

Madera microlaminada
estructural de chopo
reforzada con tejidos de
carbono o basalto

CHOPO

Dr. Antolino Gallego,
Dr. Francisco Rescalvo y
Dra. Elisabet Suárez
Grupo IDIE,
ETS de Ingeniería de Edificación,
Universidad de Granada



La madera microlaminada (*Laminated Veneer Lumber*) es un material compuesto de varias capas de chapa extraídas por desarrollo del tronco, todas ellas orientadas en la dirección de la fibra, y encoladas entre sí con un adhesivo a través de un prensado. Por lo general se comercializa en forma de perfiles de sección rectangular para uso estructural.

En este trabajo se muestran los resultados mecánicos obtenidos de varios prototipos de LVL de chapas de chopo reforzadas con tejidos de material compuesto de fibra de carbono o basalto para aumentar su rigidez a flexión. El trabajo forma parte de los resultados del proyecto de investigación COMPOP desarrollado en la ETS de Ingeniería Superior de Edificación de la Universidad de Granada (www.compop.ugr.es).

Introducción

El edificio, entendido como el uso de edificios, la producción y transporte de materiales, construcción, mantenimiento y final de la vida útil de los sistemas constructivos, representa hasta el 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión Europea¹. A lo largo del siglo XX, el hormigón armado ha permitido un desarrollo competitivo y rápido de nuestro entorno construido. Hoy sabemos que se puede conseguir una reducción media de 2,1 t de emisiones de CO₂ sin más que sustituir 1 t de hormigón por 1 t de madera en el proceso de construcción¹. La madera, un material de construcción muy extendido

en nuestro planeta es renovable y tiene una base biológica. Comparado a otros materiales, presenta ventajas medioambientales en todas sus fases. La madera también tiene ciertas limitaciones con respecto a otros materiales, como su durabilidad, resistencia al fuego o falta de homogeneidad, entre otros. Sin embargo, existe un creciente interés social por una construcción con menor impacto ambiental. Asimismo, la creciente conciencia en el sector es evidente al reducir su huella de carbono y mochila ecológica, siendo el uso de madera, en combinación con otros materiales ampliamente validados a través de soluciones híbridas, una de las más estrategias efectivas y rentables en manos de los profesionales y prescriptores del sector. El creciente interés social por una construcción de consumo energético casi nulo y los numerosos valores añadidos de la madera, son una gran oportunidad para este material en el sector de la construcción. Esto supone además una gran oportunidad para muchas especies arbóreas plantadas y de crecimiento rápido como el chopo.



“...existe un creciente interés social por una construcción con menor impacto ambiental.”

1. Jefree, M. Wood, Building the bioeconomy, 2019, www.CEI-BOIS.org.



Para superar las propiedades mecánicas del LVL de chopo,... este trabajo y el proyecto COMPOP proponen la combinación de madera con materiales plásticos reforzados con fibra (FRP), tanto fibra de carbono (CFRP) como fibra de basalto (BFRP).

La madera puede aportar al mercado productos tecnológicos que responden a las necesidades actuales de construcción, y así revalorizar las plantaciones de chopo de Andalucía y Granada, y establecer una industria de proximidad en la zona, con valor añadido y sostenibilidad en el tiempo, mucho mayor que la actual industria de procesamiento de madera de chopo. Nuevas tecnologías y avances científicos ofrecen al chopo la posibilidad de pasar de productos tradicionales (papel, tableros aglomerados, biomasa, palets, muebles, contrachapados, cajas de frutas, etc.) a productos tecnológicos de alto valor añadido o en la construcción de madera (paneles de tablero de fibra orientada, viguetas I, cerchas, madera contralaminada o CLT, paneles de madera contrachapada estructural de o madera de madera laminada enchapada (LVL), entre otros).

En concreto, el LVL está hecho de varias chapas de madera encoladas en la dirección de la fibra. El LVL se utiliza en muchas aplicaciones estructurales por sus elevadas propiedades mecánicas². El módulo de ruptura en flexión (MOR) de LVL es mayor que en la madera maciza, con menos variaciones debido a la distribución uniforme de los defectos naturales tales como nudos, orientaciones de la fibra o fendas³. El LVL puede estar hecho de especies de madera muy diferentes, como haya, abedul, álamo, abeto, abeto Douglas, etc. Los efectos de la organización de las capas sobre las propiedades mecánicas se han estudiado en diferentes trabajos, demostrándose por ejemplo que el LVL de chopo ofrece una mayor resistencia a la flexión y un mayor módulo de elasticidad (MoE) en comparación con la madera aserrada de la misma especie^{4 5}.

Para superar las propiedades mecánicas del LVL de chopo, disminuyendo además la influencia de los nudos y la dispersión en la calidad de las chapas de madera usadas para su elaboración, este trabajo y el proyecto COMPOP proponen la combinación de madera con materiales plásticos reforzados con fibra (FRP), tanto fibra de carbono (CFRP) como fibra de basalto (BFRP).

Principales formatos y usos de la madera microlaminada

Como material base la madera microlaminada se suele presentar en dos formatos diferentes, vigas y paneles. De ella se suelen elaborar productos estructurales más complejos como viguetas en I y cajones estructurales para forjados y envolventes con capacidad para incorporar rellenos para aislamiento térmico y acústico (Figura 1). Entre sus usos más comunes, el LVL se usa como viguetas de piso y techo, paneles de techo, marcos y bastidores, cerchas, pilares, paneles de refuerzo para muros y paredes o paneles de refuerzo para techos (Figura 2).

2. I. Rahayu, L. Denaud, R. Marchal, D.W. Ten, new poplar cultivars provide laminated veneer lumber for structural application, *Ann. For. Sci.* 72 (2015) 705–715, <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0422-0>.

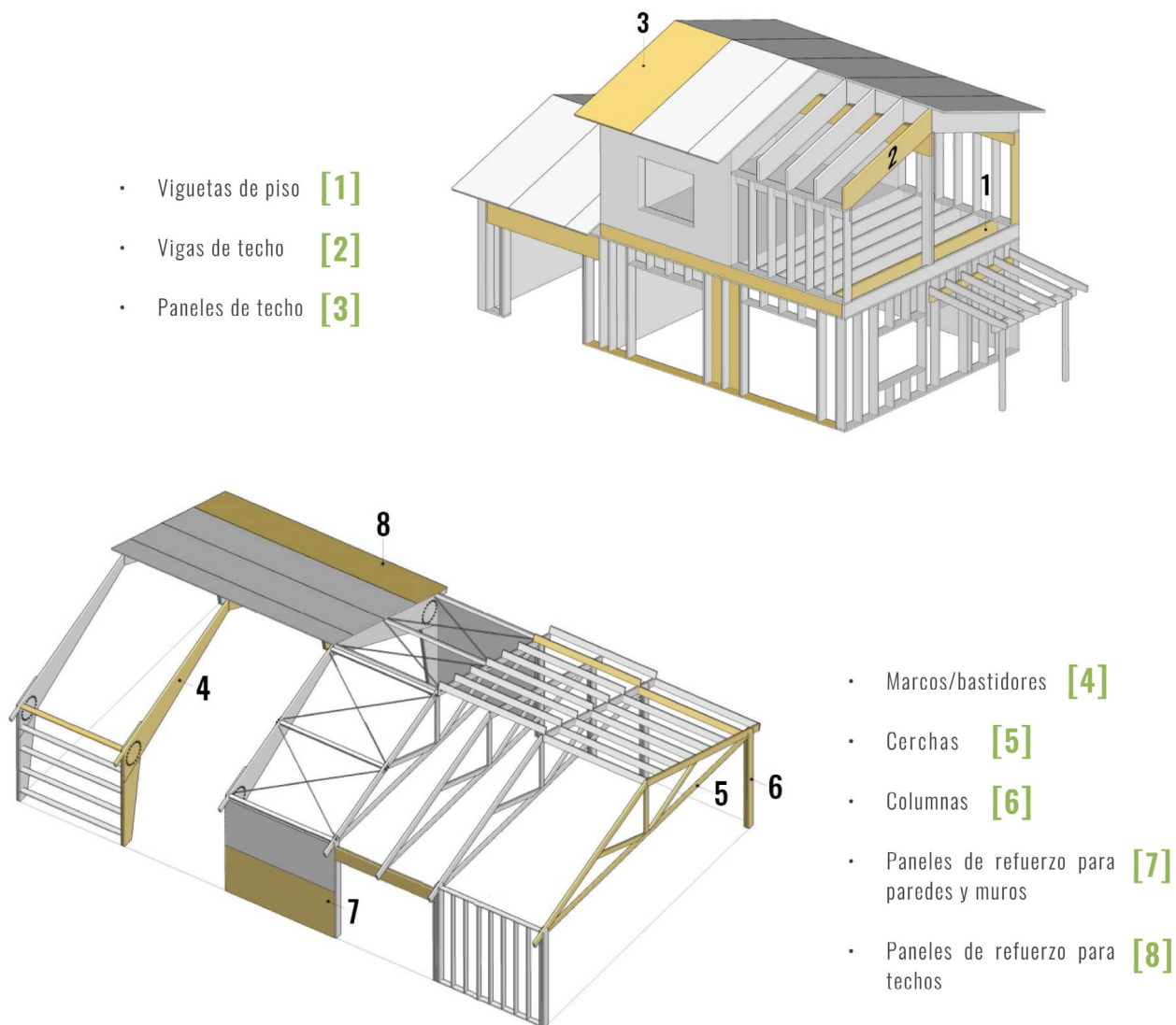
3. T.L. Laufenberg, Parallel-laminated veneer: processing and performance research review, *Forest Prod. J.* 33 (1983) 21–28.

4. E. Burdurlu, M. Kilic, A.C. Ilce, O. Uzunkavak, The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*Fagurs orientalis L.*) and Lombardy poplar (*Populus nigra L.*), *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1720–1725, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.05.002>.

5. M.D. Strickler, R.F. Pellerin, Tension proof loading of finger joint for laminated beams, *Forest Prod. J.* 21 (2) (1971) 10–15.



Figura 1: Formatos de LVL y productos estructurales (cajones estructurales y viguetas I con flancos de LVL y alma de panel OSB).



FIGURAS. LVL HANDBOOK. EUROPE. FEDERATION OF FINNISH OF WOODWORKING INDUSTRIES. 2019

Figura 2: Principales usos del LVL.



Ventajas de la madera microlaminada para uso estructural

01

Dos veces más fuerte a flexión que el acero en proporción al peso.

02

Dimensionalmente estable, sin torceduras, astillas o divisiones debido a la estructura laminada.

03

Propiedades uniformes del material.

04

Calidad y dimensiones uniformes del producto final; ventaja clave en aplicaciones industriales.

05

Fácil de perforar, cortar, sujetar y ajustar.

06

Diseño de precisión y fácil de adaptar incluso a perfiles curvos.

07

Se puede producir a dimensiones exactas, minimizando el corte transversal y el aserrado de residuos.

08

Amplia gama de tamaños: dimensiones del producto no limitadas por el tamaño de la materia prima.

09

Ligero y altamente portátil.

10

Seco de fábrica, el contenido de humedad del 8-10% garantiza una contracción mínima in situ.

11

Se combina fácilmente con otros productos de construcción.

12

La producción fuera de obra reduce el tiempo de construcción.

13

Madera enteramente trazable, renovable y reciclable proveniente de bosques y plantaciones certificadas.

14

Almacén de carbono ecológico: 1 m³ de LVL contiene carbono almacenado equivalente a 789 kg de CO₂.

15

El costo de producción es más alto que la madera aserrada, pero se necesita menos material para cumplir con las especificaciones de diseño cuando se construye con LVL.



Figura 3: Elaboración de LVL de chopo para este trabajo.

Proceso industrial de elaboración

La elaboración LVL se realiza en un proceso que comienza con el corte de las trozas del árbol adaptadas a la longitud del torno de desarrollo disponible. Tras su descortezado y desenrollado, se obtiene una chapa en continuo de varios milímetros de espesor. Una vez secas de forma forzada, las diferentes chapas así obtenidas se encolan entre ellas mediante adhesivos estructurales, orientando todas las chapas en la misma dirección (la dirección de la fibra del árbol). Las chapas encoladas y montadas se introducen así en una prensa de platos calientes, la cual bajo presión y una temperatura superior a 100 °C, es capaz de rigidizar el producto tras aproximadamente 4 horas. Posteriormente, el producto es mecanizado al tamaño deseado eliminando bordes y sobrantes, para finalmente ser empaquetado para su uso final o como elemento de otros productos (Figura 3).

Materiales y probetas

En este trabajo se elaboraron 4 tipos de probetas de madera microlaminada (Figura 4):

- 1-NR: LVL homogéneo (solo chopo), hecho únicamente de chapas de chopo;
- 2-CU: LVL de chopo reforzado con tejido de carbono unidireccional;
- 3-CB: LVL de chopo reforzado con tejido de carbono bidireccional;
- 4-BU: LVL de chopo reforzado con tejido de basalto unidireccional.

Todas ellas tuvieron una longitud de 760 mm y una sección de 45 x 45 mm.

En el caso del chopo se usó el clon I-214, de alta tasa de crecimiento, obteniéndose chapas de 3 mm. La Tabla 1 resume las propiedades de los materiales usados: chopo, material FRP y adhesivo. En el caso de la configuración homogénea NR se elaborará LVL de dos calidades, uno con chapa de primera calidad (Q1) y otro con chapa de segunda calidad (Q2). En las configuraciones reforzadas con FRP, es decir, CU, CB y BU, se instalaron 2 capas de tejido en el laminado entre chapas de chopo, una en la parte superior y otra en la parte inferior (Figura 4).

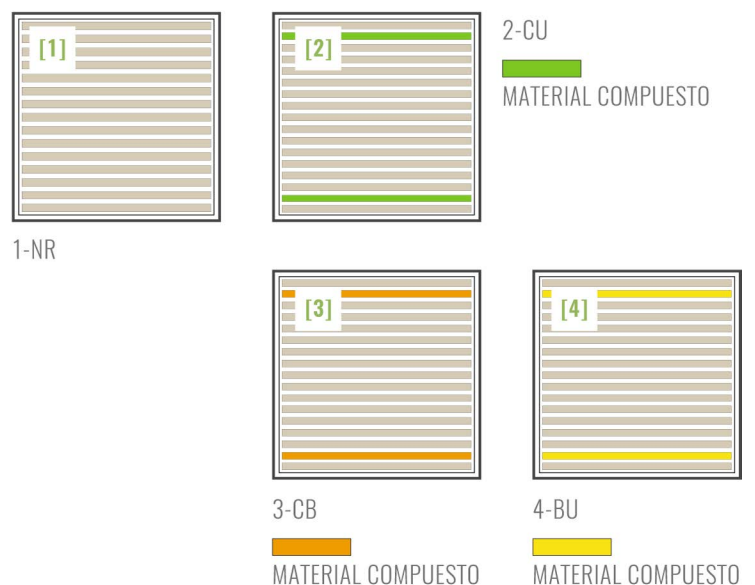


Figura 4: Tipos de LVL elaborado.

Material compuesto de refuerzo				Chopo*		Resinas	
Tipo	Carbono Unidireccional CFRP-U	Carbono Bidireccional CFRP-B	Basalto Unidireccional BFRP-U	Clon	I-214	Para chapa de chopo	Poliuretano
Masa superficial (g/m ²)	300	238	400	MoE (MPa)	7450	Para material compuesto	Epoxi
Espesor (mm)	0,166	0,064	0,140	MoR (MPa)	37		
Área resistente por unidad de ancho (mm ² /mm)	166,6	64,2	142,5	Densidad al 12% HR (g/m ³)	351		
				Espesor de chapa	3 mm		

Tabla 1: Propiedades de los materiales usados para elaborar los elementos de ensayo.



CHAPA DE ALTA CALIDAD USADA PARA LOS PANELES Q1 CHAPA DE BAJA CALIDAD PARA LOS PANELES Q2

Figura 5: Chapas usadas para elaborar los paneles de LVL con dos calidades de chapa (Q1 y Q2).

Ensayos

Se realizaron dos tipos de ensayos sobre las probetas elaboradas:

Ensayos no destructivos: Consiste en un ensayo de vibraciones en el que cada probeta es golpeada con un martillo en un extremo siguiendo la dirección de la fibra (vibración longitudinal). Con un micrófono se recoge la señal acústica generada, que es convertida en señal eléctrica mediante un sistema de adquisición, conversión y procesado. De esta señal se obtiene su espectro en frecuencias y de él se obtiene su primer pico, correspondiente a la frecuencia fundamental de vibración o primera frecuencia de resonancia. A partir de esta frecuencia y de la densidad de la probeta, se puede obtener el módulo de elasticidad dinámico MoE_{dyn} (Figura 6).

MARTILLO DE IMPACTO

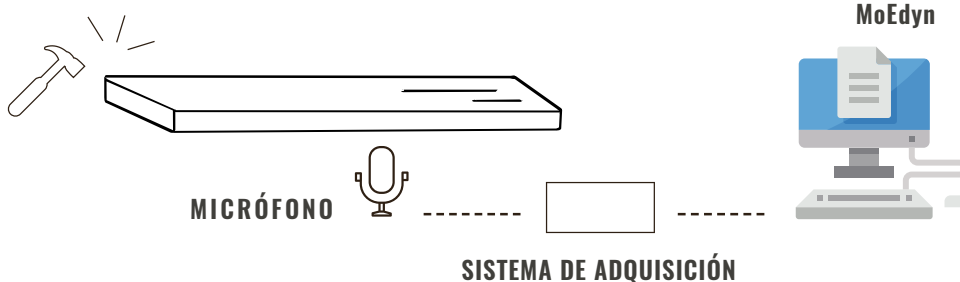


Figura 6: Ensayo de vibraciones (no destructivo) para obtener el módulo elástico dinámico (MoE_{dyn}).

Ensayos destructivos: Se realizaron tres tipos de ensayos destructivos: Ensayo a flexión a 4 puntos, ensayo de compresión en la dirección de la fibra y ensayo a cortante (Figura 7).

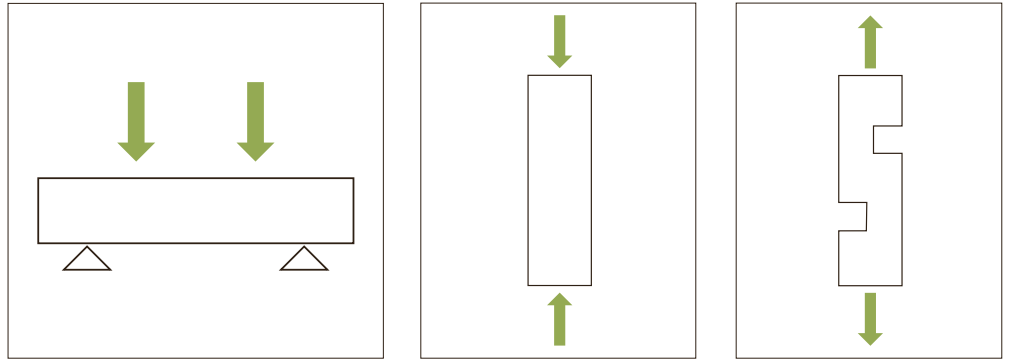


Figura 7: Ensayos destructivos. Flexión, compresión y cortante.

Además, tanto en los ensayos no destructivos como destructivos, las probetas se ensayaron en dos configuraciones diferentes, de canto (edgewise) y plana (flatwise), tal y como se muestra en la Figura 8.

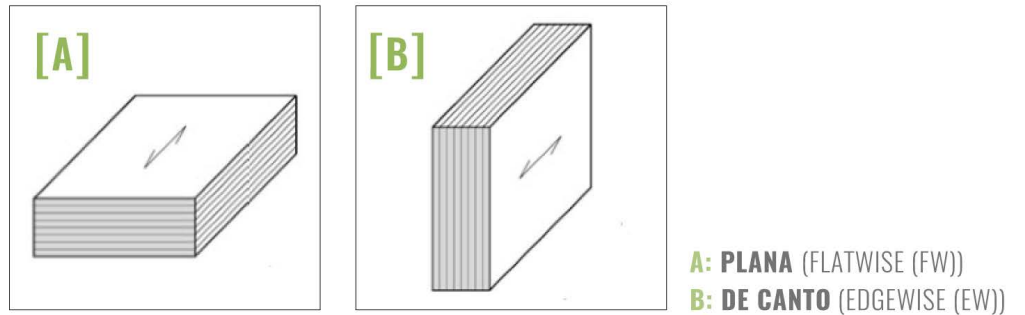


Figura 8: Configuraciones plana y de canto en las que se ensayaron las probetas.

Fotografía: Ismael Martínez



Resultados**COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN**

La Figura 9 representa las curvas de la tensión en MPa frente a la flecha en mm para las dos configuraciones de ensayo, plana y de canto. En la primera gráfica (izquierda) se estudia la influencia del material compuesto comparando las configuraciones NR (solo chopo) y CU (chopo reforzado con carbono unidireccional) para la calidad de chapa Q1. Se observa claramente la mejora introducida tanto en rigidez ($MoE_{m,g}$ estático global y MoE_{dyn}), tensión máxima y ductilidad por el material compuesto. Estas diferencias se contabilizan en la Tabla 2, con ganancias que van desde el 49% hasta el 13%.

En la Figura central se compara la influencia de la calidad de la chapa, cuyos resultados numéricos se exponen en la Tabla 3, sobre la configuración CU (chopo reforzado con tejido de carbono unidireccional). Se observan diferencias entre el 12% y el 6%, debidas a la calidad de la chapa de chopo, demostrándose así su clara influencia y la importancia de una gestión forestal adecuada para no obtener madera con muchos nudos.

En la figura de la derecha se comparan entre sí los tres tipos de material compuesto de refuerzo, CU (carbono unidireccional), CB (carbono bidireccional) y BU (basalto unidireccional).

Los resultados se contabilizan en la Tabla 4.

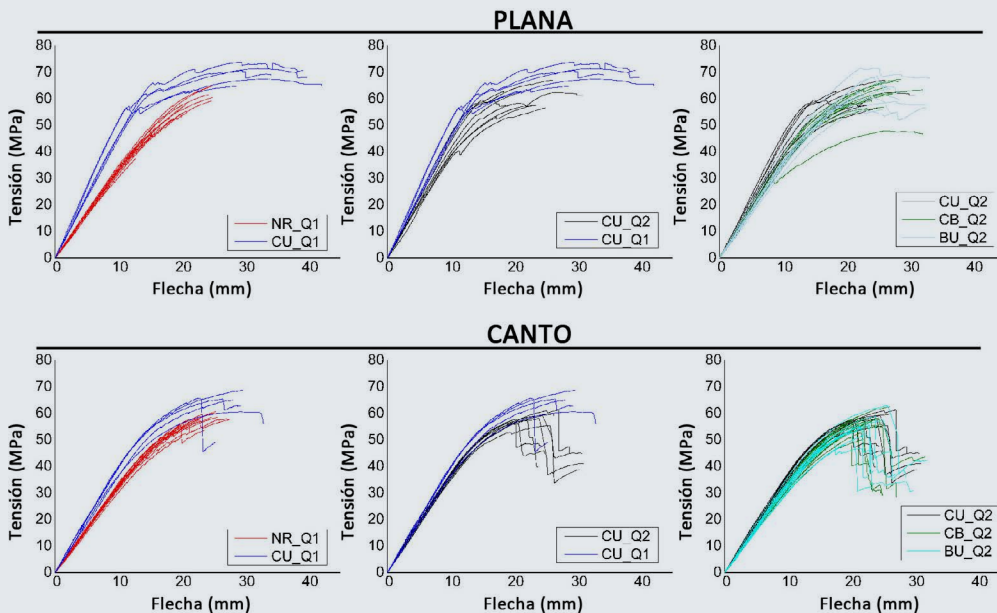


Figura 9: Tensión frente a flecha de las probetas ensayadas a flexión.

Tipología	Calidad de la chapa	MoE_{dyn} (GPa)		$MoE_{m,g}$ (GPa)		Tensión máxima (MPa)	
		Plana	Canto	Plana	Canto	Plana	Canto
Homogénea de chopo	Q1	9.4±4%	9.5±3%	8.9±5%	8.6±3%	58.1±13%	59.9±4%
Combinada de chopo y CU	Q1	13.9±11%	11.3±5%	12.7±7%	10.5±6%	72.1±5%	67.7±4%
Ganancia introducida por el carbono		49%	19%	42%	22%	24%	13%

Tabla 2. Influencia del material compuesto de carbono unidireccional en las propiedades mecánicas a flexión en la madera microlaminada de chopo.

Tipología	Calidad de la chapa	MoE _{dyn} (MPa)		MoE _{m,g} (MPa)		Tensión máxima (MPa)	
		Plana	Canto	Plana	Canto	Plana	Canto
Combinada de chopo y CU	Q2	12.5±9%	10.7±2%	11.0±6%	9.8±3%	63.2±6%	60.6±3%
Combinada de chopo y CU	Q1	13.9±11%	11.3±5%	12.7±7%	10.5±6%	72.1±5%	67.7±4%
Ganancia introducida por la mayor calidad de la chapa (%)		12%	6%	15%	7%	12%	11%

Tabla 3: Influencia de la calidad de la chapa de chopo en las propiedades mecánicas a flexión en la madera microlaminada de chopo reforzado.

Tipología	Calidad de la chapa	MoE _{dyn} (MPa)		MoE _{m,g} (MPa)		Tensión Máxima (MPa)	
		Plana	Canto	Plana	Canto	Plana	Canto
Combinada bde chopo y CU	Q2	12.5±9%	10.7±2%	11.0±6%	9.8±3%	63.2±6%	60.6±3%
Combinada de chopo y CB	Q2	11.0±2%	10.0±3%	9.4±4%	8.8±4%	62.7±9%	58.9±5%
Combinada de chopo y BU	Q2	10.6±6%	9.8±4%	9.5±6%	8.9±6%	64.6±8%	57.6±6%

Tabla 4: Comparación de los tres tipos de refuerzo en las propiedades mecánicas a flexión en la madera microlaminada de chopo reforzado.

COMPRESIÓN

Resultados

COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN EN LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA

La Tabla 5 muestra los resultados del ensayo a compresión. Se observa una ganancia de hasta el 13% introducida por el refuerzo de material compuesto de carbono unidireccional en la tensión máxima.

Influencia del material compuesto	Influencia de la calidad de la chapa		Influencia del tipo de material compuesto
Tensión máxima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión máxima (MPa)	Tensión máxima (MPa)
Homogénea de chopo Q1	35.8±3%	Combinada de chopo y CU Q1	40.6±5%
Combinada de chopo y CU Q1	40.6±5%	Combinada de chopo y CU Q2	38.0±5%
Ganancia introducida por el material compuesto (%)	13.4%	Combinada de chopo y CB Q2	36.4±5%
		Ganancia introducida por la calidad de la chapa (%)	7.7%
		Combinada de chopo y CU Q2	37.2±7%

Tabla 5: Tensión máxima a compresión en la dirección de la fibra para las diferentes probetas de madera microlaminada de chopo.

Resultados**COMPORTAMIENTO A CORTANTE**

La Tabla 6 muestra los resultados del ensayo a cortante. Se observa una ganancia de hasta el 8% introducida por el refuerzo de material compuesto de carbono unidireccional en la tensión máxima.

Influencia del material compuesto	Influencia de la calidad de la chapa		Influencia del tipo de material compuesto		
	Tensión máxima (MPa)		Tensión máxima (MPa)		Tensión máxima (MPa)
Homogénea de chopo Q1	4.5-6%	Combinada de chopo y CU Q1	4.9-6%	Combinada de chopo y CU Q2	5.0-12%
Combinada de chopo y CU Q1	4.9-6%	Combinada de chopo y CU Q2	5.0-12%	Combinada de chopo y CB Q2	4.8-10%
Ganancia introducida por el material compuesto (%)	7.7%	Ganancia introducida por la calidad de la chapa (%)	0%	Combinada de chopo y BU Q2	4.4-9%

Tabla 6: Tensión máxima a cortante en la dirección de la fibra para las diferentes probetas de madera microlaminada de chopo.

CORTANTE**Principales conclusiones**

La madera microlaminada de chopo del clon I-214 tiene una rigidez a flexión entre un 15 y un 20% mayor que la madera aserrada de chopo del mismo clon, y una tensión máxima a flexión entre un 50 y un 60% más, y es totalmente apropiada para uso estructural, especialmente en aplicaciones de pequeña y mediana escuadría.

La madera microlaminada combinada de chopo y tejido de carbono unidireccional tiene una rigidez a flexión de entre un 20 y un 50% más que la madera microlaminada homogénea de chopo, y una tensión máxima a flexión entre un 10 y un 25% mayor.

La madera microlaminada combinada de chopo y tejido de carbono bidireccional o basalto unidireccional tiene una rigidez a flexión en torno a un 10% menor que la madera microlaminada combinada de chopo y tejido de carbono unidireccional, y una tensión máxima a flexión muy similar.

La madera microlaminada combinada de chopo y tejido de carbono unidireccional tiene una tensión máxima a compresión en torno a un 13% más que la madera microlaminada homogénea de chopo, y una tensión máxima a cortante en torno a un 8% mayor.

La calidad de la chapa influye moderadamente en las propiedades de la madera microlaminada de chopo. Una calidad alta de la chapa puede suponer un aumento de la rigidez a flexión entre un 7 y un 15%, un aumento de la tensión máxima a flexión de un 12% y un incremento de la a tensión máxima a compresión en un 8%, sin tener efecto notable sobre la tensión máxima a cortante. ■