

Infrared thermography (IRT) to detect internal defects caused by xylophagous insects in bamboo culms

Termografía infrarroja (TI) para detectar los defectos internos causados por los insectos xilófagos en los culmos de bambú

A. Jaramillo ^{1*}, Â. do Valle **, L. Librelotto **

* Universidad UTE – Quito, ECUADOR

** Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, BRASIL

Fecha de Recepción: 18/12/2018

Fecha de Aceptación: 12/04/2019

PAG 278-287

Abstract

Infrared Thermography (IRT) is a technique used in the inspection of constructive elements in buildings. It has a great potential for the investigation of pathological manifestations because it is a strictly non-destructive procedure that could be rapidly applied in fieldwork. This research analyzes the possibility of using active IRT to detect internal defects caused by xylophagous insects in bamboo culms, in order to apply it in the fieldwork for the inspection of pathological manifestations in buildings. In laboratory, samples of bamboo culms of Bambusa tuldoidea and Phyllostachys bambusoides species were submitted to a thermographic experiment using a thermographic camera and FLIR B400 software. Subsequently, the potential for using this technique in the fieldwork was evaluated. The results point the limitations of both, technique and method used, to identify perforations of diameter less than or equal to 3 mm located in the inner wall of the bamboo culms.

Keywords: Infrared thermography, bamboo, detection of internal defects, insect decay, non-destructive testing

Resumen

La Termografía Infrarroja (TI) es una técnica usada para inspeccionar los elementos constructivos en las edificaciones. Posee un enorme potencial para la investigación de las manifestaciones patológicas porque es un procedimiento estrictamente no destructivo que se podría aplicar fácilmente en el trabajo de campo. Esta investigación analiza la posibilidad de usar la termografía infrarroja activa para detectar los defectos internos causados por insectos xilófagos en las cañas de bambú, con el fin de aplicarla en terreno en la inspección de las manifestaciones patológicas de las construcciones. En el laboratorio, muestras de cañas de bambú de las especies *Bambusa tuldoidea* y *Phyllostachys bambusoides* se sometieron a un experimento termográfico usando una cámara termográfica y software FLIR B400. Luego, se evaluó el potencial de esta técnica para ser usada en terreno. Los resultados señalan las limitaciones, tanto de la técnica como del método usado, para identificar las perforaciones menores o igual a 3mm de diámetro ubicadas en la pared interior de los culmos de bambú.

Palabras clave: Termografía infrarroja, bambú, detección de defectos internos, deterioro por insectos, ensayo no destructivo

1. Introducción

El empleo del bambú en la construcción podría transformarse en una alternativa sustentable considerando sus potenciales de renovación, abundancia y rápido crecimiento. Sin embargo, el bambú es un material orgánico y, en consecuencia, susceptible al deterioro provocado por los agentes bióticos, entre ellos, los organismos xilófagos (Gupta y Kumar, 2008); (Jaramillo, 2019).

La durabilidad de una construcción y de sus componentes constituye un requisito para los usuarios respecto de su comportamiento (International Organization for Standardization, 2011); (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013). En este sentido, el estudio de la condición y conservación de los elementos de bambú usados en las edificaciones contribuye a incrementar el conocimiento sobre este tema, poco explorado y determinar su durabilidad.

La inspección visual es un método no destructivo empleado para inspeccionar los elementos constructivos de

las edificaciones; se usa ampliamente para detectar las irregularidades en los componentes de las construcciones. Sin embargo, está limitada a los aspectos externos y no identifica el estado de la integridad interna de los componentes.

Considerando lo anterior, es necesario complementar la inspección de los elementos de bambú con otros procedimientos de inspección para identificar el estado de las partes internas dañadas que muestren signos de deterioro, facilitando la toma de decisiones en relación a los tratamientos preventivos o paliativos (Jaramillo y Librelotto, 2018); (Jaramillo, 2019).

La termografía infrarroja (en adelante, TI) es un método de inspección estrictamente no destructivo que funciona con una cámara termográfica, que mide la radiación emitida por las superficies de la muestra en un momento dado, entregándola en forma de termogramas. Una técnica de ejecución rápida que puede ser aplicada en terreno (Gayo et al., 1992); (Rodríguez-Liñan et al., 2012). En la construcción, se usa con frecuencia para detectar zonas con diferente humedad e infiltraciones de aire, para la inspección de instalaciones eléctricas y el análisis del comportamiento

¹ Autor de Correspondencia:

Universidad UTE – Quito, ECUADOR
E-mail: andresalome@gmail.com

térmico de las edificaciones con el fin de determinar su eficiencia energética (Bagavathiappan et al., 2013).

Luego de realizar una búsqueda sistemática sobre la TI de muchas bases de datos, se encontró un trabajo científico (Tuli et al., 2009) que describe específicamente la aplicación de una TI en el bambú. Esa investigación exploraba la posibilidad de usar la técnica para estudiar los defectos y daños en este material; modulando diferentes frecuencias de calentamiento y simulando defectos del tipo agujero, con diámetros de entre 3 y 10mm, en muestras de medio culmo de bambú (culmo de bambú cortado a lo largo) para los ensayos.

Previamente, en un trabajo de campo relacionado con este estudio, se practicaron algunas inspecciones visuales a las construcciones con bambú, donde fue posible observar y registrar la presencia de agujeros superficiales de aproximadamente 3mm de diámetro en algunos culmos (Jaramillo et al., 2018), provocados por *Dinoderus minutus* y otros insectos. Debido a esas anomalías típicas y al ataque de insectos, el enfoque se centró en la aplicación de la técnica de termografía para identificar y analizar las manifestaciones patológicas en diámetros de hasta 3mm.

En consecuencia, el objetivo de este estudio fue analizar el potencial de usar la termografía infrarroja activa para detectar los defectos internos (agujeros) provocados por insectos xilófagos en los culmos de bambú, explorando la aplicación de esta técnica en los estudios actuales, y además guiando investigaciones futuras sobre este tema.

2. Marco teórico

Las primeras aplicaciones de termografía infrarroja se realizaron en 1800, cuando William Herschell identificó la existencia de los rayos infrarrojos. Durante el siglo XIX, se realizaron algunas investigaciones como un intento de diseñar dispositivos para detectar y cuantificar este tipo de radiación. En el siglo XX, el desarrollo de esta tecnología fue sustancial y su aplicación fue prioritariamente para fines militares. Solo al término de la Segunda Guerra Mundial, la aplicación se enfocó en la ingeniería (López, 2010).

La radiación emitida por la mayoría de los cuerpos se concentra principalmente en el espectro infrarrojo, con longitudes de onda de entre 2 y 5,6 μ (Gayo et al., 1992). La cámara termográfica puede detectar, medir y capturar imágenes de esta radiación, lo que permite calcular y procesar estas imágenes para visibilizar las temperaturas emitidas por el cuerpo en un mapa (termograma). Esto es posible porque los detectores de una cámara termográfica convierten la energía radiante del espectro infrarrojo en una señal eléctrica y luego en una imagen de temperatura visible (López, 2010).

En este sentido, la termografía es una técnica que se basa en la detección de la radiación infrarroja emitida por los objetos y permite medir las temperaturas y observar los patrones de la distribución del calor en un sistema dado (Altoé y Oliveira, 2012); puede emplearse en la inspección de manifestaciones patológicas de las edificaciones y como instrumento con intenciones ingenieriles.

La existencia de un defecto en un elemento constructivo reduce la tasa de difusión del calor, por lo que al observar la temperatura de la superficie con una cámara termográfica, los defectos aparecen como zonas de distinta

temperatura respecto del área circundante. Para ver los defectos más profundos, se requiere mayor tiempo de observación y, por tanto, la imagen aparecerá con menos contraste (Maldague, 2000).

Para comprender cabalmente el tema de la inspección de elementos constructivos mediante la aplicación de la TI, fue necesario realizar un estudio bibliográfico sobre su funcionamiento para identificar los defectos de la madera y luego, adaptarla y aplicarla a las muestras de bambú, en el laboratorio. Esta investigación experimental intenta encontrar una aplicación de esta técnica al trabajo de campo para inspeccionar el bambú incorporado en las construcciones.

La TI utilizada en la inspección de piezas de madera, identifica los defectos internos según las variaciones de la densidad combinadas con las irregularidades del material: los defectos se relacionan con la reducción de la densidad y las singularidades con el aumento de esta (López et al., 2012). Estos cambios de densidad modifican el comportamiento térmico del material, provocando una variación de la temperatura superficial de la muestra porque la difusibilidad térmica es inversamente proporcional a la densidad (López et al., 2014). La identificación de una modificación en la temperatura capturada por la cámara infrarroja sugiere la ocurrencia de un defecto o particularidad en la madera. Este mismo principio operativo y la identificación se podrían aplicar al bambú.

Algunos estudios (Rodríguez-Liñan et al., 2012); (López et al., 2014); (López et al., 2012) señalan las posibilidades de aplicar la termografía infrarroja a las piezas de madera para detectar las diferencias en el contenido de humedad, pérdida de densidad interna, así como para ilustrar el proceso de deterioro en sus diversas etapas.

Los ensayos de TI se clasifican en dos tipos: pasivos y activos. En los primeros, el registro termográfico se obtiene sin usar la excitación térmica en la muestra. Por su parte, la termografía activa expone el objeto en estudio a una fuente artificial de calor. En general, la termografía pasiva no presenta diferencias térmicas perceptibles en las muestras de madera, independientemente del tamaño o la profundidad del defecto interno con respecto a la superficie (Rodríguez-Liñan et al., 2012). Por esta razón, es necesario usar la termografía activa para obtener resultados visibles.

Algunos tipos de TI se basan en el tipo y duración de la excitación térmica (López, 2010): termografía pulsada, termografía de pulso largo, termografía lock-in, vibro-termografía. En los tres primeros tipos, es necesario aplicar calor para analizar la cara del objeto, mientras que en el último se aplica la vibración mecánica.

La termografía pulsada tiene tres características importantes: rapidez de inspección, posibilidad de aplicarla en componentes que están en servicio y prevención del daño al sistema ensayado debido al uso de estímulos de baja intensidad (Oshiro, 2011). Esta técnica, al igual que la termografía de pulso largo (López, 2010); (López et al., 2012), ha sido aplicada para detectar los defectos internos en la madera (Rodríguez-Liñan et al., 2012).

La detección de defectos internos en las muestras de bambú se realizó con el método de la técnica por Imágenes de onda térmica de frecuencia modulada (FMTWI, por sus siglas en inglés) (Tuli et al., 2009), que puede ser referido como un tipo de termografía lock-in (Chatterjee et al., 2011). (Tuli et al., 2009) señalan la aplicación de esta técnica en cuatro culmos de bambú de dos especies diferentes, divididos por la mitad de su dirección longitudinal, con perforaciones



de agujeros ciegos de diversos diámetros. Para la excitación térmica de las muestras, se usaron dos lámparas halógenas de 300W colocadas una a cada costado de la muestra en ensayo, durante veinte minutos para calentar la superficie, con frecuencias de ensayo entre 1 y 100mHz; se consideró que fue lo correcto. Los resultados señalan la posibilidad de identificar agujeros con diámetros mayores a los 5mm ubicados entre los 2 y 6mm de profundidad respecto de la superficie de la corteza y la posibilidad de observar defectos a 2mm de profundidad con frecuencias similares a los 100 mHz.

En base a estos experimentos, el objetivo de este estudio fue ensayar la TI pulsada activa para inspeccionar los culmos de bambú con agujeros, en muestras de diámetros de hasta 3mm, similar a los provocados por insectos xilófagos.

Los insectos xilófagos producen ataques más destructivos en el bambú, principalmente en las cañas secas. Las termitas y los insectos perforadores son los más comunes; su ataque se caracteriza por la presencia de galerías en las paredes de la caña y agujeros circulares u ovales en la corteza. Las inspecciones de campo realizadas a las estructuras de bambú, identifican que el diámetro de este tipo de agujeros es de aproximadamente 2 a 3cm (Jaramillo y Librelotto, 2018). Los autores (Jaramillo, 2019) y (Kaminski et al., 2016) señalan que los insectos perforadores son los que atacan más frecuentemente las cañas de bambú; produciendo agujeros de salida de entre 1 y 2mm de diámetro.

3. Materiales y métodos

En este estudio se usó una cámara infrarroja marca FLIR, modelo B400, con una resolución espacial de 320x240 pixeles, sensibilidad térmica de 50mK (0,05°C) que permite inspeccionar objetos en un rango de temperatura de entre los -20°C y 350°C, con una precisión de +/- 2°C.

Previo a los ensayos, se le introdujeron a la cámara los siguientes parámetros: temperatura ambiente, humedad del aire, distancia cámara-objeto, temperatura reflectada y emisividad. Con el uso de un termohigrómetro fue posible registrar la temperatura ambiente y la humedad del aire. La distancia entre la cámara y la muestra fue de 80cm. Antes de cada ensayo, se fijó la temperatura reflectada mediante el método descrito en la norma ASTM E1862-97 (ASTM, 2010). Además, para determinar la emisividad de las muestras, se usó el método descrito en la ASTM E1933-99a (ASTM, 1999). El valor obtenido para la emisividad del bambú fue $\epsilon = 0,95$.

Las muestras fueron calentadas de dos formas. Al inicio, se usó un tipo de fuente calórica transportable, con el objetivo de que fuera replicable en terreno, específicamente cuando el procedimiento se aplicara a las construcciones en bambú. Entonces, se usaron dos lámparas infrarrojas marca Phillips, de 150W y frecuencias de 50Hz cada una. Estas lámparas se instalaron cerca de las muestras, a una distancia de 30cm de la superficie del culmo, en la cara de captación de la imagen (Figura 1).



Figura 1. Disposición del equipo de ensayo

La otra forma empleada para calentar fue un horno de secado y esterilización de laboratorio marca Olidéf Cz, con las siguientes dimensiones internas: 31,5 x 31,5 x 31,5cm. Se usó la opción del horno para obtener un calentamiento más uniforme en comparación con el de las lámparas. En esta

etapa, las muestras se calentaron en grupos de tres, considerando que cada grupo estaba compuesto por muestras de la misma especie de bambú, con integridad y agujeros de características similares. La (Figura 2) muestra la disposición de las muestras dentro del horno.

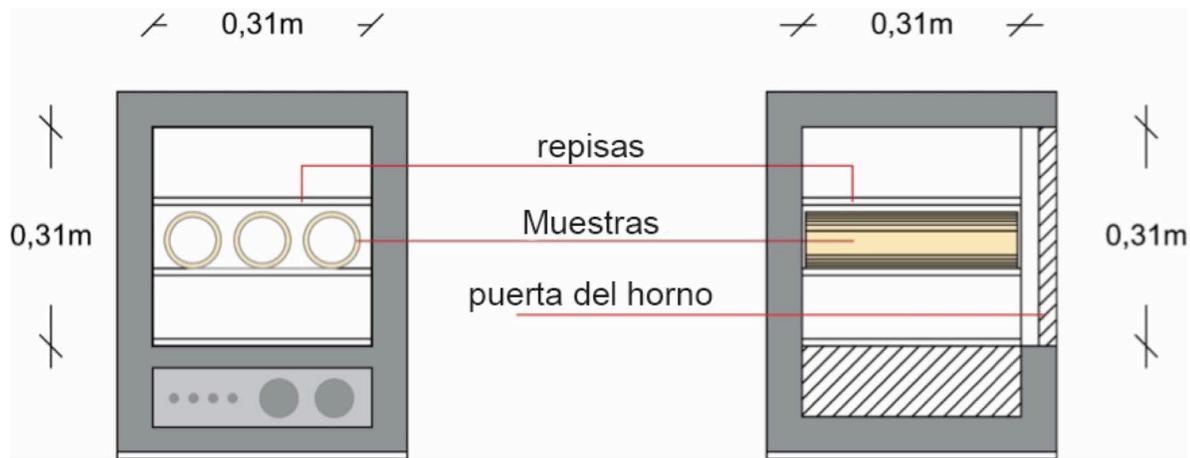


Figura 2. Disposición de las muestras dentro del horno

3.1 Muestras

Las muestras fueron extraídas de cañas de bambú de las especies *Bambusa tuldoides* y *Phyllostachys bambusoides*

(llamado comúnmente Bambú Madake). En total, se ensayaron veinticuatro muestras. Las características generales se presentan en la (Tabla 1):

Tabla 1. Características generales de las muestras ensayadas

Especie	Origen y tratamiento	Descripción	Cant. de muestras	Código
Bambusa tuldoides	Origen del bambú: Florianópolis /Campus UFSC (2016).	Bambú culmo redondo con o sin nudos/30cm de largo	6	RT* (Tuloides culmo redondo)
	Tratamiento: inmersión en solución de pentaborato en el laboratorio	Medio culmo de bambú / 30cm de largo	6	MT* (Tuloides medio culmo)
Phyllostachys bambusoides	Origen del bambú: Sao Paulo	Bambú culmo redondo con o sin nudos/30cm de largo	6	RM*(Madake culmo redondo)
	Tratamiento: agua hirviendo (realizado por el proveedor)	Medio culmo de bambú / 30cm de largo	6	MM* (Madake medio culmo)

*NOTA: cada grupo de muestras está identificada con las letras "S" y "C", para distinguir las muestras Sin Agujeros (S) y Con Agujeros (C)

Cada grupo de ensayo se componía de seis probetas de bambú, de las cuales tres eran sanas (sin defectos). Las otras tres probetas fueron perforadas de diversas formas, para simular defectos similares a los de las galerías dejadas por los insectos xilófagos. En las muestras con defectos simulados, las perforaciones se hicieron con un taladro portátil en dirección perpendicular a las fibras, usando brocas para madera de cuatro diámetros diferentes: 1,5mm, 2,0mm, 2,5mm y 3,0mm respectivamente; con una profundidad de

penetración de 2mm medidos en relación a la superficie de la corteza de los culmos. Asimismo, se hicieron con broca perforaciones en dirección longitudinal de las fibras de los culmos de 3mm o mas, con una profundidad de 15mm y diámetros de 1,5mm y 2mm. La (Figura 3) muestra las características y disposición de las perforaciones en las muestras con defectos.

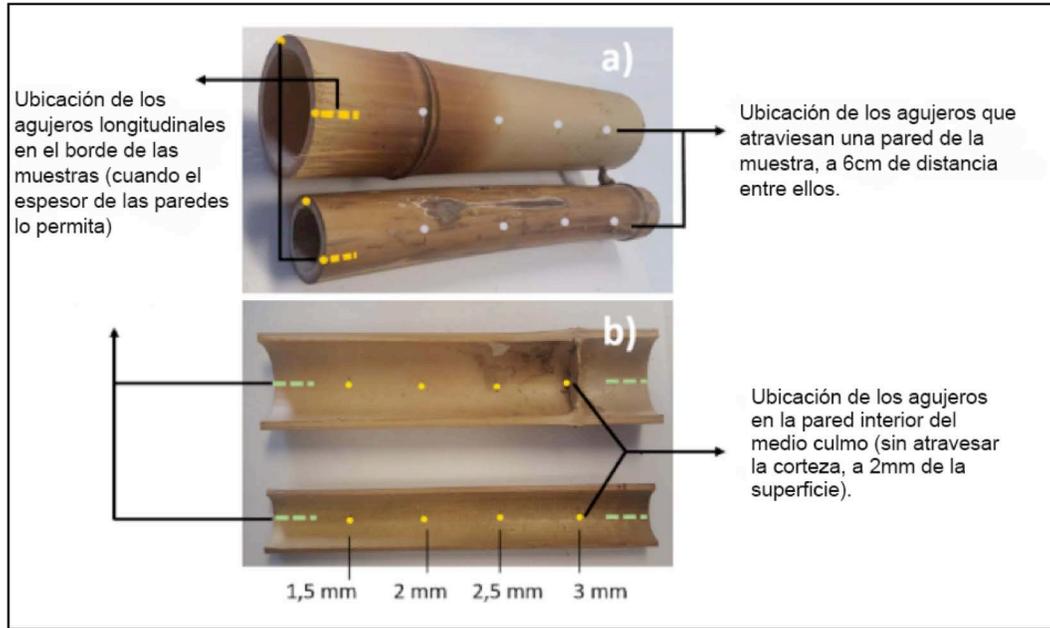


Figura 3. Diámetros y ubicaciones de las perforaciones en las muestras de culmo entero (a) y medio culmo (b)

3.2 Procedimiento experimental

Para realizar el procedimiento de calentamiento con las lámparas, todas las probetas se colocaron horizontalmente sobre una superficie de espuma de poliestireno, a 90cm de distancia de la cámara termográfica. Las lámparas se colocaron a 30cm de distancia del borde de la muestra.

Al cabo de 25 minutos de calentamiento, se apagaron las lámparas y se inició el proceso de enfriamiento. Durante ambas fases, calentamiento y enfriamiento, se registraron las imágenes a intervalos de cinco minutos. En el periodo de enfriamiento, el tiempo transcurrido hasta el último registro fue de 30 minutos; en ese momento, la imagen térmica de la cámara señalaba que la muestra se encontraba prácticamente en equilibrio térmico con la temperatura ambiente.

Los resultados obtenidos después de estos ensayos mostraron la necesidad de ajustar el proceso de calentamiento de las probetas. Todos los termogramas presentados por la cámara marcaban registros de temperaturas mayores en los puntos cercanos a la ubicación de las lámparas infrarrojas, señalando una falta de uniformidad en el proceso de calentamiento. Esta condición influyó en los termogramas y, en consecuencia, en los resultados obtenidos.

Para mejorar la uniformidad de la temperatura en el proceso de calentamiento de las muestras, se decidió calentarlas en un horno a 90°C durante 30 minutos. La decisión acerca de los grados de temperatura se basó en la temperatura y tiempo usados por una investigación similar con madera (Rodríguez-Liñán et al., 2012), considerando además que las propiedades físicas del bambú no se verían afectadas, lo que ocurre sobre los 160°C (Brito, 2013).

Una vez terminado el calentamiento, se retiraron las muestras del horno y se dejaron a temperatura ambiente

durante 30 minutos, hasta que se enfriaran por completo. Durante esta etapa, se tomaron registros termográficos cada 30 segundos. Durante el proceso de enfriamiento, se redujo este intervalo entre los registros de las muestras en comparación con los de las muestras calentadas con lámparas, para aumentar el número de registros de variación de la temperatura.

3.3 Análisis de los resultados

Los termogramas obtenidos en las primeras etapas de calentamiento de las muestras se analizaron cuantitativamente usando una cámara termográfica FLIR, que permite crear puntos, líneas o áreas en las imágenes y determinar la temperatura en cada píxel de la imagen. A continuación, la información se exportó a una hoja de cálculo de datos electrónicos que se usaría para la elaboración de los gráficos.

Durante la etapa de análisis, además de identificar los defectos y singularidades en las muestras ensayadas, se compararon los termogramas y gráficos obtenidos de una misma muestra, primero calentada con lámparas y luego en el horno. Asimismo, se compararon los termogramas y gráficos obtenidos de las muestras sanas y de las defectuosas.

4. Resultados y discusión

Al término de los ensayos, se obtuvieron 754 termogramas: 270 de las muestras calentadas con lámparas y 484 calentadas en el horno. En las muestras calentadas con lámparas, la temperatura máxima observada sobre la superficie fue de 71,56°C. En el otro caso, a pesar de que la

SPANISH VERSION.....

temperatura del horno se había fijado en 90°C, las muestras alcanzaron los 87,67°C al término del proceso (Tabla 2). Mediante la comparación de los coeficientes de variación de la temperatura máxima, se puede apreciar una disminución

de la variación de la temperatura en las muestras calentadas en el horno. Este hecho ocurrió debido a que con este procedimiento se obtuvo un calentamiento más uniforme que con el de las lámparas.

Tabla 2. Temperaturas máximas promedio alcanzadas por las muestras calentadas con lámparas

	Grupo de muestras	No de muestras en el grupo	Temp promedio máx por grupo bambues (° C)	Coefficiente de variación (CV) de la temp máx	Temp máx promedio por método de calentamiento (°C)
Calentamiento con lámparas	RTS	3	62,675	6%	71,56
	RTC	3	69,67	10%	
	RMS	3	71,77	5%	
	RMC	3	74,5	3%	
	MTS	3	70,9	3%	
	MTC	3	68,77	5%	
	MMS	3	76,6	5%	
	MMC	3	77,63	8%	
Calentamiento en horno	RTS	3	80,33	0,3%	87,67
	RTC	3	78,7	2%	
	RMS	3	91,6	1%	
	RMC	3	87,16	3%	
	MTS	3	91,46	1%	
	MTC	3	86,57	1%	
	MMS	3	92,9	0,4%	
	MMC	3	92,6	0,5%	

4.1 Influencia del tipo de calentamiento de las muestras

Los ensayos de termografía, en que se usaron lámparas para producir la excitación térmica, no entregaron un calor uniforme a las muestras, lo que dificultó la interpretación de los resultados. Sin embargo, la excitación térmica obtenida en el horno logró una mayor uniformidad térmica en las muestras, pudiéndose observar claramente los

defectos. Este hecho puede ser verificado al comparar la (Figura 4a), que presenta una imagen de la probeta RMC2 calentada con lámparas y la (Figura 4b), que presenta la misma muestra calentada en el horno. Ambas imagenes fueron tomadas inmediatamente después del proceso de calentamiento.

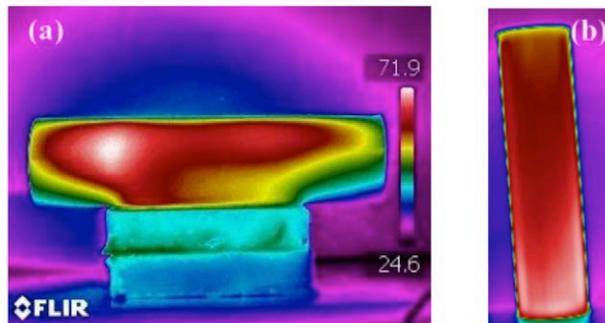


Figura 4. Los termogramas que muestran el calentamiento de la probeta RMC2 con lámparas (a) y en el horno (b)

Estas primeras observaciones sugieren la necesidad de ensayar alternativas para proporcionarle excitación térmica a los culmos de bambú. Por lo tanto, a futuro puede ser posible usar la TI para inspeccionar las edificaciones en terreno. Cabe mencionar que, durante el procedimiento adoptado, las temperaturas alcanzadas no deberían cambiar las propiedades del material.

En este estudio, para analizar los termogramas de la superficie de los culmos de bambú, solo se consideraron los resultados obtenidos de las muestras calentadas al horno, a fin de identificar más fácilmente las diferencias de temperatura de sus particularidades visibles.

4.2 Observaciones en las muestras sanas

A partir de los termogramas obtenidos fue posible visualizar las diferentes temperaturas de las superficies de las muestras. En la (Figura 5a) es una fotografía de las probetas RTS1, RTS2 y RTS3 y (Figura 5b) los termogramas correspondientes obtenidos en el minuto cuatro de la fase de enfriamiento. Se aprecian las diferencias cromáticas que indican las diversas temperaturas de las muestras. En las probetas RMS, las diferencias no son tan perceptibles como en estas.

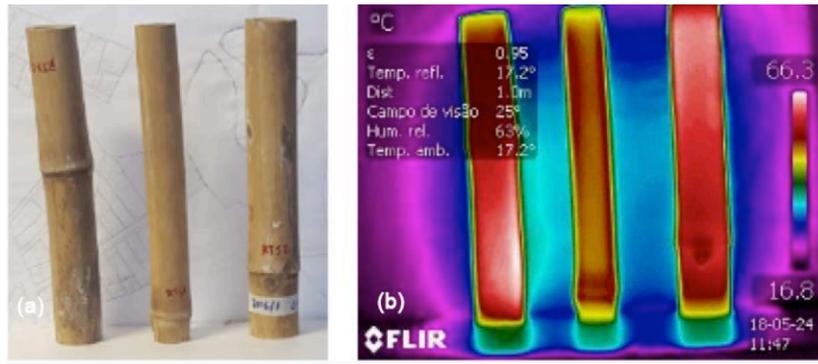


Figura 5. Fotografía (a) y termograma (b) de las probetas RTS1, RTS2 y RTS3

En la (Figura 6), se observa un termograma que muestra el minuto dos de la fase de enfriamiento de las probetas MMS1, MMS2 y MMS3. Todos los casos presentan variaciones evidentes de las temperaturas entre los pixeles

próximos a la región del nodo. En la misma imagen, también se aprecian cerca del borde superior de las probetas, las irregularidades del desastillado producido en la corteza durante el proceso de corte.

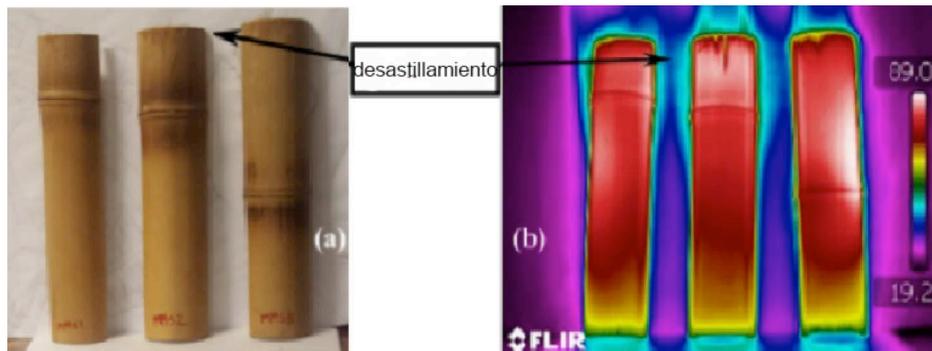


Figura 6. Fotografía (a) y termograma (b) de las probetas MMS1, MMS2 y MMS3 en el minuto dos de la fase de enfriamiento

En tales casos, como la superficie de las probetas presenta ciertas singularidades visibles a simple vista, como manchas o perforaciones en la corteza, en el termograma la irregularidad aparece como una temperatura diferente (color)

a la de los pixeles más cercanos. La (Figura 7a) presenta una fotografía de las probetas MTS1, MTS2 y MTS3 y (Figura 7b) el termograma correspondiente capturado al inicio de la fase de enfriamiento .

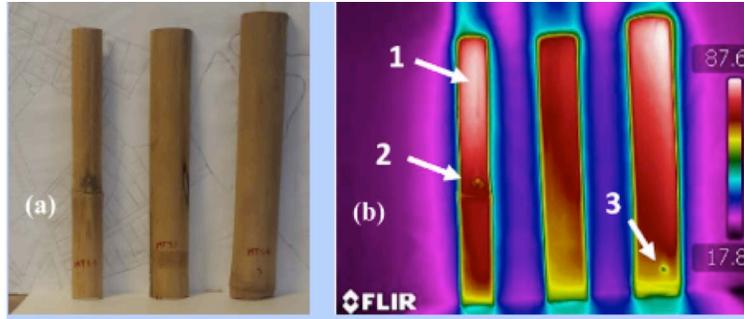


Figura 7. Mancha longitudinal del culmo (1), yema y nodo (2) y perforación existente que atraviesa la pared (3) en las probetas MTS1, MTS2 y MTS3

4.3 Muestras de bambú rollizo y medios culmos con agujeros (defectos internos)

Al analizar los termogramas de las probetas con agujeros internos perforados sin que alcanzaran la superficie de la corteza (grupos: RTC, RMC, MTC y MMC), no fue posible observar diferencias en la temperatura en las zonas específicas donde se ubicaron los defectos.

Como ejemplo del grupo de bambú rollizo con defectos, la (Figura 8) muestra los gráficos de los termogramas y los gráficos de diferencia de temperatura del grupo de

probetas RMC, en el minuto 5 y 22 de la fase de enfriamiento. Los termogramas obtenidos fueron similares a los de las probetas sanas (RMS); por lo tanto, solo aparecen los defectos externos visibles en la corteza del culmo. En los termogramas, en las regiones destacadas con línea punteada, donde las diferencias térmicas de los defectos practicados deberían aparecer como puntos específicos, no hay cambios en la temperatura que evidencien la presencia de agujeros internos y, esto es aún más notable en los gráficos de análisis que muestran la temperatura en cada píxel de la imagen.

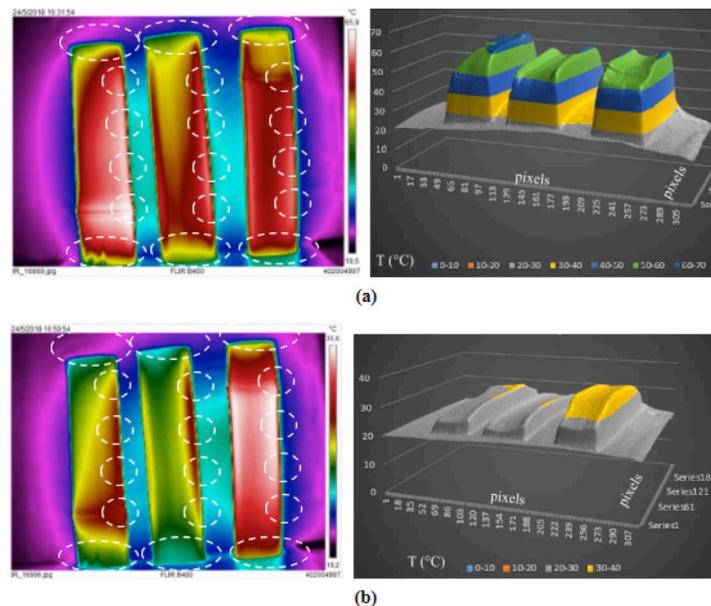


Figura 8. Termogramas y gráficos de las diferencias de temperatura de las probetas RMC1, RMC2 y RMC3 en el minuto cinco (a) y minuto veintidós (b) de la fase de enfriamiento

SPANISH VERSION.....

De manera similar, para ejemplificar los termogramas de los grupos de medios culmos de bambú, la (Figura 9) muestra los termogramas y gráficos de las diferencias en las temperaturas de las probetas MTC1, MTC2 y MTC3 en el minuto cinco y veinticinco de la fase de enfriamiento. Parecido a lo observado en los bambúes rollizos, los termogramas obtenidos fueron similares a los de las probetas

sin daños (MTS). En el eje longitudinal de la probeta, se esperaban diferencias térmicas en los puntos defectuosos, aunque no hubo cambios de temperatura que mostraran los defectos internos. El único defecto que se aprecia es el agujero que pasa por la parte interna de una de las probetas y la particularidad en el nodo de la probeta MTC1.

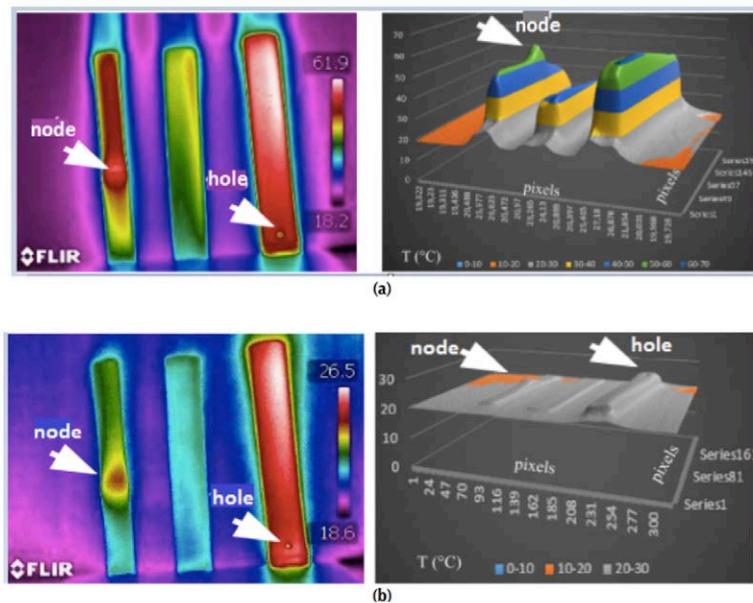


Figura 9. Termogramas y gráficos de las diferencias de temperaturas en las probetas MTC1, MTC2 y MTC3 en el minuto cinco (a) y veinticinco (b) de la fase de enfriamiento

Mediante un análisis comparado entre el método usado en este estudio con el aplicado por (Tuli et al., 2009) es posible observar que estos autores detectaron defectos a 2mm de profundidad, con diámetros cercanos a los 10mm, mientras que en este estudio el diámetro mayor simulado a la misma profundidad fue de 3mm, para asemejarlo a los defectos observados en estudios de campo. Adicionalmente, a diferencia de ese método, para esta investigación no se usó la modulación de frecuencia, tratando de trabajar con fuentes de excitación térmica de frecuencia constante.

4.4 Otras observaciones generales

Durante los ensayos, fue posible observar que en las paredes más delgadas de la muestra, los procesos de calentamiento y enfriamiento fueron más rápidos que en los más gruesos. También se percibió que las zonas nodales de los culmos (más densas que el resto del culmo) demoraban más en calentarse y enfriarse. Hecho que debe ser considerado para ensayos con otras fuentes de calor.

Considerando la importancia de las variaciones en la densidad del material, dentro de un análisis termográfico y de las características de la superficie de la muestra, la densidad

incrementa en la dirección radial de la pared del culmo, que genera una corteza muy densa, influye y dificulta la observación de los defectos de sus capas más internas, que son menos densas. En futuras investigaciones, se podrían ensayar latillas de bambú para observar si las variaciones de la densidad a través de la pared del culmo permiten identificar los defectos internos con esta técnica.

5. Conclusiones y recomendaciones

Teniendo en consideración las limitaciones y características de esta investigación sobre los culmos de bambú, especies, tipos y dirección de la fuente de calor empleada, distancia entre la cámara termográfica y las probetas, tiempo de calentamiento, profundidad y diámetro de los agujeros y el análisis de sus datos, se concluyó lo siguiente:

- La TI es una técnica no destructiva que permite identificar las particularidades naturales de los

SPANISH VERSION.....

culmos de bambú como los nodos y yemas, manchas y desastillados en la corteza, los que son visibles porque cambia la densidad superficial en las diferentes partes de la probeta, que influyen en su temperatura.

- Con la TI activa pulsada, no fue posible identificar los defectos de las probetas que tenían: perforaciones menores a los 3mm de diámetro, profundidad de 2mm respecto de la corteza, en la pared del bambú rollizo ni en los medios culmos; todo lo anterior considerando la especie de bambú, las especificaciones de los equipos y la metodología aplicada en este estudio.

Sin embargo, la relación entre la densidad del material y la temperatura señalada por los termogramas muestran el potencial que posee esta técnica para la detección de un defecto. Al respecto, es necesario continuar

efectuando investigaciones más específicas y en profundidad, cambiando algunas variables. Se sugiere aplicar los ensayos a una mayor cantidad de especies o probetas de bambú, ensayar otros rangos de temperatura para la excitación térmica, probar diversos métodos de calentamiento y usar una cámara termográfica de mayor resolución que amplíe la posibilidad de analizar un mayor número de puntos en las muestras.

6. Agradecimientos

Esta investigación contó con el apoyo de las becas otorgadas por la Fundación Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES, Brasil) y la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT, Ecuador).

7. Referencias

- Altoé, L.; Oliveira, Filho D. (2012)**, Termografia infravermelha aplicada à inspeção de edifícios. *Acta Tecnológica*, 7 (1), 55-59.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2013)**, NBR 15575-1 Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. Comitê ABNT /CB-002 Construção Civil.
- ASTM (1999)**, E1933-99a Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999. DOI: 10.1520/E1933-99A
- ASTM (2010)**, E1862-97 Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. DOI: 10.1520/E1862-97R10
- Bagavathiappan, S.; Lahiri, B.; Saravanan, T.; Philip, J.; Jayakumar, T. (2013)**, Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, 60, 35–55. DOI: 10.1016/j.infrared.2013.03.006
- Brito F. M. S. (2013)**, Efeito da termorrefiticação nas propriedades tecnológicas do bambu. 2013. 88p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.
- Chatterjee, K.; Tuli, S.; Pickering, S. G.; Almond, D. P. (2011)**, A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques. *NDT & E International*. 44 (7), 655 – 667. DOI: 10.1016/j.ndteint.2011.06.008
- Gayo, E.; Palomo, A.; Macías, A. (1992)**, La termografía infrarroja: posibilidades y aplicación al estudio superficial de los materiales. *Materiales de construcción*. 42 (227), 5 – 14. DOI: 10.3989/mc.1992.v42.i227.702
- Gupta, A.; Kumar, A. (2008)**, Potential of bamboo in sustainable development. *Asia Pacific Business Review*, 4 (3), 100 – 107. DOI: 10.1177/097324700800400312
- International Organization for Standardization (2011)**, ISO 15686-1 Buildings and constructed assets – Service life planning. Part 1: General principles and framework. International Organization for Standardization. Technical Committee ISO /TC 59/SC 14 Design life. ICS: 91.040.01 Buildings in general.
- Jaramillo, A. (2019)**, Manifestações patológicas e decisões projetuais que incidem na durabilidade do bambu em edificações no Sul do Brasil. 282 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Jaramillo, A.; do Valle, A.; Librelotto, L. (2018)**, Inspección y estado de conservación de edificaciones de bambú en el litoral de Santa Catarina – Brasil. *Proceedings of the 11th World Bamboo Congress*. Part 3. 325 – 338.
- Kaminski, S.; Lawrence, A.; Trujillo, D.; King, Ch. (2016)**, Structural use of bamboo: Part 2: Durability and preservation. *Structural Engineer*. 94. 38.
- López, G. (2010)**, Aplicación de la termografía infrarroja en la evaluación no destructiva de estructuras de madera. 2010. 283p. Tesis (doctorado) Universidad de Valladolid, Valladolid.
- López, G.; Basterra, L.A.; Ramón-Cueto, G. (2014)**, Alcance de la Termografía Infrarroja en la evaluación no destructiva de las estructuras de madera. *Proceedings of Rehabend*. 841-852.
- López, G.; Basterra, L.A.; Ramón-Cueto, G.; Diego, A. (2012)**, Detection of Singularities and Subsurface Defects in Wood by Infrared Thermography. *International Journal of Architectural Heritage: conservation, analysis and restoration*. 8 (4), 517 – 536. DOI: 10.1080/15583058.2012.702369
- Maldague, X. (2000)**, Applications of Infrared Thermography. *Trends in Optical Nondestructive Testing (invited chapter)*, Pramod Rastogi ed., pp. 591- 609.
- Oshiro, H. K. (2011)**, Modelagem Numérica e Validação Experimental de Ensaio Não Destrutivo por Termografia Infravermelha. 2011. TCC (graduação). Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Rodríguez-Liñán, C.; Morales-Conde, M.J.; Rubio-de-Hita, P.; Pérez-Gálvez, F. (2012)**, Análisis sobre la influencia de la densidad en la termografía de infrarrojos y el alcance de esta técnica en la detección de defectos internos en la madera. *Materiales de Construcción*, 62 (305), 99-113. DOI: 10.3989/mc.2012.62410.
- Tuli, S.; Chugh, S.; Chatterjee, K.; Palada, D.R.; Puttanguta, S. (2009)**, Thermal Wave Imaging of Defects in Bamboo. *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation NDE*, 190 - 193.

