





Diagnóstico y propuesta de solución a las lesiones presentes en el forjado del Convento de Santa Clara de Asís

A. Hernández Oroza^{1*} , A. Diomedes Almeida¹, A. Romeo Sáez¹, P. R. Cuétara Pérez¹ 

*Autor de Contacto: ahernandez@proyectos.ohc.cu

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.584>

Recepción: 11/01/2022 | Aceptación: 20/04/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es diagnosticar y proponer solución a las lesiones presentes en los forjados de madera del Convento de Santa Clara. Para ello, se aplicaron ensayos no destructivos de resistografía y penetrómetro, estudios biológicos a la madera, y técnicas geomáticas para análisis de deformación y dimensionamiento de las vigas. Los resultados del diagnóstico demostraron que el 65% del forjado compuesto de 98 vigas, está afectado por pudrición y organismos xilófagos. Los estudios de densidad mediante comparación con valores de referencia, mostraron pérdida en la dureza de la madera. Los resultados concluyen que la restauración implica la necesidad de sustituir 17 vigas, y el refuerzo de los pies derechos y secciones de vigas de corredera.

Palabras clave: ensayos no destructivos, diagnóstico, edificaciones, patrimonio, geomática.

Citar como: Hernández Oroza, A., Diomedes Almeida, A., Romeo Sáez, A., Cuétara Pérez, P. R. (2022), "Diagnóstico y propuesta de solución a las lesiones presentes en el forjado del Convento de Santa Clara de Asís", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 296 – 310, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.584>

¹Departamento de Diagnóstico y Levantamiento. Empresa Filial RESTAURA, Oficina del Historiador de La Habana, La Habana Vieja, Cuba.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor A. H. Oroza contribuyó con el diseño de la investigación y la realización de ensayos en obra (100%), la redacción del texto (50%), la discusión de resultados (100%) y revisión (50%). La autora A. Diomedes Almeida contribuyó con el diseño de la investigación y la realización de ensayos en obra (100%), redacción del texto (20%) y revisión (25%). La autora A. Romeo Sáez contribuyó en la investigación biológica (100%), redacción del texto (20%) y revisión (25%). El autor P. R. Cuétara Pérez contribuyó con el levantamiento con escáner láser y procesamiento digital 3D/ortoimágenes (100%) y redacción del texto (10%).

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2022.

Diagnosis and solutions proposal to the damages present in the ceiling of the Convent of Santa Clara de Asís

ABSTRACT

For the restoration of the wooden ceilings of the Convent of Santa Clara, resistography and penetrometer tests, biological studies of the wood, and geomatic techniques for analysis of deformation and dimensioning of the beams were applied. In the present work, the results of the diagnosis showed that 65% of 98 beams is affected by rot and the presence of xylophagous organisms. Density studies by comparison with reference values, showed a loss in the hardness of the wood. The results conclude in the need to replace 17 beams, and the reinforcement of the wood pillars and sections of sliding beams.

Keywords: non-destructive testing, diagnosis, buildings, heritage, geomatics.

Diagnóstico e proposta de solução para as lesões presentes na laje do Convento de Santa Clara de Asís

RESUMO

Para a restauração dos pisos de madeira do Convento de Santa Clara, foram aplicados ensaios de resistografia não destrutiva e penetrometria, estudos biológicos da madeira e técnicas geomáticas para análise de deformação e dimensionamento das vigas. No presente trabalho, os resultados do diagnóstico mostraram que 65% da laje de 98 vigas é afetada por podridão e organismos xilófagos. Estudos de densidade por comparação com valores de referência, mostraram uma perda na dureza da madeira. Os resultados concluem na necessidade de substituição de 17 vigas, e do reforço dos pés direitos e secções de vigas deslizantes.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos, diagnóstico, edificações, patrimônio, geomática.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

Diagnóstico y propuesta de solución a las lesiones presentes en el forjado del Convento de Santa Clara de Asís

Hernández Oroza, A., Diomedes Almeida, A., Romeo Sáez, A., Cuétara Pérez, P. R.

1. INTRODUCCIÓN

La conservación de las edificaciones patrimoniales continúa siendo en la actualidad uno de los problemas más complejos dentro del campo de la construcción. Como consecuencia de los siglos de exposición, estas estructuras han estado sometidas a la influencia de los efectos del cambio climático y el incremento en la atmósfera de gases corrosivos (SO_2 , NO_x , O_3), lo que ha conllevado a un deterioro acelerado de sus materiales constituyentes (piedra, metal, madera) debido a reacciones químicas, colonización biológica y formación de costras negras (Kherais et al., 2021; Kumar and Imam, 2013; Sesana et al., 2021). Esto puede significar un riesgo importante en la durabilidad del patrimonio cultural, el cual debe ser debidamente evaluado por un grupo de trabajo multidisciplinario, apoyado en diferentes técnicas de ensayo, muchas de las cuales se basan en técnicas destructivas como las extracciones de probetas y realización de calas. Sin embargo, al tratarse de la conservación del patrimonio edificado, este tipo de estudios invasivos debe intentar evitarse para mantener la integridad de la obra, sus elementos estructurales y en consecuencia, su valor patrimonial.

En la actualidad existen novedosas técnicas de ensayos no destructivos (END) que aportan información con elevado nivel de precisión, exactitud, repetibilidad y confiabilidad. Las aplicaciones desarrolladas se basan en diferentes principios, como las electromagnéticas (ultrasonidos, potenciales, resistividad), de impacto (esclerometría, penetrómetro), geomáticas (escáner láser, fotogrametría), emisivas (termografía), entre otras.

El análisis cuantitativo obtenido de estos resultados durante el diagnóstico permite identificar las causas de las lesiones, evaluar el grado de deterioro o pudrición (Liñán et al., 2011) y seguidamente la toma de acciones correctivas y de conservación necesarias.

El Convento de Santa Clara de Asís se inaugura en La Habana en el año 1644, convirtiéndose en el primer convento de religiosas fundado en Cuba. En el año 2018 la Oficina del Historiador de La Habana (OHCH) inicia un proyecto de restauración y recuperación que ha involucrado profesionales y estudiantes de diferentes ramas de las carreras técnicas, y profesionales vinculadas al campo de la construcción y la conservación del patrimonio edificado. Los resultados que se han ido obteniendo de estas investigaciones permitieron el establecimiento de las prioridades y las metodologías para su paulatina intervención y recuperación (Guevara et al., 2019).

El objetivo de este trabajo es evaluar el estado de conservación en la estructura del forjado de madera de la galería de circulación ubicada en la planta alta del primer claustro, para el cual se combinaron una serie de END que permitieron identificar las patologías presentes, y determinar la magnitud de las lesiones en las vigas y pies derechos que la conforman. Lo anterior implica una propuesta de solución que se discute al final del trabajo.

2. CASO DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

2.1 Identificación del objeto de estudio

La estructura se ubica en la planta alta del primer claustro, hacia el bloque A (Figura 1). Se basa en un forjado de madera y tablazón conformado por 98 vigas de 9 cm x 13 cm (base x altura), espaciadas entre 43 cm y 45 cm con una inclinación de 17 grados desde el muro hacia los pies derechos, apoyadas por el eje 3 en el muro de tapial que conforma la iglesia, y por el eje 4 en una viga corredera que descansa sobre 13 pies derechos. La viga de corredera se compone de 12 vigas unidas mediante rayo de Júpiter, las cuales descansan sobre los pies derechos (Tabla 1). La cubierta está formada por tejas de cerámica roja.

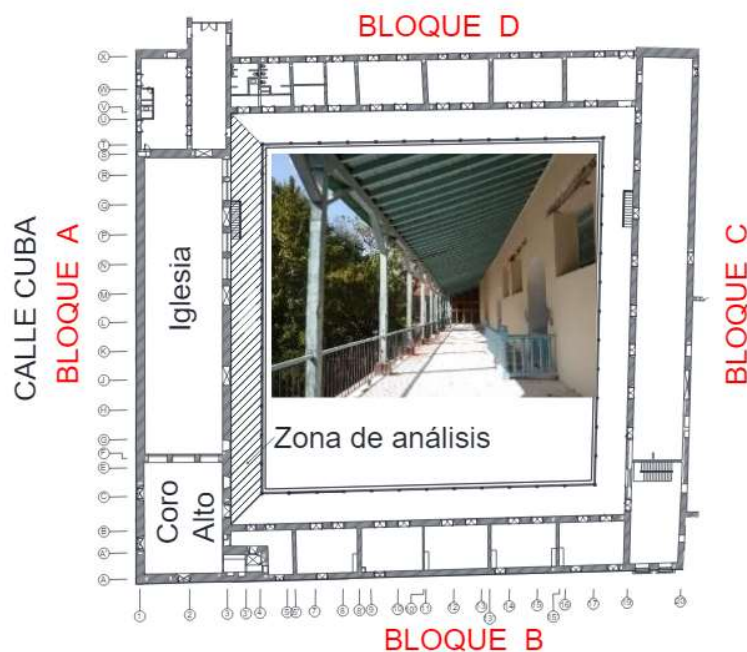


Figura 1. Croquis de planta del primer claustro, señalización y fotografía de la galería estudiada

2.2 Análisis y selección de los ensayos no destructivos

El propósito de los END es determinar la calidad e integralidad del material y sus partes componentes sin afectar sus propiedades, funciones y utilidad mediante inspecciones, mediciones o evaluaciones (Helal et al., 2015; Workman and Moore, 2012). La aplicación de este tipo de técnicas para estudiar el estado de conservación de las edificaciones históricas ha ganado validez, propiciado fundamentalmente por la ventaja de no requerirse de incurrir en un deterioro adicional en los elementos estructurales de la edificación, para conocer su estado de conservación (Binda and Saisi, 2009; Liñán et al., 2011; Ortega and Ripani, 2007). Debido a que la madera es un material orgánico, es susceptible a procesos de degradación provocados por insectos xilófagos, acciones mecánicas, exposición al intemperismo, pudrición por hongos o la acción del fuego.

En edificaciones patrimoniales el empleo de los END le aporta un elevado valor al estudio de diagnóstico, debido a que los elementos estructurales de madera no son afectados o reciben un impacto despreciable. Como resultado, es posible obtener información técnica con suficiente precisión para estimar el estado de conservación, la calidad y durabilidad de la obra u objeto de obra estudiado (Hasníková and Kuklík, 2014; Morales-Conde et al., 2013; Palaia et al., 2008).

Las técnicas de trabajo aplicadas fueron:

- Inspección visual de las lesiones presentes en todos los elementos estructurales
- Medición de parámetros ambientales y humedad superficial de los elementos de madera
- Identificación de las especies de madera presentes
- Dimensionamiento de los elementos de madera que conforman el forjado
- Aplicación de termografía infrarroja
- Detección de daños interiores en la madera mediante resistografía
- Estimación de dureza mediante penetrómetro
- Evaluación estructural a partir de modelo 3D obtenido con escáner láser terrestre (TLS-siglas en inglés)
- Elaboración de planos de planta y cortes en plataforma CAD

2.2.1 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica no destructiva que permite el análisis patológico mediante la emisión de energía calorífica por parte de los materiales. La lectura de la radiación emitida en la banda del infrarrojo posibilita interpretar la temperatura del material en función de la conductividad térmica o el calor específico. En dependencia de las características y las condiciones de exposición, este material puede retener o emitir calor. La emisividad está definida por la Ley de Stefan-Boltzman, la cual plantea que la radiación es proporcional a la temperatura del cuerpo y las propiedades térmicas del material (Morales-Conde et al., 2013). Las imágenes se tomaron con una cámara FLIR E75 y se procesaron posteriormente empleando el software FLIR Tools.

2.2.2 Resistografía

El resistógrafo es un equipo especialmente diseñado para identificar con facilidad las zonas con cavidades, deformaciones, ablandamientos, entre otras lesiones propias de la madera (Ortiz et al., 2017). Se empleó un equipo modelo IML Resi PD400 y se procesaron los resultados con el software PD-Tools. La resistografía se realizó en los elementos seleccionados basándose en los deterioros encontrados durante el puncionado y la inspección visual de lesiones. En las vigas las mediciones se efectuaron principalmente en los extremos de las vigas que se encuentran empotrados dentro del muro, en tres direcciones: diagonal, horizontal y vertical en función de las patologías de cada elemento ensayado. En los pies derechos, las mediciones se realizaron en sentido diagonal en las bases para conocer el estado de conservación en el apoyo, y en dirección horizontal a diferentes alturas, desde la base con separación de 150 mm entre cada punto de medida resistográfica.







2.2.3 Dureza mediante penetrómetro Pilodyn

Es una herramienta que permite estimar la dureza de la madera mediante la penetración de una varilla de acero de 1.5 mm de diámetro, a partir de un disparo hacia el elemento de madera (Palaia et al., 2008). La profundidad de penetración de la varilla varía en función de la densidad del material. Debido a que el resultado obtenido es adimensional, se hace necesario para su correcta interpretación, realizar varias mediciones sobre el mismo elemento y referenciarlo contra una probeta de madera de la misma especie, a una humedad conocida (Kloiber, 2007; Kuklík, 2007).

2.2.4 Identificación de especies maderables

El ensayo se realizó para conocer las especies maderables presentes en los elementos que conforman el forjado de la galería y los pies derechos que la soportan. Se tomaron muestras de 1 cm³ de volumen de los elementos de madera presentes en el área de análisis. Se realizaron cortes histológicos en las tres direcciones (transversal, tangencial y radial) para la observación de la disposición de los elementos constitutivos por especie y se compararon con las descripciones anatómicas de referencia y las claves de identificación reportadas y clasificadas dentro de una xiloteca. Los caracteres anatómicos macroscópicos evaluados fueron color, textura, olor (en las que lo poseían), lustre y la presencia de anillos de crecimiento. Las microfotografías se realizaron con una cámara digital acoplada a un microscopio Nikon modelo SMZ745. Las imágenes fueron procesadas mediante el programa IC Capture versión 2.4. Se identificaron gráficamente las especies de madera mediante la siguiente simbología (Tabla 1).

Tabla 1. Representación gráfica de las especies de madera identificadas en el forjado estudiado

Icono/Nombre		
		
		

Diagnóstico y propuesta de solución a las lesiones presentes en el forjado del Convento de Santa Clara de Asís

2.2.5 Levantamiento 3D y procesamiento digital

Se empleó el escáner láser Z+F Imager® 5010c. Se realizaron 11 posicionamientos, con una distancia media entre cada uno de 5 m. En el equipo se configuraron la resolución y la calidad durante el barrido en “Alta” (High), además de la adquisición de fotos. Esta configuración en el TLS implica que a los 10 metros de la ubicación del emisor, la distancia máxima de error entre los puntos marcados por el láser es de 6 mm. Con esta programación de trabajo, el tiempo de demora aproximado es de 8 minutos por cada posicionamiento, en el cual se obtiene un modelo final de puntos de coordenada x y z conocidas, con sus valores RGB.

2.2.6 Generación de modelos 3D y extracción de ortoimágenes

Para los diferentes tipos de análisis (geométrico, estructural, etc.), que pueden hacerse sobre un elemento finito, es necesaria la obtención de modelo 3D que pueda ser fácilmente manipulable y medible por los programas convencionales existentes. La información obtenida de un levantamiento 3D propicia una descripción casi continua de la superficie escaneada, lo cual hace posible identificar y cuantificar anomalías en los elementos como asimetrías, deformaciones, discontinuidades entre otras lesiones que pueden ser difíciles o imposibles de identificar a simple vista (Tucci and Bonora, 2017). A partir de los modelos 3D pueden ser extraídas las ortoimágenes, lo que posibilita obtener una proyección ortogonal del modelo de puntos, el cual tiene la misma validez métrica que un dibujo tradicional a escala (Figura 2). Los softwares comerciales basados en CAD permiten la importación de la ortoimagen, siendo posible realizar dibujos precisos que pueden ser posteriormente visualizados y analizados en otros entornos de trabajo digital.



Figura 2. Ortoimagen obtenida de la galería del bloque A

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de la inspección organoléptica

Desde la viga 1 a la 17 el forjado se apoya sobre un sistema de apuntalamiento por riesgo de derrumbe debido al avanzando deterioro por pudrición, así como ausencia de varias tablas y tapajuntas. Esta situación ha provocado descenso en el resto del forjado y el fallo de algunos elementos.

La cubierta se encuentra afectada por la proliferación de plantas invasoras a todo lo largo de la galería, lo cual conlleva a un aumento del contenido de humedad en la madera, fundamentalmente en épocas de lluvia, así como del peso adicional que compromete la durabilidad de los elementos estructurales en esta zona. El resultado del diagnóstico identificó como lesiones más recurrentes a la pudrición, principalmente en la fogonadura debido a la colonización por hongos, desfibramiento producto del ataque de termitas subterráneas del género *Coptotermes*, y fallos a flexión en vigas asociados a la pérdida de la capacidad portante del elemento.

Los pies derechos que soportan el forjado presentan en el apoyo una base de hormigón, las cuales responden a una intervención realizada en la década de 1980. En la mayoría de estos, la base se encuentra agrietada producto del aumento de volumen que sufre la sección de madera embebida, como consecuencia de la acumulación de humedad en el interior. El hormigón no es capaz de

Para el análisis estructural de las vigas del forjado se extrajeron ortoimágenes empleando el software Reconstructor, y se realizaron cortes mediante el software Autodesk Recap desde la viga número 17 hasta la 98. Todas las vigas que conforman el forjado presentan en mayor o menor medida deformaciones (flecha), y algunas muestran fallos a flexión debido a la disminución de su capacidad portante. La norma cubana (NC 53-179:88, 1988), establece que la flecha máxima admisible es $1/240$ de la luz para la carga total. Esto indica que la flecha admisible para las vigas del forjado es aproximadamente 1.5 cm pero los valores obtenidos en obra superan de 2 cm a 4 cm los aceptables por cálculo. La norma establece que la flecha de las vigas aumentará para períodos de carga de más de 10 años en un 50% para madera seca, y un 100% en madera húmeda. Considerando esto, la flecha admisible aumentaría 2.25 cm y 3.0 cm respectivamente, para lo cual siguen existiendo diferencias entre valores permisibles y los reales (Figura 4). Es importante destacar que no todas las deformaciones máximas encontradas se localizan en el centro de la luz, debido a que existen zonas donde el elemento está más deteriorado que otras; es por ello que las vigas se deforman y fallan por el área más vulnerable. Se identificó que no todas las vigas son de la misma especie maderable, por lo cual también varían su dureza y resistencia a la flexión. En los pies derechos 1 y 7, el deterioro en la fognadura ha provocado el desplazamiento del mismo y de todos los elementos que a él colindan. Estos movimientos verticales que han sufrido los pies derechos varían entre 3.5 cm - 20 cm aproximadamente, y la separación en el rayo de Júpiter entre las vigas que conforman la viga de corredera, oscila entre 1 cm - 2 cm, lo que representa desplazamientos considerables.

Para evaluar la deformación de las vigas y la densidad que presentan, se realizó la identificación de las especies maderables, a partir de la toma de muestras directamente de las vigas y pies derechos. Las especies de madera se identificaron en laboratorio biológico y las densidades obtenidas con penetrómetro, fueron comparadas con los valores de referencia reportados por el Instituto Nacional de Investigaciones Agro-Forestales (INAF).

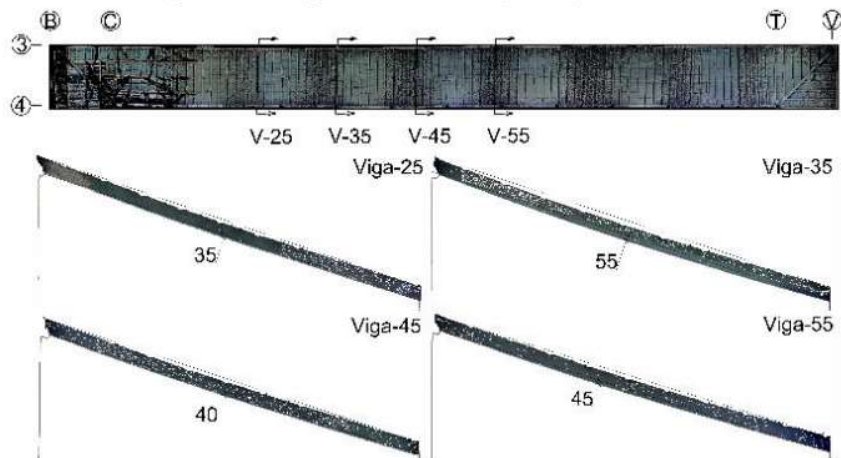


Figura 4. Deformaciones de algunas vigas del forjado (flecha en mm)

3.3 Especies maderables identificadas

Mediante la aplicación del método de anatomía comparada a partir de los cortes histológicos realizados en dirección transversal, tangencial y radial, se obtuvo como resultado que las especies de madera que forman la estructura del forjado y el sistema de apoyo de los pies derecho son: cedro (*Cedrela odorata*), pino (*Pinus sp.*), baria (*Cordia gerascantus*), caguairán (*Guibourtia himenifolia*) y ácana (*Manilkara grisebachii*). En la figura 5 se muestran los cortes histológicos realizados para la identificación de las especies de madera existentes.

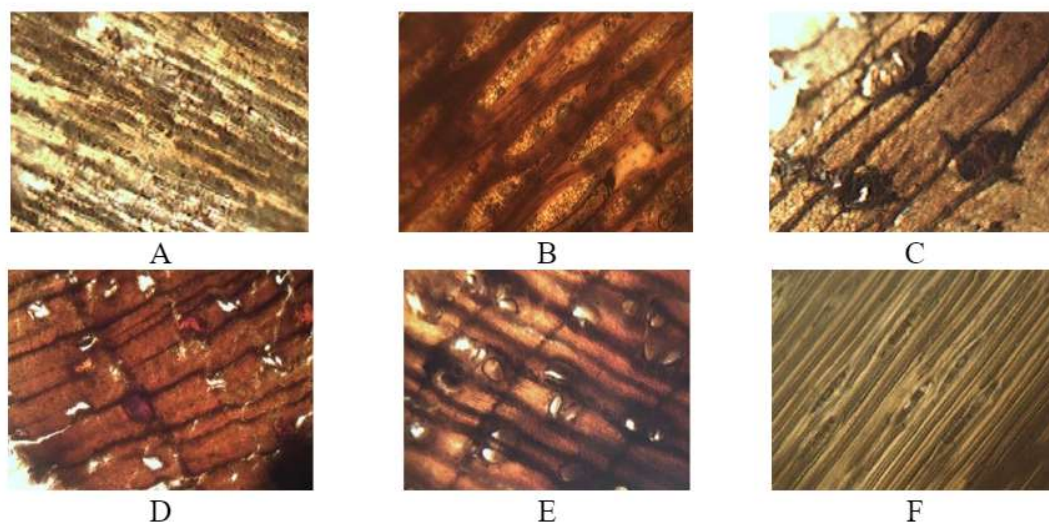


Figura 5. Cortes histológicos a 40x de las especies de madera identificadas: A- ácana (corte longitudinal), B- baría (corte longitudinal), C- caguairán (corte transversal), D- cedro (corte longitudinal), E- najesí (corte transversal), F- pino (corte longitudinal)

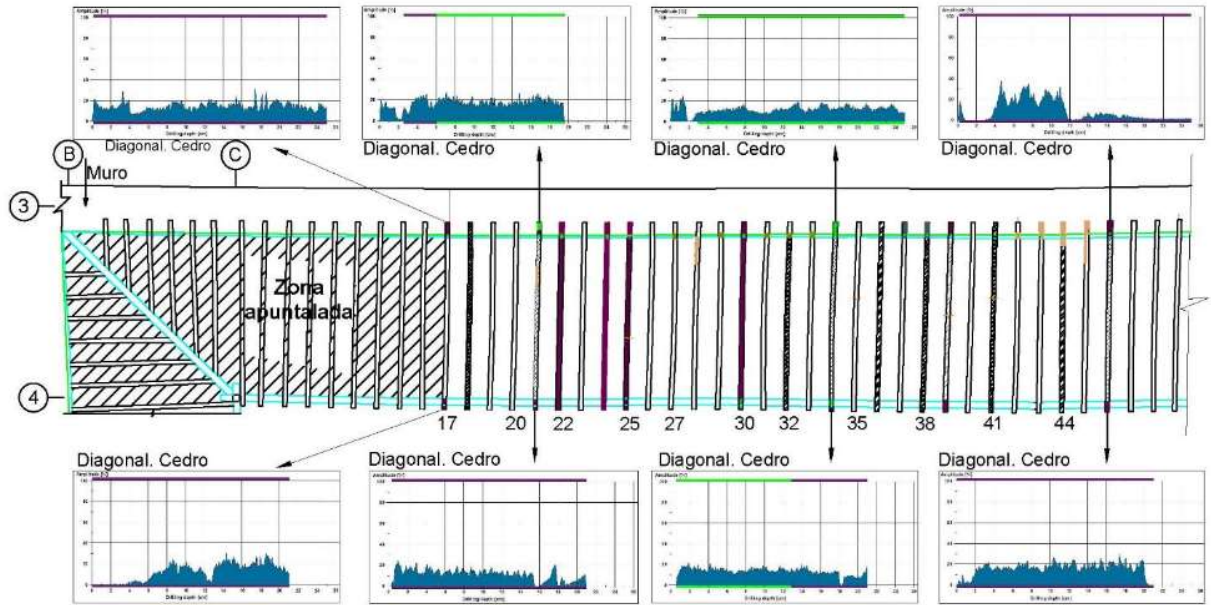
3.4 Análisis de los resultados del diagnóstico

Los contenidos de humedad medidos en las vigas del forjado se encuentran entre 9%-19%, en los pies derechos entre 11%-17% y la viga de corredera entre 11%-12%. Las imágenes termográficas obtenidas reflejaron como el muro de apoyo presenta zonas de elevada humedad, lo cual favorece la absorción de agua en la madera por ser un material higroscópico.

En el caso de los pies derechos y la viga de corredera, los elementos se encontraban parcialmente húmedos debido a que están expuestos a la luz solar y sus condiciones de secado y ventilación son más favorables que las de las vigas del forjado. Sin embargo, en tiempos de lluvia y eventos climáticos extremos, esta misma exposición provoca que el deterioro sea más acelerado y propicie la proliferación y ataque de organismos degradadores de la madera.

En el análisis con la cámara termográfica se identificaron cambios de temperatura de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en distintos puntos de un mismo elemento, lo que conlleva a deformaciones térmicas en el forjado. En el caso de las vigas, los valores más fríos se encuentran cerca de las tablas y en el muro del eje 3, donde las diferencias más considerables aparecen en la zona apuntalada y próxima al forjado. Cuando llueve, el agua se infiltra principalmente por las zonas donde menor conservado se encuentra el sistema de impermeabilización y donde exista mayor presencia de planta invasoras, lo que provoca la acumulación del agua, tanto en el forjado como en el muro. El grado de saturación de los elementos de madera varía en función de la especie, el nivel de exposición y las condiciones ambientales, lo que conlleva a que se desencadenen procesos patológicos que debilitan sus propiedades mecánicas. Otras de las lesiones identificadas con la termografía fueron las variaciones de temperaturas en el piso, asociadas a desniveles o desperfectos que favorecen la acumulación del agua pluvial, y propician la absorción por capilaridad en los pies derechos de la galería. Al encontrarse embebidos en una base de concreto que funciona como una capa impermeable, el secado en el interior de la base es muy ineficiente y acelera la pudrición de la madera.

El análisis realizado con el resistógrafo permitió identificar que de las 98 vigas que conforman el forjado, 64 de ellas presentan diferentes manifestaciones patológicas asociadas a pudrición por exposición a ciclos de humectación y secado. La resistografía se inició en la zona de la fognadura debido a que es el área más vulnerable, y en función de los daños detectados se realizaron mediciones también en el centro de la luz o próximo a los apoyos (Figuras 6 y 7).



Leyenda:

- desfibramiento
- pudrición
- madera sana
- grietas
- ablandamiento
- madera dañada

Figura 6. Resultados de ensayos y lesiones en elementos del forjado entre las vigas 1-49

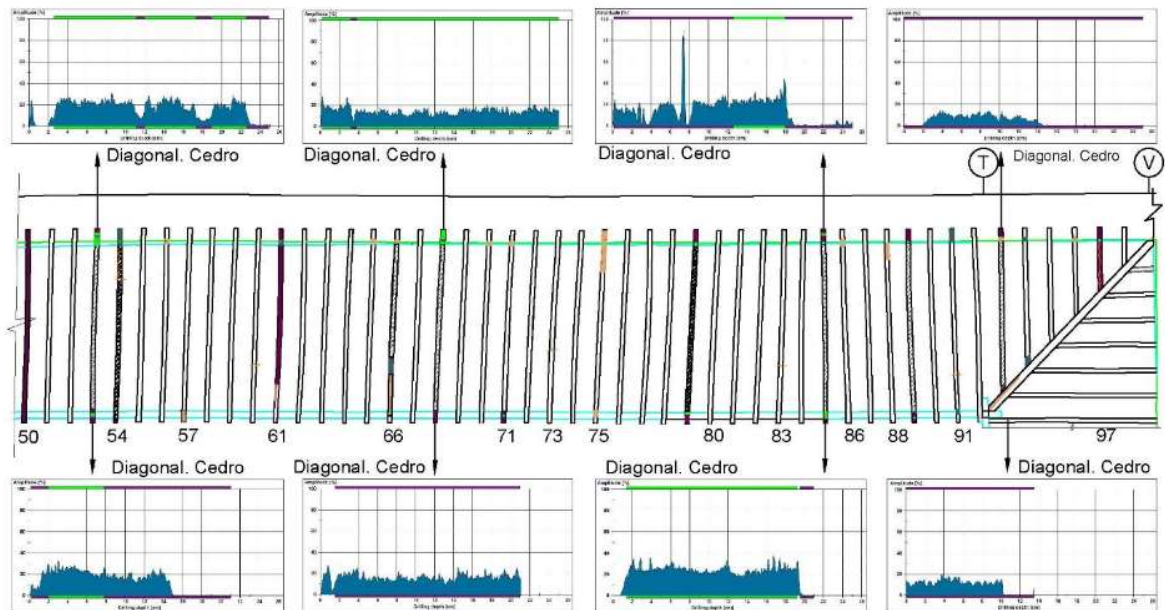


Figura 7. Resultados de ensayos de resistografía y lesiones en elementos del forjado entre las vigas 50-98

En el caso de los pies derechos, la resistografía mostró para todos ellos valores bajos de resistencia a la penetración, y anomalías similares a las detectadas en las vigas de madera. La extensión de las lesiones se encuentra entre 150 mm y 750 mm desde la base de concreto hacia arriba, y en más del 50% de los pies derecho, esta se ubica en los primeros 150 mm de altura.

La viga de corredera, con una extensión de 45.5 m está conformada por tramos, y cada tramo por vigas de diferentes especies maderables. Debido a que la zona más vulnerable es la cara exterior,

se realizó la resistografía desde la cara interior (galería) hacia la exterior (patio), con el propósito de identificar el avance en el deterioro en función del ancho de la viga. En el tramo entre el pie derecho 8 y 9 la resistografía refleja zonas con desfibramiento debido al ataque de termitas. Estos organismos xilófagos se alimentan de la madera y dejan túneles en su interior, en consecuencia, la curva resistográfica cambia repentinamente debido a la falta de resistencia durante su avance (Figuras 8 y 9). Al realizar los ensayos de penetrómetro y los cálculos de ajuste correspondientes, se evaluó que los elementos de madera tienen una dureza inferior a los valores tabulados para las maderas cubanas. Estos resultados están en correspondencia con las bajas resistencias obtenidas en los ensayos de resistografía. En la tabla 3 se presenta una muestra de algunos elementos estudiados.

Tabla 3: Resultados del cálculo de la dureza a partir del penetrómetro

Elemento	Ubicación	Especie de madera	w (%)	Tp,12 (mm)	p12 (g/cm ³)	p12 tabulado* (g/cm ³)
Lima	Eje 3	Pino	14	14	0.35	0.74
Viga 30	Eje 4	Cedro	13	17	0.27	0.37
Viga 50	Eje 3	Cedro	13	21	0.16	0.37
Pie derecho 8	a 30 cm de la base	Pino	14	9.5	0.47	0.74
Pie derecho 9	a 30 cm de la base	Baría	13	11	0.43	0.84

*- valores de referencia aportados por el INAF

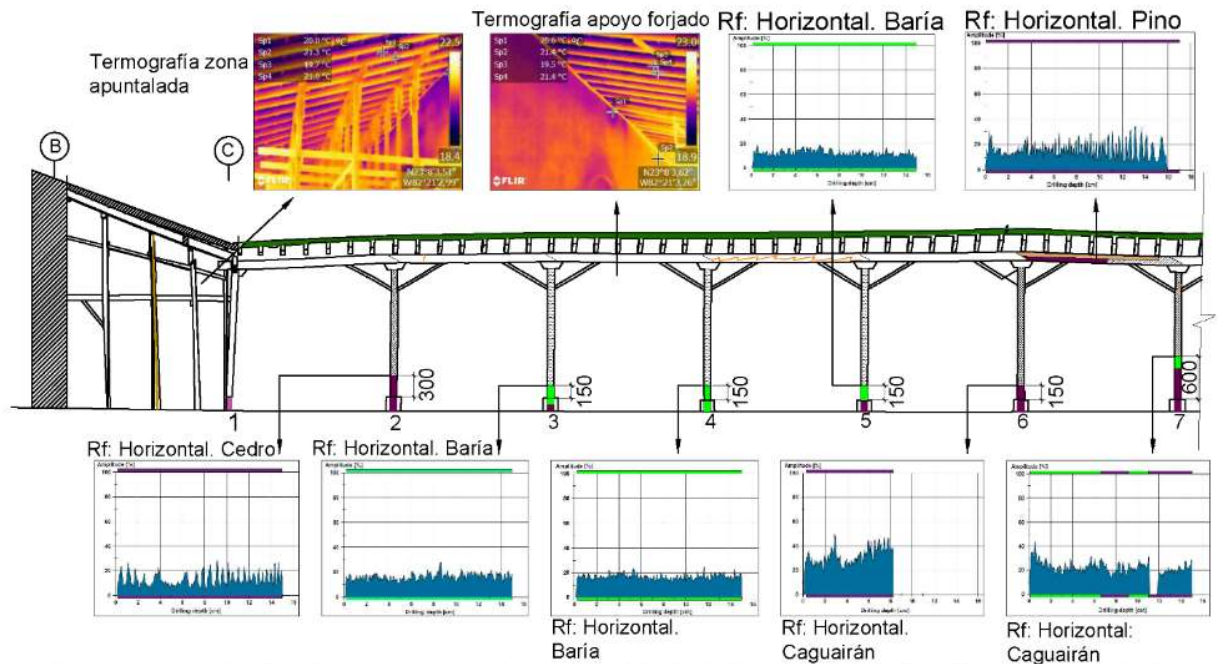


Figura 8. Resultados de ensayos en elementos del forjado entre pies derechos 1-7, donde la termografía refleja la humedad presente en el muro del eje 3 en la zona de apoyo de las vigas, y la resistografía en pies derechos y viga de corredera del eje 4.

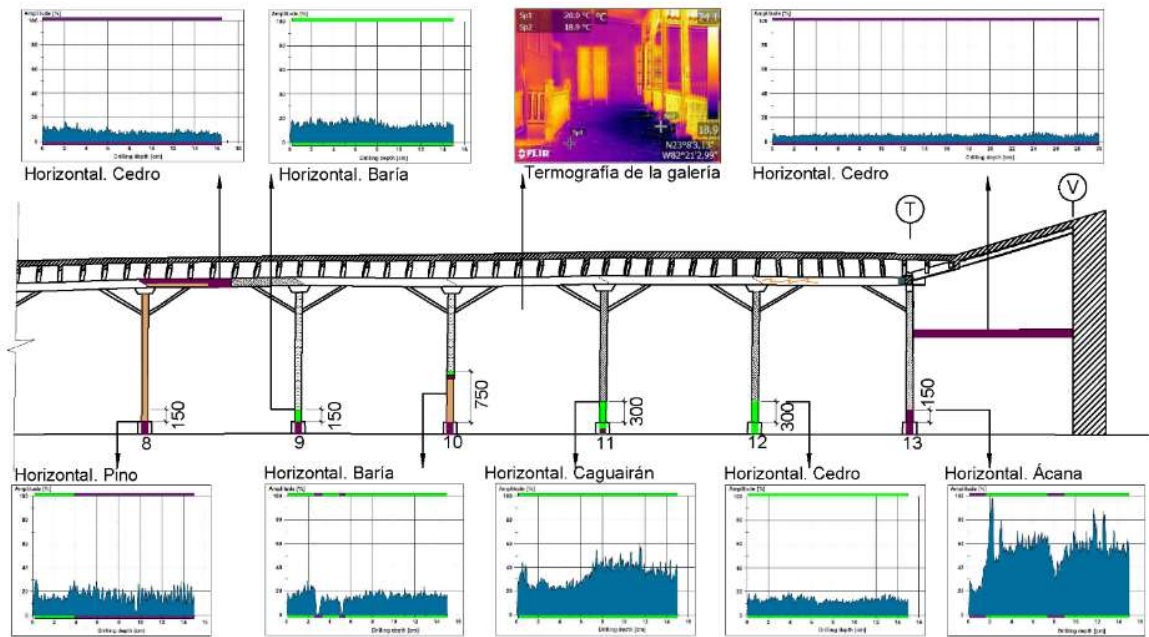
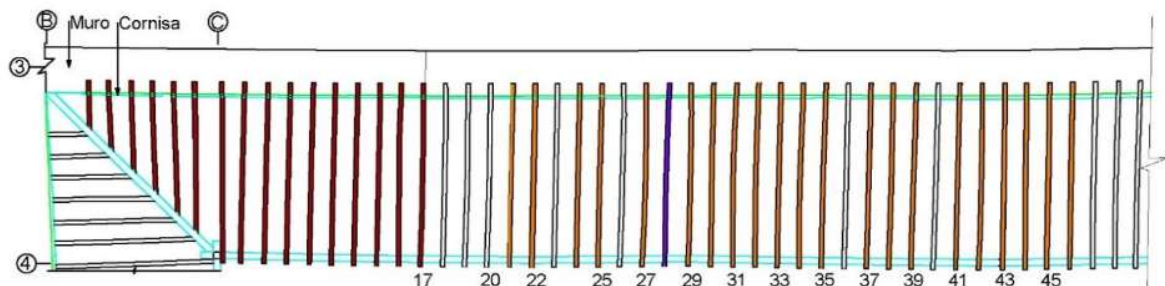


Figura 9. Resultados de ensayos en elementos del forjado entre pies derechos 8-13, donde se muestra la termografía de la galería con elevado nivel de humedad en los apoyos de los pies derechos, y la resistografía en pies derechos y viga de corredera del eje 4.

3.5 Propuestas de solución

En las vigas del forjado se determinó que 17 de ellas requieren ser sustituidas por su avanzado deterioro. Adicionalmente otras 45 vigas deberán ser reforzadas estructuralmente en diferentes zonas, en función de las patologías desarrolladas en cada una. De las 34 vigas restantes a las que no se le identificaron lesiones significativas, será necesario desmontar y decapar 2 de ellas debido a deterioros superficiales, para posteriormente recalcular la carga para la nueva sección de viga (Figuras 10 y 11). Todos los pies derechos mostraron deterioros que requieren acciones de reforzamiento estructural, así como en las vigas de corredera, donde será necesario la sustitución de dos tramos, y el reforzamiento de otros 3 tramos (Figuras 12 y 13). La disminución significativa de la densidad de las maderas del forjado es el resultado de la exposición a ciclos de humectación y secado, fundamentalmente en los meses de lluvia, con la consecuente proliferación de hongos e infestación de termitas. Las deformaciones presentes en las vigas no solo son el resultado del incremento del peso por exceso de agua y el crecimiento de plantas superiores, sino también debido a la pérdida de sus propiedades maderables, lo cual incrementa el riesgo de fallo estructural.



Leyenda:

- - sustitución
- - decarpar y recalcular para nueva sección
- - reforzamiento

Figura 10. Propuesta de solución al forjado entre vigas 1-49

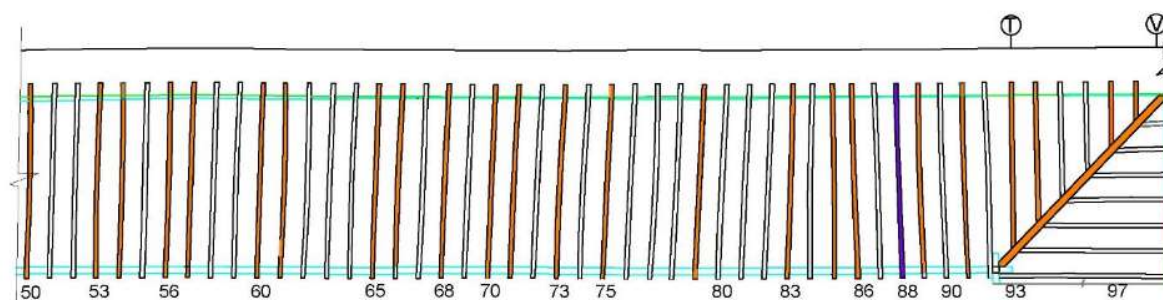


Figura 11. Propuesta de solución al forjado entre vigas 50-98

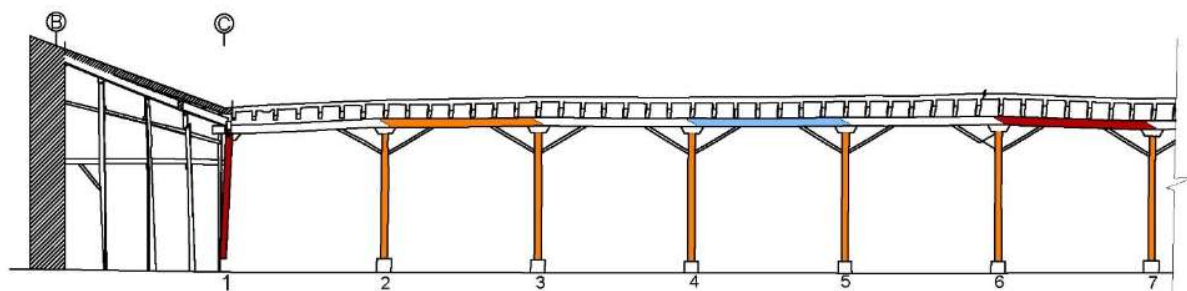


Figura 12. Propuesta de solución a los pies derechos 1-7 y sección de viga de corredera

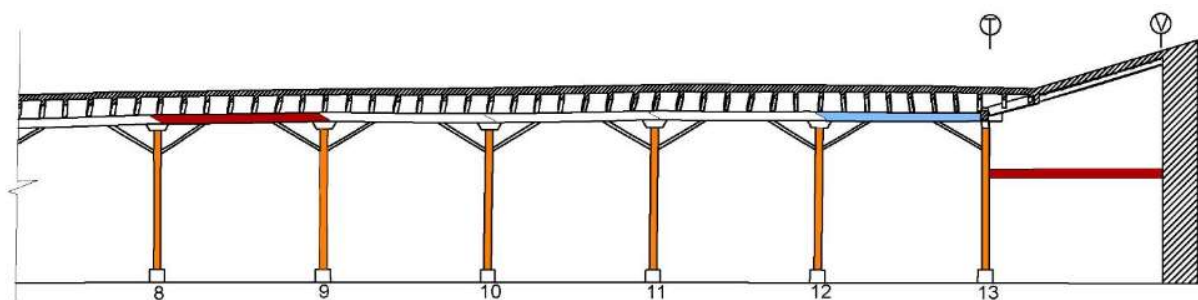


Figura 13. Propuesta de solución a los pies derechos 8-13 y sección de viga de corredera

4. CONCLUSIONES

La estructura del forjado de madera de la galería estudiada presenta un avanzado deterioro, provocado por pudrición debido al exceso de humedad producto del crecimiento de plantas invasoras sobre la cubierta. Esta situación propició la colonización por hongos y el ataque de organismos xilófagos, lo cual conllevó a pérdidas en las propiedades de las maderas empleadas. Los estudios de densidad aplicados mostraron afectaciones en la dureza debido a la exposición a ciclos de humectación y secado, y la colonización biológica. Esto conllevó a deformaciones en las vigas y la disminución de la capacidad portante de sus elementos estructurales.

Como resultado del diagnóstico realizado, se demostró la necesidad de sustituir 17 vigas de soporte de la cubierta y el refuerzo estructural de otras 45. Los pies derechos deberán igualmente ser reforzados, mientras uno de ellos tendrá que ser sustituido por avanzado deterioro, así como algunas secciones de viga de corredera.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el financiamiento de esta investigación al Grupo Inversionista de Rehabilitación Patrimonial de la OHCH bajo contrato No. S-5AI/2020 Ccto. 22DG/2019. La misma

fue realizada con apoyo de la División de Materiales de la Fundación Tecnalia Research & Innovation bajo el proyecto de colaboración FOCAD 2018.

De igual manera se desea agradecer la participación de los especialistas y técnicos del Departamento de Diagnóstico y Levantamiento, en particular a los Ingenieros Rafael González Hernández y Dainelys Guerra Bouza por su considerable aportación, a todos los técnicos del Departamento de Diagnóstico y Levantamiento, así como a la Bióloga Maider Arana de la Fundación Tecnalia en la elaboración del plan de control y erradicación de termitas, y de la Cooperación Internacional a la Ing. Ingrid Alonso Esquivel.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Binda, L., Saisi, A. (2009), *Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France.
- Guevara, J. L., Toirac, Y. A., Marisy, C. M. C. (2019), *Un acercamiento al convento de Santa Clara de Asís de La Habana. Estudio de su estado de conservación y propuestas de intervención*. Revista ALCONPAT, 9(2): 228-246. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.354>
- Hasniková, H., Kuklík, P. (2014), *Various non-destructive methods for investigation of timber members from a historical structure*. Wood research, 59(3): 411-420.
- Helal, J., Sofi, M., Mendis, P. (2015), *Non-destructive testing of concrete: A review of methods*. Electronic Journal of Structural Engineering, 14(1): 97-105.
- Kherais, M., Csébfalvi, A., Len, A. (2021), *The climate impact on timber structures*. International journal of optimization in civil engineering, 11(1): 143-154.
- Kloiber, M. (2007), *"Ensayos no destructivos de las propiedades de la madera"*, Mendel University, Czech Republic, 208 pp.
- Kuklík, P. (2007), *Determinación de las propiedades estructurales de la madera*, Praha.
- Kumar, P., Imam, B., (2013), *Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure*. Science of The Total Environment, 444: 85-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.056>
- Liñán, C. R., Conde, J. M., Hita, P. R. D., Gálvez, F. P. (2011), *Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz)*. Informes de la Construcción, 63(521): 13-22. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.032>
- Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñán, C., Rubio de Hita, P. (2013), *Application of non-destructive techniques in the inspection of the wooden roof of historic buildings: A case study*. Advanced Materials Research, 778: 233-242. 10.4028/www.scientific.net/AMR.778.233
- Norma Cubana (1988), *NC 53-179:88 - Estructuras de madera. Método de cálculo*. La Habana, Cuba.
- Ortega, N. F., Ripani, M. (2007), *Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas*, IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007. Asociación Argentina de Ensayos no Destructivos y Estructurales (AAENDE), Argentina, pp. 1-12.
- Ortiz, R., Fuentes, N., Jamet, A., Moya, A., González, M., Varela, M. P., Ramírez, A., Adofacci, G., Martínez, P. (2017), *Evaluación resistográfica en elementos de maderas desfibradas de la torre de lixiviación de la oficina salitrera Santa Laura en Chile. Patrimonio de la Humanidad. Informes de la Construcción*, 69(547): 1-6. <http://dx.doi.org/10.3989/id54678>
- Palaia, L., Monfort, J., Sánchez, R., Gil, L., Álvarez, A., López, V., Tormo, S., Pérez, C., Navarro, P. (2008), *"Assessment of timber structures in service, by using combined methods of non-destructive testing together with traditional ones"*. 9th International Conference on NDT of Art. Jerusalem, Israel.

Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J., Hughes, J. J. (2021), *Climate change impacts on cultural heritage: A literature review*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change: e710. <https://doi.org/10.1002/wcc.710>

Tucci, G., Bonora, V. (2017), *Towers in San Gimignano: metric survey approach*. Journal of performance of constructed facilities, 31(6). [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001085](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001085)

Workman, G. L., Moore, P. O. (2012), "Nondestructive Testing Handbook 10: Overview". American Society for Nondestructive Testing.