

## CÓDIGO 1.7.52

### **ALCANCE DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA EN LA EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LAS ESTRUCTURAS DE MADERA**

**López, Gamaliel<sup>1</sup>, Basterra, Luis-Alfonso<sup>1</sup>, Ramón-Cueto, Gemma<sup>1</sup>**

1: Grupo de Investigación Reconocido en Estructuras y Tecnología de la Madera  
Universidad de Valladolid  
e-mail: gama@arqu.uva.es, web: <http://www3.uva.es/maderas/index.htm>

**PALABRAS CLAVE:** Estructura de Madera; Ensayos No Destructivos; Termografía Infrarroja; Densidad; Detección Defectos Ocultos.

#### **RESUMEN**

La termografía infrarroja se ha incorporado en fechas relativamente recientes al grupo de técnicas instrumentales consideradas no destructivas que, de forma habitual, se utilizan en la inspección de estructuras históricas de madera. Esta técnica permite visualizar la temperatura de la superficie de los objetos de forma remota y sin ningún tipo de contacto, lo cual la convierte en un método estrictamente no destructivo. A pesar del potencial que atesora, las prestaciones que actualmente proporciona en el campo de las estructuras de madera son bastante limitadas, quizás por no haberse profundizado lo suficiente en su funcionamiento.

En esta comunicación se analizan los principios físicos que subyacen en la termografía infrarroja, así como del comportamiento termodinámico de la madera, para determinar sus posibilidades en la evaluación no destructiva de estructuras de madera. Mediante una serie de ensayos llevados a cabo en laboratorio se ha fijado, por un lado, la emisividad de la madera, propiedad imprescindible para el uso adecuado de esta técnica. Por otro lado, se ha abierto una nueva vía para caracterizar físicamente la madera mediante la estimación cuantitativa de su densidad, y se ha comprobado el alcance de la termografía infrarroja para detectar los defectos subsuperficiales que puede padecer este material.

#### **1. INTRODUCCIÓN**

En los últimos 25 años se ha producido un acelerado desarrollo de las técnicas denominadas no destructivas, proceso iniciado a comienzos del siglo XX, que ha permitido evaluar objetivamente las propiedades físicas de la madera y contrastarlas con los valores deducidos por métodos visuales. Estos procedimientos instrumentales posibilitan la determinación de propiedades elásticas y resistentes y, por tanto, su clasificación estructural, de un modo automático o semiautomático, eliminando cualquier criterio subjetivo que sí conlleva el sistema visual, el procedimiento más extendido.

Entre los procedimientos no destructivos más empleados en la actualidad para la evaluación de piezas estructurales de madera se pueden destacar las técnicas de ultrasonidos [1] y los métodos de penetración superficial o profunda [2]. En los últimos años se están agregando asimismo otras técnicas basadas en el uso de ondas electromagnéticas [3], grupo en el que se encuadra la técnica objeto de esta investigación, la Termografía Infrarroja (TI en adelante), encargada de analizar la región del espectro electromagnético que ocupan los rayos infrarrojos. La TI es una técnica relativamente nueva cuya característica principal, en el

contexto de este trabajo, consiste en visualizar la temperatura de la superficie de los objetos sin contacto alguno.

El propósito de este trabajo es analizar el potencial que posee esta técnica y establecer el rendimiento que actualmente puede aportar en la evaluación no destructiva (END en lo sucesivo) de estructuras de madera. En concreto, el trabajo se ha centrado en determinar la emisividad ( $\varepsilon$ ) de la madera, cuantificar su densidad ( $\rho$ ) y definir los límites para detectar defectos ocultos.

### 1.1 Emisividad

Las cámaras termográficas permiten obtener la temperatura de los cuerpos de forma remota por medio de la radiación infrarroja que emiten y las leyes de la radiación térmica. En este proceso, el conocimiento de la emisividad ( $\varepsilon$ ), propiedad que caracteriza la superficie de los cuerpos y determina su habilidad para irradiar energía [4], es imprescindible para determinar con exactitud la cantidad real de energía que irradian e interpretar adecuadamente las temperaturas calculadas por la cámara. Es esencial entonces saber el valor de la emisividad de la madera para realizar un análisis termográfico.

### 1.2 Densidad

La densidad es una de las características físicas más importantes de la madera. Por sí sola proporciona una idea muy aproximada de su calidad global como material estructural al estar relacionada con la mayor parte de las propiedades resistentes de la madera y, por tanto, con su comportamiento mecánico. Es, de hecho, uno de los parámetros asociados a las clases resistentes definidas en la norma europea *EN 338:2010* [5], por lo que su conocimiento permite una primera clasificación del material leñoso. Su determinación por medios no destructivos constituye entonces un interesante objetivo a la hora de dictaminar la fiabilidad y viabilidad de un elemento estructural.

### 1.3 Defectos

En la madera podemos encontrar dos tipos de irregularidades a causa de su origen orgánico: las denominadas singularidades, a veces mal llamadas defectos, y los defectos propiamente dichos. Las primeras son inevitables, aparecen de forma natural y siempre están presentes en mayor o menor medida en piezas estructurales que proceden de árboles vivos. Los segundos se entienden del mismo modo que en el resto de materiales pero, aunque las consecuencias en la estructura interna puedan ser parecidas, su origen y naturaleza son muy distintos y precisan una atención especial. Ambos trastornos afectan a la calidad del material y pueden reducir notablemente la capacidad resistente y mecánica del elemento estructural que las sufra respecto de la que tendría libre de defectos.

## 2. BASE TEÓRICA

### 2.1 Medición de la emisividad

Existen diversas técnicas para determinar la emisividad de la superficie de los cuerpos opacos aunque, quizás, la más habitual sea utilizar un emisor de referencia a la misma temperatura que el cuerpo investigado. Un procedimiento similar al descrito consiste en obtener la temperatura real del objeto a través de otro instrumento de medida de contacto, como un termopar. Ambas técnicas están normalizadas por la *ASTM Standard E1933, 1999a (2005)* [6]. No obstante, a día de hoy se siguen proponiendo nuevos procedimientos para mejorar la precisión en el cálculo de su valor [7, 8].

En la literatura apenas se ha encontrado información sobre valores de la emisividad de los materiales que normalmente integran este tipo de construcciones salvo alguna rara excepción [9]. Sí se han encontrado

puntuales valores de emisividad de alguna muestra de madera para distintas condiciones de temperatura e intervalos espectrales. El rango de valores oscila desde 0,50 de una muestra de madera “natural” [10] hasta 0,98 de una muestra genérica a 17°C en la banda espectral 2-5  $\mu\text{m}$  (dato extraído de la tabla de emisividades que incluye la cámara utilizada en este trabajo y a la que en el apdo. 3.1 se aludirá), pasando por 0,895 de una muestra de “roble cepillado” a 20°C [11]. La horquilla de valores es bastante amplia y en muchos casos no se especifica en qué condiciones de temperatura y en qué franja espectral se han obtenido. Al mismo tiempo se ha detectado una ausencia significativa de emisividades para las numerosas clases de madera que existen y para un rango más amplio de temperaturas y otras circunstancias propias de la madera que puedan afectar al valor de la misma.

## 2.2 Procesos térmicos no estacionarios

Se ha demostrado experimental y teóricamente que en los procesos de termotransferencia que se dan en régimen transitorio, la velocidad del enfriamiento y el calentamiento de los cuerpos depende de su geometría y dimensiones. Estos procesos suceden en tres etapas, una primera llamada de régimen irregular donde la velocidad de variación de la temperatura depende de las condiciones de contorno iniciales. Una segunda etapa denominada de régimen regular, condicionada por el coeficiente de traspaso de calor de la superficie, las dimensiones y forma del cuerpo y sus propiedades físicas, en donde la variación del exceso de temperatura en el tiempo tiene un comportamiento exponencial y adquiere la siguiente forma universal [12]:

$$\mathcal{G} = Ce^{-m \cdot t} \quad (1)$$

donde  $\mathcal{G}$  es el exceso de temperatura,  $C$  es una constante,  $t$  el tiempo y  $m$  el ritmo de enfriamiento o calentamiento.

Se advierte que el logaritmo del exceso de temperatura varía en el tiempo de forma lineal, y la magnitud  $m$  que los vincula es constante y no depende ni de las coordenadas ni del tiempo. Se denomina ritmo de calentamiento o enfriamiento y determina la velocidad a la que se calienta o enfría un cuerpo. Esta regularización del campo de temperatura tiene, además, carácter general y se cumple en todo tipo de cuerpos, ya sean homogéneos o heterogéneos [12]. Finalmente, hay una tercera etapa cuando el cuerpo alcanza el equilibrio térmico con el entorno y su temperatura coincide con la ambiental, pasando del régimen transitorio al estacionario.

## 2.3 TI en la detección de defectos subsuperficiales

La TI de tipo activo se basa en la inducción de un flujo de calor en la muestra mediante la utilización de una fuente de energía externa que produce contrastes térmicos en la superficie de la misma entre las zonas que presentan defectos en su interior y las que no. Estos gradientes de temperatura son recogidos a modo de mapas térmicos con la cámara de infrarrojos. De las diferentes técnicas de termografía activa existentes actualmente, quizás la más efectiva en la detección de defectos ocultos sea la termografía pulsada [13]. Una vez que la muestra ha sido solicitada térmicamente, la temperatura de la superficie crece súbitamente, comenzando la propagación del calor hacia las capas más internas. En principio, la velocidad a la que el frente caliente se transmite hacia el interior debería ser homogénea, dependiendo de las propiedades termofísicas del material, conductividad térmica, calor específico, densidad y difusividad térmica. En el momento que el frente de calor llega a una anomalía que altera alguna de dichas propiedades, la tasa de difusión de calor se modifica y, en consecuencia, la temperatura superficial sobre la mencionada anomalía variará a distinta velocidad que la del área que la rodea. En la superficie de la muestra resultan entonces gradientes de temperatura que quedan reflejados en las imágenes termográficas. Estos termogramas son almacenados en formato digital y serán posteriormente procesados y analizados para conocer la naturaleza

y el alcance real de dichos contrastes. El contraste térmico y su momento de aparición dependen, además de las propiedades térmicas del defecto, también de las características geométricas del mismo. Se producirá antes, y con mayor intensidad, sobre los defectos más superficiales y, por el contrario, su aparición se demorará en el tiempo, y lo hará con gradientes térmicos más reducidos, sobre aquellos que se encuentran a mayor profundidad [4]. En principio, y atendiendo a las leyes de conducción del calor, cuanto mayor sea la energía irradiada sobre la superficie del objeto mayor será el contraste de temperaturas obtenido y se podrán llegar a detectar defectos a mayor profundidad.

### 3. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Medios e instrumental

Para este trabajo se ha utilizado una cámara infrarroja modelo ThermaCAM B2 (FLIR Systems). Cuenta con un detector formado por un microbolómetro sin enfriamiento con arreglo de plano focal (FPA) de 160x120 píxeles de resolución que opera en el rango espectral 7,5-13  $\mu\text{m}$ . Los termogramas registrados se han analizado con el software *FLIR QuickReport 1.2* y el procesado de los datos de temperatura extraídos de las mismas con *Statgraphics Centurión XV*, con la versión 13.00 del programa matemático de cálculo simbólico *Maple* y con el *Matlab 7.1*. El acondicionamiento térmico de las probetas se ha llevado a cabo en una estufa ES-6 de IBERTEST y en una cámara frigorífica modelo MOD AC-250-30 de la empresa JP SLECTA. Como fuentes de excitación térmica se han utilizado calentadores de infrarrojos de cuarzo de hasta 2.400W. El control higrotérmico se ha seguido con un instrumento de medición multifunción de la casa TESTO, modelo 635-2 a través de tres sondas inalámbricas de temperatura y humedad y una sonda de inmersión/ penetración con punta de inmersión flexible T/P tipo K con una resolución de 0,10°C en el intervalo comprendido entre -50,00-+199,90°C.

#### 3.2 Material ensayado

Se han seleccionado siete especies distintas de madera maciza aserrada y una de aglomerado rechapado, buscando variedad en el color, textura y densidad. Se han confeccionado unas probetas con dimensiones aproximadas de 20x30x2 cm que presentan un acabado cepillado y limpio sin apenas defectos (Figura 1 y Figura 2). Para la detección de defectos se ha optado por trabajar sobre dos de las probetas anteriores, roble y haya. Sobre estas probetas se han practicado una serie de taladros en las testas y cantos para simular artificialmente los defectos que puede sufrir el material leñoso. Los diámetros son 1, 2, 4 y 8 mm a unas profundidades de 1, 2, 4, 6 y 8 mm (Figura 3). Con el fin de recrear con mayor fidelidad los efectos que padece una madera atacada, se han rellenado con serrín no compactado las perforaciones abiertas en las testas y se han aislado las probetas con poliestireno extrusionado en todo su perímetro para evitar una difusión lateral desigual.

#### 3.3 Procedimiento experimental emisividad

Se ha optado por estudiar la emisividad de las muestras a -25°C, -10°C, 5°C, 40°C y 60°C. El procedimiento se ha llevado a cabo de acuerdo a las especificaciones recogidas en la *ASTM Standard E1933, 1999a (2005)* [6], que propone dos métodos, el del termómetro de contacto y el del termómetro sin contacto. En primer lugar se ha calculado la emisividad de un material de referencia por medio del método del termómetro de contacto a las cinco temperaturas propuestas. El material seleccionado ha sido la cinta aislante 3M Scotch Super 88 de vinilo en color negro, con una emisividad muy bien conocida de 0,95 a 48,8°C, y que se usa de forma habitual en diversas aplicaciones termográficas [9].

Una vez calibrada la emisividad del material de referencia se ha fijado sobre cada una de las probetas un trozo de cinta aislante de unos 40 cm<sup>2</sup> y se han acondicionado a las mismas temperaturas ya comentadas (Figura 2). De este modo se puede medir la temperatura real de la superficie de la probeta sobre la cinta

aislante mediante el dispositivo termográfico y con la emisividad conocida previamente. Antes de la obtención de la emisividad de la madera se ha procesado cada termograma teniendo en cuenta la temperatura, la humedad ambiental y la radiación incidente sobre el plano donde se han ubicado las probetas, parámetros que afectan al cálculo de la temperatura.



Figura 1. Probetas ensayadas.



Figura 2. Procedimiento emisividad.

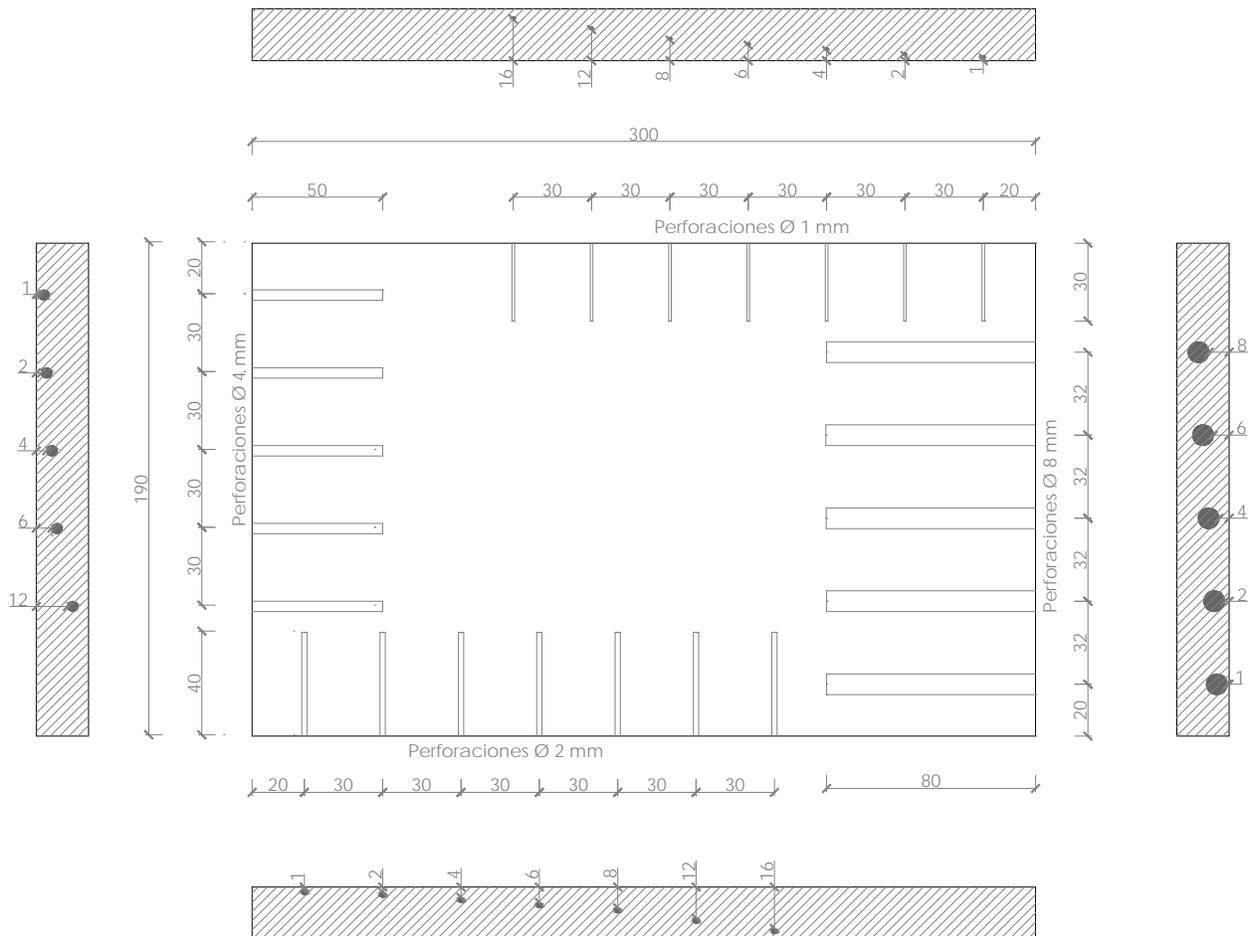


Figura 3. Geometría de los defectos recreados en las probetas.

### 3.4 Procedimiento experimental densidad

Las probetas se han acondicionado a 60°C introduciéndolas en la estufa durante 72 h, manipulando la humedad relativa del contenedor para que la madera ensayada mantuviera una humedad en torno al 7%. A continuación se ha observado su enfriamiento hasta la temperatura ambiente (25°C) durante una hora para garantizar el establecimiento del régimen térmico regular, seleccionando siete instantes para el control de la evolución descendente de la temperatura en función del tiempo: los minutos 1, 5, 10, 20, 30, 45 y 60.

Antes de la captura de los termogramas se ha anotado la temperatura y humedad del ambiente y se ha medido la radiación incidente sobre el plano donde se ubicarán las probetas, parámetros que afectan al cálculo de la temperatura. La cámara se ha colocado a 40 cm del objetivo y la temperatura se ha promediado sobre una superficie de unos 90 cm<sup>2</sup> para reducir los efectos puntuales del acabado de la madera. La emisividad considerada para el cómputo de la temperatura ha sido en todos los casos 0,90. Manteniendo constante su valor podemos evaluar la modificación real en la cantidad de energía que irradia la madera.

### 3.5 Procedimiento experimental defectos

La naturaleza anisótropa de la madera, además de su baja difusividad térmica y acabados superficiales heterogéneos, hace que la detección de defectos ocultos sea especialmente complicada, por lo que se ha optado por la aplicación de la termografía de pulso largo mediante la aportación al cuerpo inspeccionado de energía térmica radiante con un pulso de “muy larga duración”. Los calentadores se han emplazado a 45 cm del objeto y la cámara a 50 cm de la misma cara que el calentador. Se han efectuado los ensayos de cada probeta para pulsos de 60, 120, 180, 240, 300, 360, 480 y 600 segundos de duración y una potencia de 1.500 W.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Emisividad

La emisividad deducida en cada caso es el valor medio resultante de promediar los valores obtenidos tras repetir el ensayo en tres ocasiones para cada una de las condiciones de temperatura propuestas, tal y como señala la citada norma ASTM [6]. Además, el cálculo de la temperatura se ha promediado sobre una superficie de alrededor de 60 cm<sup>2</sup>. Una vez calibrada la emisividad de la cinta aislante a las temperaturas seleccionadas, los resultados obtenidos sobre las distintas probetas de madera se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Emisividad de distintas especies de madera a diferentes temperaturas.

PROBETA	-25°C	-10°C	+5°C	+40°C	+60°C
Pino	0,966	0,965	0,930	0,855	0,835
Moabi	0,977	0,975	0,940	0,860	0,830
Haya	0,985	0,975	0,965	0,876	0,850
Chapado Roble	1,000	0,990	0,980	0,887	0,855
Cerezo	1,000	0,990	0,970	0,900	0,865
Sapelly	1,000	0,990	0,980	0,880	0,860
Roble	1,000	0,990	0,990	0,910	0,880
Ipe	1,000	0,990	0,990	0,920	0,890

Centrándonos en 40°C y 60°C, las temperaturas más normales en una inspección termográfica, observamos que la emisividad a 40°C varía entre 0,855 y 0,920, mientras que a 60°C lo hace entre 0,830 y 0,890.

La adopción de cualquiera de los valores extremos de sendas horquillas implica un error inferior al 9% y al 8% respectivamente.

Tabla 2. Emisividad media de la madera según se temperatura.

Temperatura madera	Rango	Emisividad media	Contraste térmico	Error ΔT
-25°C	0,966-1,000	<b>0,983</b>	-45°C	1,1°C
-10°C	0,965-0,990	<b>0,977</b>	-30°C	0,5°C
+5°C	0,930-0,990	<b>0,960</b>	-20°C	0,7°C
+40°C	0,855-0,920	<b>0,887</b>	+15°C	0,3°C
+60°C	0,830-0,890	<b>0,860</b>	+35°C	0,8°C

## 4.2 Densidad

Las temperaturas resultantes durante el enfriamiento de las diferentes muestras, después de procesar los termogramas correspondientes, se detallan en la Tabla 3:

Tabla 3. Temperaturas registradas durante el enfriamiento de las probetas desde 60°C.

	Pino	Moabi	Haya	Chapado	Cerezo	Sapelly	Roble	Ipe
	507.42	555.15	620.43	651.25	781.47	788.39	919.45	1060.5
1.00	53.6	54.9	56.0	56.3	56.6	54.1	55.8	57.0
5.00	45.9	48.1	49.2	49.6	50.7	48.3	51.0	52.4
10.00	40.9	41.8	43.8	44.4	45.9	43.9	46.7	48.2
20.00	33.6	34.8	36.5	37.1	37.9	37.4	39.7	41.8
30.00	30.0	30.6	31.9	32.4	34.4	33.5	36.1	37.2
45.00	27.5	28.3	28.5	28.7	30.4	29.7	31.9	33.3
60.00	26.5	27.1	27.6	28.1	28.8	28.1	30.3	31.0

Una vez ligadas las tres variables involucradas en el proceso, la densidad, la temperatura y el tiempo (Tabla 3) se ha comparado la variación del exceso de temperatura en el tiempo, obteniendo unas curvas de enfriamiento que siguen una ley exponencial de acuerdo a la teoría del régimen térmico regular, y advirtiéndose que dicha etapa se establece ya desde el primer minuto (Figura 4). En esta ecuación exponencial la constante que aparece en la potencia del número “e” determina el ritmo de enfriamiento  $m$  (1), magnitud que vincula el exceso de temperatura con el tiempo y que es propia de cada cuerpo (Tabla 4). Se advierte que la diferencia total en la cantidad de variación de temperatura que sufren las probetas es menor a medida que la densidad aumenta (Tabla 5), comportamiento previsible ya que la difusividad térmica es inversamente proporcional a la densidad. Las leves desviaciones obedecen a que pequeñas diferencias en las condiciones térmicas iniciales y las dimensiones de las probetas. No obstante, la relación entre la densidad y la velocidad de enfriamiento es estadísticamente manifiesta: se ha determinado que las pendientes entre las distintas maderas es significativamente diferente por medio de una ANOVA de una variable,  $P < 0,01$ .

Tabla 4. Ley exponencial de enfriamiento y coeficiente de correlación.

	Pino	Moabi	Haya	Chapado	Cerezo	Sapelly	Roble	Ipe
Densidad	507.42	555.15	620.43	651.25	781.47	788.39	919.45	1,060.50
Función	$26.115e^{-0.049389x}$	$27.251e^{-0.048813x}$	$29.199e^{-0.047688x}$	$25.949e^{-0.042776x}$	$29.701e^{-0.039368x}$	$28.764e^{-0.038643x}$	$28.522e^{-0.035359x}$	$30.341e^{-0.031391x}$
R <sup>2</sup>	98.4248%	98.4271%	98.5625%	99.1149%	99.1337%	99.3852%	97.9982%	99.4938%

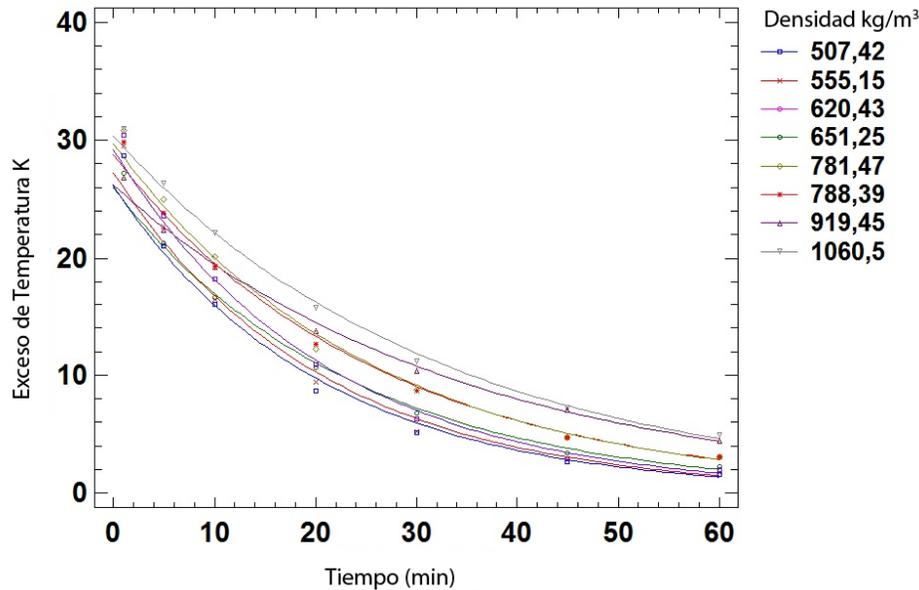


Figura 4. Relación tiempo-exceso de temperatura según la densidad.

Las condiciones térmicas iniciales no afectan de ninguna manera al resultado dado que el ritmo de enfriamiento era constante e independiente de las coordenadas y del tiempo. No importa, por tanto, la temperatura a la que comience el proceso, en cuanto se establezca el régimen regular el ritmo de transmisión de calor será teóricamente idéntico. La imprecisión a causa del cálculo termográfico es despreciable, dado que se toman siete mediciones durante una hora y la línea de regresión absorbe buena parte de la misma.

Tabla 5. Variación de temperatura de las probetas durante su enfriamiento a lo largo de una hora.

	Pino	Moabi	Haya	Chapado	Cerezo	Sapelly	Roble	Ipe
Densidad	507.42	555.15	620.43	651.25	781.47	788.39	919.45	1,060.50
$T_{ini}$ [°C]	61.7	61.2	61.7	61.5	61.2	61.0	61.9	61.3
$T_{fin}$ [°C]	26.5	27.1	27.6	28.1	28.8	28.1	30.3	31.0
$\Delta T$ [°C]	<b>35.2</b>	<b>34.1</b>	<b>34.1</b>	<b>33.4</b>	<b>32.4</b>	<b>32.9</b>	<b>31.6</b>	<b>30.3</b>

### 4.3 Defectos

A continuación se va a mostrar el ensayo más representativo de los numerosos llevados a cabo [16]: probeta de roble con defectos de 8 mm y un pulso de 300 segundos (Figura 5 y Figura 6). En todos los casos, cada una de las figuras corresponde a un tiempo determinado del ensayo. En el centro de todas ellas aparece el termograma en 2D ya procesado, sobre el que se señala a trazos una línea cuyo perfil térmico se dibuja en la parte superior en un gráfico que indica la situación y profundidad de los defectos simulados. En la zona inferior se representa el mapa térmico en 3D. Aunque la secuencia de termogramas es muy amplia, se han seleccionado únicamente los instantes más representativos.

Además de analizar la distribución espacial de la temperatura en cada momento, se ha realizado un estudio de la evolución temporal del gradiente térmico (método del contraste absoluto) entre los píxeles situados sobre cada uno de los defectos y otro píxel situado sobre un área sana,  $S_a$ , a lo largo de todo el ensayo (Figura 7). En las gráficas se observa la evolución del contraste térmico entre los defectos y la  $S_a$  registrada a lo largo de todo el proceso y que han sido originados por la aplicación de pulsos de energía radiante de distinta duración. Dichas gráficas se acompañan con una imagen termográfica normalizada como promedio aritmético de todos los termogramas tomados durante el ensayo elevada a la décima potencia. El

propósito de esta normalización es condensar en una única imagen todos estos termogramas y tratar de fusionar, de alguna manera, los máximos gradientes sobre la misma. Estas imágenes reflejan la distribución espacial de la temperatura superficial de la probeta en algún momento del calentamiento o enfriamiento que experimenta después de la aplicación del pulso de energía.

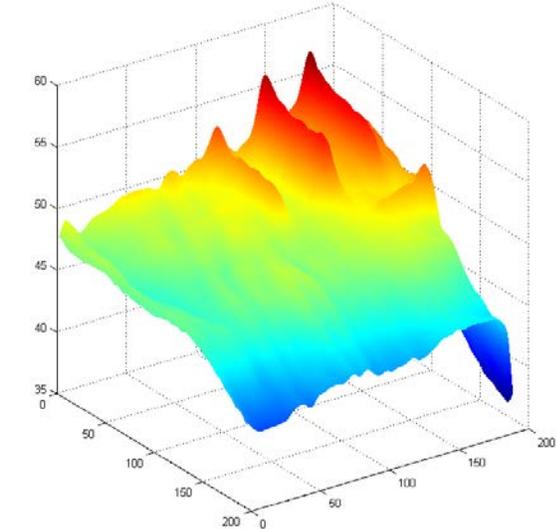
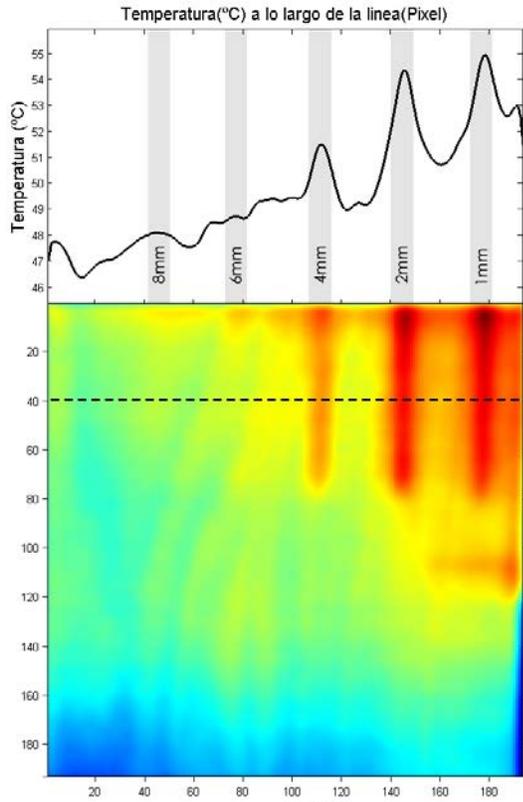


Figura 5. Distribución espacial de la temperatura superficial de la probeta de roble a los 180 s de calentamiento.

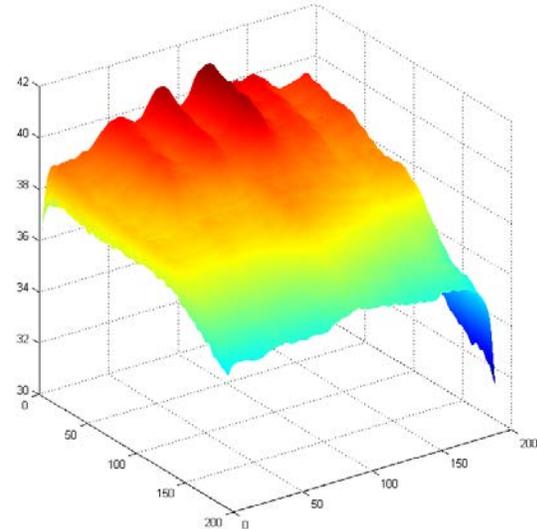
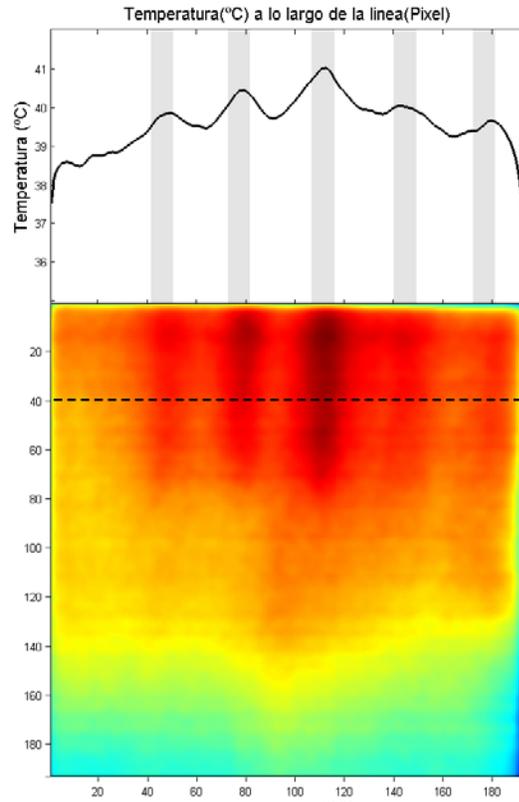


Figura 6. Distribución espacial de la temperatura superficial de la probeta de roble a los 180 s de enfriamiento.

Se advierte que la superficie ubicada sobre los defectos presenta una temperatura superior a la del resto de la cara inspeccionada, generando lo que se denomina habitualmente como zonas calientes. Son precisamente estas zonas calientes las que permiten detectar los defectos que se ocultan en el interior de la probeta. Tal y como se observa en la secuencia de figuras presentadas, el defecto de 8 mm de diámetro es detectable a todas las profundidades consideradas en algún momento del proceso, apareciendo inicialmente los más superficiales con un gradiente térmico muy marcado y, posteriormente, los más profundos con un gradiente más moderado.

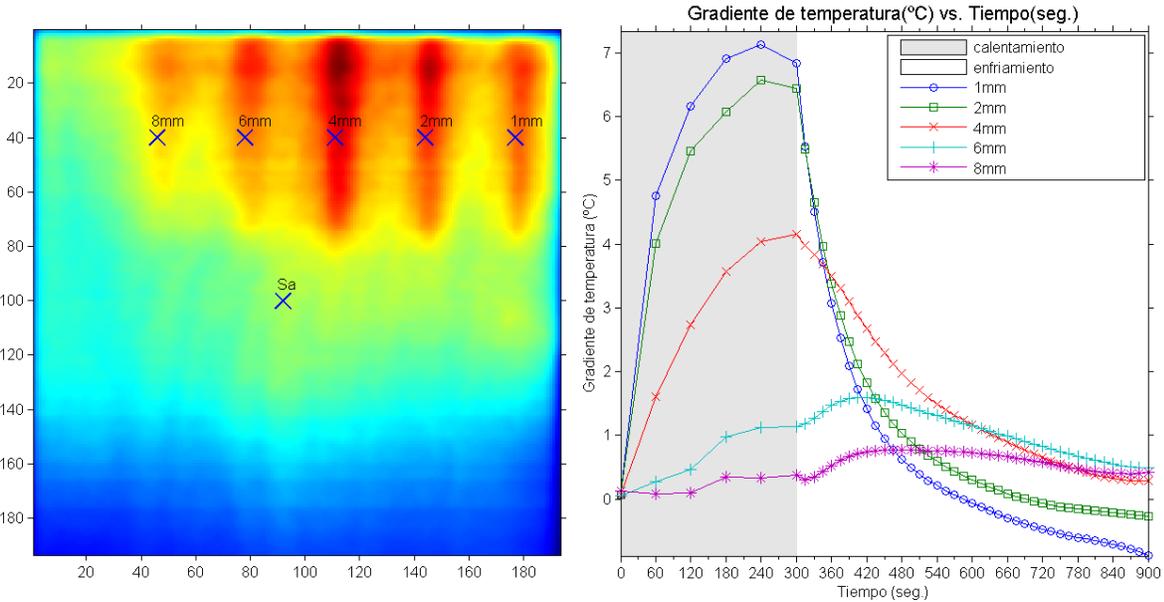


Figura 7. Roble. Evolución temporal del contraste térmico entre píxeles sobre defectos y un píxel sobre un área sana provocado por la aplicación de un pulso de energía radiante de 300 s de duración.

En el análisis temporal también se advierte que el defecto de 8 mm es detectable a todas las profundidades consideradas por la generación de las llamadas zonas calientes. La evolución e intensidad de los contrastes térmicos dependen de la profundidad del defecto. Para 1, 2 y 4 mm el máximo valor de dicho contraste aparece durante el calentamiento y rápidamente, y para 6 y 8 mm, lo hace durante el enfriamiento y de una forma más pausada. Si nos fijamos en los defectos más profundos, podemos apreciar que el contraste se ha ido acentuando a medida que incrementábamos la duración del pulso de energía aplicado sobre la probeta. Así, en el defecto a 6 mm de profundidad el gradiente ha pasado de 0,63°C para un pulso de 60 s, a 2,20°C para un pulso de 600 s, y en el defecto a 8 mm, de 0,40°C a 1,36°C. En los defectos más superficiales sucede lo mismo entre el pulso de 60 y 300 s, sin embargo, el gradiente provocado por pulsos de mayor duración apenas varía con respecto al de 300 s. A continuación se muestra el máximo gradiente térmico detectado en la probeta de roble con defectos de 8 mm de diámetro y el momento de su aparición durante el ensayo, en función de la duración del pulso de energía aplicado (Tabla 6).

Tabla 6. Máximo gradiente detectado entre píxel sobre defecto y sobre  $S_a$  e instante de aparición en la probeta de roble y perforaciones de diámetro de 8 mm.

Profundidad [mm]	Pulso de 60s		Pulso de 300s		Pulso de 600s	
	Tiempo [s]	Gradiente [°C]	Tiempo [s]	Gradiente [°C]	Tiempo [s]	Gradiente [°C]
1	60 (cal)	5,75	240 (cal)	7,14	480 (cal)	6,75
2	60 (cal)	5,63	240 (cal)	6,58	360 (cal)	6,93
4	60 (cal)	2,15	600 (cal)	4,15	540 (cal)	5,27
6	165 (enf)	0,63	105 (enf)	1,59	90 (enf)	2,20
8	195 (enf)	0,40	180 (enf)	0,77	120 (enf)	1,36

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1 Emisividad

Se ha obtenido el valor de la emisividad de ocho especies de madera a cinco temperaturas distintas en la banda espectral 7,5-13  $\mu\text{m}$ . Se ha observado que varía significativamente con la temperatura, decreciendo su valor en todos los casos con el aumento de esta última. El tipo de acabado y el aspecto que presenta la superficie de la madera, color, textura, veteado e incluso tonalidad, ejercen una gran influencia sobre el valor de la emisividad. Dado que la madera es un material muy heterogéneo se deberá promediar la medida termográfica sobre una superficie relativamente amplia del elemento analizado. Se propone un valor genérico de emisividad para la madera según las temperaturas seleccionadas y en la banda espectral 7,5-13  $\mu\text{m}$ , que se ha extraído de promediar los valores obtenidos para cada una de ellas (Tabla 2). La adopción de esta emisividad media, cualquiera que sea la especie involucrada, posibilita limitar el error máximo en el cálculo de la temperatura a 1,1°C en el peor de los casos [14].

### 5.2 Densidad

Se ha comprobado que la densidad de la madera mantiene una estrecha relación con la velocidad de transmisión de calor durante la etapa de régimen regular de su enfriamiento, velocidad que viene determinada por la magnitud  $m$ , conocida como ritmo de enfriamiento (Tabla 4). La IRT se ha utilizado para controlar la evolución de la temperatura en el tiempo y diseñar un procedimiento que permite estimar la densidad. El procedimiento se basa en la obtención del ritmo de enfriamiento o la pendiente de la recta que en coordenadas semilogarítmicas describe dicho enfriamiento en función de la densidad de la madera. Una vez establecida la etapa regular del proceso su valor teóricamente tiene que ser constante, por lo tanto, sólo es necesario provocar un contraste térmico suficientemente intenso que garantice que dicho proceso se prolongue durante cierto tiempo. En este trabajo se han definido las pendientes para unas probetas de aproximadamente 18 mm de grosor, y al ser los resultados de los ensayos tan satisfactorios, se está ampliando la investigación para establecer las pendientes de más espesores y buscar la relación entre los mismos [15].

### 5.3 Defectos

La detección de defectos subsuperficiales mediante TI se basa en la localización de contrastes térmicos en la superficie del cuerpo solicitado. El procesado de las imágenes es imprescindible para intentar minimizar el ruido y aberraciones inherentes al sistema de captura y a las fuentes de excitación térmica de modo que se garantice que los gradientes de temperatura detectados tengan su origen exclusivamente en la energía irradiada por el cuerpo y no por causas ajenas al mismo. La radiación emitida por un cuerpo depende en gran medida de su emisividad que, a su vez, está fuertemente condicionada por el estado de la superficie que presente el propio cuerpo. Se ha comprobado que las singularidades superficiales propias de la madera son muy fácilmente detectables por medio de la TI, como también lo son las diferencias de densidad exis-

tentes entre los sucesivos anillos de crecimiento estacionales. La termografía activa de pulso largo empleada ha permitido identificar, con cierta seguridad, los defectos artificiales simulados de un diámetro de 4 mm hasta una profundidad de 2 mm, y de 8 mm hasta una profundidad de 8 mm en las probetas de madera testadas, con espesores reducidos y superficies cepilladas que no muestran apenas irregularidades superficiales. Sin embargo, hay que subrayar que los gradientes de temperatura producidos por los defectos en la superficie de las probetas son similares, cualitativa y cuantitativamente, a los que generan las singularidades de la superficie de la madera. En consecuencia, no es posible, por el momento, establecer con carácter general los límites de la detectabilidad, ya que incluso los defectos más grandes y próximos a la superficie pueden ser confundidos o quedar camuflados por las variaciones locales de emisividad y reflectividad y por los cambios en las propiedades termofísicas del material leñoso. Con la metodología de los ensayos planteados en este trabajo se ha comprobado la dificultad que supone la detección de defectos internos en la madera puesta en obra mediante la TI. No obstante, esta técnica está en constante evolución y no se descarta que se pueda mejorar su efectividad mediante la aplicación de otros métodos de procesamiento o de sistemas de termografía activa distintos a los utilizados [16].

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Oliveira F. G. R., Sales A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 97 (2006): 2443-2446.
- [2] Acuña L., Basterra L.A., Casado M., López G. et al. Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species. *Materiales de Construcción*, Vol 61, 303 (2011): 451-464.
- [3] Bucur V. *Non-destructive characterization and imaging of wood*. New York: Springer, 2003.
- [4] Maldague, Xavier P.V. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [5] EN 384:2010. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density.
- [6] ASTM Standard E1933, 1999a (2005). "Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers". ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.
- [7] Z.H. Chen, T. Uchida, S. Minami, Emissivity correction in infrared microthermography. *Measurement*, Vol. 11 (1993): 55-64.
- [8] D. Especel, S. Matteï, Total emissivity measurements without use of an absolute reference. *Infrared Physics & Technology*, Vol. 37 (1996): 777-784.
- [9] Avdelidis, N.P. and A. Moropoulou. Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*. Vol 35 (2003): 663-667.
- [10] Gaussorgues, G. *Infrared Thermography*. London: Chapman & Hall, 1994.
- [11] Mijeev M.A., Mijeeva I.M. *Fundamentos de termotransferencia*. Rumania: Mir, 1979.
- [12] Isachenko V., Osipova V., Sukomel A. *Heat Transfer*. USA: University Press of the Pacific, 2000.
- [13] Tanaka T., Divós F. Wood inspection by thermography. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*, Sopron, Hungary, September 2000.
- [14] López G., Basterra L.A., Acuña L., Casado M. Determination of the Emissivity of Wood for Inspection by Infrared Thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 32 (2013): 172-176.
- [15] López G., Basterra L.A., Acuña L. Estimation of wood density using Infrared Thermography. *Construction and Building Materials*, Vol. 42 (2013): 29-32.
- [16] López G., Basterra L.A., Ramón-Cueto G., De Deigo A. Detection of Singularities and Subsurface Defects in Wood by Infrared Thermography. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*. Doi: 10.1080/15583058.2012.702369.