de humedad del adhesivo en la capa de fallo. b) ejemplo de fallo a compresión

La Tabla 2 presenta los valores promedio y desviación estándar de las diferentes propiedades obtenidas. En este caso y según los resultados previos, se aseguró que el contenido de humedad de la línea de cola se encontrara por debajo del 18%. La Figura 5 muestra la relación carga-desplazamiento para los distintos casos.

Tabla 2. Nomenclatura y principales propiedades obtenidas. Valores promedio $\pm$ desviación estándar.

Nomenclatura	Humedad [%]	Tensión máx. [Mpa]	MoE _{din} [Mpa]	MoE _{est} [Mpa]
PUR-FW	8 $\pm$ 3	68 $\pm$ 6	9562 $\pm$ 218	9506 $\pm$ 617
LIG-FW	14 $\pm$ 3	40 $\pm$ 7	11345 $\pm$ 350	10369 $\pm$ 455
PUR-EW	9 $\pm$ 2	69 $\pm$ 5	9551 $\pm$ 300	9635 $\pm$ 494
LIG-EW	11 $\pm$ 3	56 $\pm$ 8	10879 $\pm$ 485	9868 $\pm$ 787

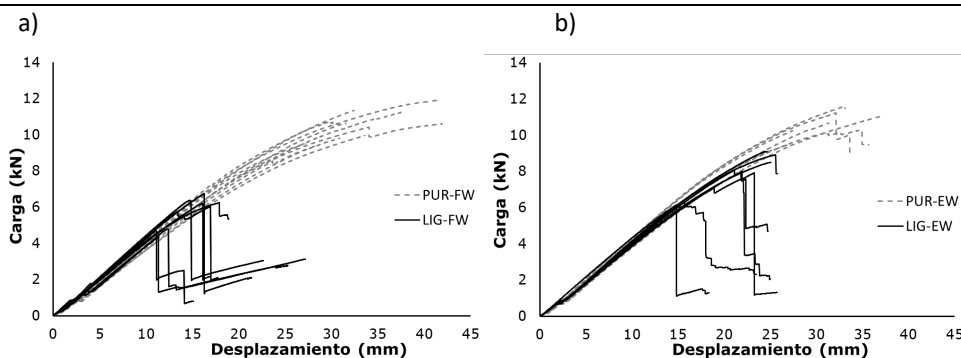


Figura 5. Relación carga-desplazamiento de LVL a flexión a 4 puntos. a) Plana o Flatwise. b) Canto o Edgewise. PUR: Poliuretano. LIG: Lignina

Como se observa en la Figura 5 y Tabla 1, en general las vigas elaboradas con lignina obtienen menor resistencia a flexión que las elaboradas con adhesivo PUR, en línea con lo observado en ensayos similares con adhesivos lignocelulósicos (Gavrilović Grmuša, et al., 2026). Este efecto se acentúa en la posición plana o FW, con un descenso de la resistencia de un 41%, debido a que el cortante en la línea neutra es más crítico. Como se observó en el ensayo de calidad del encolado, la lignina alcanza 3 MPa a cortante fallando por adhesivo (frente a los 5 MPa del adhesivo PUR fallando por madera). Al colocar la viga de canto, esta reducción de la resistencia es del 19%, produciéndose una adecuada rotura por madera a tracción. Respecto de la rigidez, se observan buenas correlaciones entre los módulos elásticos dinámicos (no destructivo) y estáticos (destructivo), con variaciones por debajo del 10%. Comparando ambos adhesivos, estadísticamente no se presentan diferencias en cuanto a su módulo de elasticidad más allá de la variación propia de la madera.

Observando el comportamiento mecánico (Figura 5), cabe destacar que las vigas elaboradas con lignina, aún con menor resistencia, presentan un comportamiento de fallo dúctil frente a la rotura frágil que se observa en las vigas PUR. Este fallo se observa en que la rotura no se produce de forma súbita, sino que el fallo se produce de forma escalonada. Tras dichos escalones las vigas con lignina presentan un tramo con resistencia constante en torno a 5 mm de media, aspecto importante en términos de seguridad.

4. CONCLUSIONES

Se concluye que el bioadhesivo en base lignina representa una alternativa viable y más sostenible al adhesivo PUR para aplicaciones no estructurales o con demandas moderadas, siendo especialmente relevante en el contexto actual de descarbonización y economía circular en el sector de la construcción con madera. La solución al problema de la polaridad de la lignina podría hacer que esta mejorara en términos de adherencia y por ende, en términos de comportamiento a compresión y flexión.

En los ensayos de calidad del encolado, la lignina presentó una única fase de deformación, con rotura mayoritariamente en el plano adhesivo. Esto indica una buena capacidad de adherencia, aunque su resistencia última a cortante es inferior a la del sustrato lignocelulósico, lo que limita su desempeño en situaciones críticas de esfuerzo transversal.

En los ensayos a flexión a cuatro puntos, las vigas elaboradas con bioadhesivo en base lignina mostraron reducciones de resistencia mecánica respecto al PUR siendo esta última menos sensible por la distribución del esfuerzo de cortante fuera de la línea neutra. Sin embargo, el comportamiento mecánico de las vigas con lignina mostró un fallo progresivo y dúctil, en contraste con la rotura frágil observada en las vigas PUR, lo que podría suponer una ventaja en aplicaciones donde se priorice la seguridad estructural frente a fallos abruptos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gavrilović-Grmuša, I.; Dunky, M.; Djiporović-Momčilović, M.; Popović, Z. Influence of pressure on the radial and tangential penetration of adhesive resin into poplar wood and on the shear strength of adhesive joints. *BioResources* 2016, 11(1), 2238–2255. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.2238-2255>
- Ghorbani, M; Liebner, F.; van Herwijnen, H.W.G.; Solt, P.; Konnerth, J. Ligneous resole adhesives for exterior grade plywood. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2018, 75, 809–820. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1249-9>
- Hass, P.; Wittel, F.K.; Mendoza, M.; Herrmann, H.J.; Niemz, P. Adhesive penetration in beech wood Part I: Experiments. *Wood Sci. and Tech.* 2012, 46, 243-256. <https://doi.org/10.1007/s00226-011-0410-6>
- Hemmilä V.; Adamopoulos, S.; Karlsson, O.; Kumar A. Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels – A review. *RSC Adv.* 2017, 7, 385–433. <https://doi.org/10.1039/c7ra06598>
<https://www.architecture2030.org/old-why-the-built-environment/>. Último acceso: 09/09/2025
- Rescalvo, F.J.; Duriot, R.; Pot, G.; Gallego, A.; Denaud, L. Enhancement of bending properties of Douglas-fir and poplar laminate veneer lumber (LVL) beams with carbon and basalt fibers reinforcement. *Constr. Build. Mater.* 2020, 254, 120185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120185>
- UNE-EN 408:2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. AENOR
- UNE-EN 14374:2005. Estructuras de madera. Madera microlaminada (LVL). Requisitos. AENOR
- Winandy, J.E.; Morrell J.J. Improving the utility, performance, and durability of wood- and bio-based composites. *Ann. For. Sci.* 2017, 74, 29. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0625-2>