ISSN impresa 0717-3644
ISSN online 0718-221X

Maderas. Ciencia y tecnología 17(3): 493 - 504, 2015
DOI:10.4067/S0718-221X2015005000044

CARACTERIZACIÓN DE LA MADERA ASERRADA DE *Pinus radiata* MODIFICADA TÉRMICAMENTE

CHARACTERIZATION OF THERMALLY MODIFIED *Pinus radiata* TIMBER

E. Hermoso [1,♠], J. Fernández-Golfín [1], M.Conde [1], M.T. Troya [1], R. Mateo [2], J. Cabrero [1], M. Conde [3]

RESUMEN

La búsqueda de una mejor adaptación al uso de la madera conduce al estudio de técnicas de modificación de las propiedades del material en distintos sentidos. Una de ellas es el tratamiento con altas temperaturas los cuales repercuten en la estructura de la madera causando la mejora de alguna de sus propiedades pero pudiendo producirse el efecto contrario en otras. Así resulta necesaria la evaluación del producto obtenido dirigida al ajuste de los procesos y usos, atendiendo además a las peculiaridades de la especie utilizada. El presente trabajo trata de caracterizar la madera de pino radiata de procedencia País Vasco (España) termotratada a 190ºC y 210ºC por el método Thermowood comparada con piezas testigo de la misma especie, procedencia y dimensiones. Se presentan los resultados obtenidos para la humedad de equilibrio, la estabilidad dimensional, la durabilidad biológica y diversas propiedades mecánicas, observándose diferencias significativas entre temperaturas de tratamiento en la humedad de equilibrio (hasta 43% de pérdida), la resistencia a la flexión (hasta 53% de pérdida) y al impacto (hasta el 57% de pérdida), la compresión axial (40% de ganancia), el cortante (25,6% de pérdida), la hienda (30,5% de pérdida) y la durabilidad frente a hongos. Se concluye que cuando el criterio primordial de uso del material sea la durabilidad se deberá escoger con preferencia el tratamiento a 210ºC pero que cuando esta exigencia no esté presente, el tratamiento a 190ºC será el de preferencia ya que produce menores alteraciones en las propiedades mecánicas y genera una estabilidad dimensional similar a la del tratamiento a 210ºC.

Palabras clave: *Pinus radiata*, propiedades físicas, propiedades mecánicas, Termotratamiento de madera.

ABSTRACT

Searching for the best development in the uses of timber, it is studied different techniques modifying the properties of the material in some ways. One of the ways is the treatment with high temperature which works on the internal structure of wood, producing improvements in some of its properties, but there is the possibility of obtaining opposite effects. For this reason, it is necessary to evaluate the product, having in mind the process, its use and to consider the species of wood.

[1] Centro de Investigación Forestal (CIFOR) del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid (INIA), Carretera de la Coruña km 8, 28040 Madrid. España. hermoso@inia.es
[2] Unidad mixta INIA-AITIM. Asociación de Investigación Técnica de Industrias de la Madera
[3] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes. Universidad de Córdoba (España)
[♠]Corresponding author: hermoso@inia.es
Received: 03.04.2014 Accepted: 12.10.2014

The object of this study is to characterize the radiata pine timber from the Basque Country (Spain) with two different thermo-treatment temperatures, 190ºC and 210ºC, by the Thermowood method, and to compare with control pieces of the same species, dimensions and origin but without this termo-treatment. It is presented the results obtained referred to the equilibrium moisture content, the dimensional stability, the biological durability, and some mechanical properties. It is observed significant differences between the treatment temperatures in the moisture content (until 43% of loss), the bending strength (until 53% of loss), the impact resistance (until 57% of loss), the axial compression (until 40% of gain), the shear strength (until 25,6% of loss), cracks (until 30,5% of loss) and the durability against fungi. It is concluded that when the main criteria for use is the durability, it is advisable the treatment of 210ºC, but when this request isn´t necessary, the treatment with 190ºC is the best, because it produces less variations in mechanical properties and offers a similar dimensional stability of the 210ºC treatment.

Keywords: Mechanical properties, physical properties, *Pinus radiata*, Thermowood.

INTRODUCCIÓN

Entre las líneas de investigación centradas en la madera se halla la modificación de su estructura básica para mejora de las propiedades iniciales del material por diversas metodologías, orientada a conseguir mejores prestaciones para usos determinados. Dentro de esta filosofía, se incluye la utilización de altas temperaturas dirigida, fundamentalmente, a la búsqueda de una mejora en la estabilidad dimensional y durabilidad biológica de la madera, además de favorecer características estéticas como la uniformidad del color. Habitualmente estos tratamientos térmicos son aplicados sobre maderas de coníferas, orientados a usos de exterior (suelos, revestimientos, carpinterías y mobiliario) que puedan sustituir a especies tropicales más costosas pero con mejor comportamiento en dichas clases de usos.

La norma experimental UNE-CEN/TS 15679EX (AENOR, 2009), define la madera modificada térmicamente (MMT), como *"Madera en la cual la composición de las paredes celulares y las propiedades físicas se modifican por exposición a una temperatura mayor de 160ºC y a condiciones de disponibilidad reducida de oxígeno. La madera se modifica de tal forma que como mínimo algunas propiedades quedan alteradas de forma permanente y en toda la sección de la pieza".*

En la actualidad las técnicas industriales más empleadas son las conocidas como Thermowood (Viitanen *et al.* 1994, Viitaniemi *et al.* 1997), Torrefacción o rectificación-Retiwood- (Dirol y Guyonnet 1993), Le Bois-Perdure o PCI (Vernois 2001) y Platowood o Plato (Tjeerdsma *et al.* 1998). Estas cuatro técnicas pueden ser encuadradas dentro del grupo de modificación hidrotérmica, basadas en el efecto combinado de temperatura y humedad.

De todos los procesos, Thermowood es el que ha tenido más éxito de mercado en Europa ya que la madera modificada por este método representa el 90% del total de la comercializada (Boonstra 2007b).

Son varios los estudios que han corroborado la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades del producto obtenido. La temperatura alcanzada y la humedad aplicada durante el tratamiento es clave en el resultado final. En esta línea diversos trabajos recomiendan para conseguir altos valores de eficiencia anti-contracción (EAC) y bajos de humedad de equilibrio, efectuar tratamientos en recintos cerrados aplicando vapor de agua (Hsu 1986, Inoue *et al.* 1991, Inoue *et al.* 1993, Tjeerdsma *et al.* 1998, Rowell *et al.* 2000). Otros trabajos (Rapp 2001, Hill 2006, Esteves y Pereira 2009) han ido encaminados a valorar las técnicas químicas y físicas para conseguir la idónea estabilización de la madera.

La modificación de las propiedades de la madera como consecuencia del termotratamiento se puso en evidencia desde el inicio de la técnica. La aplicación de altas temperaturas no solo producían la disminución de la variación de la humedad de equilibrio de la madera sino que además generaban un cambio en de sus propiedades (Militz 2002, Jun Li Shi *et al.* 2007). La cuantía de esta alteración parece depender de la especie tratada (Boonstra *et al.* 2006).

Esta dependencia de la especie y de las condiciones del tratamiento, en particular de la temperatura del proceso, queda claramente reflejada en el articulado de la norma experimental UNE-CEN/TS 15679EX (AENOR 2009) anteriormente citada.

Por tanto, es esencial la consideración conjunta de las variables debidas al tipo de tratamiento, a la especie y a las propiedades resultantes. Estudios como el de Boonstra *et al.* (2007b), lo reflejan utilizando *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris* y *Picea* sp., sobre las que aplicaron temperaturas de 165ºC y 185ºC, demostrando que la resistencia a la tracción paralela a la fibra, la resistencia a la flexión y la resistencia al impacto disminuían con el incremento de la temperatura mientras que la resistencia a la compresión paralela y el módulo de elasticidad a flexión aumentaban. La mejora de la durabilidad también dependía de la especie estudiada. Así en pino radiata se conseguía aumentarla para hongos de pudrición parda y el azulado pero limitada para hongos de pudrición blanca, mientras que en *Pinus sylvestris* sí se lograba (Boonstra *et al.* 2007a).

De los resultados habidos hasta el momento, parece deducirse que en líneas generales y para los tratamientos con vapor de agua, existe una temperatura umbral próxima a los 200ºC, por encima de la cual el efecto degradativo sobre las propiedades tiende a incrementarse, aunque cuantitativamente este efecto es fuertemente dependiente de la especie tratada (Johansson y Morén 2006, Frühwald 2007, Widmann *et al.* 2012).

Esta interrelación hace que, para que el proyectista y/o comprador de madera modificada térmicamente pueda elegir el producto más adecuado a cada condición de uso, sea necesario que las propiedades de las diferentes especies termotratadas con diferentes métodos y variables, sean perfectamente caracterizadas. A este respecto es importante tomar en consideración el hecho de que si bien existe abundante información referida a la caracterización de la MMT de *Picea sp.* y *Pinus sylvestris* de procedencias del centro y norte de Europa, obtenidas por diferentes métodos y con distintas condiciones de tratamiento, no se puede decir lo mismo de otras especies de madera, tales como el *Pinus radiata.* Recientemente Ariete (2010), realizó la caracterización para esta especie usando diferentes temperaturas pero basada en el método Plato. No se conocen referencias sobre caracterizaciones llevadas a cabo sobre madera de pino radiata modificada térmicamente por el método Thermowood.

En esta línea, el estudio tiene como objetivo principal caracterizar la modificación introducida en la estabilidad de la madera, en la durabilidad biológica y en las propiedades mecánicas de la madera de pino radiata por la aplicación del tratamiento hidro-térmico conocido como Thermowood a dos temperaturas, 190ºC y 210ºC. Los resultados pueden proveer al sector de las claves para actuar en la mejora del proceso aplicado a esta especie y en los posibles destinos del material resultante.

METODOLOGÍA

Para el siguiente trabajo se hizo uso de tablas de *Pinus radiata* de procedencia País Vasco (norte de la Península Ibérica) tratadas industrialmente a 190ºC (MMT 190º) y 210ºC (MMT 210º) mediante el método Thermowood por la empresa Torrebaso, S.L. De forma sintetizada, consiste en calentar la madera hasta una temperatura entre 185-215ºC 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). Como testigos sobre los que evaluar las variaciones introducidas por las modificaciones térmicas se emplearon muestras de madera de la misma especie y procedencia pero sin tratar (Testigo).

Todos los ensayos y determinaciones se llevaron a cabo acorde a la especificación técnica UNE-CEN/TS 15679EX (AENOR, 2009), que establece una metodología consensuada para la evaluación y declaración de las características de la MMT.

Propiedades físico-mecánicas

La tabla 1 contiene un resumen de todos los ensayos físico-mecánicos efectuados con indicación de las metodologías empleadas y el número total de probetas ensayadas (MMT 190º, MMT 210º y Testigo) obtenidas de forma consecutiva. Se incluye una columna con detalles respecto a las condiciones del ensayo.

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas caracterizadas y condiciones de ensayo.

Propiedad	Norma ensayo	Tamaño probeta (mm)	Nº probetas	Detalles
Humedad equilibrio	UNE-EN 13183-1	20x20x20	30	A 20ºC/30%HR; 20ºC/65%HR; 20ºC/85%HR
Eficiencia anti-contracción (EAC)	UNE-EN 1910	20x20x250	30	20ºC/85%HR vs 20ºC/30%HR
Densidad	UNE-EN 408	20x20x20	30	A 20ºC/65%HR
MOR y MOE flexión	UNE-EN 408	20x120x600	45	A 20ºC/65%HR.
Impacto (Charpy)	UNE-EN ISO 179-1, método a_{cU} (probeta sin entallar) tipo 2n*	20x20x320	30	A 20ºC/65%HR
Dureza Brinell	UNE-EN 1534	40x40x200	30	A 20ºC/65%HR. Sobre cara tangencial
Compresión axial	UNE-EN 408	40x40x240	30	A 20ºC/65%HR
Cortante paralelo.	ASTM D143-94	50x50x63	30	A 20ºC/65%HR
Resistencia hienda	ASTM D143-94	50x50x76	30	A 20ºC/65%HR
(*) Se escogió una relación Longitud/altura de 12 (distancia entre apoyos de 240mm) por ser la habitualmente usada en el sector de la madera				

La medida de las dimensiones de cada probeta de ensayo se llevó a cabo usando comparadores digitales de 0,01mm de precisión mientras que 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 mejor que 2ºC en temperatura y 5% en humedad relativa.

Salvo en la determinación de la humedad de equilibrio y la estabilidad dimensional, todas las medidas y ensayos se efectuaron sobre material previamente acondicionado hasta masa constante (variación diaria inferior a 0,1%) a 20ºC y 65%HR. Como término medio el acondicionamiento se conseguía en un plazo inferior a las cuatro semanas.

La efectividad del tratamiento respecto de la estabilización dimensional se expresó haciendo uso del índice EAC (*Eficiencia anti-contracción*), que se calcula como sigue:

$$EAC = \frac{(Sst - St)}{Sst} * 100$$

El cálculo de Sst (contracción de la madera sin tratar entre 20º/85% y 20º/30%) y St (contracción de la madera tratada) para cada tipo de material se calculó conforme a lo establecido en la norma UNE-EN 1910 (AENOR 2000).

Los ensayos para la determinación de la densidad, la compresión axial, los módulos de elasticidad (MOE) y de rotura a flexión (MOR), fueron efectuados según la norma UNE-EN 408 (AENOR 2011).

Durabilidad biológica frente a hongos xilófagos e insectos

De acuerdo con la UNE-CEN/TS 15679EX (AENOR, 2009), los ensayos y la evaluación de la durabilidad han de basarse en los contenidos de la norma UNE-EN 350-1 (AENOR 2013). Conforme a esta norma, la durabilidad puede determinarse mediante ensayos de laboratorio o de campo. En el presente trabajo se llevó a cabo exclusivamente una caracterización en laboratorio, omitiéndose los ensayos de campo por cuanto los usos previstos para este tipo de maderas excluyen su empleo en contacto directo con el suelo (Clase de uso 4 según UNE-EN 335, AENOR 2012). La determinación de la asignación de clases de durabilidad se realiza en función del porcentaje de pérdida de masa.

La caracterización de la durabilidad natural frente a los hongos basidiomicetos *Coniophora puteana* (cepa BAM Ebw.15) y *Postia placenta* (cepa FPRL280) se llevó a cabo sobre 30 muestras tomadas aleatoriamente de los tres lotes (MMT 190º, MMT 210º y Testigos).

Para evaluar el efecto del tratamiento térmico sobre la susceptibilidad al ataque por hongos basidiomicetos, como control se emplearon muestras de madera de pino radiata sin tratar.

La caracterización de la durabilidad natural frente a *Hylotrupes bajulus*, insecto causante de la carcoma grande, se realizó de acuerdo con la norma UNE-EN 46-1 (AENOR, 2010) mientras que la caracterización de la durabilidad natural frente a las termitas se hizo en función de la norma UNE-EN 117 (AENOR, 2012), utilizando como especie *Reticulitermes grassei.* En ambos casos se utilizaron 30 probetas.

En el análisis de los resultados se utilizaron técnicas estadísticas clásicas como análisis de varianza, test de rangos múltiples y comparación de muestras múltiples mediante el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas

Humedad de equilibrio

La tabla 2 muestra la humedad de equilibrio media para las condiciones higrotérmicas analizadas y los resultados del análisis estadístico. Entre paréntesis se indica la desviación estándar de los datos individuales.

Tabla 2. Humedad de equilibrio media y pruebas de múltiples rangos para las condiciones higrotérmicas.

Lotes	Condición (TºC/HR%)											
	20/30				20/65				20/85			
	Humedad (%)	*Grupos Homogéneos			Humedad (%)	*Grupos Homogéneos			Humedad (%)	*Grupos Homogéneos		
Testigo	8,3 (0,04)	X			12,7 (0,05)	X			19,2 (0,07)	X		
MMT 190º	6,6 (0,30)		X		8,9 (0,30)		X		13,9 (0,30)		X	
MMT 210º	4,8 (0,30)			X	6,9 (0,30)			X	11,3 (0,02)			X

*Diferencias estadísticas con un nivel del 95% de confianza.

Los resultados expuestos ponen de manifiesto el efecto del termotratamiento a distintas temperaturas en la disminución de la humedad de equilibrio de la madera, observándose que entre las condiciones extremas (20/30-20/85) la diferencia total de la humedad de equilibrio alcanza 10,9% en el caso de la madera sin tratar (Testigo); 7,3% en el de la madera tratada a 190ºC (MMT 190º) y 6,5% en el de la madera tratada a 210ºC (MMT 210º). La reducción de la humedad de equilibrio detectada en la modificación térmica a 190ºC respecto de los testigos es del (25±5)%, mientras que a 210ºC alcanza el (43±2)%. Los datos presentan diferencias significativas entre sí.

Otro hecho que se deriva del análisis de la evolución de los valores de la humedad de equilibrio con el tiempo, es el de que tanto en sorción (20/65 a 20/85) como en desorción (20/65 a 20/30), en el transcurso de una semana ya se alcanzaba el 99% de la humedad final (Figura 1), no modificando el tipo de tratamiento (Testigo, MMT 190º, MMT 210º) la velocidad de ganancia o pérdida de humedad aunque sí, como más arriba se ha puesto de manifiesto, el valor final de la misma.

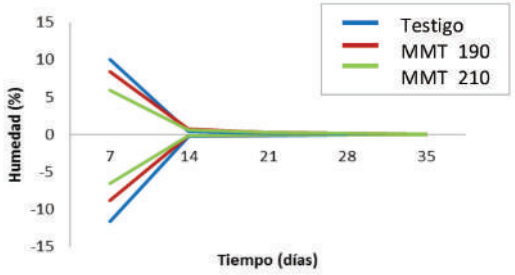

Figura 1. Evolución de la humedad de equilibrio con el tiempo.

Eficiencia anti-contracción (EAC)

La tabla 3 presenta los valores de la eficiencia anti-contracción (EAC) para los materiales analizados entre las condiciones higrotérmicas extremas de 20ºC/85%HR y 20ºC/30%HR.

Tabla 3. EAC en las condiciones higrotérmicas normalizadas.

Material	EAC (%)	
	Radial	Tangencial
Testigo	-	-
MMT 190º	29,1[a]	34,1 [a]
MMT 210º	29,9[a]	36,2 [a]

NOTA: letras diferentes indican diferencias significativas al 95% de nivel de confianza.

Los resultados anteriores ponen de manifiesto la ausencia de diferencias estadísticas en la estabilidad dimensional de la madera para las dos temperaturas de modificación en estudio. Los valores de la prueba F del análisis de varianza fueron P=0,24 para EAC radial y P=0,76 para EAC tangencial, siendo los datos medios de eficiencia anti-contracción un 29,5% en dirección radial y un 35,2% en dirección tangencial.

Densidad

La Tabla 4 presenta los resultados medios obtenidos. Entre paréntesis se señala la desviación típica.

Tabla 4. Densidad aparente media en las condiciones higrotérmicas normalizadas (kg/m^3).

Condición (TºC/HR%)	Testigo	MMT 190º	MMT 210º
20/65	541 (53)[a]	550 (64) [a]	543 (29) [a]

NOTA: letras diferentes indican diferencias significativas al 95% de nivel de confianza.

El análisis de varianza muestra que el tipo de tratamiento o su ausencia, no influye en la densidad del material (P=0,89>0,05).

Propiedades mecánicas

La tabla 5 recoge un resumen de los valores medios de las propiedades mecánicas ensayadas para cada tipo de tratamiento en comparación con las probetas testigo.

Tabla 5. Propiedades mecánicas para los tres lotes.

Propiedad	Unidades	Testigo	MMT 190º	MMT 210º
MOR en flexión	N/mm^2	85,5 (12,2)[a]	69,7 (20,6)[b]	40,1 (7,5)[c]
MOE en flexión	N/mm^2	10730 (1820)[a]	11900 (2298)[a]	10635 (1673)[a]
Impacto	kJ/m^2	27,0 (6,6) [a]	17,2 (6,1) [b]	7,4 (1,7) [c]
Dureza Brinell	N/mm^2	2,2 (1,0) [a]	1,5 (0,4) [a]	1,6 (0,2) [a]
Compresión axial	N/mm^2	42,2 (1,8) [a]	41,8 (8,6) [a]	59,3 (7,3) [b]
Cortante paralelo	N/mm^2	11,2 (1,3) [a]	11,4 (2,9) [a]	8,3 (1,9) [b]
Hienda	N/mm	34,8 (7,8) [a]	24,2 (4,8) [b]	24,1 (2,3) [b]

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

En lo que hace referencia a los datos observados para el MOR, el análisis refleja la existencia de tres grupos homogéneos diferentes estadísticamente entre sí (P=0,00<0,05) con un nivel de confianza del 95%.

De acuerdo con lo anterior se puede afirmar que el tratamiento produce una significativa pérdida de resistencia (MOR) que alcanza el valor de 18,4% en el tratamiento a 190ºC (MMT 190º) y de 53,1% en el de 210ºC (MMT 210º). Sin embargo no influye en la rigidez a flexión (MOE) del material (tabla 5) ya que no existen diferencias entre lotes (Hermoso *et al.* 2013).

En referencia a la resistencia al impacto, los datos de la tabla 5 concluyen que el tratamiento produce una significativa (P=0<0,05) pérdida de resistencia al impacto que alcanza el valor del 41% en el tratamiento a 190ºC (MMT 190) y el de 57,51% en el de 210ºC (MMT 210). Los resultados de este ensayo son de especial utilidad en el presente caso ya que esta propiedad es la que refleja una mayor sensibilidad al efecto reductor de las propiedades producido en la madera por la acción de los hongos, la temperatura de exposición o los tratamientos químicos (Gerhards 1968).

Respecto de la dureza superficial (Brinell), no existen diferencias estadísticas (P=0,26>0,05) entre la dureza de las tres muestras.

Para la resistencia a la compresión axial, sólo el tratamiento a 210ºC parece modificar significativamente la citada resistencia (incremento del 40%), lo que está en línea con los resultados obtenidos por Boonstra *et al.* 2007b, quienes incluso apuntaron que debido a este comportamiento, la flexión, por ser una combinación de los fenómenos de tracción, compresión y cortante, disminuye menos que la tracción por sí sola. Los autores atribuyen este resultado, a los cambios y modificaciones de los principales componentes de la madera los que parecen estar implicados en los efectos del termotratamiento sobre las propiedades mecánicas, aunque las causas, en todo caso, no obedecen a una regla clara ni sencilla.

Análogamente, los datos de la resistencia al cortante paralelo de la tabla 5 junto con el análisis estadístico muestran que la temperatura de 210ºC le afecta de forma significativa reduciéndola en un 25,6%, de nuevo en consonancia con lo expuesto por Früwald (2007).

Finalmente, de los datos de resistencia a la hienda se desprende que no existen diferencias entre tratamientos aunque sí entre la madera tratada (MMT 190, MMT 210) y sin tratar (Testigo). Se observa que el valor de la madera tratada se ve, como media, disminuida en un 30,5% respecto de la de la madera sin tratar.

Durabilidad biológica frente a hongos xilófagos e insectos

La tabla 6 recoge las medias de los valores de pérdida de peso en 30 probetas frente a los hongos basidiomicetos para cada tipo de tratamiento en comparación con las de las probetas control sin tratar (Control *P. radiata*).

Tabla 6. Resultados de los ensayos de durabilidad frente a hongos basidiomicetos (CEN/TS 15083-1).

Termotratamiento	Hongos	P. peso (%)	Clase de durabilidad (EN 350-1)	Clase de uso (EN 335)
Testigo	*C. puteana*	32,5	DC5 No durable	1
	P. placenta	20,3	DC 4 Ligeramente durable	
MMT 190º	*C. puteana*	23,3	DC 4 Ligeramente durable	1 y 2
	P. placenta	21,0	DC 4 Ligeramente durable	
MMT 210º	*C. puteana*	1,0	DC 1 Muy durable	3
	P. placenta	5,5	DC 2 Durable	

Al ser *Coniophora puteana* el hongo más crítico en madera de coníferas (Van Acker *et al.* 2011), la asignación más correcta y conservadora será la correspondiente a dicho hongo. Por dicho motivo la madera modificada térmicamente a 190ºC es asignada a la clase de durabilidad DC4 y la madera modificada térmicamente a 210ºC a DC1. Esto supone que la madera termotratada a 190ºC pueda ser empleada en las Clases de uso 1 y 2 (UNE-EN 335, AENOR 2012) y que la termotratada a 210ºC lo podrá ser en la Clase 3, mientras que la testigo vale para Clase de uso 1. Estos últimos datos son similares a los obtenidos por Van Acker *et al.* (2011). El efecto significativo de la temperatura de tratamiento sobre la durabilidad de la madera coincide con el puesto de manifiesto por Hakkou *et al.* (2006), sobre madera de haya (*Fagus sylvatica*).

Respecto de la durabilidad natural frente a *Hylotrupes bajulus*, la tabla 7 recoge los resultados medios habidos en la evaluación de las muestras de los dos tratamientos térmicos y de la madera sin tratar.

Tabla 7. Resultados de los ensayos de durabilidad frente a *Hylotrupes bajulus* (UNE-EN 46).

Termotratamiento	Grado de ataque	Larvas recuperadas			Larvas desaparecidas	Clase de durabilidad (UNE-EN 350-1)
		Muertas		Vivas		
		Sin haber perforado	Habiendo perforado			
Testigo	3	0	1 (10%)	9 (90%)	0	Susceptible
MMT 190º	2	2 (20%)	0	8 (80%)	0	Susceptible
MMT 210º	1	2 (20%)	8 (80%)	0	0	Durable

El estudio de los datos de la tabla 7, lleva a resultados muy similares a los obtenidos frente a hongos basidiomicetos ya que el tratamiento a 190ºC parece no conferir resistencia alguna, siendo compatible con una Clase de uso 2 definida en UNE-EN 335 (AENOR 2012) que no permite su uso en exterior salvo que exista una protección de barrera por diseño frente al agua de lluvia y por tanto no mejorando su durabilidad. El tratamiento efectuado a 210ºC es el que parece modificar la estructura de forma que la madera pueda ser clasificada como durable frente a este organismo, permitiendo la aplicación en Clase de uso 3, es decir en contacto con agua de lluvia pero no con el suelo. Este último resultado es compatible con lo hallado al respecto por Militz (2002).

Finalmente, en la tabla 8 se recogen los resultados obtenidos tras la evaluación efectuada en las probetas modificadas térmicamente y sin tratar frente a *Reticulitermes grassei*.

Tabla 8. Resultados de los ensayos de durabilidad frente a *Reticulitermes grassei* (UNE-EN 117).

Termotratamiento	Grado de ataque (EN 350-1)	Nª de supervivientes			Supervivencia de obreros (%)	Clase de durabilidad (EN 350-1)
		Obreros	Ninfas	Soldados		
Testigo	4	185	8	1	74	Susceptible
MMT 190º	4	144	9	3	58	Susceptible
MMT 210º	4	183	3	5	73	Susceptible

Se comprueba que la modificación térmica, cualquiera que sea la temperatura empleada, no confiere durabilidad alguna a la madera frente a la acción de termitas del género *Reticulitermes*. Este resultado es coincidente con el publicado por Nunes *et al.* 2004.

CONCLUSIONES

La modificación térmica reduce de forma significativa la variación de la humedad de equilibrio de la madera de *Pinus radiata*, sobre todo a 210ºC (43±2)%, lo que explica en parte la menor susceptibilidad de la madera termotratada al ataque por parte de hongos.

De los resultados sobre estabilidad dimensional y de densidad, no se desprende que el incremento en la temperatura del tratamiento influya de forma significativa en una mejora de la misma, aunque para la estabilidad dimensional sí se hace patente que la madera termotratada mejora respecto la madera sin tratar.

Se ha podido constatar experimentalmente sobre Pino radiata que los termotratamientos producen efectos colaterales en las propiedades mecánicas del material, salvo en la dureza Brinell y en la rigidez a flexión (MOE), que son más patentes a 210ºC. La modificación térmica a 210ºC produce una significativa reducción en la resistencia del material (MOR, impacto, cortante y hienda) y un aumento de la compresión axial. En el caso del tratamiento a 190ºC estas reducciones sólo afectan a las resistencias a la flexión, al impacto y a la hienda.

Respecto a la durabilidad, los resultados obtenidos permiten concluir que el termotratamiento a 190ºC confiere a la madera una durabilidad frente a hongos de pudrición no compatible con su empleo en exterior salvo que exista una protección por diseño frente al agua de lluvia; mientras que el termotratamiento a 210ºC confiere durabilidad suficiente como para destinar la madera a usos exteriores en contacto con agua de lluvia pero no con el suelo.

De todo lo anterior se deduce que cuando el criterio primordial de selección de la temperatura de tratamiento sea la durabilidad se deberá escoger con preferencia 210ºC pero que cuando esta exigencia no esté presente, la modificación a 190ºC será la de preferencia ya que produce menores alteraciones en las propiedades mecánicas y genera una estabilidad dimensional similar a la del tratamiento a 210ºC.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a la empresa Termobaso S.L. que cedió el material de ensayo.

BIBLIOGRAFÍA

Ariete, N.A. 2010. Caracterización de madera de *Pinus radiata* sometido a un proceso de modificación térmica usando un ambiente de inmersión. Trabajo de titulación de la Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales.

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2012. Durability of wood and wood-based products - Use classes: definitions, application to solid wood and wood based panels. UNE-EN 335. CEN. 13pp.

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2013. Durability of wood and wood-based products. Testing and classification of the resistance to biological agents and the water permeability of wood and wood-based materials. UNE-EN 350-1

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2012. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. UNE-EN 408:2011+A1

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2009. Madera modificada térmicamente (MMT): definiciones y características. UNE-CEN/TS 15679EX

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2011. Plásticos. Determinación de las propiedades al impacto Charpy. Parte 1: Ensayo de impacto no instrumentado. UNE-EN ISO 179-1.

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2010. Protectores de la madera. Determinación de la eficacia preventiva contra Hylotrupes bajulus (Linnaeus). Parte 1: Aplicación mediante tratamiento superficial (método de laboratorio). UNE-EN 46-1.

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2012. Protectores de madera. Determinación del umbral de eficacia contra las especies de reticulitermes (termitas europeas) (método de laboratorio). UNE-EN 117

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2004. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa. UNE-EN 13183-1/AC

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2011. Suelos de madera. Determinación de la resistencia a la huella (Brinell). Método de ensayo. UNE-EN 1534

Asociación Española de Normalización. AENOR. 2000. Suelos de madera y parquet, y revestimientos de madera para paredes y techos. Determinación de la estabilidad dimensional. UNE- EN 1910

American Society of Testing Materials. ASTM. 2000. Standard tests methods for small clear specimens of timber. ASTM D143-94, reapproved 2000

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.

Boonstra, M.J.; Van Acker, J.; Kegel, E.V.; Stevens, M.; 2007a. Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects. *Wood Sci Technol* 41:31-57.

Boonstra, M.J.; Van Acker, J.; Tjeerdsma, B.F.; Kegel, E.V. 2007b. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science* 64: 679-690.

Dirol, D.; Guyonnet, R. 1993. Durability by rectification process. *International Research group on Wood Preservation. Document No.* IRG/WP 93-40015.

Esteves, B.M.; Pereira, H.M. 2009. Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources* 4(1): 370-404.

Frühwald, E. 2007. Effect of high-temperature drying on properties of Norway spruce and larch. *Holz als Roh-und Werkst* 65: 411-418.

Gerhards, C.C. 1968. Effects of type of testing equipment and specimen size on toughness of wood. *U.S.D.A.Forest Service Research Paper FPL 97. 14 pp. U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory Madison, Wisconsin.*

Hakkou, M.; Prétissans, M.; Gérardin, P.; Zoulalian, A. 2006. Investigaction of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polymer Degradation and Stability* 91: 393-397.

Hermoso-Prieto, E.; Mateo-Campos, R.; Cabrero-Rojo, J.C.; y Fernández-Golfín, J.I. 2013. Tratamientos térmicos versus propiedades mecánicas en madera de pino radiata. Poster en el 6º Congreso Forestal Español. Actas del Congreso ISBN 978-84-937964-9-5.

Hill, C.A.S. 2006. *Wood modification: chemical, thermal and other processes.* Wiley series in renewable resources. J. Wiley and Sons. ISBN-10: 0-470-02172-1.

Hsu, W.E. 1986. Method of making dimensionally stable composite board and composite board produced by such method. *Canadian patent* 1215510.

Inoue, M.; Norimoto, M. 1991. Heat treatment and steam treatment of wood. *Wood industry* 45: 588-592.

Inoue, M.; Norimoto, M.; Tanahashi, M.; Rowell, R.M. 1993. Steam or heat fixation of compressed Wood. *Wood and Fiber Sci.* 25(3): 224-235.

Johansson, D.; Morén, T. 2006. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz als Roh-und Werkst.* 64: 104-110.

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.

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

Nunes, L.; Nobre, T.; Rapp, A. 2004. Thermally modified Wood in choice tests with subterranean termites. COST E 37, Reinbeck.

Rapp, A.O. 2001. Review of heat treatments of wood. ISBN 3-926301-02-3.

Rowell, R.M.; Lange, S.; Davis, M. 2000. Steam stabilization of aspen fiberboards. In Proceedings of the Fifth Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium; Canberra, Australia December 10th -13th 2000. Pp: 425-438. ISBN: 085926050X.

ThermoWood® Handbook. 2003. Finnish Thermowood Association.

Tjeerdsma, B.F.; Boonstra, M.; Militz, H. 1998. Thermal modification of non-durable wood species. 2. Improved wood properties of thermal treated wood. *IRG document IRG/WP 98-40123.*

Van Acker, J.; Michon, S.; Van den Bulcke, J.; De Windt, I.; Van Swaay, B.; Stevens, M. 2011. Limited variability in biological durability of thermally modified timber using vacuum based technology. *International Research group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 11-40567.*

Vernois, M. 2001. Heat treatment of wood in France-State of the art. In. *Review on heat treatments of wood. Proceedings of the special seminar held in Antibes, france, on 9 February 2001. COST action E22, EUR 19885. Pp: 35-42.*

Viitanen, H.; Jamsa, S.; Paajanen, L.; Nurmi, A.; Viitaniemi, P. 1994. The effect of heat treatment on the properties of spruce - a preliminary report. *International Research group on Wood Preservation. Document No. IRG/WP 94-40032.*

Viitaniemi, P.; Jämsä, S.; Viitanen, H. 1997. Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products. United States Patent nº 5678324 (US005678324).

Widmann, R.; Fernández-Cabo, J.L.; Steiger, R.; 2012. Mechanical properties of thermally modified beech timber for structural purposes. *Journal of Wood Products* 70: 775-784.