


Evaluación no destructiva de las vigas de madera del edificio Narciso López del Centro Histórico de La Habana para reúso en su restauración

A. Hernández Oroza^{1*} , E. Berreo Alayo¹, R. Expósito Mendez¹

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

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.585>

Recepción: 01/02/2022 | Aceptación: 08/04/2022 | Publicación: 01/05/2022

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo evaluar, a través de clasificación visual y ensayos no destructivos, el estado de conservación de 32 vigas de madera para su reúso como proyecto de restauración de un edificio histórico. Para esto se realizaron mediciones del contenido de humedad, penetrómetro, estimación del módulo de elasticidad y tensión de rotura mediante velocidad del pulso ultrasónico. Los resultados mostraron que el 66% de las vigas presentaban afectación por pudrición, desfibramiento y fisuración. Los ensayos realizados a las vigas deterioradas permitieron determinar que, para una confiabilidad del 95%, de las restantes 21 vigas era posible reutilizar 17 de ellas con una densidad promedio de 0.4 g/cm³.

Palabras clave: restauración; vigas de madera; deterioro; penetrómetro; ultrasonido.

Citar como: Hernández Oroza, A., Berreo Alayo, E., Expósito Mendez, R. (2022), “Evaluación no destructiva del estado de conservación de las vigas de madera del edificio Narciso López del Centro Histórico de La Habana para reúso en su restauración”, Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 263 – 278, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.585>

¹ Departamento 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 (100%), la redacción del texto (60%), la discusión de resultados (100%) y revisión (100%). El autor E. Berrio Alayo contribuyó con redacción del texto (40%) y el procesamiento de los datos obtenidos (100%). El autor R. Expósito Mendez contribuyó con la actividad de registro de las mediciones (100%). Todos los autores contribuyeron de forma equitativa en la ejecución de las mediciones y el desarrollo de la investigación.

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.

Non-destructive evaluation of the wooden beams of the Narciso López building in the Historic Center of Havana for reuse in its restoration

ABSTRACT

The objective of the study was to evaluate, through visual classification and non-destructive tests, the state of conservation of 32 wooden beams for reuse as a restoration project for a historic building. For this, measurements of the moisture content, penetrometer, estimation of the modulus of elasticity and breaking stress by ultrasonic pulse velocity were made. The results showed that 66% of the beams were affected by rot, defibrination and cracking. The tests carried out on the deteriorated beams made it possible to determine that, for a reliability of 95%, of the remaining 21 beams it was possible to reuse 17 of them with an average density of 0.4 g/cm³.

Keywords: restoration; wooden beams; decay; penetrometer; ultrasound.

Avaliação não destrutiva das vigas de madeira do edifício Narciso López no Centro Histórico de Havana para reutilização em sua restauração

RESUMO

O objetivo do estudo foi avaliar, por meio de classificação visual e ensaios não destrutivos, o estado de conservação de 32 vigas de madeira para reaproveitamento como projeto de restauração de um edifício histórico. Para isso, foram feitas medições do teor de umidade, penetrômetro, estimativa do módulo de elasticidade e tensão de ruptura por velocidade de pulso ultrassônico. Os resultados mostraram que 66% das vigas foram afetadas por apodrecimento, desfibramento e fissuração. Os ensaios realizados nas vigas deterioradas permitiram determinar que, para uma fiabilidade de 95%, das restantes 21 vigas foi possível reaproveitar 17 delas com densidade média de 0,4 g/cm³.

Palavras-chave: restauração; vigas de madeira; deterioração; penetrômetro; ultrassom.

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.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de la madera como material de construcción tiene sus orígenes desde los primeros asentamientos humanos, con la conformación de chozas primitivas. Las bondades de sus propiedades en cuanto a manipulación, durabilidad, dureza, resistencia y color, han propiciado el uso de la misma a lo largo de la historia de la humanidad, tanto para la creación artística como constructiva. En las edificaciones en donde el empleo de este material tiene un desempeño estructural, el cual influye en la seguridad de la obra y sus explotadores, se hace necesario realizar evaluaciones periódicas de la integridad de la madera mediante inspecciones y ensayos (Szostak et al., 2020; Zielińska and Rucka, 2021). Factores como la baja disponibilidad mundial de madera sólida, la disminución de los diámetros de los troncos de los árboles de especies maderables que los hace menos aprovechables industrialmente, unido a la necesidad de preservar la memoria histórica de las edificaciones, ha conllevado al desarrollo de normativas, metodologías y técnicas de ensayos para la evaluación de la calidad y estado de conservación de este material (Documento Básico SE-M, 2019; Manavella et al., 2019; Salazar et al., 2018; UNE 56544, 2011).

Con el propósito de que la intervención sobre las estructuras de madera sean lo menos invasiva posibles, la aplicación de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistografía, extracción de tornillo o penetrómetro, permiten obtener a partir de mediciones *in-situ* resultados fiables para la determinación del estado de conservación de elementos estructurales de madera. La aplicación de los mismos posibilita la estimación de parámetros como la densidad, la tensión de rotura y el módulo de elasticidad para su reaprovechamiento o sustitución de acuerdo con los requisitos del proyecto. Aunque el empleo de estas técnicas ofrece ventajas en cuanto a seguridad de clasificación basado en sus resultados, la evaluación visual de la madera, como criterio de aceptación, se mantiene en la actualidad como el método más empleado, debido fundamentalmente a su bajo coste en comparación con el empleo de equipamientos, y la facilidad que ofrece la madera de mostrar sus características y lesiones en la superficie de la misma.

Las edificaciones del Centro Histórico de La Habana construidas antes del siglo XX tienen en común el empleo de madera como elemento estructural de soporte de entresijos y forjados, en donde se combinan los sistemas de viga y tabazón, con viga y losa por tabla. Estas maderas, en el momento que fueron aserradas para su explotación como elemento estructural, no se clasificaron por sus características debido a la inexistencia de normativas al respecto, por lo que criterios como la anchura de los anillos de crecimiento, fendas, bolsas de resina, gemas, deformaciones y alteraciones biológicas no fueron tenidas en cuenta de forma normalizada. En este sentido, las normativas vigentes (DIN EN 338:2016-07, 2016; ISO 9709:2018, 2018; UNE 56544, 2011), establecen criterios de rechazo que conllevarían a la sustitución total o parcial de elementos de madera que, después de haber sido empleados por más de un siglo, han demostrado su durabilidad y capacidad portante, debido a que están concebidas para madera nueva.

Sin embargo, cuando se trata de reutilización de elementos de madera estructural para rehabilitación y conservación patrimonial, es importante el empleo combinado de los criterios visuales y analíticos, puesto que estos últimos pueden aportar mejores criterios de acierto en comparación con la clasificación visual, según fue demostrado por (Rello et al., 2007) en donde obtuvieron que mediante VPU se puede alcanzar hasta 72% con respecto al 53% de acierto en calidad de madera. Los materiales de construcción con los años de explotación sufren diferentes formas de deterioro que, en el caso de la madera, se inicia fundamentalmente por la presencia de humedad debido a que es un material higroscópico y poroso. En este sentido, diversos investigadores (Bratasz et al., 2010; Sotomayor Castellanos, 2015) han demostrado la influencia del contenido de agua en la conservación de la madera y sus propiedades. De acuerdo con (Arriaga et al., 2006), el módulo de elasticidad puede variar en 2% para rangos de humedad entre 5% y 30%.

Basado en las consideraciones antes expuestas y la necesidad de evaluar la posible reutilización de vigas de madera en edificaciones históricas, este trabajo tiene como objetivo presentar los resultados de la evaluación del estado de conservación de las vigas de madera del soporte del primer nivel entre los ejes 5-6:A-C del edificio Narciso López (Figuras 1 y 2), ubicado en el Centro Histórico de La Habana. El mismo fue construido en el año 1858 y cuenta de 4 niveles, de los cuales la planta baja y entresuelo son de muros de piedra, mientras los superiores son de mampuesto. Los entresijos están soportados por vigas de madera de pino (*pinus sp.*). Los procesos de restauración iniciados en el año 2019 requirieron de un diagnóstico patológico, por primera vez desde la construcción del inmueble, para determinar su posible aprovechamiento y de esta manera preservar, en la medida de lo posible, los elementos originales de la edificación.



Figura 1. Edificio Narciso López.
Fuente: Centro de Documentación Arq. Fernando Salinas, Restaura, OHCH

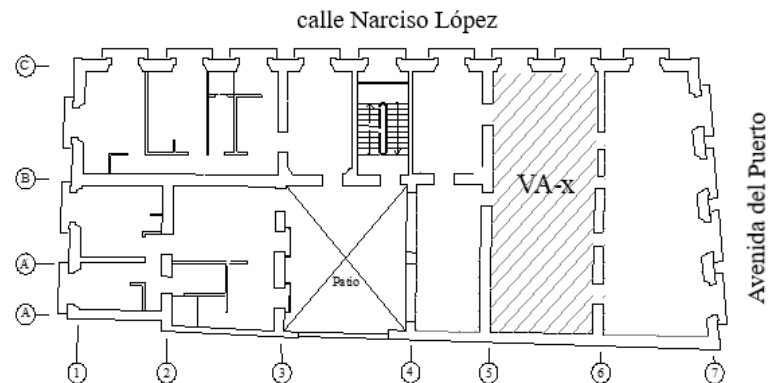


Figura 2. Vista en planta del primer nivel del edificio. Señalizado de la zona de estudio. Elaboración propia

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El estudio se inició con el retiro del piso y el desmonte de todas las vigas. Esto posibilita la inspección detallada por todas las caras (Figuras 3 y 4), fundamentalmente en la zona de las cabezas, las cuales, al estar empotradas en los muros, presentan mayores deterioros por pudrición debido a la acumulación de humedad en el interior de la fognadura (Figuras 5 y 6). Esta primera etapa permite registrar la posición, longitud, dirección y sentido de cada fisura, grieta, pudrición y/o desfibramiento presentes en las vigas, para lo cual se tomó como referencia la distancia de la lesión con respecto a la cabeza (Figura 7). Adicionalmente se identificaron las zonas de ensayo que cuentan con las condiciones idóneas para la realización de las mediciones. En áreas en donde existan fisuraciones o deterioros por distintas formas de pudrición (parda, blanda, etc.) no es posible realizar mediciones debido a que no se logra una correcta transmisión o confinamiento de la señal, desde el emisor al receptor, o los resultados obtenidos están alterados por la presencia de películas microbianas que afectan la composición física-química de la madera, degradando su estructura y densidad. Por su parte las técnicas de impacto o penetración, presentan como inconveniente que no deben ser aplicadas sobre superficies irregulares que influyan en el momento de impacto de la broca, ya sea por deformación de la misma, alteración en el ángulo de entrada o carencia de madera para ofrecer un valor de densidad representativo de las propiedades reales del elemento estructural. Para la preparación de las zonas de ensayo se seleccionaron dos secciones por cada viga, libres de lesiones en la superficie.

Posteriormente se procedió a la identificación de cada viga mediante el código del local (VA-x), en donde la x representa un número consecutivo, iniciado desde el 1. El local cuenta con un total de 32 vigas de madera, las cuales apoyan entre los ejes 5-6. Para determinar las dimensiones se empleó una cinta métrica, y se registraron las medidas de ancho, peralte y longitud (Tabla 1). A las cabezas de las vigas se les identificó con las letras A y B (Figura 8).



Figura 3. Etapa de inspección detallada en viga montada sobre burros de madera



Figura 4. Inspección y clasificación visual de vigas desmontadas



Figura 5. Estado de las cabezas de las vigas

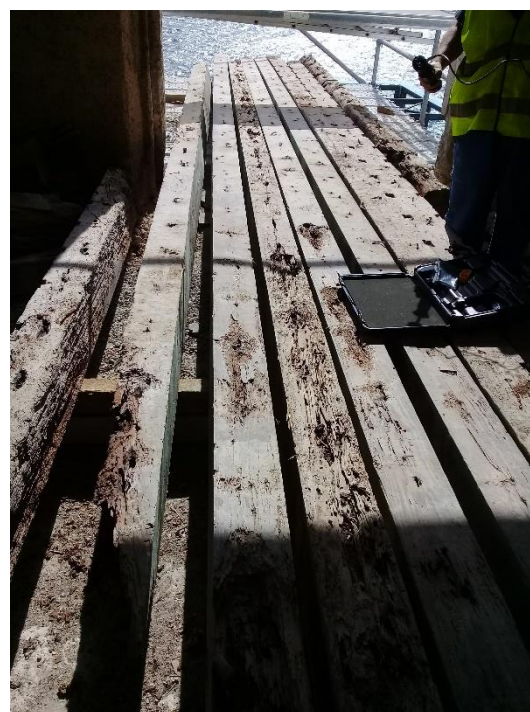


Figura 6. Vigas desmontadas con diferentes manifestaciones patológicas



Figura 7. Medición con cinta métrica de la sección de viga afectada



Figura 8. Identificación de las vigas de madera

2.1 Ensayos no destructivos aplicados

Los ensayos aplicados consistieron en la estimación de la densidad (ρ), tensión de rotura (f_k) y módulo de elasticidad dinámico (MED), mediante la combinación de las técnicas de penetrómetro y VPU. Para ambas es necesario realizar ajustes con respecto al contenido de humedad, para lo cual se toma como referencia el valor de 12%. En el caso del penetrómetro, para la determinación de la densidad a 12% de humedad, la ecuación de ajuste empleada fue la de (Kuklík, 2007):

$$\rho_{12} = -0.027102 * t_{p,12} + 0.727987 \quad (1)$$

$$t_{p,12} = t_p(1 - 0.007\Delta w) \quad (2)$$

$$\Delta w = w - 12 \quad (3)$$

Dónde:

ρ_{12} = densidad de la madera al 12% de humedad; g/cm^3

$t_{p,12}$ = profundidad de penetración en la madera con 12% de humedad; mm

t_p = profundidad de penetración en la madera ensayada; mm

w = humedad de la madera en el momento de la medición; %

Para la medición de VPU el equipo empleado fue Proceq Pundit Lab⁺, con transductores cónicos de 54KHz (Figura 9). Los mismos se colocaron en sentido perpendicular a las fibras (Figura 10) y se programó en el equipo la distancia entre ellos, para cada viga. Se realizó el ajuste a 12% de humedad mediante la siguiente ecuación (Liñán et al., 2011):

$$VPU_{12} = 27.5(w - 12) + VPU \quad (4)$$

Dónde:

VPU_{12} = velocidad de pulso ultrasónico referida a 12% de humedad; m/s

w = humedad de la madera en el momento de la medición; %

VPU = velocidad de pulso ultrasónico medida; m/s



Figura 9. Aplicación de ensayos de VPU en vigas de madera

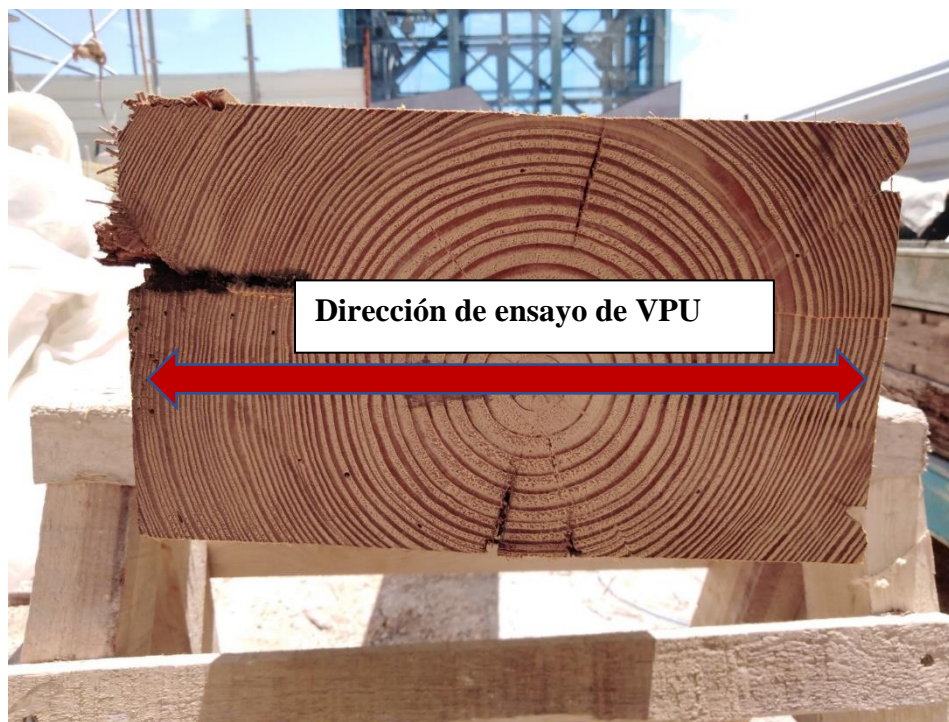


Figura 10. Esquema de aplicación de VPU perpendicular a la fibra

Basado en los mismos criterios, se calculó la tensión básica de rotura (f_k) y el límite de determinación del estado de conservación de las vigas de madera:

$$f_k = (0.212VPU_{12} - 183.09) * 1/10 \quad (5)$$

Dónde:

f_k = tensión de rotura; MPa

VPU_{12} = velocidad de pulso ultrasónico referida a 12% de humedad; m/s

A partir de las mediciones de VPU y los valores obtenidos de estimación de densidad, se calcularon los módulos dinámicos aplicando la ecuación empleada por (Alquicira and Castellanos, 2021; Ettelaei et al., 2018):

$$MED = \rho * VPU_{12}^2 \quad (6)$$

Dónde:

MED= módulo de elasticidad dinámico; N/m²

ρ = densidad; Kg/m³

VPU_{12}^2 = velocidad de pulso ultrasónico referida a 12% de humedad; m/s

Para la medición de la humedad en las vigas de madera se empleó el termo-higrómetro Delmhorst's TotalCheck (Figura 11).



Figura 11. Medición de humedad superficial con equipo termo-higrómetro Delmhorst's TotalCheck

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evaluación visual

De las 32 vigas inspeccionadas, once de ellas no mostraron ningún tipo de lesión (Tabla 1). De acuerdo con los requisitos de clasificación visual de la norma (UNE 56544, 2011), 4 vigas categorizaron como ME-1 y 7 como ME-2 (Tabla 2). El resto de las vigas clasifican como Rechazo considerando los daños recurrentes de grietas y fisuras longitudinales, pudrición y desfibramiento, fundamentalmente en la zona de las cabezas hasta una distancia aproximada de 40 cm. Sin embargo, al tratarse de un proyecto de rehabilitación que pretende emplear las vigas originales, a excepción de la VA-18, todas requieren de ser reevaluadas mediante los ensayos propuestos.

Tabla 1. Resultados de la inspección realizada a las vigas de madera.

ID	Ancho (cm)	Peralto (cm)	Longitud (cm)	Lesiones
VA-1	15	19.5	312	Astillado por la CI a 70 cm del cabezal A.
VA-2	16	20	320	Fisuras longitudinales discontinuas en la mitad del peralto de la CL, desde el cabezal B hasta una longitud de 250 cm.
VA-3	18	20	309	Fisuras discontinuas longitudinales en la mitad del peralto.
VA-4	17.5	20	295	Desfibrada en la AS en toda la longitud de la viga.
VA-5	17.5	20	310	Grietas y fisuras longitudinales discontinuas por CL, en la mitad del peralto. Desfibrada por CS desde el cabezal B hasta una longitud de 70 cm.
VA-6	14	20	304	Fisura en la CL, desde el cabezal B hasta una longitud de 20 cm en la mitad del peralto.
VA-7	12.5	20	304	Fisura longitudinal en la mitad del peralto de ambas caras laterales, desde el cabezal A hasta una longitud de 90 cm.
VA-8	12.5	20	310	Fisuras longitudinales desde el cabezal B hasta una longitud de 60 cm en la mitad superior de la CL. Pudrición por CL desde el cabezal A, hasta una longitud de 70 cm.
VA-9	14.5	20	309	No se observaron lesiones.
VA-10	15.5	20	310	Fisura longitudinal en la mitad superior de la CL, en toda la longitud. Desfibrado superficial por CL, a 90 cm del cabezal B.
VA-11	17.5	21	310	No se observaron lesiones.
VA-12	17	20	310	
VA-13	11.5	21.5	476	Desfibrada por la CS afectando 5 cm del ancho de la CL y 2-3 cm del peralto.
VA-14	11.5	21.5	475	No se observaron lesiones.
VA-15	11.5	21.5	472	Fisura longitudinal en la mitad del peralto de la CL en toda la longitud.
VA-16	12	22	480	No se observaron lesiones.
VA-17	13	21.5	480	Desfibrado por CS a 30 cm del cabezal B, hasta una longitud de 60 cm.
VA-19	13	21	480	No se observaron lesiones.
VA-18	Pudrición generalizada			
VA-20	12	20	480	No se observaron lesiones.
VA-21	11.5	20	480	
VA-22	11.5	21	480	Grietas y fisuras longitudinales discontinuas por CL en toda la luz de la viga en la mitad inferior del peralto. Desfibrada por CS a partir de 160 cm del cabezal A, hasta una longitud de 200 cm.

VA-23	15	20	299	Desfibrado superficial en el tercio superior de la CL, desde el cabezal B hasta una longitud de 40 cm.
VA-24	14	19.5	297	No se observaron lesiones.
VA-25	15.5	20	306	
VA-26	18	20	305	Desfibrado en toda la arista superior de la CL.
VA-27	17	20	305	Fisuras longitudinales por CS en toda la luz.
VA-28	15	20	310	Ablandamiento y desfibrado por la CS, en toda la longitud. Fisuras longitudinales discontinuas por la CL.
VA-29	14.5	20	310	Desfibrado en cabezal A y B por la CS hasta una longitud de 40 cm respectivamente.
VA-30	14.5	20	310	Desfibrado por CS afectando 3 cm del peralto en toda la longitud.
VA-31	16.5	20	362	Astillada por CI a 60 cm del cabezal B. Desfibrado superficial en AS de la CL.
VA-32	11	21	361	No se observaron lesiones.
Abreviaturas empleadas: CI: cara inferior CL: cara lateral CS: cara superior AS: arista superior				

Tabla 2. Clasificación visual de las vigas de madera.

Calidad visual (UNE 56544, 2011)	Cantidad de vigas
ME-1	4
ME-2	7
Rechazo	21

La inspección visual permitió determinar la extensión del daño en la superficie, pero no su profundidad en la masa de la madera, excepto en los casos donde la pudrición sea muy avanzada. Las lesiones por pudrición o profundidad de grietas hacia el interior de las vigas, puede conllevar a la pérdida de la capacidad portante del elemento y provocar su fractura.

De acuerdo con (Nuere, 2007), en los casos en los cuales el deterioro puede conllevar a la invalidación del elemento para cumplir la función estructural que tiene asignada en el conjunto, debe tomarse la decisión si bien sustituir o reforzar las vigas. La aplicación de estos criterios a cada viga dependerá del análisis combinado de las lesiones visibles, y los resultados obtenidos mediante las técnicas no destructivas (Tabla 3). El retiro de un elemento de madera requerirá necesariamente su sustitución por otro de similares dimensiones que cumpla los requerimientos de clasificación visual y clase resistente, para no afectar los requisitos de carga por proyecto.

3.2 Aplicación de ensayos no destructivos

Para la realización de los ensayos de penetrómetro y VPU se prepararon dos puntos en cada viga. En cada uno se registraron 5 lecturas, para un total de 10 resultados por cada elemento. En la figura 12 se muestra un resumen de valores en algunas de las vigas ensayadas.

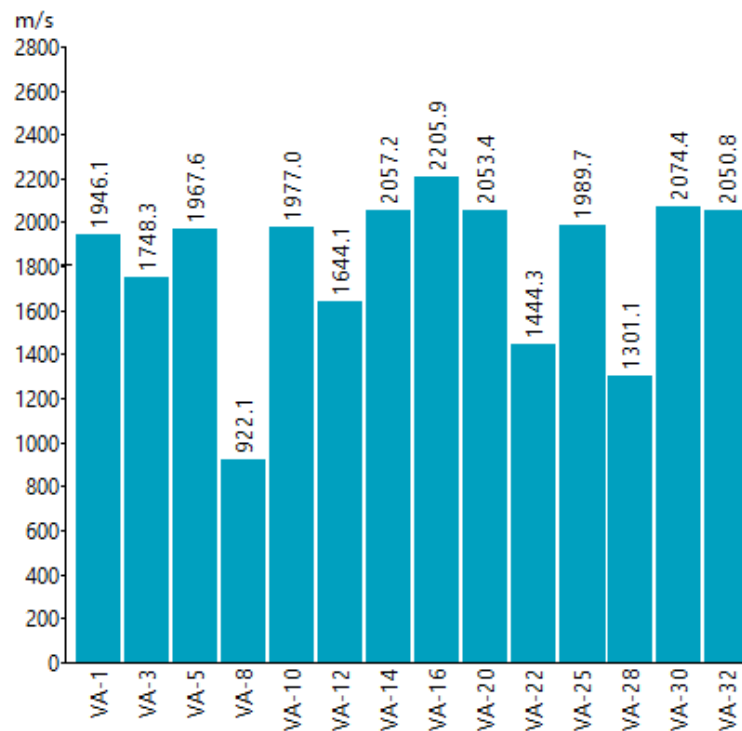


Figura 12. Resumen de mediciones de VPU en un punto de ensayo para las vigas de madera. Datos extraídos del software Proceq PunditLink

Los criterios para la estimación del deterioro de la madera basado en los resultados de VPU se plantearon de acuerdo con (Liñán et al., 2011), en el que se establece que:

VPU > 1400 m/s: madera sana (MS)

VPU < 1400 m/s: madera deteriorada (MD)

Tabla 3. Resultados promedios de las mediciones y cálculos aplicados.

ID	w (%)	TP (mm)	TP ₁₂ (mm)	p ₁₂ (g/cm ³)	VPU ₁₂ (m/s)	fk (MPa)	MED (MN/m ²)	Criterio
VA-1	13.3	10.5	10.4	0.45	2011.58	24.34	1804.33	MS
VA-2	12.3	10.0	10.0	0.46	2143.33	27.13	2101.57	MS
VA-3	11.8	12.0	12.0	0.40	2020.32	24.52	1642.40	MS
VA-4	14.3	12.0	11.8	0.41	1972.75	23.51	1587.83	MS
VA-5	17.9	9.5	9.1	0.48	1930.15	22.61	1792.52	MS
VA-6	13.7	9.5	9.4	0.47	2108.75	26.40	2105.94	MS
VA-7	15.8	9.5	9.2	0.48	2565.00	36.07	3140.70	MS
VA-8	15.2	10.5	10.3	0.45	921.20	1.22	381.70	MD
VA-9	19.9	11.3	10.7	0.44	2147.25	27.21	2022.57	MS
VA-10	12.2	10.7	10.7	0.44	1865.80	21.25	1526.17	MS
VA-11	14.6	9.0	8.8	0.49	2043.00	25.00	2038.96	MS
VA-12	18.1	12.3	11.8	0.41	1733.55	18.44	1228.72	MS
VA-13	17.8	10.7	10.3	0.45	2375.50	32.05	2538.05	MS
VA-14	14.9	12.3	12.1	0.40	2101.05	26.23	1771.94	MS
VA-15	15.6	11.7	11.4	0.42	2019.70	24.51	1708.71	MS
VA-16	19.3	11.0	10.4	0.45	2336.25	31.22	2429.38	MS

VA-17	15.7	12.0	11.7	0.41	2273.55	29.89	2125.43	MS
VA-18	Viga descartada por avanzado deterioro							
VA-19	17.0	10.3	9.9	0.46	2126.00	26.76	2072.85	MS
VA-20	15.4	10.3	10.1	0.46	2066.10	25.49	1944.34	MS
VA-21	15.6	11.0	10.7	0.44	2126.20	26.77	1977.26	MS
VA-22	14.4	10.7	10.5	0.44	1485.10	13.18	976.75	MS
VA-23	14.4	10.0	9.8	0.46	2165.10	27.59	2163.45	MS
VA-24	13.1	9.3	9.2	0.48	1995.55	24.00	1903.02	MS
VA-25	12.0	10.7	10.7	0.44	1996.20	24.01	1745.33	MS
VA-26	13.2	10.0	9.9	0.46	2073.90	25.66	1975.23	MS
VA-27	16.2	10.7	10.4	0.45	2015.70	24.42	1814.24	MS
VA-28	18.4	12.7	12.1	0.40	1397.50	11.32	779.66	MD
VA-29	15.7	11.7	11.4	0.42	1960.35	23.25	1610.61	MS
VA-30	14.5	11.7	11.5	0.42	2193.75	28.20	2004.15	MS
VA-31	14.6	12.0	11.8	0.41	1914.30	22.27	1497.63	MS
VA-32	13.9	9.7	9.6	0.47	1960.15	23.25	1800.43	MS

En los resultados de VPU obtenidos solo dos vigas (VA-8 y VA-28) muestran valores inferiores al límite establecido de 1400 m/s, siendo clasificadas como “madera deteriorada”. Esto puede deberse a que la infestación por hongos de la pudrición, ablandamiento y desfibramiento en la madera se han extendido hacia el interior de las vigas, lo cual se refleja en el resultado de la velocidad de transmisión de la onda entre los transductores. Con los años de explotación del inmueble no es posible determinar las causas por las cuales estas vigas sufrieron un deterioro considerablemente superior al resto. Es posible que su ubicación coincidiera con la de zonas húmedas como baños o cocinas, aunque los contenidos de humedad registrados no muestran valores extremos que sustenten esta hipótesis. El análisis estadístico de los datos (Tabla 4), en el que se excluyeron a las vigas VA-8 y VA-28, muestran una dispersión para VPU inferior al 10%, con una confiabilidad del 95%, por lo que para el resto de los valores se acepta la población de datos obtenida.

Tabla 4. Cálculos estadísticos de los resultados obtenidos en las vigas clasificadas como MS.

Parámetros estadísticos	w (%)	Tp,12 (mm)	p12 (g/cm ³)	VPU, 12 (m/s)	fk (MPa)	MED (MN/m ²)
Xmed	15.1	10.8	0.4	2059.5	25.4	1898.3
sd	2.1	1.0	0.0	197.3	4.2	400.3
CV(%)	14.0	9.2	5.8	9.6	16.5	21.1
Min.	11.8	9.0	0.4	1485.1	13.2	976.8
Max.	19.9	12.3	0.5	2565.0	36.1	3140.7

La densidad mínima de las vigas fue de 0.4 g/cm³. Esto corresponde con una clasificación de clase resistente superior a C35, de acuerdo con (Documento Básico SE-M, 2019). Los resultados de VPU inferiores a 1400 m/s obtenidos para la VA-8 y VA-28 infieren que los deterioros por pudrición y fisuras se extienden hacia el interior del elemento. Sin embargo, sus resultados de profundidad de penetración no fueron significativos en comparación con las restantes vigas.

Esto demuestra que la estimación del estado de conservación de la madera basados en la densidad calculada mediante penetrómetro, puede conllevar a falsos positivos si no se combina con otras técnicas de medición. La dureza de la madera en el punto de impacto de la aguja, puede resultar en un valor elevado que no refleja el deterioro en el interior del material. En la Figura 13 se muestra

el análisis general de resultados que correlacionan el contenido de humedad/penetración/densidad calculada. En los casos de la VA-9 y VA-16 se identifica como alcanzan un valor de penetración ≥ 11.0 mm para una humedad próxima a 20%, en lo cual se esperaría un ablandamiento de la madera que resultase en mayor penetración, como sucede con la VA-28. La comparación de contenidos de humedad entre estas vigas es muy similar pero con resultados opuestos. En el caso de VA-9 y VA-16 no presentan lesión alguna y mantuvieron una VPU superior a 2000 m/s, mientras que en la VA-28 se confirmó el avance de las lesiones hacia el interior de la viga con resultados de VPU inferiores a 1400 m/s.

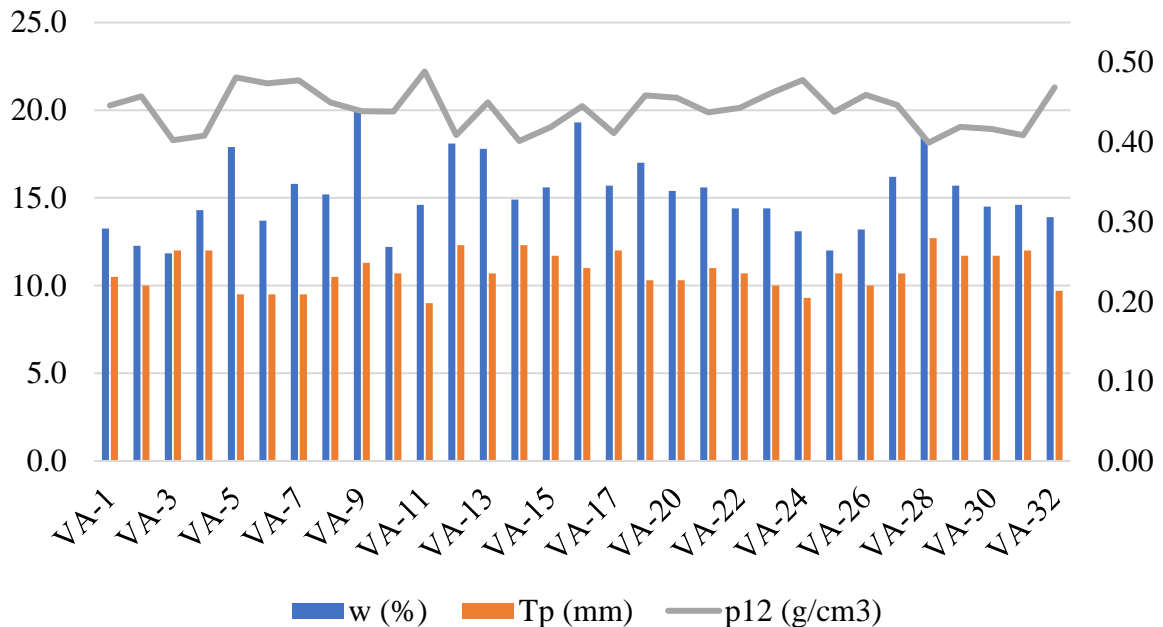


Figura 13. Relación de resultados de contenido de humedad, penetrómetro y densidad calculada a 12% para todas las vigas de madera estudiadas

Del total de mediciones de VPU realizadas, el 82% fluctuó en una profundidad de penetración entre 9.0 mm y 12.0 mm. En el análisis gráfico (Figura 14) se aprecia como el conjunto mayoritario de resultados ocupa el rango comprendido entre 1800 m/s y 2400 m/s para el intervalo antes mencionado. La gráfica permitió identificar a la viga VA-22 como una variable distante de la media poblacional con un resultado de VPU= 1485.10 m/s. Si se toma en consideración la desviación estándar calculada y las lesiones presentes en la viga, sería razonable por cuestiones de seguridad estructural sustituirla por una nueva. Los valores obtenidos a partir de las ecuaciones propuestas para estimación de la f_k y el MED muestran una elevada correlación entre ellos (Figura 15)., caracterizando a las vigas en clase estructural ME-2 (UNE 56544, 2011), sobre las cuales deben aplicarse todas las acciones de restauración y consolidación necesarias para su reúso.

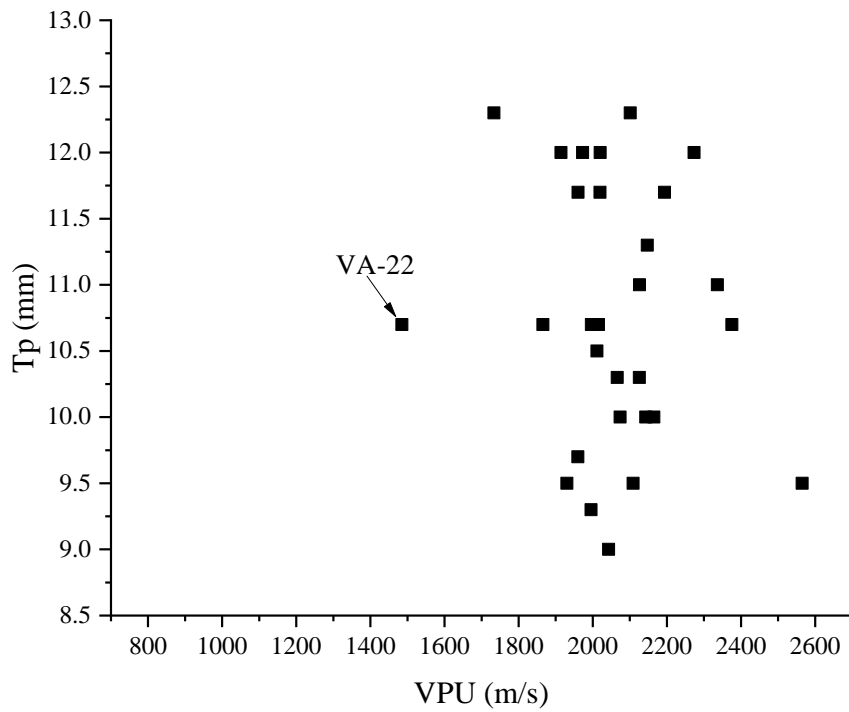


Figura 14. Relación de resultados de VPU vs Tp para las vigas evaluadas como Madera Sana

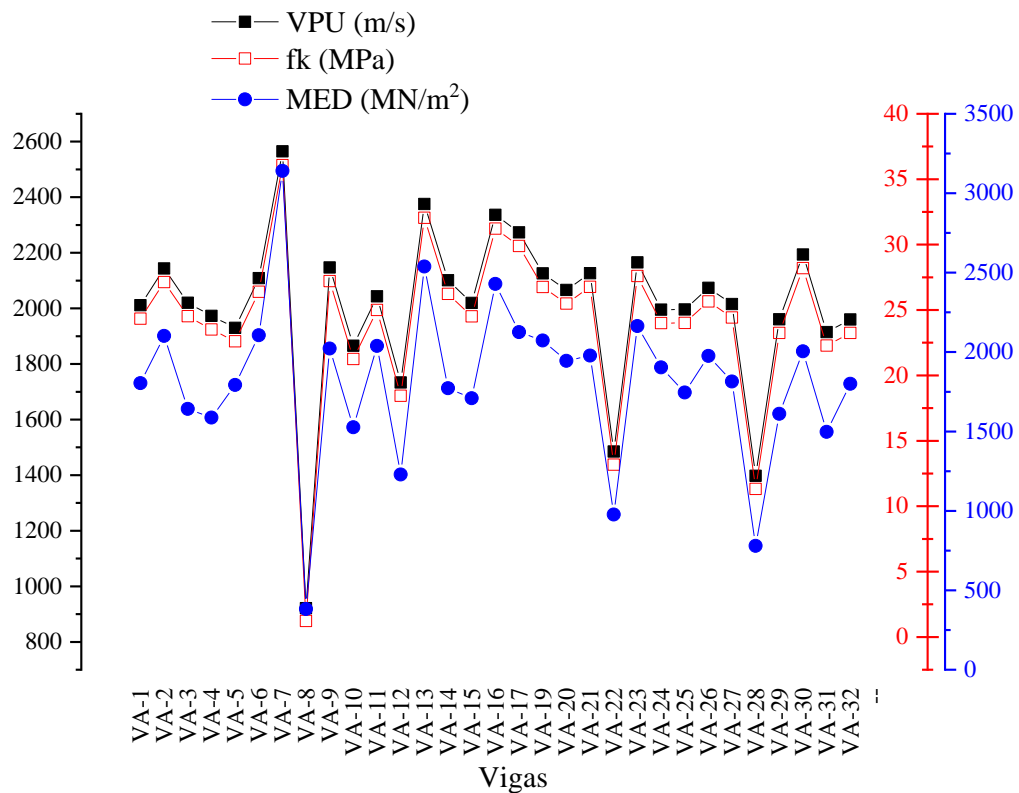


Figura 15. Correlación de resultados obtenidos de VPU, fk y MED para las vigas de madera

4. CONCLUSIONES

De las 32 vigas diagnosticadas para evaluar su posible reúso como madera estructural en la rehabilitación del inmueble, se arriba a las siguientes conclusiones:

Las lesiones más recurrentes encontradas durante la inspección visual fueron el deterioro de las cabezas por exceso de humedad en la fagonadura, debido al desarrollo de hongos de la pudrición, además de fisuras y grietas discontinuas en las caras y aristas. Entre las técnicas más comunes de restauración y reforzamiento para estos tipos de deterioro están el uso de casquillos y ménsulas metálicas para garantizar la sujeción de las vigas en los puntos de apoyo. Decapado o cepillado de las caras y aristas hasta alcanzar una superficie con la menor cantidad posible de lesiones. Las fisuras por su parte pueden ser selladas mediante resinas, o a partir de la preparación de un engrudo de cola de carpintero mezclada con aserrín, fumigación y tratamiento con productos biocidas, y finalmente el recálculo estructural para las nuevas dimensiones de las vigas.

El estudio combinado de evaluación visual y ensayos no destructivos permitió identificar que las vigas VA-8, VA-18, VA-22 y VA-28, deben ser sustituidas por presentar avanzadas lesiones y deficiente densidad para ser reusadas como elemento estructural.

La normativa vigente de clasificación visual de madera serrada para uso estructural es muy conservadora en lo relativo a deterioros, lo que puede resultar en la sustitución total de elementos de madera antiguos. En proyectos de rehabilitación y conservación de bienes patrimoniales, es más efectiva la evaluación del estado de conservación mediante la aplicación de ensayos de medición sobre las piezas de madera.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, la técnica de VPU mostró resultados más acertados con respecto a la condición de densidad de la madera en comparación con la técnica de penetrómetro, en la cual, mediante las ecuaciones empleadas, no se reflejaron afectaciones en las densidades para variaciones de contenido de humedad entre 11.8% y 19.9%.

5. AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado por el Grupo Inversionista Avenida del Puerto, perteneciente a la Dirección de Inversiones de la OHCH bajo contrato S-No. 4DG /2021 al Contrato 6DG/2020. Los autores desean agradecer el apoyo de los técnicos Lázaro Y. Martínez García y Raúl de Jesús Expósito Mendez, así como reconocer la labor y colaboración de los obreros y carpinteros de la obra.

6. REFERENCIAS

- Alquicira, I. M., Castellanos, J. R. S. (2021), *Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo dinámico de madera sólida y laminada de Pinus pseudostrobus*. Madera y Bosques, 27(3): e2732235-e2732235. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732235>
- Arriaga, F., Íñiguez, G., Esteban, M., Fernández-Golfín, J. I. (2006), *Structural Tali timber (Erythrophleum ivorense A. Chev., Erythrophleum suaveolens Brenan.): Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasonic methods*. Holz als Roh-und Werkstoff, 64(5): 357-362. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0100-5>
- Bratasz, L., Rachwal, B., Kozłowski, A., Kozłowski, R. (2010). *Sorption of Moisture and Dimensional Change of Wood Species Used in Historic Objects, Wood science for conservation of cultural heritage-Braga 2008 : proceedings of the international conference held by Cost action IE0601 in Braga (Portugal) 5-7 November 2008. - (Proceedings e report ; 67)*. Firenze University Press, Firenze.

- DIN EN 338:2016-07. (2016). *Structural timber - Strength classes*. Germany. <https://dx.doi.org/10.31030/2463437>.
- Documento Básico SE-M. (2019). *Seguridad Estructural. Madera*.
- Ettelaei, A., Layeghi, M., Hosseinabadi, H. Z., Ebrahimi, G., (2018), *Prediction of Modulus of Elasticity of Poplar Wood Using Ultrasonic Technique by Applying Empirical Correction Factors*. Measurement. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.076>
- ISO 9709:2018. (2018). *ISO 9709:2018(en) Structural timber — Visual strength grading — Basic principles*.
- Kuklík, P. (2007). *Determinación de las propiedades estructurales de la madera*, Praha.
- 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>
- Manavella, R. D., Guillaumet, A. A., Filippetti, M. C., Meyer, L. C. (2019), "*Determinación del módulo de elasticidad por ultrasonido y vibraciones en vigas de pino ponderosa*". 4to Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera. Montevideo, Uruguay.
- Nuere, E., (2007), *Madera, en restauración y rehabilitación*. Informes de la Construcción, 59(506): 123-130.
- Rello, L. A., Barra, R. D., Sanz, M. C., Fernández, A. L., Sánchez, M. T. L., Basterra, A. (2007). *Clasificación de madera estructural de P. pinaster Ait. Mediante ultrasonidos*, Congreso Iberoamericano de productos forestales - Iberomadera, Buenos Aires, Argentina.
- Salazar, D. V., Delgado, J. C., Yoza, L. Y., Mallque, M. A. (2018), *Propuesta metodológica para la evaluación de estructuras de madera en monumentos históricos – Caso Hotel El Comercio*. Revista Forestal del Perú, 33(2): 117-132. <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v33i2.1225>
- Sotomayor Castellanos, J. R. (2015), *Densidad, velocidad del ultrasonido y módulo de elasticidad de la madera de Pinus douglasiana, en relación a su contenido de humedad*. Revista de Ciencia y Tecnología(23): 25-30.
- Szostak, B., Trochonowicz, M., Kowalczyk, M. (2020), *Determination of the strength parameters of pinewood based on the non-destructive sclerometric test with a wood hammer*. Civil and Environmental Engineering Reports, 30(1): 43-52. <https://doi.org/10.2478/ceer-2020-0004>
- UNE 56544. (2011). *Norma Española UNE 56544:2011 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*. Madrid. España.
- Zielińska, M., Rucka, M. (2021), "*Using the ultrasonic tomography method to study the condition of wooden beams from historical building*". 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC). International Institute for Conservation of Historic And Artistic Works.