



9CFE-1203

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: 978-84-941695-7-1

Organiza





Influencia del termotratamiento en las propiedades elastomecánicas de la madera de *Eucalyptus nitens*

CASADO SANZ, M. (1), CARRO LLORENTE, S. (1), BAÑO GOMEZ, V. (2)

(1) Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid.

(2) InnovaWood.

Resumen

El género *Eucalyptus* ha sido y es uno de los recursos forestales más utilizado industrialmente a nivel mundial. El destino actual de la madera de eucalipto en España es principalmente para la producción de pasta de celulosa, fabricación de tableros y en menor medida producción energética, sus elevadas propiedades mecánicas ofrecen buenas posibilidades para su uso estructural.

El presente estudio analiza las propiedades elasto-mecánicas de madera de *Eucalyptus nitens* de procedencia Outeiro de Rei (Lugo) de dimensiones 75 x 25 x 2.500 mm, 46 sin termotratar y 27 termotrataadas. Se realizaron ensayos a flexión según norma UNE-EN 408 y no destructivos con MTG (Mechanical Timber Grader). La principal ventaja del termotratamiento es que se trata de un método natural y ecológico al no utilizar productos químicos.

Los resultados indican que el termotratamiento a 170°C en madera de *Eucalyptus nitens* implican una reducción del módulo de elasticidad global, de la resistencia a flexión y de la densidad y un aumento de la estabilidad dimensional frente a cambios de humedad. Los resultados medios del lote sin termotratamiento son: densidad 614 Kg/m³, MOEG 18.112 N/mm² y MOR 74 N/mm², para el lote termotratado: densidad 536 Kg/m³, MOEG 15.682 N/mm² y MOR 39 N/mm².

Palabras clave

Economía circular, madera estructural, protección.

1. Introducción

La superficie mundial de plantaciones con *Eucalyptus nitens* es de aproximadamente 340.000 ha, distribuidas en Australia (Tasmania y Victoria), Chile, Sudáfrica, Nueva Zelanda y España, la mayor parte de las cuales (88%) en Australia y Chile (IUFOR 2004).

En España el volumen de cortas de *Eucalyptus spp* fue de 6.814.174 m³ c.c. (MITECO 2021), es la especie de frondosa con mayor volumen de corta como se aprecia en la tabla 1, representando el 87% de todas las frondosas (Figura 1). Su destino principal en la actualidad es para pulpa, tableros de fibras y biomasa, si bien en el pasado el eucalipto fue utilizada en la construcción por su gran resistencia (Seco et al 2007). Las cortas de esta especie han aumentado al tiempo que también ha crecido la demanda de madera. Las provincias con mayor volumen de cortas de *Eucalyptus spp.* se muestran en la figura 2 y son A Coruña (en torno a 4 millones de m³ c.c.) y Lugo (2 millones de m³c.c. aproximadamente).

Tabla 1. Cortas por especies de frondosas en España (Fuente: MITECO, 2021)

FRONDOSAS	Especies principales	Volumen cortado (m3c.c.)
% respecto del total de cortas:	43%	<i>Eucalyptus spp.</i> 6.814.174
		<i>Populus spp.</i> 466.704
		<i>Fagus sylvatica</i> 133.902
		<i>Quercus robur</i> 140.671
% frondosas alóctonas respecto total de frondosas:	92%	<i>Castanea sativa</i> 97.878
		<i>Quercus rubra</i> 51.185
		Otros <i>Quercus</i> 15.656
		Otras frondosas alóctonas 16.558
		Resto de frondosas 87.426

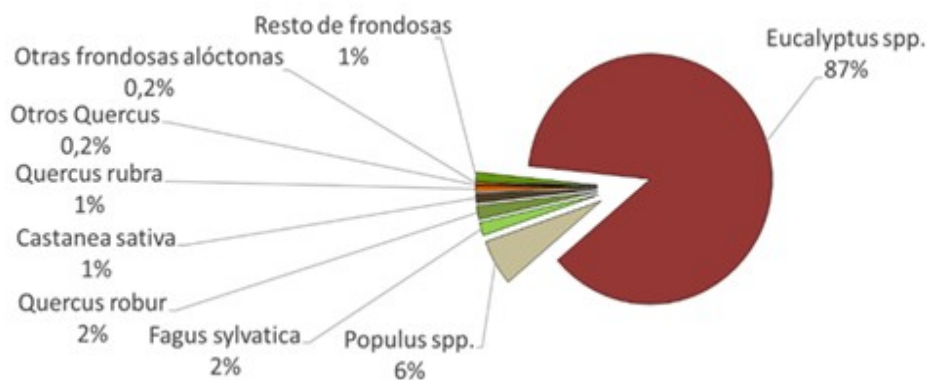


Figura 1. Cortas por especies de frondosas en España (Fuente: MITECO, 2021)



Figura 2. Volumen de cortas de *Eucalyptus* spp. por provincias en 2021

(Fuente: Anuario de estadística forestal de 2021)

Se define la madera modificada térmicamente (MMT) según la norma experimental UNE-CEN/TS 15679EX (AENOR 2009), como; "*Madera en la cual la composición de las paredes celulares y las propiedades físicas se modifican por exposición a una temperatura mayor de 160°C y a condiciones de disponibilidad reducida de oxígeno. La madera se modifica de tal forma que algunas propiedades quedan alteradas de forma permanente y en toda la sección de la pieza*". La aplicación de altas temperaturas produce la disminución de la variación de la humedad de equilibrio de la madera y generan un cambio en sus propiedades (Militz 2002, Junet al. 2007), la cuantía de esta alteración parece depender de la especie tratada (Boonstraet al. 2006).

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es explorar la aplicación de la madera de *Eucalyptus nitens* en la construcción sostenible, analizando la influencia del tratamiento hidro-térmico conocido como Thermowood a 170°C en las propiedades físicas y mecánicas. Los resultados pueden proveer al sector forestal claves para actuar en la mejora del proceso aplicado de esta especie y en los posibles destinos de la madera termotratada.

3. Metodología

Se utilizaron dos lotes de probetas de *Eucalyptus nitens* de procedencia Outeiro de Rei (Lugo); 46 probetas sin termotratar (Testigo) y 27 piezas termotratadas, en ambos casos de dimensiones 75 x 25 x 2.500 mm. El método Thermowood, de forma sintetizada, consiste en calentar la madera hasta una temperatura entre 160-220°C en un secadero mientras se inyecta vapor y se mantiene la temperatura constante durante 2-3 horas, dependiendo del objetivo buscado. Finalizada esta fase, se reduce la temperatura mediante pulverización de agua hasta alcanzar contenidos de humedad de la madera del 4-7% (más detalles del proceso se pueden ver en ThermoWood® Handbook 2003). En nuestro estudio se utilizó una temperatura de 170°C y el proceso lo realizó la empresa Maderas Torresar S.A. (Termogenik).

En la tabla 2 se indica un resumen de todos los ensayos físico-mecánicos efectuados con las metodologías empleadas. Todos los ensayos fueron realizados

en el laboratorio de estructuras de CESEFOR.

Tabla 2. Propiedades físico-mecánicas caracterizadas y tamaño de probetas.

Propiedad	Norma de Ensayo	Tamaño probeta (mm)
Densidad	UNE-EN 408	20x20x20
Humedad	UNE-EN 13.183-2/AC	75x25x2.500
Contracciones lineales	UNE 56.533	20x20x40
MOEG y MOR	UNE-EN 408	75 x 25 x 2.500
MOE dinámico	Mechanical Timber Grader (MTG)	75 x 25 x 2.500

La medida de las dimensiones de cada probeta de ensayo se llevó a cabo usando comparadores digitales de 0,01mm de precisión, la medida de la masa se efectuó usando una balanza de precisión de 0,01g. Para el acondicionamiento de las probetas de ensayo se emplearon cámaras climáticas con precisión de 2°C en temperatura y 5% en humedad relativa. Salvo en la determinación de la humedad y las contracciones lineales, todas las medidas y ensayos se efectuaron sobre material previamente acondicionado hasta masa constante (variación diaria inferior a 0,1%) a 20°C y 65%HR. Como término medio el acondicionamiento se conseguía en un plazo inferior a las cuatro semanas.

Se realizaron ensayos no destructivos con el equipo MTG (Mechanical Timber Grader) golpeando en la testa de cada pieza con un martillo y recogiendo la frecuencia principal de vibración longitudinal en la misma testa, según se puede ver en la figura 3. Dicho valor de frecuencia es el utilizado posteriormente para estimar el MOE dinámico o módulo de elasticidad dinámico (MOEd), en N/mm², de la calidad estructural de la madera, el cual se calcula mediante la ecuación 1:

$$\text{MOEd} = (2 * f * l)^2 * \rho \quad (\text{ecuación 1})$$

Dónde: f es la frecuencia en hercios, l es la longitud en milímetro, ρ es la densidad g/cm³



Figura 3. Ensayo con el MTG en una pieza de eucalipto testigo

El análisis estadístico se ha realizado mediante el programa informático STATGRAPHICS Centurion 18.

4. Resultados

En la tabla 3 se muestran los resultados de la estadística descriptiva de las propiedades físico-mecánicas de las probetas sin termotratar (Testigo) y termotratadas (MMT 170) de *Eucalyptus nitens*.

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas de los lotes de *Eucalyptus nitens*

Propiedad (unidad)	Testigo	MMT 170
Densidad (kg/m ³)	614,18 (99,71)a	536,25 (64,58)b
Humedad (%)	10,86 (2,01)a	4,57 (0,49)b
MOEG (N/mm ²)	18.112,19 (3.638,64)a	15.682,30 (3.028,60)b
MOR (N/mm ²)	74,30 (13,5)a	39,16 (15,73)b
MOE dinámico (N/mm ²)	16.602,91 (3.921,19)a	15.237,79 (3.159,31)a

NOTA: letras diferentes indican diferencias significativas al 95% de nivel de confianza. Desviación típica entre paréntesis

En la tabla 4 se muestran los resultados de la estadística descriptiva de las contracciones lineales y volumétrica de las probetas testigo y termotratadas de *Eucalyptus nitens*.

Tabla 4. Contracciones lineales y volumétricas de los lotes de *Eucalyptus nitens*

Propiedad (unidad)	Testigo	MMT 170
Contracción longitudinal (%)	0,37 (0,29)a	0,14 (0,22)b
Contracción radial (%)	7,28 (2,99)a	3,71 (1,96)b
Contracción tangencial (%)	8,83 (3,04)a	4,92 (1,08)b
Coefficiente de contracción volumétrica (%)	18,18 (3,80)a	8,69 (2,59)b

NOTA: letras diferentes indican diferencias significativas al 95% de nivel de confianza. Desviación típica entre paréntesis.

Se definió una función de predicción del Módulo de Elasticidad Global (MOEG) a partir del Módulo de Elasticidad dinámico (MOE dinámico) cuya expresión se indica en la ecuación 2.

$$\text{MOEG (N/mm}^2\text{)} = 3327,92 + 0,866822 * \text{MOE dinámico (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{ecuación 2})$$

El valor-P en la tabla ANOVA dió menor que 0,05, lo que indica que existe una relación estadísticamente significativa entre MOEG y MOE dinámico con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R-cuadrada indica que el modelo ajustado explica 77,58 % de la variabilidad en MOEG, por lo que el ensayo no destructivo con el MTG es un buen estimador de la calidad de la madera.

5. Discusión

Los resultados del estudio indican que la resistencia a flexión (MOR) de la madera termotratada (MMT 170) de *Eucalyptus nitens* es significativamente inferior al de la madera natural. El valor medio de la resistencia a flexión de la madera



termotratada fue de 39,16 N/mm² es un 47,44 % inferior al MOR de la madera natural (74,3 N/mm²). Estos resultados son inferiores a los obtenidos por Wentzel et al (2018) para *Eucalyptus nitens* de Chile, en los que el MOR para madera termotratada a 160°C (132 N/mm²) y 180°C (134 N/mm²) fue moderadamente superior 10,92 % y 12,61 % respectivamente al obtenido para la madera natural (119 N/mm²). El resultado del MOR para madera sin termotratar es moderadamente inferior al obtenido por Seco et al (2007) para *Eucalyptus globulus*, el cual obtuvo una media de 91,97 N/mm². Comparando con estudios de termotratamiento en madera de pino, los resultados son diferentes a los obtenidos por Hermoso et al (2015) para *Pinus radiata*, en los que el MOR para madera termotratada a 190°C (69,7 N/mm²) y 210°C (40,1 N/mm²) fue inferior (18,48 % y 53,10 % respectivamente) al obtenido para la madera natural (85,5 N/mm²).

Los ensayos no destructivos con el MTG ofrecen un MOE dinámico de la madera termotratada inferior al de la madera natural. El valor medio del MOE dinámico de la madera termotratada es un 8,22 % inferior al de la madera natural. Estos resultados son diferentes a los obtenidos por Hermoso et al (2015) para *Pinus radiata*, en los que el MOE dinámico obtenido por ultrasonidos con el equipo Fakopp para madera termotratada a 210 °C (14.550 N/mm²) fue similar al obtenido para la madera natural (14.594 N/mm²), pero el obtenido para madera termotratada a 190°C (16.004 N/mm²) fue ligeramente superior a los dos anteriores (9,99 % y 9,66 % respectivamente).

En relación a los ensayos de flexión realizados según norma UNE EN 408 ofrecen un Módulo de elasticidad (MOEG) de la madera termotratada (MMT 170) de *Eucalyptus nitens* significativamente inferior al MOEG de la madera natural. Así el valor medio del MOEG de la madera termotratada 15.682 N/mm² es un 13,42 % inferior al de la madera natural (18.112 N/mm²). Estos resultados difieren de los obtenidos por Wentzel et al (2018) para *Eucalyptus nitens* de Chile, en los que el Módulo de elasticidad para madera termotratada a 160°C (19.084 N/mm²) y 180°C (19.403 N/mm²) fueron moderadamente superiores en un 3,45 % y 5,18 % respectivamente al obtenido para la madera natural (18.448 N/mm²). El Módulo de elasticidad obtenido para madera sin termotratar es ligeramente inferior al indicado por Seco et al (2007) para *Eucalyptus globulus* de 18.430 N/mm². Hermoso et al (2015) para *Pinus radiata* señala que el MOE para madera termotratada a 190°C fue de 11.900 N/mm² a 210°C de 10.635 N/mm² y para la madera natural 10.730 N/mm².

Respecto a la influencia del termotratamiento a 170°C en la madera de *Eucalyptus nitens* en la estabilidad dimensional, todas las contracciones lineales y la volumétrica son significativamente inferiores en la madera termotratada frente a la madera testigo. La contracción tangencial en la madera termotratada es significativamente inferior (50,05 %) a la de la madera sin termotratar y la contracción radial también es significativamente inferior (49,04 %) a la de la madera sin termotratar. El coeficiente de contracción volumétrica en la madera termotratada es significativamente inferior (52,20%) al de la madera sin termotratar. Dichos resultados confirman la mejora del comportamiento de la estabilidad dimensional tras el termotratamiento coincidiendo con muchas otras investigaciones en otras especies (Méndez-Mejías, L. D.& Roger 2018, Aragón et al 2021, Skurydinet al 2021, Marcon et al 2022).

6. Conclusiones

Los resultados del estudio muestran los siguientes valores medios de las

propiedades mecánicas del lote de madera de *Eucalyptus nitens* sin termotratamiento: densidad de 614 Kg/m³, MOEG de 18.112 N/mm² y MOR de 74 N/mm². Para la madera termotratada a 170°C la densidad es 536 Kg/m³, MOEG de 15.682 N/mm² y MOR de 39 N/mm².

El termotratamiento a 170°C supone una reducción de la calidad estructural de la madera de *Eucalyptus nitens*, una disminución del 13,42 % en el módulo de elasticidad global, del 47,43 % en la resistencia a flexión, por lo que no sería recomendable su utilización en elementos con altos niveles de carga. La densidad disminuyó en un 12,69 %. Sin embargo, se debe insistir en el reducido número de piezas que se ensayaron (44 sin termotratamiento y tan solo 27 termotradas), por lo que estos resultados deben ser tomados con precaución.

El termotratamiento supone una mejora significativa de la estabilidad dimensional de la madera, pues la madera termotratada a 170°C es más estable frente a los cambios de humedad. La contracción tangencial en la madera termotratada es significativamente inferior (50,05 %) a la de la madera sin termotratar y la contracción radial también es significativamente inferior (49,04 %) a la de la madera sin termotratar. El coeficiente de contracción volumétrica en la madera termotratada es significativamente inferior (52,20%) al de la madera sin termotratar. Estos resultados indican que la madera termotratada de *Eucalyptus nitens* puede ser empleada en exterior para tarimas, celosías, pérgolas o recubrimiento de fachadas con mejor comportamiento frente a los cambios higrométricos que la madera sin dicho tratamiento.

Se puede predecir el módulo de elasticidad global sin realizar ensayos destructivos, a partir del módulo de elasticidad dinámico obtenido mediante el equipo MTG (Mechanical Timber Grader).

Serían necesarios realizar más ensayos y con un número superior de probetas para así poder obtener la clase resistente y determinar con mayor precisión su uso a nivel estructural.

7. Agradecimientos

CESEFOR por el apoyo recibido a lo largo del estudio, a Ence energía y celulosa S.A por la donación de la madera y Maderas Torresar S.A. (Termogenik).

8. Bibliografía

ARAGÓN, P.; COBAS, A. C.; TORTORIELLO, M.; 2021. Termotratamiento en Salicáceas.

BOONSTRA, M.J.; RIJSDIJK, J.; SANDER, C.; KEGEL, E.; TJEERDSMA, B.; MILITZ, H.; VAN ACKER, J.; 2006. Microstructural and physical aspects of heat-treated wood. Part 1. Softwoods. *Maderas Ciencia y Tecnología* 8(3):193-208.

HERMOSO, E.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.; CONDE, M.; TROYA, M. T.; MATEO, R.; CABRERO, J.; 2015. Caracterización de la madera aserrada de *Pinus radiata* modificada térmicamente. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(3), 493-504.

INFOR.; 2004. *Eucalyptus nitens* en Chile: Primera monografía. Instituto Forestal. Valdivia. Chile, Informe Técnico N° 165, 143 p.

JUN, L.S.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J.; 2007. Mechanical behavior of Québec wood species heat-treated using Thermo Wood process. *Holz als Roh-und Werkst* 65: 255-259.

MARCON, B.; CANDELIER, K.; PIGNOLET, L.; GARTILI, A.; THÉVENON, M. F.; DENAUD, L.; VIGUIER, J.; 2022. Durability of Heat Treated Massive Poplar Plywood.



MÉNDEZ-MEJÍAS, L. D.; Roger, M. O. Y. A.; 2018. Effect of thermo-treatment on the physical and mechanical, color, fungal durability of wood of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* from forest plantations. *Materials Science*, 24(1), 59-68.

MILITZ, H.; 2002. Heat treatment of wood: European processes and their background. *International Research group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 02-40241*.

MITECO.2021

<https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/estadisticas/aef2021/anuario-estadistica-forestal-2021.pdf>

SECO, J. I. F. G.; DÍEZ, R.; HERMOSO, E.; LÓPEZ, C. B.; CASAS, J. M.; 2007. Caracterización de la madera de *E. globulus* para uso estructural. *Boletín Informativo CIDEU*, (4), 91-100.

SKURYDIN, Y. G.; SKURYDINA, E. M.; SAFIN, R. G.; KHABIBULINA, A. R.; 2021.

Physical and mechanical characteristics of a pine thermowood composition during barothermal treatment.

ThermoWood® Handbook 2003.

https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/ThermoWood_Handb

WENTZEL, M.; FLECKENSTEIN, M.; HOFMANN, T.; MILITZ, H.; 2018. Relationships between longitudinal growth deformation and some properties of wood in *Eucalyptus nitens*. Article from *Wood Material Science and Engineering*