

Obtención de modelos de cálculo de sistemas provisionales de protección de borde mediante la técnica de Análisis Modal Operacional

Procurement of models for the calculation of temporary edge protection systems through the Operational Modal Analysis technique

M.N. González^(*), A. Cobo^(*), J. V. Fuente^(**)

RESUMEN

En este trabajo se han obtenido experimentalmente mediante Análisis Modal Operacional (AMO) los modos de vibración y las frecuencias asociadas de sistemas provisionales de protección de borde (SPPB) fabricados con tablas de madera de pino silvestre y postes de sección tubular de acero. Los mismos sistemas se han evaluado analíticamente, usando un modelo de elementos finitos (MEF). Para el MEF se han obtenido las constantes elásticas de la madera mediante ultrasonidos. Los resultados de la evaluación experimental y analítica concuerdan en los primeros modos de vibración.

SUMMARY

In this work were obtained by Operational Modal Analysis (OMA) vibration modes and frequencies associated with temporary of protection systems (TEPS) built with planks of pine wood and steel poles. These systems have been evaluated analytically, using a finite element model (FEM). For the FEM we obtained the elastic constants of wood using ultrasound. The results of experimental and analytical assessment in the first vibration modes match in reasonable ways.

750-17

Palabras clave: Análisis modal operacional; método de elementos finitos; ultrasonidos; barandillas; seguridad.

Keywords: Operational modal analysis; finite element method; ultrasound; guard-rails; safety.

^(*) Universidad Politécnica de Madrid. (España).

^(**) AIDICO. Instituto Tecnológico de la Construcción. Valencia (España).

Persona de contacto/Corresponding author: mariadelasnieves.gonzalez@upm.es (M.N. González).

1. INTRODUCCIÓN

Una de las mayores dificultades existentes en el análisis de protecciones colectivas (PC) y de medios auxiliares de edificación (MAE) es la realización de un modelo de cálculo que refleje lo más fielmente posible la situación real (1). Para sistemas tan utilizados en España como las redes sobre pescantes, los trabajos analíticos y experimentales realizados han permitido obtener los modelos de cálculo de estos sistemas (2) (3). En el caso de sistemas provisionales de protección de borde (SPPB), las distintas posibilidades de unión de los postes a la estructura en la que se ancla el SPPB da lugar a respuestas significativamente distintas (4). Incluso en el caso tan elemental como es el anclaje por medio de la introducción de un poste en un cartucho de plástico embebido en el forjado, los modelos que usualmente se emplean dan soluciones que no son seguras porque predicen menores desplazamientos en los sistemas que los que se obtienen cuando la evaluación se realiza de forma experimental (5) (6).

El Análisis Modal Operacional (AMO) es un procedimiento de evaluación experimental no destructivo que permite obtener los modos de vibración y las frecuencias asociadas de una estructura. El empleo de esta técnica se ha extendido de manera importante en ingeniería mecánica. En la actualidad también se emplea para analizar el comportamiento dinámico de estructuras civiles y de edificación como puentes (7), chimeneas industriales (8) o patrimonio construido (9) (10) (11) (12) (13) (14). Una vez obtenidos los modos de vibración y las frecuencias asociadas de la estructura, se puede obtener la misma información mediante una evaluación analítica. La comparación de los resultados experimentales y analíticos permite calibrar el modelo analítico empleado. Si los resultados difieren, el modelo analítico debe ser modificado hasta que los resultados obtenidos por ambos procedimientos concuerden con suficiente grado de aproximación.

Una de las técnicas más empleadas para evaluar estructuras analíticamente es el empleo del Método de Elementos Finitos (MEF). El desarrollo de una evaluación analítica precisa incorporar al modelo las características elásticas de los materiales (módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson). En el caso del acero, estas características son constantes y conocidas. La madera es un material que se caracteriza por una gran variabilidad de sus constantes elásticas, incluso para piezas de la misma clase resistente y de la misma procedencia. Entre las técnicas no destructivas más

empleadas para obtener las propiedades de elementos de madera se encuentran las que se basan en el empleo de ultrasonidos, existiendo abundante información al respecto (15) (16) (17) (18).

En este trabajo se han estudiado SPPB comparando el comportamiento dinámico real, obtenido mediante AMO, con la predicción analítica resultante de la simulación a partir de un modelo matemático mediante el MEF. Para el desarrollo del MEF, las características elásticas de la madera se han obtenido mediante ultrasonidos. Con este tipo de análisis, cuando los resultados no coinciden, en términos de frecuencias propias de vibración o geometría de modos de vibración, el modelo debe ser reconsiderado y mejorado. De esta forma, el estudio realizado mediante AMO puede utilizarse como criterio para la calibración o corrección del modelo.

2. MATERIALES Y TÉCNICAS EMPLEADAS

Se han analizado tres SPPB fabricados con barandillas de tablas de madera de pino silvestre de distinta calidad y espesor y postes de sección tubular circular (40·1,5) de acero S235. En los tres casos los postes se han separado 2400 mm, la sección de las tablas tiene 150 mm de altura y espesores de 30 y 40 mm. El sistema 1 (S1) se ha montado con tablas de espesor 30 mm y clasificación visual ME 1 según la norma UNE 56544 (19), a la que le corresponde una clase resistente C27. El sistema 2 (S2) se ha montado con tablas de espesor 30 mm y clasificación visual Rechazo. Finalmente, el sistema 3 se ha construido con tablas de espesor 40 mm y clasificación visual Rechazo.

3. TRABAJO EXPERIMENTAL Y ANALÍTICO REALIZADO

3.1. Trabajo experimental realizado. AMO

El análisis experimental dinámico se ha realizado mediante el AMO. Éste consiste en reproducir todos los elementos y condiciones de contorno de una estructura, y someterla a pequeños impactos controlados con el fin de encontrar los modos propios de vibración que la caracterizan.

La propagación de las ondas mecánicas generadas mediante golpeo permite excitar modos propios de vibración de la estructura. Estos modos corresponden a la propagación predominante de una onda mecánica con una frecuencia de pulsación determinada que es posible registrar con un adecuado sistema de captación de vibraciones mecánicas (20).

Para la realización del AMO únicamente se instalan unos puntos de medida, en este caso sensores de aceleración de alimentación ICP, distribuidos en diferentes puntos de la estructura, y se realizan diferentes registros de aceleración, ante una excitación aleatoria y ambiental, como puede ser el viento, el tráfico, o en nuestro caso dos personas con sendos martillos golpeando el SPPB de modo que se produce una excitación aleatoria.

El posterior análisis mediante técnicas de identificación modal de dichas lecturas obtenidas por los acelerómetros, en particular los ICP, permite obtener los modos de vibración de la estructura y sus frecuencias asociadas.

La identificación de los modos de vibración a partir del AMO se ha realizado con 7 acelerómetros colocados en 4 *runs*, completando un total de 28 posiciones.

Se han dejado 2 acelerómetros fijos y el resto se han ido moviendo en los diferentes *runs* o sets de medida. En cada uno de los set de medida se ha procedido a registrar un tiempo de unos 60 segundos y se han realizado una serie de impactos con un martillo. En la Figura 1 se muestra un esquema que refleja la posición de los acelerómetros.

A partir de los registros obtenidos en cada canal de aceleración, se calculan las Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRF). Asimismo, se utilizan algoritmos que permiten la suma de dichas FRF y la aplicación de los mismos en bandas concretas. De esta manera, se obtiene un gráfico de respuesta

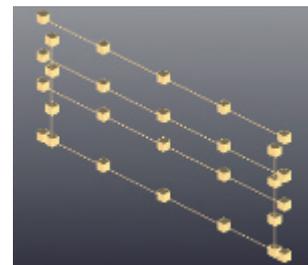
espectral donde las frecuencias de interés se muestran posicionadas en la abscisa correspondiente a algunos picos (Figura 2). No obstante, al tratarse de un diagrama espectral calculado a partir de varios sets de medida, todas las frecuencias pueden no corresponder a modos propios, para ello se aplica otra familia de algoritmos que analiza la estabilidad o valor de confianza de dichas frecuencias (Figura 3).

El algoritmo permite observar el grado de *scattering* o fluctuación del valor de cada frecuencia. De manera que los picos con mayor número de "s" y que presentan una amplitud de pico mayor, suponen la correspondencia de dicha frecuencia con un modo propio.

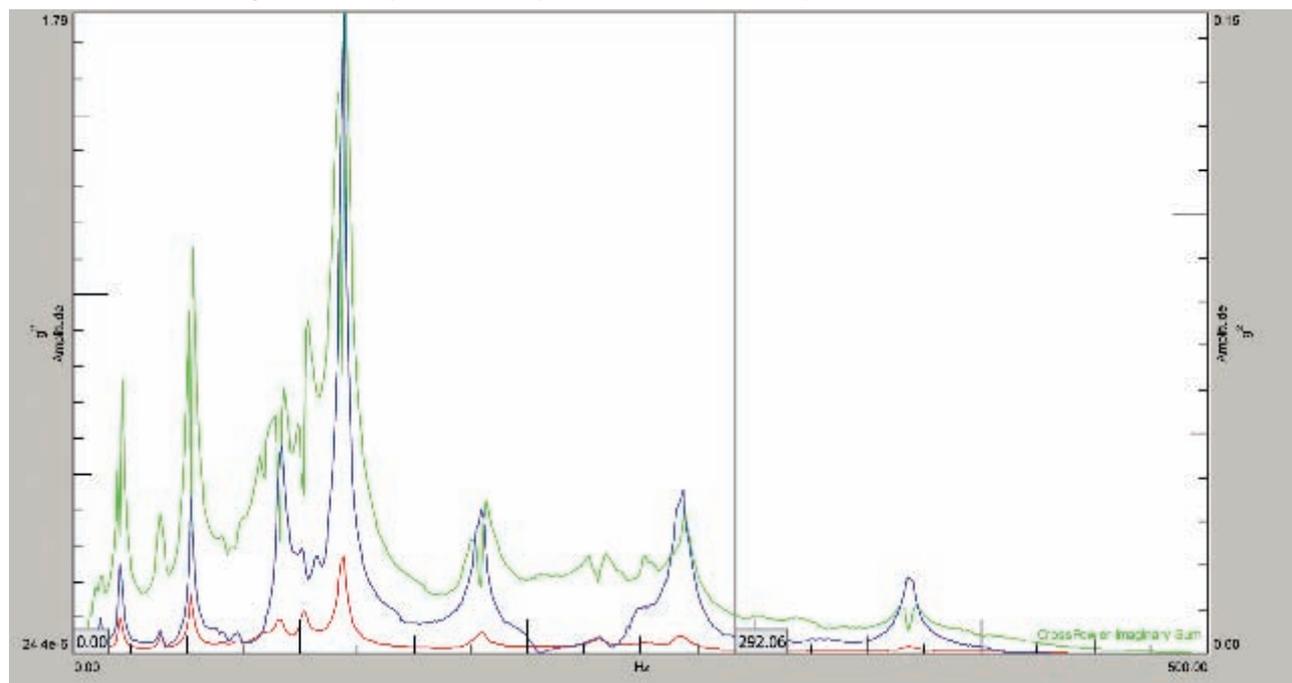
A partir de la frecuencia y de los desplazamientos calculados en cada punto para dicha frecuencia, se consigue reproducir el movimiento esquematizado del conjunto del sistema instrumentado con acelerómetros, en este caso, de los SPPB.

Los modos de vibración obtenidos deben ser nuevamente analizados para desechar posibles modos matemáticos que no se corresponden con la realidad y así poder asumir los restantes como válidos y dispuestos a ser comparados con los modos teóricos derivados de la simulación numérica. No obstante, cabe resaltar la importancia que presenta el poder obtener los modos experimentalmente y, por tanto, reales sin tener que hacer suposiciones de las propiedades mecánicas de los materiales y elementos que componen el sistema, en este caso de los postes verticales de acero y de las tablas.

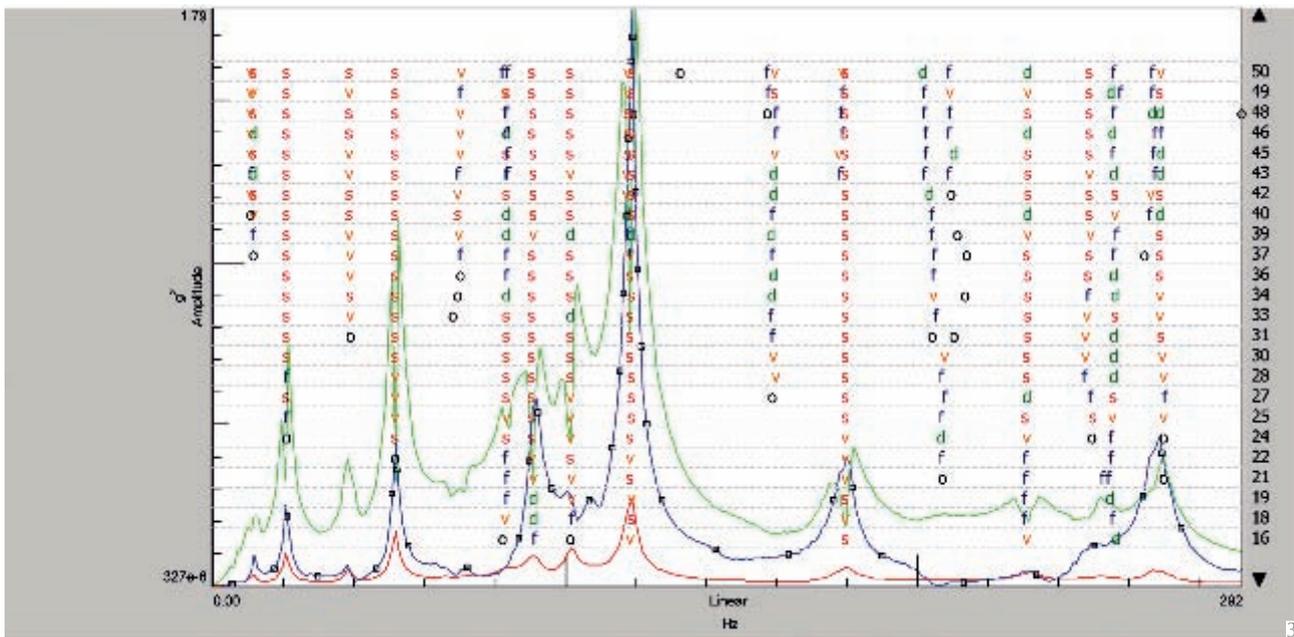
1. Esquema de colocación de los acelerómetros.
2. Diagrama de Respuesta en Frecuencia.



1



2



- 3. Análisis estadístico y estabilización.
- 4. Alzado del modelo del SPPB.
- 5. Perfil del modelo del SPPB.

3.2. Obtención de las características elásticas mediante técnicas ultrasónicas

Las inspecciones ultrasónicas se realizaron con un equipo de emisión-recepción de pulsos DPR300 y osciloscopio digital Tektronics TDS3012. Se han utilizado sendos transductores PANAMETRICS V1012 y V150 de banda ancha centrados en 250 kHz, unos no polarizados y otros polarizados para onda transversal. A partir de las señales digitalizadas con 1MHz de frecuencia de muestreo se obtuvieron los registros que permiten calcular el tiempo de propagación.

A partir del tiempo de propagación para cada onda de propagación longitudinal (t_p), transversal (t_s), y de la densidad aparente ρ , se pueden determinar los módulos de elasticidad longitudinal y transversal y el coeficiente de Poisson que, junto con la densidad, permiten modelizar los elementos integrantes del SPPB de manera que reproduzcan de la manera más exacta el comportamiento del sistema real.

A partir de los datos de los tiempos obtenidos se aplican las ecuaciones que relacionan las velocidades de propagación longitudinal (V_p) y transversal (V_s) y la densidad (ρ) con las constantes elásticas [1] [2] y [3].

$$[1] \quad \nu = \frac{1 - 2 \cdot \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2\right]}$$

$$[2] \quad G = \rho \cdot V_s^2$$

$$[3] \quad E = V_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

Con la determinación de los módulos de elasticidad (longitudinal E y transversal G) y el coeficiente de Poisson ν se puede realizar una modelización de los elementos asumiendo que son isótropos.

3.3. Evaluación analítica. MEF

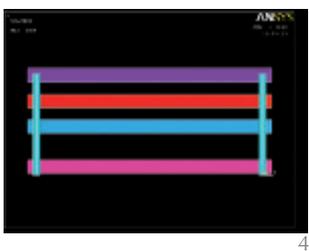
La simulación numérica de los SPPB se ha realizado a partir de la definición de un modelo de cada uno de los elementos: postes y tablas.

Los postes se encuentran insertados en un elemento con una masa muy superior, que permite suponer que no se mueven en el eje Z (eje vertical) y que su desplazamiento en los ejes X (perpendicular al SPPB) e Y (contenido en el SPPB) es prácticamente despreciable en la altura donde arranca el poste.

En las Figuras 4 y 5 se muestra un esquema de SPPB que se ha reproducido para cada una de las tres configuraciones ensayadas, donde para cada una de ellas, se ha cambiado el espesor de las tablas y/o su clasificación resistente.

En el modelo realizado para analizar mediante elementos finitos, se ha supuesto que los postes están empotrados en la viga de hormigón y que la unión entre las barandillas y los postes es rígida.

Una vez realizado el modelo, se han añadido las características o propiedades mecánicas. Dichas características se han tomado de medidas realizadas sobre las tablas empleadas en los ensayos experimentales mediante inspección ultrasónica.



4



5

Una vez determinados los parámetros de caracterización mecánica de los elementos que conforman el SPPB se realiza el mallado conjunto del mismo, para poder realizar el análisis mediante elementos finitos. El tipo de mallado ha consistido en discretización mediante tetraedros sólidos tanto en las tablas de madera como en los postes de acero. El motor de mallado ha sido el estándar. El análisis realizado ha sido lineal.

Una vez resuelto el proceso de mallado, y dimensionándolo para que concilie buena resolución espacial con capacidad de computación, se realiza el análisis de los modos propios del SPPB, donde se lista el conjunto de modos y consecuentemente se obtienen sus frecuencias propias y los desplazamientos unitarios, es decir, los desplazamientos que presenta el sistema a partir de una excitación unitaria y plana en toda la banda de análisis. Estos modos (en frecuencia y formas de deflexión) son comparados con los valores y modos obtenidos experimentalmente.

4. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Obtención experimental de los modos de vibración

El análisis dinámico efectuado mediante AMO ha permitido encontrar los modos propios experimentales. En los tres sistemas se ha trabajado de la misma manera. A continuación se presenta el trabajo realizado en el sistema S1. En la Figura 6 se muestra el proceso de captación de vibraciones sobre el sistema S1, golpeándolo de forma aleatoria con sendos martillos.



6

La banda de análisis se ha seleccionado en los tres SPPB analizados hasta 250 Hz, pues se entiende que por encima de esas frecuencias los modos resultantes no son los más simples y que, en todo caso, suponen modos de elementos por separado o armónicos superiores de movimientos más sencillos.

La frecuencia fundamental o Modo 1 corresponde a un movimiento de flexión don-

de los postes verticales están en fase, en su movimiento respectivo uno de otro y las tablas también se mueven en fase unas respecto de otras (Figura 7).

El modo 2 corresponde a un movimiento de torsión donde los postes verticales están en contrafase, en su movimiento respectivo uno de otro mientras que las tablas presentan un nodo central a mitad de su longitud de 2400 mm (Figura 8).

El Modo 3 corresponde a un movimiento de torsión doble para postes verticales y las tablas.

Los Modos 4 y 5 corresponden a un movimiento de flexión donde los postes verticales están en fase pero las tablas presentan un único nodo aunque una de las tablas puede vibrar en contrafase respecto de las demás.

La evaluación experimental efectuada mediante AMO en los sistemas S2 y S3 ofrece la misma forma de los modos de vibración pero con frecuencias asociadas que difieren de los valores obtenidos sobre el sistema S1. En el apartado 5 de este trabajo se ofrecen los correspondientes valores numéricos.

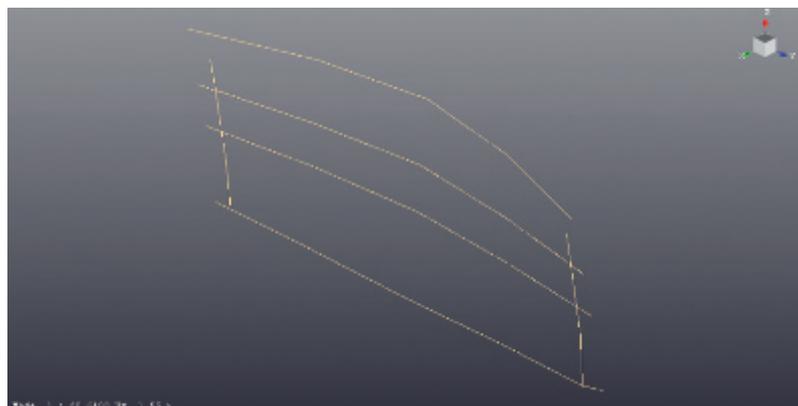
4.2. Propiedades elásticas de la madera

A partir de las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas y de las densidades aparentes se calculan las constantes

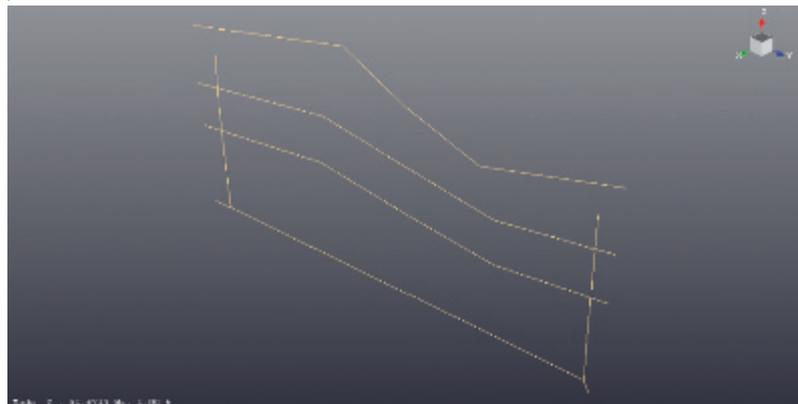
6. Imagen del proceso de captación de vibraciones.

7. Frecuencia fundamental o Modo 1. Frecuencia 20.619 Hz.

8. Modo 2. Frecuencia 51.62 Hz.



7



8

9. Sistema S1. Obtención del Modo 1 de vibración mediante MEF.

10. Sistema S1. Obtención del Modo 2 de vibración mediante MEF.

Tabla 1. Datos de caracterización ultrasónica y determinación de constantes elásticas

Tabla	Tipo de medida	Longitud de propagación (m)	t_p (s)	t_s (s)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	ρ (kg/m ³)	ν
S1	Longitud	2,591	495	884	4905	2930	9660	3950	470	0,223
S2	Longitud	2,600	492	948	5266	2733	9240	3510	460	0,316
S3	Longitud	2,580	568	956	4577	2720	8350	3400	460	0,227

elásticas de cada tabla. En la Tabla 1 se muestran, a modo de ejemplo, los valores obtenidos para las barandillas principales de los tres sistemas estudiados. Cada medida supone el promedio de tres medidas de inspección ultrasónica en la tabla.

4.3. Obtención analítica de los modos propios de vibración

Se han realizado simulaciones numéricas mediante análisis por elementos finitos sobre los tres SPPB estudiados mediante AMO.

Para cada uno de los SPPB se ha realizado el análisis considerando las características mecánicas obtenidas por ultrasonidos.

Análisis del sistema S1.

Modo 1. Frecuencia 26,87 Hz (Figura 9). Este modo resultado del análisis MEF del modelo numérico desarrollado, se corresponde con el primer modo experimental, atendiendo a las deflexiones en la dirección Y que se observan.

Los postes verticales se mueven poco, presentando una elongación máxima en el punto central de la tabla superior. No se observan nodos de desplazamiento en la dirección Y en las tablas.

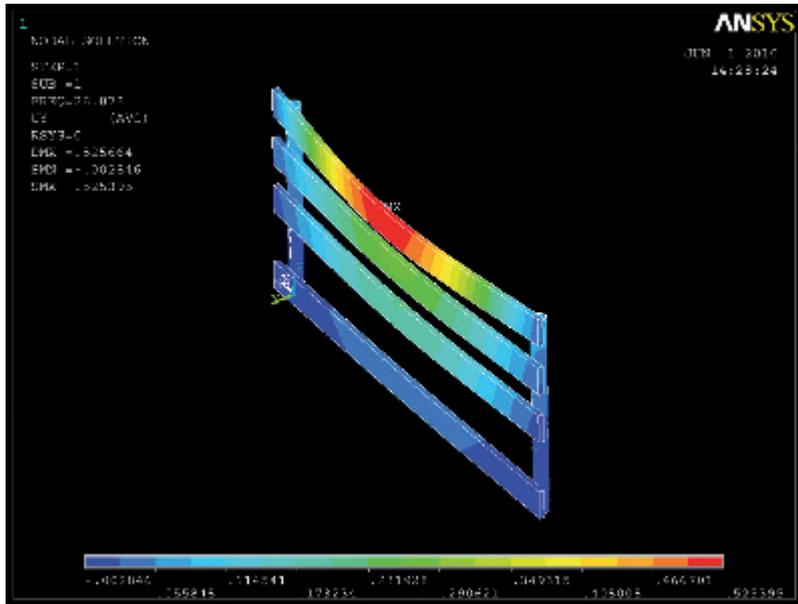
Modo 2. Frecuencia 65,49 Hz (Figura 10). Este modo corresponde con el segundo modo experimental, atendiendo a las deflexiones en la dirección Y que se observan.

Los postes verticales se mueven en contrafase alcanzándose un desplazamiento notable. Se observa máximo desplazamiento en la tabla superior. Se observa un nodo de desplazamiento en la dirección Y en la zona central de las tablas.

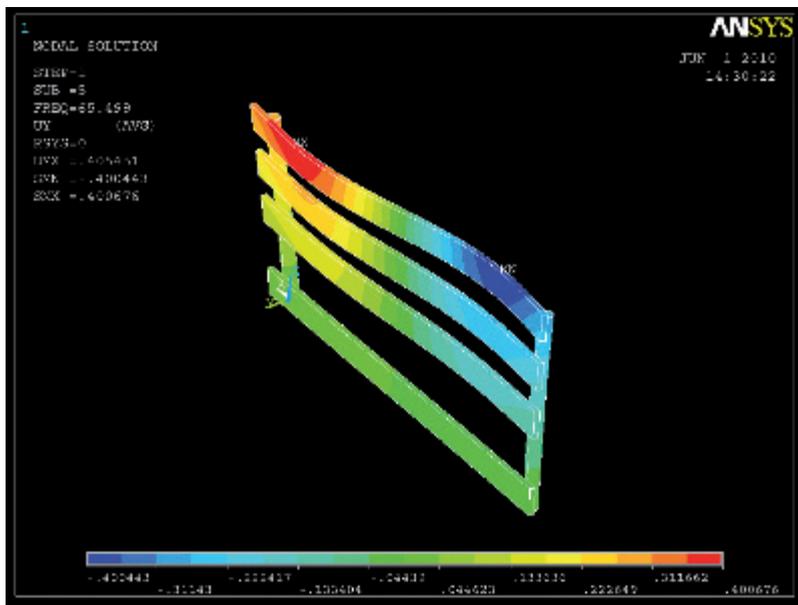
Modo 3. Frecuencia 100,84 Hz. Este modo corresponde con el tercer modo experimental, atendiendo a las deflexiones en la dirección Y que se observan. Los postes verticales se mueven en contrafase, pero no se observa ningún nodo en su movimiento. Las tablas se mueven en contrafase. Se observa un nodo de desplazamiento en la dirección Y en la zona central de las tablas.

Modo 4. Frecuencia 130,25 Hz. Este modo corresponde con el segundo modo experimental, atendiendo a las deflexiones en la dirección Y que se observan. Los postes verticales se mueven en contrafase alcanzándose un desplazamiento notable. Se observa máximo desplazamiento en la tabla superior. Se observa un nodo de desplazamiento en la dirección Y en la zona central de las tablas.

Modo 5. Frecuencia 205,93 Hz. Este modo corresponde con el quinto modo experimental, atendiendo a las deflexiones en la dirección Y que se observan. Los postes verticales experimentan desplazamientos pequeños. Se observa máximo despla-



9



10

miento en la tabla superior, cuyo desplazamiento Y se produce en contrafase con respecto a las dos tablas intermedias. Se observan dos nodos de desplazamiento en la dirección Y en las tablas.

El resumen de los resultados alcanzados con la técnica experimental AMO para la identificación de modos propios que caracterizan el comportamiento dinámico de los SPPB y su comparativa con los resultados de simulación numérica mediante el Método de Elementos Finitos para los tres sistemas estudiados se recogen en la Tabla 2.

Existen otros modos derivados de la simulación numérica que corresponden a vibraciones de elementos aislados o tablas, pero no se consideran puesto que no suponen un modo del SPPB como conjunto o elemento único.

Se observa que los primeros modos 1 y 2 se obtienen claramente en todas las simulaciones. Estos modos son los flexurales simples fundamentales. Los modos 3, 4 y 5, suponen una combinación de movimientos entre los postes de acero verticales y las tablas de madera, pudiendo vibrar en fase o en contrafase, postes respecto a madera y unas tablas respecto a otras. Estos modos superiores, no siempre quedan identificados.

En los resultados se observa que se encuentra una buena similitud aplicando el modelo isótropo para todas y cada una de las tablas. Los resultados que se obtienen muestran una clara similitud para los dos primeros modos aunque no coincidan exactamente sus valores de frecuencia.

Los valores no coinciden y esto puede deberse a varias razones. Una, y posiblemente

la más importante, es debida a que no se han podido reproducir todas las condiciones de contorno del SPPB, en el momento de las medidas experimentales, para la determinación de modos propios con AMO a partir de impacto. Las mayores fuentes de indeterminación son el apoyo y fijación de los postes al suelo y la unión y solidarización de las tablas en los postes verticales.

5. CONCLUSIONES

Se han podido determinar experimentalmente los modos fundamentales de vibración, o modos propios de un SPPB, integrado por elementos discretos y muy diferentes con uniones débiles, mediante el método de AMO.

Se han identificado hasta 5 modos que no suponen una combinación de desplazamientos compleja.

Se ha realizado una caracterización ultrasónica de las tablas obteniendo sus constantes elásticas.

Se ha realizado una modelización mediante MEF de los SPPB utilizando valores precedentes de la caracterización ultrasónica.

La similitud de resultados para los primeros modos propios de vibración (1 y 2), y que se corresponden con el comportamiento a flexión de los elementos de madera integrados en un SPPB, obtenidos tanto por vía experimental (caracterización dinámica mediante AMO), como mediante simulación numérica (modelización y análisis por elementos finitos), evidencia la eficacia del método, para predecir el comportamiento estructural real de un SPPB.

Tabla 2. Resumen de valores de frecuencia (Hz) obtenidos en SPPB

		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
S1	OMA	20,619	51,67	90,25	101,25	118,31
	FEM	26,87	65,49	100,84	130,25	205,93
S2	OMA	19,272	47,53	66,68	67,90	96,65
	FEM	26,65	64,60			
S3	OMA	20,15	53,53	58,47	79,83	103,87
	FEM	27,63	66,61	89,98		150,50

REFERENCIAS

- (1) Beguería, P.A., Cobo, A., González, M.N. (1999). *Manual de cálculo y utilización de protecciones colectivas en la construcción*. Edita: Col·legi d'Àparelladors i Arquitectes Tècnics de Girona.
- (2) Irlés, R., González, A., Segovia, E., Maciá, A. (2002). Las redes verticales de seguridad en la construcción de edificios I. *Informes de la Construcción*, 53(477): 21-29. doi: 10.3989/ic.2002.v53.i477.

- (3) Segovia, E., Irlles, R., González, A., Maciá, A., Pomares, J. (2007). Las redes verticales de seguridad en la construcción de edificios II. *Informes de la Construcción*, 59(505): 37-51. doi: 10.3989/ic.2007.v59.i505.
- (4) Lozano, C., González, M.N., Fuente, J.V., Bresó, S., Cobo, A. (2009, 24-26 de junio). Analytical and experimental evaluation of temporary edge protection systems (TEPS) built with wooden planks. 1st International Conference on Construction & Building Research. Madrid.
- (5) González, M.N., Cobo, A., Fuente, J.V., Bresó, S., Lozano, C. (2011). Comportamiento bajo cargas estáticas de sistemas provisionales de protección de borde realizados con elementos de acero. *Informes de la Construcción*, 63(521): 57-67. doi: 10.3989/ic.09.070.
- (6) González, M.N. (2010). Consideraciones respecto a los sistemas provisionales de protección de borde (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
- (7) Liu, K., Reynders, E., de Roeck, G. (2008). Experimental and numerical analysis of a composite bridge for high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 320(1-2): 201-220. doi: 10.1016/j.jsv.2008.07.010.
- (8) Brownjohn, J. (2009). Real-time performance tracking on a 183m concrete chimney and tuned mass damper system. *IOMAC*, Vol. I, XIX-XIX. Ancona-Italy.
- (9) Ivorra, S., Pallarés, F.J., Adam, J.M., Calderón, P.A. (2008). Aplicación del Análisis Modal Operacional para la identificación dinámica de campanarios de mampostería. *Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido (REHABEND 2008)*, pp. 53-62. Valencia, España.
- (10) Roca, P. (2006). Aplicación de técnicas experimentales y numéricas al estudio del patrimonio arquitectónico. 1ª Jornada Nacional sobre metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido (REHABEND 2006), pp. 53-70. Santander, España.
- (11) Albert, V., Martínez, R., Fuente, J.V., Fernández, R., González, N., Yuste, J. (2008). Remote monitoring and dynamic analysis of the built heritage. Cases of study. *Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio construido (REHABEND 2008)*, pp. 63-81. Valencia, España.
- (12) Albert, V., Fernández, R., Fuente, J.V., Martínez, R., Yuste, J. (2009). Control estructural mediante monitorización remota: Casos de aplicación. *Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio construido (REHABEND 2009)*, III Jornadas Técnicas Internacionales, pp. 63-83. Bilbao, España.
- (13) Gosalbez, J., Fuente, J.V., Safont, G., Fernández, R., Salazar, A., Albert, V. (2009). Experimentación en laboratorio de reproducciones a escala de muros históricos mediante Monitorización END y QEND. *Tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio construido (REHABEND 2009)*, III Jornadas Técnicas Internacionales, pp. 341-367. Bilbao, España.
- (14) Albert, V., Fuente, J.V.; Fernández, R., Martínez, R., González Roura, N., Yuste, J. (2009). Structural Health Monitoring with Ambient Vibration and Photonic Sensors. The Twelfth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Paper 156. Madeira, Portugal.
- (15) Acuña, L., Díez, R., Martín, L., Casado, M., Bastera, A., Ramón, G., Relea, E. (2007, 4-7 de julio). La técnica de transmisión ultrasónica aplicada a la madera estructural. 11.º Congreso Español de END. Gijón, España.
- (16) Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I., Díez, M.R., Mier, R. (2007). Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro. *Informes de la Construcción*, 59(506): 87-95. doi:10.3989/ic.2007.v59.i506.
- (17) Conde, M., Fernández-Golfín, J.I., Hermoso, E. (2007). Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. *Materiales de Construcción*, 57(288): 49-59. doi:10.3989/mc.2007.v57.i288.
- (18) Bastera, L.A., Acuña, L., Casado, M., Ramón-Cueto, G., López, G. (2007). Técnicas no destructivas y pseudo-no destructivas aplicadas a la madera estructural. *Tecnología de la rehabilitación y la gestión del patrimonio construido (REHABEND 2007)*, pp. 107-125. Santander, España.
- (19) UNE 56544. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. (2007). Asociación Española de Normalización (AENOR). Madrid.
- (20) Yuste, J., Fuente, J.V., Sabate, J.V., Albert, V., Calzado, G. (2006). Técnicas avanzadas de auscultación y diagnóstico de construcciones históricas. El proceso de diagnóstico estructural. 1ª Jornada Nacional sobre Metodologías no destructivas aplicadas a la rehabilitación del patrimonio construido (REHABEND 2006), pp. 153-176. Santander, España.

* * *