

Escuela Nacional de Conservación, Restauración
y Museografía “Manuel del Castillo Negrete”

Técnicas no destructivas y semidestructivas para la evaluación de materiales empleados en estructuras históricas

Leidy Bejarano
Giulia Bettiol

Estudios sobre conservación, restauración y museología

V O L U M E N III

ISBN: 978-607-484-747-5

publicaciones@encrym.edu.mx
www.encrym.edu.mx/index.php/publicaciones-encrym

Palabras clave

Técnicas no destructivas, técnicas semidestructivas, endoscopia, velocidad de pulso sónico, microperforación, caracterización dinámica de tensores.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo aportar una visión actualizada de algunas técnicas no destructivas y semidestructivas usadas para la inspección y diagnóstico de estructuras históricas, algunas de las cuales no se han fomentado ampliamente en México. Por medio de esas técnicas es posible obtener información cualitativa y cuantitativa sobre propiedades físicas o mecánicas de los diferentes materiales que las conforman. Las técnicas tratadas son la endoscopia, velocidad de pulso sónico, microperforación y caracterización dinámica de tensores. Se presentarán los objetivos y descripción de cada técnica, lo cual incluye su aplicación en el caso estudio de la Torre de los Ancianos en Padua, Italia.

Introducción

La caracterización física y mecánica de los materiales que conforman las edificaciones históricas es todavía un tema de investigación importante, ya que para respetar los valores intrínsecos de la estructura se deben emplear técnicas que causen la mínima alteración posible y ofrezcan información con buena precisión. Esta caracterización es de vital importancia para realizar un diagnóstico óptimo de la estructura y, más adelante, implementar proyectos de prevención o intervención adecuados.

Además de presentar una detallada descripción sobre algunas técnicas de caracterización física y/o mecánica para diferentes materiales, este trabajo presenta una aplicación en el caso estudio de la Torre de los Ancianos (figura 1), una torre de mampostería de estilo Románico construida en el siglo XIII (Bejarano, 2014) presenta información detallada sobre este proyecto.



Figura 1. Vista exterior de la Torre de los Ancianos en Padua, Italia.

Las técnicas empleadas y su tipología se presentan en la tabla 1, las cuales han mostrado ser muy eficientes para obtener información cualitativa y cuantitativa de diferentes materiales, causando un impacto mínimo en la estructura.

Prueba	Material	Semi-destructivo	No destructivo	Cualitativo	Cuantitativo
Endoscopia	Mampostería	x		x	
Velocidad de pulso sónico	Mampostería		x	x	
Micro-perforación	Madera	x		x	
Caracterización dinámica de tirantes	Hierro		x		x

Tabla 1. Técnicas empleadas para caracterización de materiales

Endoscopia

Objetivo de la prueba

La endoscopia es usada para realizar una inspección visual de áreas inaccesibles, como el interior de los muros, de forma sencilla, precisa y con alto grado de nitidez, lo cual ofrece una excelente opción para un examen rápido sin dañar el material.

Descripción

Esta técnica consiste en introducir una cámara endoscópica (endoscopio) en un pequeño agujero perforado de antemano, de 1.5 cm de diámetro, para identificar la morfología y composición del elemento (véase figura 2). Esos equipos permiten tomar medidas en puntos inaccesibles al emplear una cabeza compuesta de dos lentes y que por efecto estereoscópico permiten estimar distancias con cierta exactitud.



Figura 2. Prueba de endoscopia.

La principal ventaja de la endoscopia reside en que permite acceder a puntos no visibles de forma natural, y en que proporciona diagnósticos visuales y objetivos de forma rápida y certera. Existen endoscopios rígidos (boroscopios) y flexibles, cuya transmisión de imagen se realiza por medio de lentes y de fibra óptica, respectivamente (Lombillo *et al.*, 2008).

Aplicación en la Torre de los Ancianos

Se realizaron varios ensayos de endoscopia en los muros de mampostería de la Torre de los Ancianos (véase figura 3), donde se analizaron diferentes imágenes a diferentes profundidades. Se encontró que los muros eran sólidos (no presentaban un núcleo) y estaban hechos de mampostería de ladrillo, la cual mostró uniformidad y homogeneidad en su mayor parte. Los muros occidental y sur presentaron algunas zonas rugosas, con vacíos y grumos de mortero.

Cabe mencionar que esta prueba es muy importante para determinar las características físicas del material para realizar un análisis estructural óptimo de acuerdo con su continuidad. Para este caso de estudio se procedió a realizar un modelo estructural que tuvo en cuenta un material homogéneo, pues la mayor parte de los muros presentaron esa característica.

Velocidad de pulso sínico

Objetivo de la prueba

Por lo general esta prueba se utiliza sobre elementos de mampostería o concreto, para cumplir con los siguientes objetivos: i) determinar la calidad del material mediante la morfología de la sección del elemento; ii) detectar la presencia de vacíos y







Prueba 1 – Muro oriental	Prueba 2 – Muro sur	Prueba 3 – Muro occidental
<p data-bbox="380 350 661 378">Profundidad: 95 cm</p> 	<p data-bbox="877 350 1159 378">Profundidad: 91 cm</p> 	<p data-bbox="1381 350 1663 378">Profundidad: 127 cm</p> 
<p data-bbox="380 789 661 816">Profundidad: 15 cm</p> 	<p data-bbox="877 789 1159 816">Profundidad: 51 cm</p> 	<p data-bbox="1381 789 1663 816">Profundidad: 37 cm</p> 

Figura 3. Imágenes endoscópicas del interior de los muros.

defectos, y encontrar patrones de agrietamiento y daños; iii) controlar la efectividad de reparaciones por técnicas de inyección (Binda & Saisi, 2006).

Descripción

La prueba de velocidad de pulso sónico es una prueba acústica basada en la generación de impulsos sónicos (ondas mecánicas de baja frecuencia) por medio de percusión o un dispositivo transmisor. La onda mecánica es recibida por uno o varios receptores, casi siempre acelerómetros, ubicados al lado opuesto del elemento que se requiere analizar (véase figura 4). Las señales son registradas por un analizador de onda conectado a una computadora.



Figura 4. Equipamiento de la prueba de velocidad de pulso sónico.

La generación de las ondas se realiza usualmente para un rango de frecuencias entre 0.5 kHz y 10kHz; Lombillo *et al.*, (2008) recomienda utilizar una frecuencia de 3.5 kHz para elementos de mampostería. El procedimiento consiste en medir

el tiempo Δt que toma la onda en cubrir la distancia entre el transmisor y receptor (véase figura 5), el cual es afectado por la densidad y calidad del material; al conocer el tiempo y la distancia se procede a calcular la velocidad de onda mediante la expresión (1).

$$V_{onda} = \frac{D}{\Delta t} \quad (1)$$

en la cual D es la distancia entre el transmisor y receptor y Δt es el tiempo de viaje.

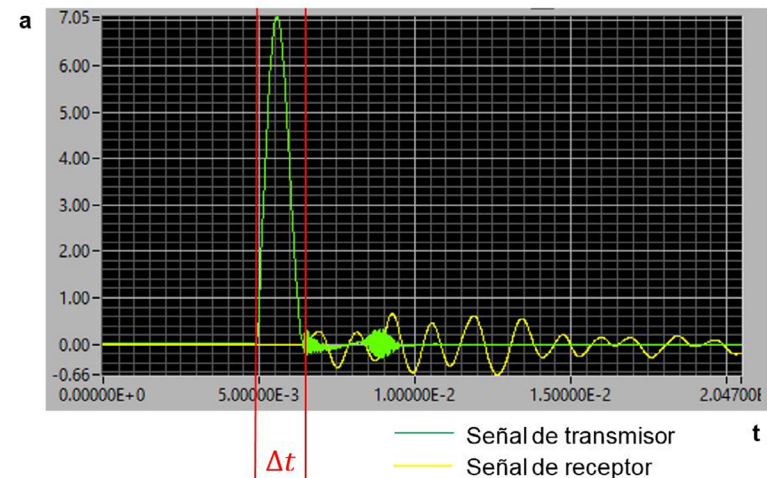


Figura 5. Señales registradas de transmisor y receptor (Bejarano, 2014).

Aplicación en la Torre de los Ancianos

La prueba se realizó en varios de los muros de mampostería de la torre usando un martillo con cabeza dura instrumentada, como transmisor y un acelerómetro, como receptor (véase figura 4). Cabe mencionar que la dureza de la cabeza del mar-

tillo define la frecuencia de la onda, mientras su masa define la energía.

La prueba se realizó en un arreglo de puntos con área de 80 x 80 cm, mediante una rejilla de adquisición de datos de 5x5 (véase figura 6). Se llevó a cabo un procedimiento de transmisión directa, donde por cada golpe de martillo en un punto se registró la señal de arriba de la onda con un acelerómetro localizado exactamente al lado opuesto de dicho punto. La prueba se realizó tres veces sobre cada punto para calcular un valor medio.

Antes de la prueba se realizó una inspección visual de cada uno de los muros. Para el muro de mampostería mostrado en la figura 6 se observó que la superficie exterior estaba cubierta por una capa de estuco blanco, mientras la superficie interior estaba cubierta por mortero de cemento. No se observó ningún tipo de daño o deterioro. La figura 7 muestra el histograma y el mapa de contorno de velocidad de pulso sónico para este muro, los cuales muestran gradientes muy bajos de velocidades.

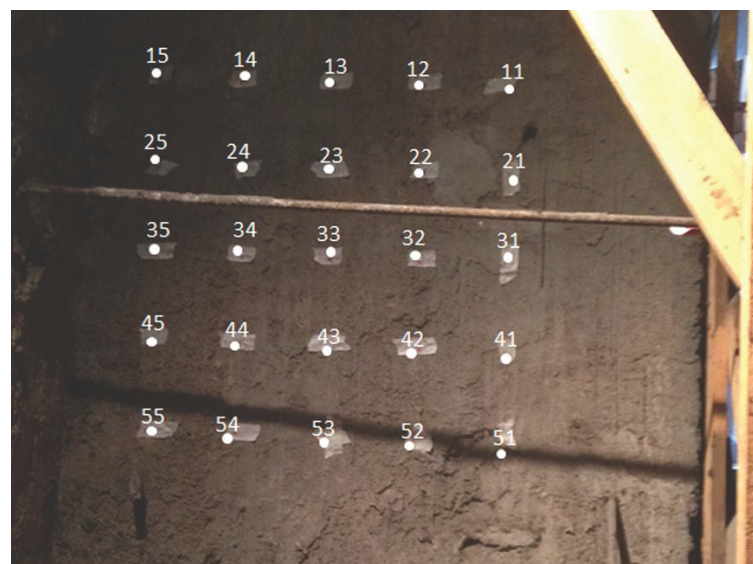
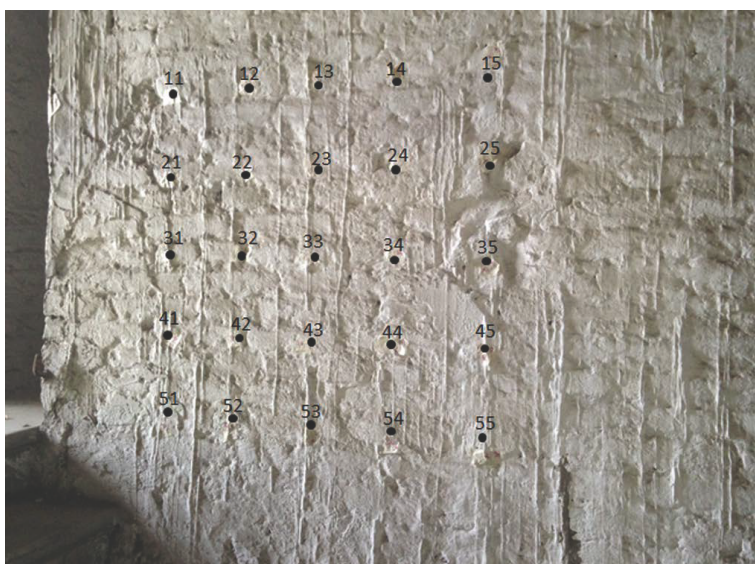


Figura 6. Arreglo de puntos sobre muro oriental de 2.34 m de espesor a 13.2 m de altura.

a) Lado exterior (transmisión) b) Lado interior (recepción).

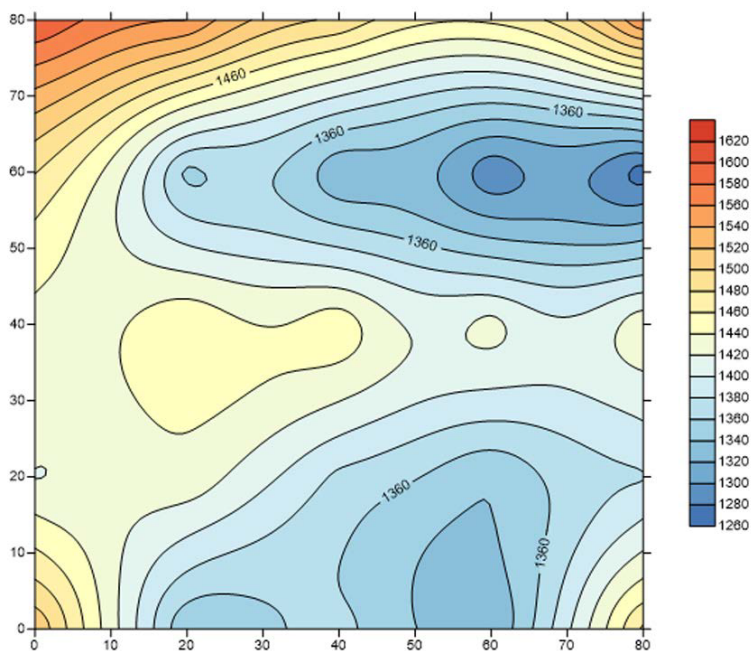
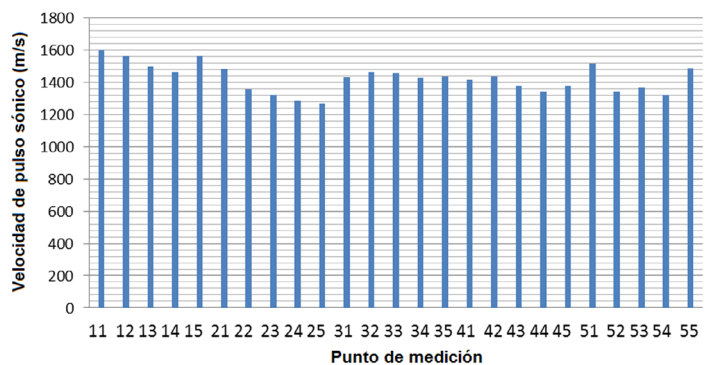


Figura 7. Representación del valor medio de velocidad de onda, V_{onda} (en m/s).

- a) Histograma
- b) Mapa de contorno

Binda y Saisi (2006) determinaron, con base a varios ensayos realizados de este tipo, que velocidades mayores a 1000 m/s representan una mampostería de calidad buena. El promedio de velocidad de pulso sónico para este muro fue de 1423.3 m/s, con un bajo coeficiente de variación (6.2%); esto representa no sólo una buena calidad del material, sino que es homogéneo y no presenta vacíos ni discontinuidades en su interior (no se observan gradientes importantes en el mapa de contorno). Estos resultados concuerdan con los obtenidos con la endoscopia.

Micro-Perforación

Objetivo de la prueba

Esta prueba proporciona información cualitativa sobre la calidad y resistencia a la perforación de elementos de madera, lo cual permite evaluar de manera indirecta la capacidad de carga del elemento y la posibilidad de intervenirlo.

Descripción

La resistencia medida se basa en la energía necesaria para hacer avanzar una aguja a través de una sección del elemento, la cual depende de la densidad y calidad del mismo. Durante la perforación, la energía de penetración se registra y se muestra gráficamente como una función de la profundidad de perforación; esta gráfica se denomina curva de resistencia a la perforación e indica los lugares con baja o nula resistencia, además de indicar zonas deterioradas, huecos, defectos naturales y grietas; la prueba también permite medir la sección transversal del

elemento (cuando no es posible medirlo de manera directa). El dispositivo tiene la sensibilidad suficientemente para medir las diferencias de densidades entre los anillos anuales, que son visibles en las curvas como picos (Binda *et al.*, 2007). Para caracterizar la calidad de la madera se calcula el parámetro de resistencia RM, el cual se define como el área bajo la curva de resistencia dividida por la longitud de la perforación.

Aplicación en la Torre de los Ancianos

Las pruebas fueron llevadas a cabo en varias vigas de madera pertenecientes a los diafragmas de entrepiso de la torre; se utilizó un resistógrafo Resi PD-400 ajustado a una velocidad de aguja constante de 2500 rev/min, el diámetro de aguja fue de 2 mm y longitud de 40 cm. La figura 8 muestra las curvas

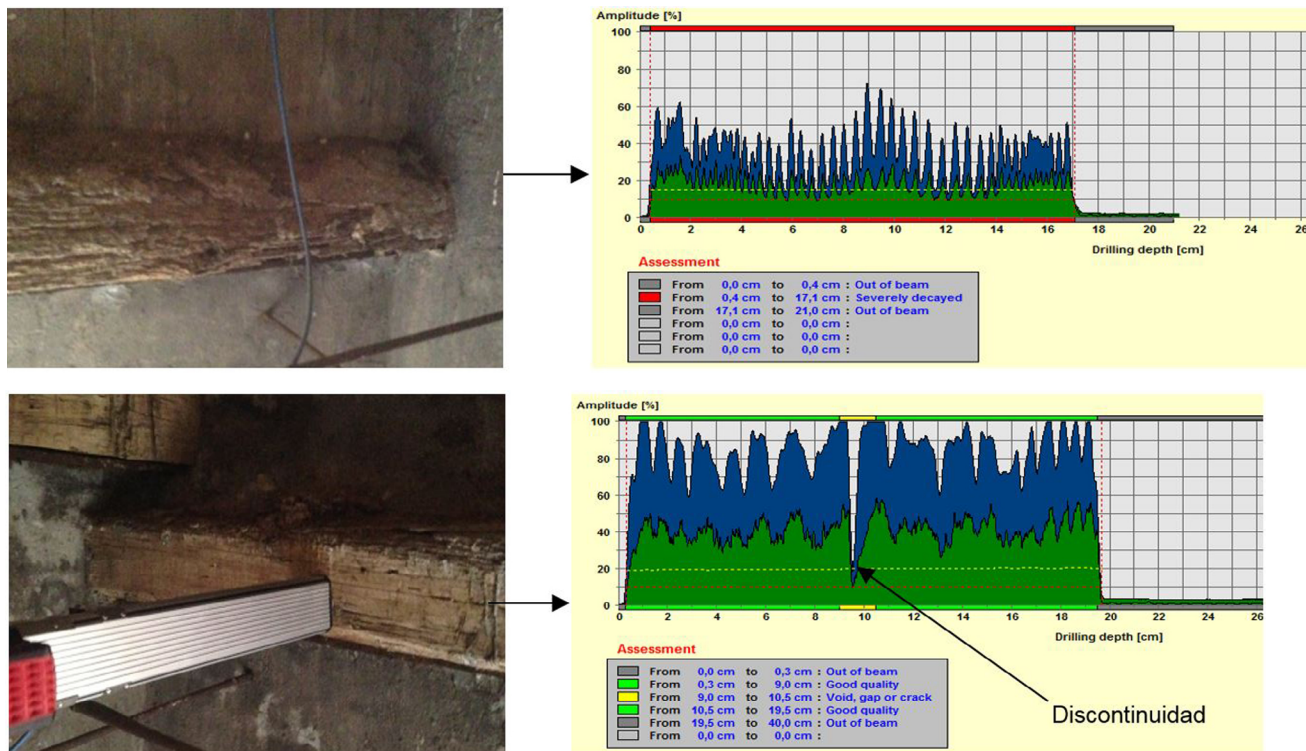


Figura 8. Curvas de resistencia a la perforación en vigas de madera (en color verde).

- a) Madera en buen estado con discontinuidad.
- b) Madera muy deteriorada.

de resistencia en una sección de dos vigas hechas con el mismo tipo de madera, la viga a) resultó de buena calidad pero presentó una discontinuidad (8a), mientras la viga b) resultó altamente deteriorada a través de toda la sección (8b).

La tabla 2 muestra los resultados de las pruebas y diagnóstico, el parámetro RM para el punto a) es de 40.1%, mientras para el punto b) es de 17.5%. La diferencia de calidad entre estos elementos puede deberse probablemente a la acción del agua o acción biológica.

Punto	Prof. (mm)	Área bajo la curva	Parámetro de resistencia RM=Área/Prof. (%)	Contenido de agua (%)	Diagnóstico
a	192	7705.04	40.1	17.2	Buena calidad, difícil de perforar, con discontinuidades
b	168	2937.73	17.5	18.8	Calidad deficiente, muy deteriorada

Tabla 2. Resultados de la prueba de microperforación.

Caracterización dinámica de tensores

Objetivo de la prueba

La caracterización dinámica es útil para conocer la fuerza a la que están sometidos tensores metálicos o cables por medio de sus frecuencias naturales de vibración.

Descripción

Existen varias técnicas para calcular la fuerza en tensores o cables, entre ellas el gato de tensión, instalación de galgas ex-

tensiométricas (strain gauges) y mediciones topográficas; Cuhna y Caetano (2008) afirman que a pesar de sus sencillas bases teóricas, estas técnicas son complejas en su aplicación práctica, y en muchos casos el nivel de aproximación resulta insuficiente. Sin embargo, un método sencillo, efectivo y menos costoso para estimar la fuerza en tensores es mediante su caracterización dinámica.

Esta técnica implica determinar las frecuencias naturales de vibración de los tensores por medio de pruebas de vibración ambiental y/o forzada (para mayor detalle sobre este tipo de pruebas véase Cuhna & Caetano, 2008). El nivel de tensión es calculado fácilmente a partir de la expresión (2), la cual se deriva de la teoría de la cuerda vibrante.

$$T = \frac{4 \mu f_n^2 l_0^2}{n^2} \quad (2)$$

Donde T es la fuerza de tensión a que está sometido el tensor, f_n es la n-ésima frecuencia natural de vibración, l_0 es la longitud efectiva del tensor y μ es la densidad del material por unidad de longitud.

Aplicación en la Torre de los Ancianos

Las pruebas se llevaron a cabo en varios de los tensores de hierro forjado encontrados en la torre, algunos de ellos instalados en el siglo XIII y otros en el siglo XX. Se realizaron tanto pruebas de vibración ambiental como forzada, para las cuales se usaron tres acelerómetros piezoeléctricos distribuidos de modo uniforme en cada tensor (figura 9), la respuesta dinámica de los tensores fue registrada con un adquisidor de datos, usando una frecuencia de muestreo de 200 Hz durante 80 segundos.



Figura 9. Montaje de acelerómetros en tensores. a) Tensor del siglo XIII.
b) Tensor del siglo XX.

Mediante el uso de un software de análisis de señales se determinó la respuesta de los tensores en función del tiempo y de frecuencia para vibración ambiental y forzada (figura 10), así como los modos de vibración y sus frecuencias naturales. Los modos de vibración de los tensores se representan en la figura 11. La tabla 3 muestra las frecuencias naturales obtenidas para dos tensores.

Para el cálculo de las fuerzas en los tensores se consideró que estaban empotrados a los muros, así que su longitud efectiva (l_0) fue determinada como la mitad de su longitud total. La densidad del hierro forjado fue tomada de la literatura con un valor de 7850 kg/m^3 . Las tablas 3 y 4 presentan las fuerzas de tensión calculadas mediante la ecuación (2), donde se observa que los resultados obtenidos con vibración ambiental son muy cercanos a los obtenidos con vibración forzada. Por otro lado, se encontró que los tensores colocados en el siglo XIII estaban sometidos a fuerzas de tensión cercanas a 33 kN; sin embargo los colocados en el siglo XX estaban sometidos a niveles muy bajos de tensión (quizá en estado pasivo).

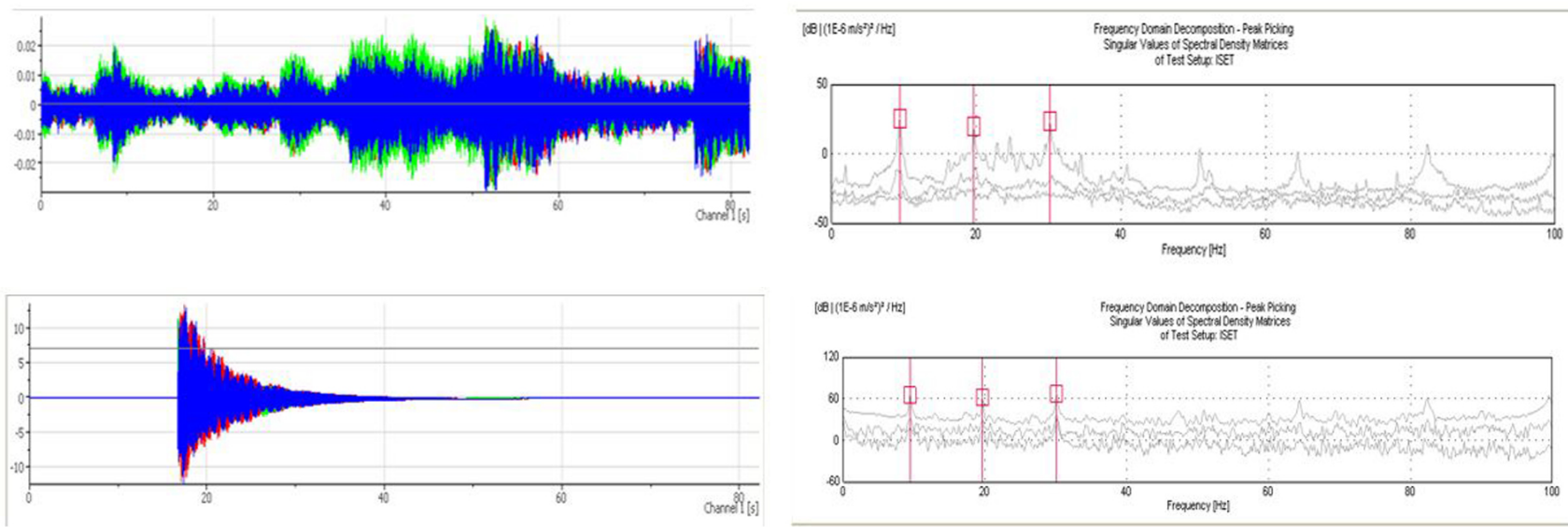


Figura 10. Respuesta de un tensor en función del tiempo (izquierda) y de frecuencia (derecha) a) Para vibración ambiental b) Para vibración forzada.

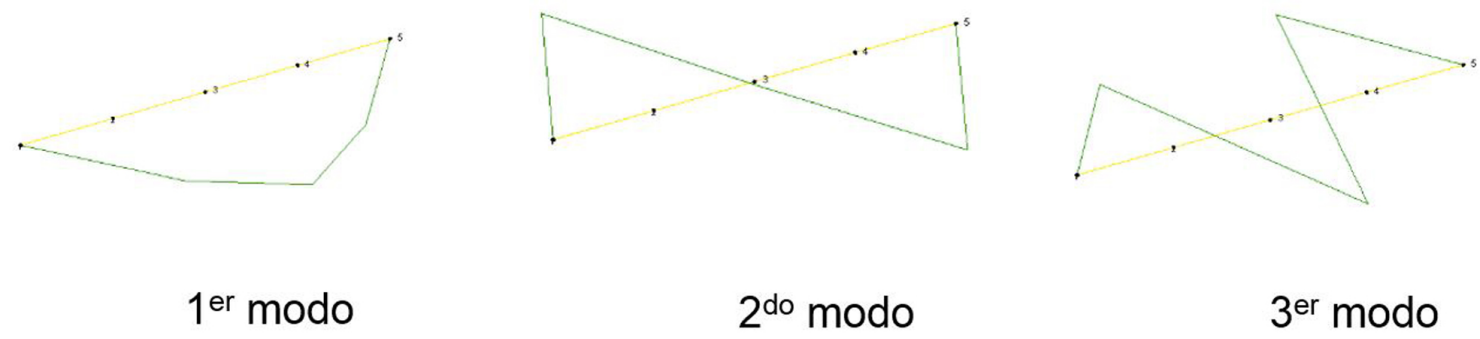


Figura 11. Modos de vibración de los tensores.

N	Periodo	Frecuencias - Vib. Ambiental (Hz)			Frecuencias -Vib. Forzada (Hz)		
		f1	f2	f3	f1	f2	f3
T1	Siglo XX	9.38	19.63	30.18	9.39	19.61	30.10
T2	Siglo XIII	16.70	34.86	54.46	16.67	34.77	54.39

Tabla 3. Frecuencias naturales para los tres modos de vibración.

Test	Periodo	T _{f1} (kN)	T _{f2} (kN)	T _{f3} (kN)	Promedio (kN)	Desv. estándar (kN)
T1	Siglo XX	2.61	2.86	3.00	2.82	0.2
T2	Siglo XIII	30.19	32.89	35.67	32.92	2.7

Tabla 4. Estado de tensión usando vibración ambiental.

Test	Periodo	T _{f1} (kN)	T _{f2} (kN)	T _{f3} (kN)	Promedio (kN)	Desv. Estándar (kN)
T1	Siglo XX	2.62	2.85	2.99	2.82	0.2
T2	Siglo XIII	30.07	32.72	35.59	32.79	2.8

Tabla 5. Estado de tensión usando vibración forzada.

Comentarios finales

Se presentó una descripción de cuatro técnicas no destructivas y semidestructivas para la caracterización física o mecánica de diversos materiales de uso común en estructuras históricas. Las técnicas descritas fueron la endoscopia y velocidad de pulso sónico para elementos de mampostería o concreto, microperforación para elementos de madera y caracterización dinámica para tensores metálicos. La principal ventaja de esas técnicas es la generación de mínimo impacto sobre la estructura, lo cual es de vital importancia en la evaluación del patrimonio construido. Por otra parte, la aplicación de esas técnicas resultó ser sencilla, rápida y de fácil interpretación de resultados.

Se presentó una aplicación en el caso estudio de la Torre de los Ancianos. De los resultados obtenidos se encontraron muros sólidos de mampostería en buen estado y algunas vigas de madera con alto grado de deterioro; además, se determinó la fuerza actuante en algunos tensores metálicos, encontrando algunos con niveles de tensión casi nula.

Con base en los resultados, se propone hacer un cambio de las vigas de madera deterioradas. Se recomienda realizar un modelo computacional que considere la continuidad de la mampostería y las fuerzas en los tensores metálicos, con el propósito de hacer un análisis estructural global de la torre.

Referencias

Bejarano, L. E. (2014), "Methodology for Seismic Assessment Applied to the Case Study of Tower Anziani in Padua (Italy)", tesis de maestría, Universidad de Padua, Padua.

Binda, L., M. Drdácý y B. Kasal (2007), *In-situ Evaluation & Non-destructive Testing of Historic Wood and Masonry Structures*, Praga, ITAM.ARCCHIP.

Binda, L. y A. Saisi (2006), "Knowledge of the Building, on Site Investigation and Connected Problems", en Edoardo Cosenza (ed.), *Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop*, Nápoles, Doppia voce, pp. 213-224.

Cunha, Á. y E. Caetano (2008), "Dynamic Measurements on Stay Cables of Cable-Stayed Bridges Using an Interferometry Laser System", *Experimental Techniques*, 23 (3): 38-43 (doi: 10.1111/j.1747-1567.1999.tb01570.x).

Lombillo, I., L. Villegas, D. Silió y C. Hoppe, (2008), "Evaluación no destructiva del patrimonio construido", *Revista Internacional Construlink* 16(6): 40-53.