

MODEL UPDATING DEL MODELO DINÁMICO DEL VIADUCTO DE VILLANUEVA DEL JALÓN

Javier OLIVA QUECEDO¹, Teresa ANCOCHEA NODAL², José M. GOICOLEA RUIGÓMEZ³, Miguel Á. ASTIZ SUÁREZ⁴

Resumen

El aumento en las velocidades y cargas del tráfico ferroviario, así como la construcción de nuevas redes y la modernización de líneas existentes, han dado un nuevo impulso a la importancia del cálculo dinámico en puentes de ferrocarril. De forma paralela es cada vez más habitual la monitorización del comportamiento en servicio de esas estructuras y el empleo de mecanismos para la detección de posibles daños a través de su respuesta dinámica. La actualización de modelos numéricos mediante el empleo de resultados experimentales ayuda a eliminar deficiencias en la simulación y a obtener resultados más realistas que serán de utilidad tanto para predecir el comportamiento dinámico como para ayudar en la identificación de degradaciones estructurales. En este trabajo se presenta la actualización del modelo de un puente continuo de hormigón que da soporte a la línea Madrid-Barcelona, el viaducto de Villanueva del Jalón. El trabajo experimental consistió en un análisis modal operacional en el que se identifican 20 modos del tablero. El modelo numérico empleado es un modelo de elementos finitos que está formado por elementos tipo viga para las pilas y tipo lámina para el tablero. La optimización se lleva a cabo mediante un algoritmo genético. Como resultado se consigue un modelo con frecuencias propias próximas a las experimentales de forma que el error de las frecuencias optimizadas no supera en ningún caso el 2,5 %.

Palabras clave: actualización modal, algoritmo genético, modelos de elementos finitos, dinámica de puentes.

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha habido un incremento importante en el transporte ferroviario en gran número de países debido a la modernización de líneas existentes y a la construcción de otras nuevas, especialmente de alta velocidad. Este aumento del tráfico ferroviario está ligado a un incremento de las cargas y de las velocidades de circulación y, por ese motivo, los efectos dinámicos en los puentes y viaductos han adquirido una mayor importancia.

En el caso de líneas de alta velocidad, la excitación dinámica puede alcanzar valores muy importantes debido a la aparición de fenómenos resonantes; pero estos efectos también pueden aparecer en líneas convencionales con velocidades de circulación más reducidas. Debido a esto, la preocupación por los fenómenos dinámicos producidos por el tráfico va creciendo y cada vez

¹ Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid joliva@mecanica.upm.es

² Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid ancochea@mecanica.upm.es

³ Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid goicolea@mecanica.upm.es

⁴ Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid miguel.a.astiz@upm.es

se encuentran modelos numéricos más complejos para reproducirlos tanto en el diseño de nuevas estructuras como en el análisis de puentes existentes.

Por otro lado, la monitorización de la salud estructural (SHM por sus siglas en inglés) de puentes y viaductos es objeto cada día de más proyectos de investigación en todo el mundo [5]. Este interés no sólo reside en el envejecimiento de un gran número de estructuras que están en servicio sino también en la mayor complejidad de los nuevos puentes. En este tipo de proyectos es un paso fundamental la creación de modelos numéricos muy detallados que se emplean para predecir el comportamiento estructural y el efecto de posibles degradaciones de la estructura.

En la red ferroviaria española la orografía obliga a la existencia de un gran número de puentes, mucho de ellos muy altos. Lo cual introduce particularidades estructurales que es conveniente controlar con la mayor efectividad posible. Por ese motivo, el control del comportamiento en servicio de puentes de ferrocarril debería ser objeto de una atención especial en nuestro país.

La actualización de modelos o *model updating* es la modificación de los modelos numéricos a partir de ciertos parámetros obtenidos de forma experimental, generalmente parámetros modales; este proceso permite la corrección de deficiencias en la modelización. La utilidad de la actualización de modelos es doble; por un lado ayuda en la determinación precisa del comportamiento dinámico estructural bajo diferentes acciones y, por otro, nos dota de una herramienta muy útil para poder establecer de forma correcta el efecto de posibles degradaciones del puente en su comportamiento estructural.

Este trabajo se enmarca en el proyecto *Integración de la monitorización de viaductos ferroviarios en el sistema de gestión y mantenimiento de infraestructuras "VIADINTEGRA"* cuyo objetivo final es dotar a una serie de viaductos de líneas ferroviarias convencionales y de alta velocidad de un sistema de control basado en la monitorización de su comportamiento estructural en servicio.

En este artículo se describe la actualización de un modelo numérico de un viaducto de ferrocarril continuo de hormigón que da servicio a la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona. Después de describir la estructura en el apartado 2, se presenta un trabajo de modelización preliminar que ayuda a determinar el tipo de modelo más adecuado para las siguientes fases. Como resultado se escoge un modelo formado por elementos lámina para el tablero y elementos viga para las pilas. En el apartado 5 se presenta la actualización del modelo que se realiza mediante el empleo de un algoritmo genético. Esta fase viene precedida de un análisis de sensibilidad que identifica los parámetros numéricos que tienen más influencia en los parámetros modales, estas serán las variables que se considerarán en la optimización del modelo. Finalmente, en la sección 6 se presentan algunas conclusiones y se proponen algunas líneas de investigación a corto y medio plazo.

2 EL VIADUCTO DE VILLANUEVA DEL JALÓN

La estructura objeto de este trabajo es un viaducto de hormigón continuo de 6 vanos que da servicio a la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa y le sirve para cruzar el río Jalón (figura 1). Concretamente, el puente está situado en la provincia de Zaragoza, en el subtramo II del tramo Calatayud-Ricla y fue construido en el año 2001. En la figura 2 se muestra un alzado del puente y un esquema de la sección tipo. El tablero es un cajón empujado de hormigón pretensado HP-40 con vanos de $35 + 4 \times 45 + 35$ metros. El canto es constante de 3.35 m y la anchura máxima del tablero (entre extremos de las alas) es de 12.94 m. En el estribo E2 (lado Zaragoza) se localiza el único punto fijo longitudinal. La vía es doble sobre balasto. Las cinco pilas son de hormigón armado HA-35, estando dos de ellas cimentadas sobre pilotes (P2 y P3) y las demás sobre cimentación directa. La altura máxima de pilas es de 37 m. El apoyo del tablero en pilas y en el estribo E1 (lado Madrid) se realiza a través de

aparatos se apoyo tipo POT, uno unidireccional y otro multidireccional; en el estribo E2 los dos apoyos son de neopreno zunchado.

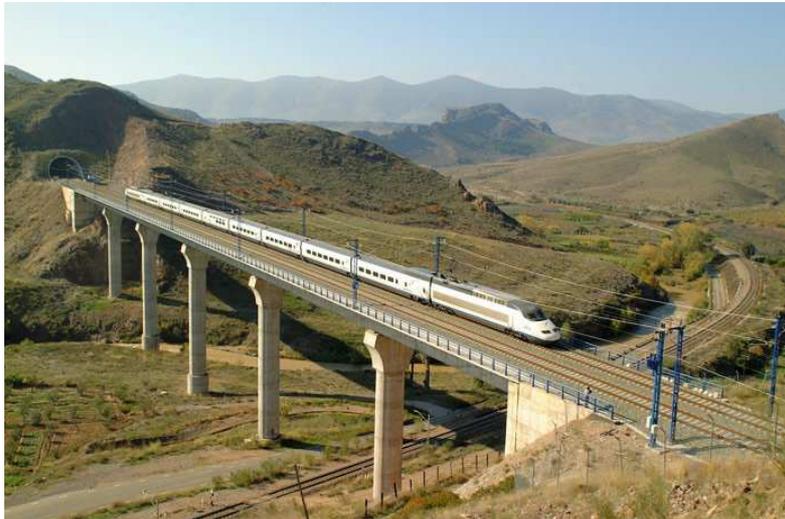


Figura 1: Vista general del viaducto de Villanueva del Jalón.

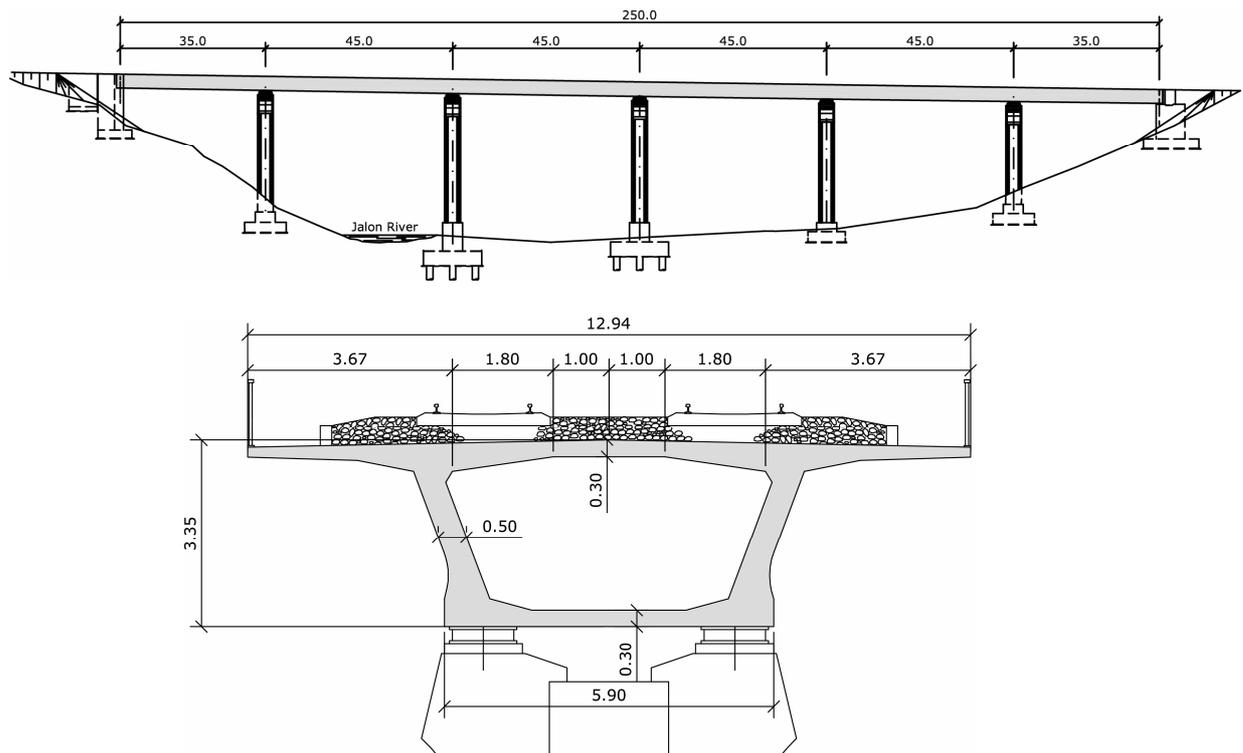


Figura 2: Alzado y sección tipo del viaducto de Villanueva del Jalón.

3 TRABAJO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental para la identificación modal se llevó a cabo en Septiembre de 2011 y fue realizado por la *Structural Mechanics Division* de la *Katholieke Universiteit Leuven (KUL)* de Lovaina (Bélgica) bajo la dirección del profesor Guido de Roeck. Se midieron las aceleraciones en la losa inferior del cajón bajo excitación ambiental y las producidas por el paso de los trenes. A partir de esas medidas se obtienen las frecuencias naturales, los amortiguamientos y las formas modales.

En la campaña experimental se emplearon 4 sensores fijos y 8 móviles de forma que en cada configuración los 4 fijos se encuentran siempre en la misma posición y los 8 restantes van ocupando diferentes posiciones en las distintas configuraciones. Se hicieron 38 configuraciones de forma que se midieron un total de 303 puntos en la losa inferior del tablero situados a lo largo de tres líneas longitudinales con lo cual se capturan de forma precisa tanto los desplazamientos como los giros del tablero. Los sensores son acelerómetros triaxiales. Debido a la gran densidad de puntos de medida la identificación y definición de las formas modales es muy precisa y se pudieron identificar 20 modos de vibración, lo cual es un número muy elevado si comparamos con otros trabajos similares. Los 20 modos identificados aparecen en las vibraciones libres tras el paso de los trenes, sin embargo sólo 11 de ellos se obtienen como resultado de las vibraciones ambientales. Es importante señalar que los tres modos de torsión identificados sólo aparecen en vibraciones libres ya que la posición excéntrica del tren los excita de forma adecuada. En la figura 3 se muestran el primer modo lateral (modo 1) y el primer modo vertical (modo 4) identificados. En la tabla 1 se recogen todos los modos, frecuencias y amortiguamientos identificados; se presentan los valores medios y las desviaciones típicas del conjunto de configuraciones empleadas. Para este trabajo se ha utilizado el programa MACEC que emplea el algoritmo SSI-cov [9].

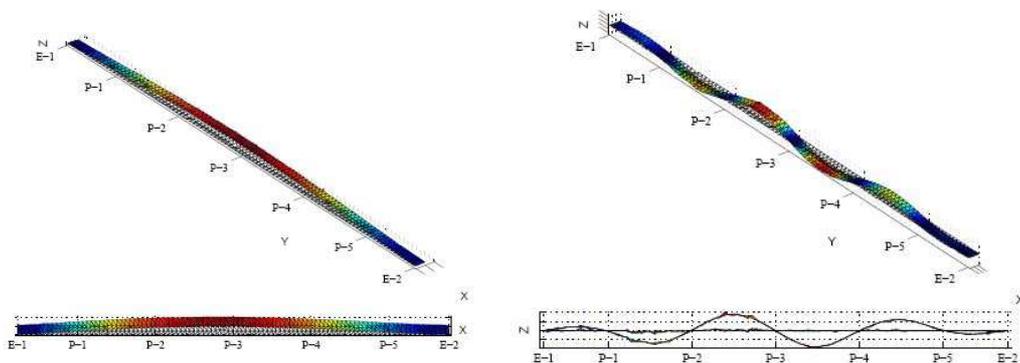


Figura 3: Primer modo lateral (modo global 1) y primer modo vertical (modo global 4) del tablero del puente del Jalón identificados en el trabajo experimental.

Modo	Vibración ambiente		Vibraciones libres		Tipo
	Frecuencia	Amort.	Frecuencia	Amort.	
	[Hz]	[%]	[Hz]	[%]	
1	0,648 ± 0.003	0.75 ± 0.037	0,648 ± 0.029	0.69 ± 0.67	Primer modo de flexión lateral
2	1,238 ± 0.006	0.81 ± 0.22	1,219 ± 0.008	1.34 ± 1.51	Segundo modo de flexión lateral
3	2,230 ± 0.006	1.00 ± 0.43	2,186 ± 0.035	1.53 ± 1.87	Tercer modo de flexión lateral
4	3,279 ± 0.007	0.42 ± 0.17	3,267 ± 0.003	0.40 ± 0.11	Flexión vertical (antisimétrica)
5	3,536 ± 0.011	1.37 ± 0.65	3,493 ± 0.009	0.70 ± 0.14	Cuarto modo de flexión lateral
6	3,758 ± 0.012	0.54 ± 0.35	3,738 ± 0.027	0.61 ± 0.55	Flexión vertical (simétrica)
7	-	-	4,094 ± 0.025	1.74 ± 0.83	Flexión vertical
8	4,471 ± 0.010	0.66 ± 0.36	4,452 ± 0.004	0.48 ± 0.07	Flexión vertical (antisimétrica)
9	-	-	4,917 ± 0.011	0.74 ± 0.09	Quinto modo de flexión lateral
10	5,056 ± 0.019	0.57 ± 0.24	5,045 ± 0.013	0.62 ± 0.47	Flexión vertical (simétrica)
11	-	-	5,309 ± 0.028	0.73 ± 0.47	Torsión
12	6,036 ± 0.020	0.69 ± 0.28	6,027 ± 0.034	0.70 ± 0.15	Flexión vertical (máximo en el 1er vano)
13	-	-	6,915 ± 0.035	0.94 ± 0.24	Torsión
14	-	-	7,455 ± 0.061	0.70 ± 0.20	Sexto modo de flexión lateral
15	-	-	8,420 ± 0.036	0.96 ± 0.62	Torsión (máximo en el 1er vano)
16	-	-	9,329 ± 0.138	0.96 ± 0.29	Séptimo modo de flexión lateral
17	-	-	9,667 ± 0.045	0.99 ± 0.74	Flexión vertical
18	10,011 ± 0.099	0.82 ± 0.29	10,435 ± 0.114	0.95 ± 0.43	Flexión vertical
19	10,743 ± 0.037	0.69 ± 0.23	10,746 ± 0.071	1.39 ± 2.28	Flexión vertical
20	-	-	14,694 ± 0.066	0.95 ± 0.25	Flexión vertical

Tabla 1: Valores medios y desviaciones típicas de las frecuencias y amortiguamientos obtenidos del trabajo experimental realizado en el tablero del puente del Jalón.

4 MODELOS PRELIMINARES

Con objeto de decidir el tipo de modelo más adecuado para emplear en el proyecto se han realizado, en una primera etapa del trabajo de simulación de la estructura, modelos numéricos con diferente grado de complejidad. El modelo elegido ha de ser una solución de compromiso entre dos aspectos: (1) la mayor precisión en la representación del comportamiento estructural del viaducto y (2) un coste computacional asumible. La exigencia de precisión en el modelo tiene una doble vertiente, por un lado ha de representar bien el comportamiento resistente del puente y por otro lado debe permitir la simulación numérica de diferentes daños: zonas localizadas, reducción de rigidez en diferentes direcciones motivada por ejemplo por la aparición de fisuras... La importancia del coste computacional es grande porque en las etapas de análisis de la sensibilidad y de optimización, que se explicarán a continuación, se va a tener que calcular el modelo elegido un elevado número de ocasiones; además, una vez actualizado, se va a usar en cálculos dinámicos de diferente complejidad, esos cálculos son costosos desde el punto de vista computacional sobre todo si se emplean modelos de interacción dinámica vehículo-estructura.

Con este objetivo se han creado tres modelos de elementos finitos diferentes del viaducto. La diferencia básica entre los tres modelos radica en el tipo de elemento empleado para modelizar el tablero ya que las pilas se han representado siempre con elementos tipo viga. La modelización del tablero en los tres modelos se ha hecho con (1) vigas, (2) láminas (3) sólidos de continuo (ver figura 4).

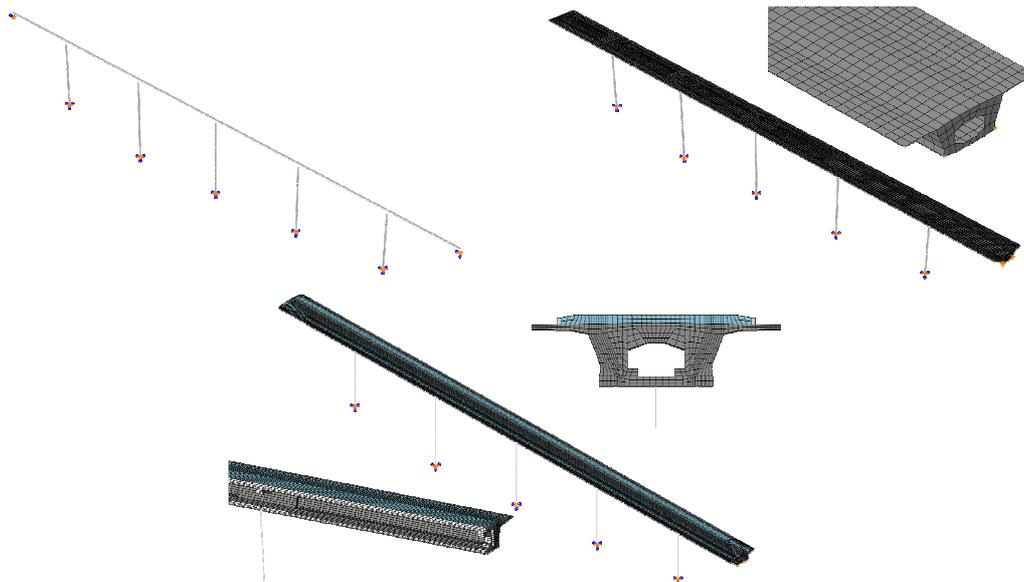


Figura 4: Modelos preliminares con diferente tipo de elementos para la modelización del tablero: (a) Vigas; (b) Láminas; (c) Hexaedros de continuo. El objeto de estos modelos preliminares es evaluar las capacidades y limitaciones de cada uno para proseguir la actualización del modelo con el más adecuado ya que se requiere una solución de compromiso entre precisión y rapidez.

Para analizar los resultados de cada modelización se han empleado los parámetros de material (módulos elásticos, densidades...) determinados a partir de de la normativa vigente (EHE-08, IAPF...). La flexibilidad vertical de los apoyos tipo POT o tipo neopreno zunchado no ha sido considerada; es decir, se suponen infinitamente rígidos en dirección vertical. Los apoyos tipo POT deslizantes se han modelizado suponiendo que no coartan el deslizamiento relativo entre pila y tablero. Esta hipótesis de deslizamiento perfecto tiene influencia en los resultados y está sujeta a discusión, sin embargo esa discusión queda fuera del objeto de este artículo. En la figura 4 se muestran los tres modelos empleados.

Los parámetros modales (formas modales y frecuencias) obtenidos en cada uno de estos tres modelos se comparan con los obtenidos del trabajo experimental presentado anteriormente. Para los 11 modos que se obtuvieron bajo vibraciones ambientales y bajo vibraciones libres se han escogido los resultados de la primera opción ya que son unos resultados más uniformes, los 9 modos restantes han de ser los resultantes de las vibraciones libres. Este mismo criterio se ha usado en el resto del trabajo. Una vez calculados los modos de cada modelo numérico hay que identificar entre ellos a cada uno de los modos experimentales con objeto de poder comparar sus frecuencias, ese trabajo se conoce como emparejamiento de modos (o *mode pairing*) y se describe con más detalle en la sección 5.

En el cuadro 2 se recogen las frecuencias experimentales y las obtenidas con cada uno de los modelos descritos anteriormente, así como el error de cada frecuencia numérica con respecto al valor experimental. Los modos 7 y 15 del trabajo experimental no se localizan con suficiente precisión en ninguno de los tres modelos numéricos, por eso no se presentan los resultados correspondientes. En la figura 5 se recoge el valor absoluto de ese error de forma gráfica. Como puede observarse el modelo de vigas tiene unos errores claramente mayores que los otros dos. Esto es debido principalmente a la hipótesis de indeformabilidad de la sección asumida por los modelos de viga clásicos, por ello estos modelos no son capaces de recoger la flexibilidad adicional que deriva de las flexiones transversales o la distorsión de la sección, ya que estos dos fenómenos son despreciados. Además, en el caso de querer representar daños localizados estos modelos son limitados ya que no permiten discriminar zonas particulares con suficiente

precisión como podrían ser por ejemplo un ala o la losa inferior. Por estos motivos los modelos de viga son ya raramente empleados en los trabajos que se realizan actualmente en este campo. Los modelos de láminas y sólidos producen errores significativamente menores. Sin embargo, el uso del modelo de sólidos viene limitado por el elevado coste computacional al tratarse de un modelo con un elevado número de grados de libertad; la extracción de modos propios es ya un cálculo demasiado pesado como para ser empleado en los siguientes pasos de la actualización. A la vista de estos resultados el modelo elegido para representar el viaducto de Villanueva del Jalón en las siguientes fases es un modelo cuyo tablero está formado por elementos tipo lámina de 4 nodos con 6 grados de libertad por nodo. Sin embargo, los otros modelos pueden ser de ayuda en determinadas circunstancias. El modelo de vigas ofrece una aproximación al comportamiento global del puente muy rápida y sencilla y el modelo de sólidos puede ser útil para cálculos puntuales muy detallados en los que el tiempo requerido no sea un condicionante. Por lo cual, no es conveniente desechar esos modelos de forma absoluta.

Modo	Tipo	Experimental	Modelo vigas		Modelo láminas		Modelo sólidos	
		[Hz]	[Hz]	Error [%]	[Hz]	Error [%]	[Hz]	Error [%]
1	Lateral	0.648	0.668	3.1	0.665	2.6	0.654	0.9
2	Lateral	1.238	1.227	-0.9	1.235	-0.2	1.193	-3.6
3	Lateral	2.230	2.290	2.7	2.232	0.1	2.161	-3.1
4	Vertical	3.279	3.481	6.2	3.257	-0.7	3.306	0.8
5	Lateral	3.536	3.804	7.6	3.575	1.1	3.479	-1.6
6	Vertical	3.758	4.129	9.9	3.795	1.0	3.825	1.8
7	Vertical	4.094	-	-	-	-	-	-
8	Vertical	4.471	4.974	11.3	4.486	0.3	4.476	0.1
9	Lateral	4.917	5.608	14.1	5.096	3.6	4.954	0.8
10	Vertical	5.056	5.837	15.4	5.155	2.0	5.075	0.4
11	Torsión	5.309	6.656	25.4	5.829	9.8	5.346	0.7
12	Vertical	6.036	6.931	14.8	6.132	1.6	6.029	-0.1
13	Torsión	6.915	8.749	26.5	7.358	6.4	7.265	5.1
14	Lateral	7.455	8.840	18.6	8.176	9.7	8.046	7.9
15	Torsión	8.420	-	-	-	-	-	-
16	Lateral	9.329	11.940	28.0	10.148	8.8	10.058	7.8
17	Vertical	9.667	11.800	22.1	10.247	6.0	9.801	1.4
18	Vertical	10.011	12.150	21.4	10.453	4.4	10.098	0.9
19	Vertical	10.743	12.883	19.9	10.805	0.6	10.882	1.3
20	Vertical	14.694	18.893	28.6	14.889	1.3	15.217	3.6

Tabla 2: Comparación entre los modos experimentales y los obtenidos con los modelos preliminares, la celda es roja cuando el error supera el 10% y es naranja cuando supera el 5%.

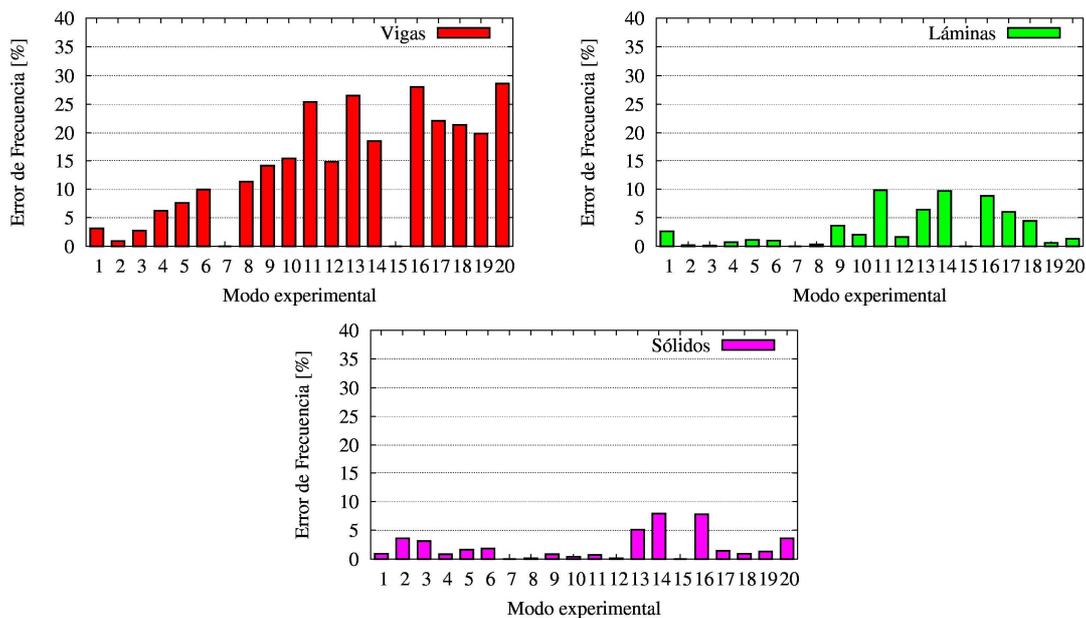


Figura 5: Error relativo a las frecuencias de los tres modelos preliminares comparando con los valores experimentales. El modelo de vigas produce un error significativamente mayor que los otros dos. El modelo de sólidos es el que mejor ajuste proporciona, sin embargo su elevado coste computacional desaconseja su uso. Por tanto es el modelo de láminas el que se empleará en el resto del trabajo.

5 ACTUALIZACIÓN DEL MODELO

La actualización o *model updating* es la corrección de modelos numéricos, en este caso Modelos de Elementos Finitos, con datos experimentales, en este caso los parámetros modales. Este proceso es necesario debido a que los modelos numéricos se desvían del comportamiento de la estructura de forma irremediable por multitud de motivos: variaciones geométricas, hipótesis asumidas, propiedades de los materiales, fisuración...

Con este procedimiento se trata de encontrar los parámetros numéricos (densidad, módulo elástico...) que consigan un mejor ajuste con los resultados experimentales. El proceso se divide en dos partes principales: análisis de sensibilidad y optimización de los parámetros. Antes de describir con detalle el objeto y la metodología propios de cada una de esas partes hay que explicar el concepto de emparejamiento de modos o *mode pairing* ya que es un cálculo necesario que ha de repetirse en numerosas ocasiones en todo el proceso.

5.1 Emparejamiento de modos

El emparejamiento de modos o *mode pairing* es el proceso mediante el cual se identifican los modos de vibración del modelo numérico que corresponden a los modos extraídos del análisis experimental. Este emparejamiento no es inmediato porque las numeraciones de los modos numéricos y experimentales no coincidirán en general. Al tener que hacerse este emparejamiento varios miles de veces en cada actualización es esencial que esté automatizado. El parámetro más comúnmente empleado para realizar esta tarea es el Modal Assurance Criterion [1], conocido como MAC, que se define como:

$$MAC_{ij} = \frac{(\hat{\phi}_i^T \hat{\phi}_j)^2}{(\hat{\phi}_i^T \hat{\phi}_i)(\hat{\phi}_j^T \hat{\phi}_j)} \quad (1)$$

donde $\hat{\phi}_j$ es el autovector numérico reducido del modo j que contiene sólo los grados de libertad medidos en el trabajo experimental, $\hat{\phi}_i$ es el modo i obtenido de forma experimental. En el caso de que la coincidencia sea total, el valor del MAC será la unidad; valores menores indican menor grado de correspondencia hasta el caso límite $MAC=0.0$ que determina la ortogonalidad de ambos vectores. Para cada modo experimental i el modo numérico correspondiente J será el que presente mayor valor del MAC al compararlo con él; es decir, $MAC_{i,J} = \max(MAC_{ij})$. Otros parámetros que derivan del MAC, como el LMAC o el EMAC [4], no ofrecen ventajas respecto al MAC en este trabajo y por ello no se explican aquí. Así pues en cada modelo numérico del que se quieran comparar los parámetros modales con los experimentales se han de calcular los MAC de todos los modos extraídos con los obtenidos experimentalmente para elegir en cada caso el modo numérico que mejor encaja con el experimental. En la figura 6 se muestran los valores del MAC obtenidos comparando los 20 modos experimentales con los 50 primeros modos de un modelo numérico de láminas. Puede verse que la identificación es en general muy clara.

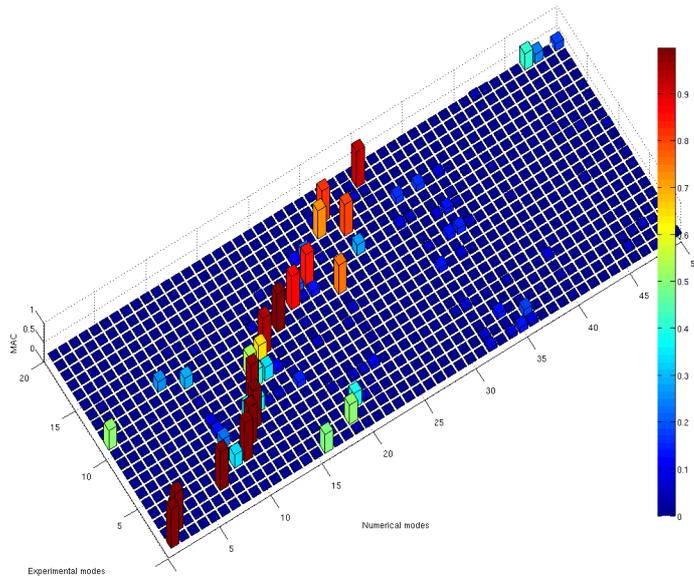


Figura 6: Valor del MAC entre modos experimentales y modos numéricos (modelo de láminas). El MAC da una idea de la semejanza entre pares de modos, en este caso entre un modo numérico y un modo experimental. Valores próximos a la unidad indican una buena correspondencia. Este parámetro se usa para identificar qué modo numérico corresponde con cada modo experimental.

5.2 Análisis de sensibilidad

El objeto del análisis de sensibilidad es determinar qué parámetros del modelo tienen mayor influencia en las respuestas de interés, en este caso los modos y frecuencias de vibración. Así, en el siguiente paso, la optimización, sólo se ajustarán los valores numéricos de esos parámetros. Limitar el número de parámetros a ajustar es necesario ya que si se emplea un alto número de parámetros en la optimización es posible que se obtengan buenos ajustes de los

parámetros de salida al tener un gran número de variables con las que ajustar; sin embargo, los valores obtenidos no serán fiables y posiblemente tampoco serán demasiado realistas.

El proceso seguido se resume en el diagrama de flujo de la figura 7. Una vez elegidos los parámetros que se van a emplear en el análisis de sensibilidad, en nuestro caso los recogidos en la tabla 3, el primer paso es crear una muestra aleatoria con un número suficientemente elevado de casos como para que los resultados sean estadísticamente significativos. Se han utilizado 1000 muestras, cada una incluye un valor para cada uno de los nueve parámetros considerados. Las muestras se generan utilizando la técnica del Hiper cubo Latino [7] asumiendo para todas las variables empleadas una distribución normal cuya media y desviación típica se recogen en la tabla 3. Además, se fijan para cada parámetro unos límites superior e inferior entre los cuales estarán contenidas todas las muestras. De acuerdo con el método del Hiper cubo Latino la distribución de cada parámetro se divide en tantos intervalos equiprobables como muestras se vaya a generar. Así, en el número total de muestras habrá un valor de ese parámetro en cada intervalo.

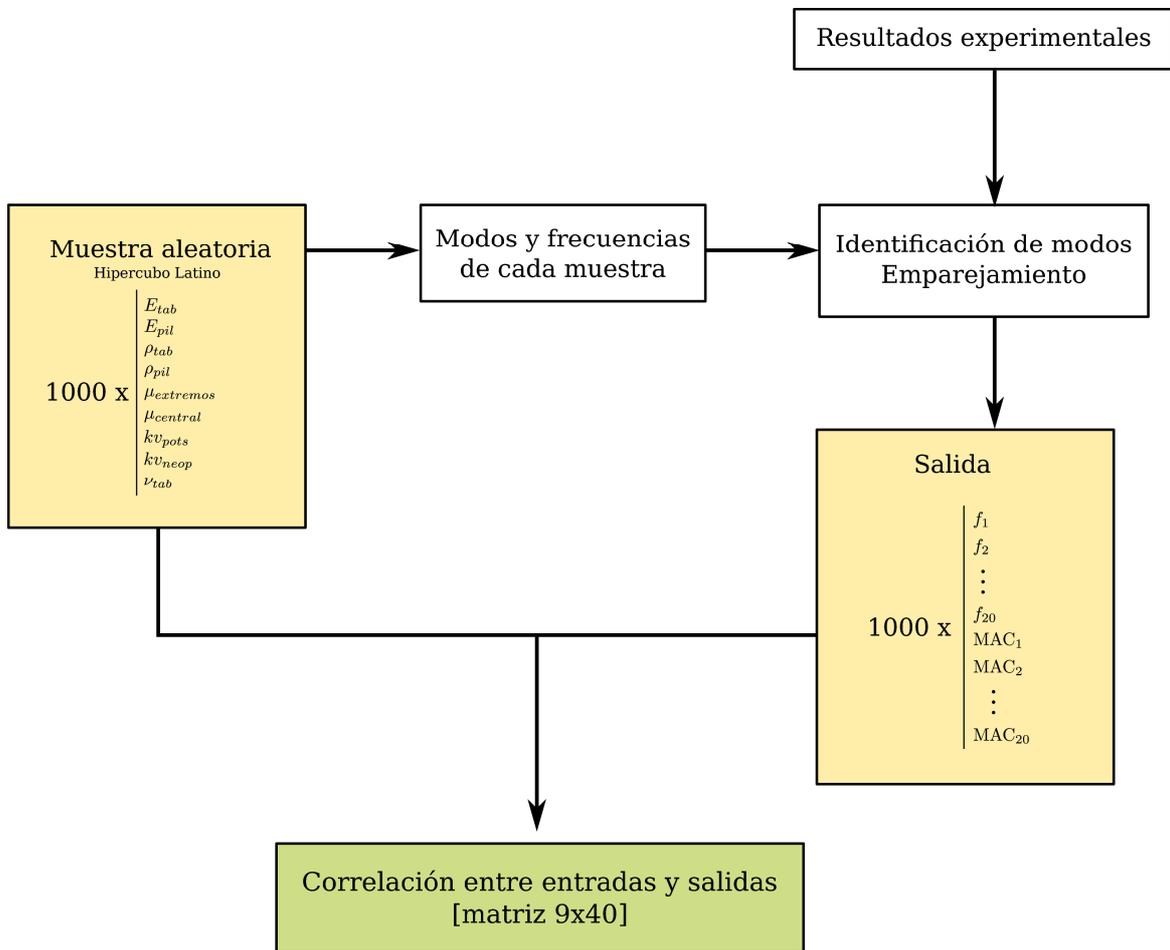


Figura 7: Diagrama de flujo del análisis de sensibilidad. El primer paso es crear una muestra aleatoria de los diferentes parámetros considerados. De esa muestra hay que obtener los parámetros que se quieren ajustar, en este caso 20 frecuencias y 20 MACs. Por último, se evalúa la correlación entre entradas y salidas mediante en coeficiente de Spearman.

Parámetro	Descripción	Media/Desviación	Límites	Unidades
E_{tab}	Módulo elástico tablero	39.2/3.92	31.4/47.0	GPa
E_{pil}	Módulo elástico pilas	36.2/3.62	29.0/43.4	GPa
ρ_{tab}	Densidad tablero	2500/250	2000/3000	kg/m ³
ρ_{pil}	Densidad pilas	2500/250	2000/3000	kg/m ³
μ_C	Masa no estructural central	925/92.5	740/1110	kg/m ²
μ_E	Masa no estructural extremos	792/79.2	634/950	kg/m ²
$k_{v,pot}$	Rigidez vertical apoyos POT	10000/1000	8000/12000	MN/m
$k_{v,neo}$	Rigidez vertical apoyos neopreno	1420/142	1140/1700	MN/m
ν_{tab}	Módulo de Poisson del tablero	0.2/0.05	0.1/0.3	-

Tabla 3: Parámetros empleados en el análisis de sensibilidad.

De cada muestra se obtienen los parámetros modales, se realiza el emparejamiento modal con los datos experimentales y como salida se obtiene el valor de las 20 frecuencias numéricas que coinciden con las experimentales y el valor de los 20 MAC correspondientes. Entre las 1000 muestras que forman la entrada y las 1000 salidas se realiza un análisis de correlación empleando el coeficiente de correlación de Spearman [11]. De esa forma se estudia el grado de influencia de cada parámetro (E_{tab} , E_{pil} ...) en cada una de las 20 frecuencias y MACs, que son los parámetros que queremos recoger con precisión en nuestro modelo numérico. Así pues, la salida final será una matriz de tantas filas como parámetros estemos usando y tantas columnas como salidas estemos evaluando.

Coefficientes de Spearman con valor absoluto alto indican una elevada correlación entre el parámetro y la respectiva salida. En el caso de que el coeficiente sea positivo la relación es directa; es decir, incrementos del parámetro de entrada inducen incrementos en el parámetro de salida. Si el valor es negativo la relación es inversa y sucede al revés. A título ilustrativo veamos qué sucede con el primer modo vertical del tablero (modo 4) antes de analizar la matriz completa de salida. En ese modo la influencia de las pilas es pequeña y la dependencia es casi absoluta de las propiedades del tablero. Veamos la frecuencia obtenida en cada una de las 1000 muestras frente al módulo elástico del tablero y de las pilas (figura 8). Se puede observar que hay una dependencia muy marcada del módulo del tablero y una independencia evidente del de las pilas. Eso se traducirá en coeficientes de correlación de Spearman altos (positivos) entre E_{tab} y f_4 y bajos (cerca de cero) entre E_{pil} y f_4 como se verá después.

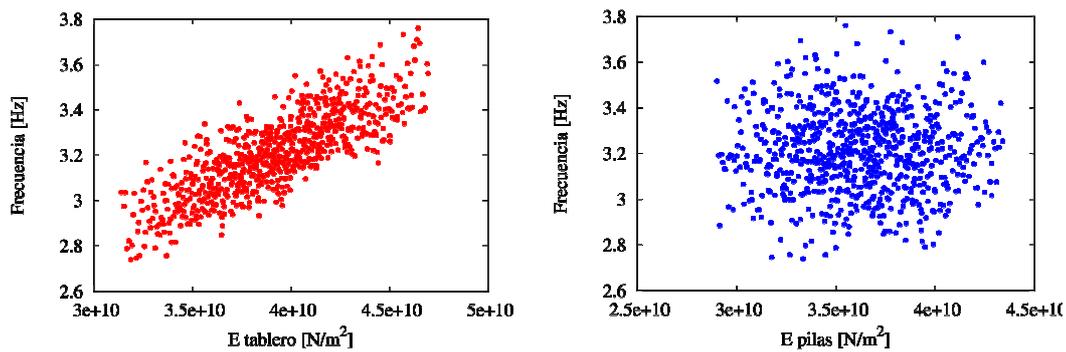


Figure 8: Dependencia de la primera frecuencia vertical (modo global 4) de: (a) Módulo elástico del tablero; (b) Módulo elástico de las pilas. La influencia del valor del módulo elástico del tablero es evidente a simple vista; sin embargo, el valor de la frecuencia depende muy poco del valor del módulo elástico de las pilas como era de esperar. Estas dos tendencias se reflejarán en un coeficiente de correlación alto entre E_{tab} y f_4 y un coeficiente cercano a 0.0 entre E_{pil} y f_4 .

En la figura 9 se recoge la matriz de correlación entre todos los parámetros considerados y todas las salidas de interés. Se observa que el módulo de elasticidad del tablero, su densidad y el módulo de las pilas son los parámetros más influyentes. Es práctica habitual en este tipo de trabajos considerar que la correlación es despreciable cuando el valor absoluto del coeficiente es menor que 0.3, por ese motivo ese rango de colores aparece en gris. Los parámetros cuyas correlaciones están siempre en ese intervalo no se emplean en el paso siguiente (optimización) sino que se fijan con un valor constante. Así pues, la masa no estructural de los extremos y el módulo de Poisson del material del tablero se fijan en este paso y no se modificarán. Los 7 parámetros restantes serán fijados en el siguiente paso.

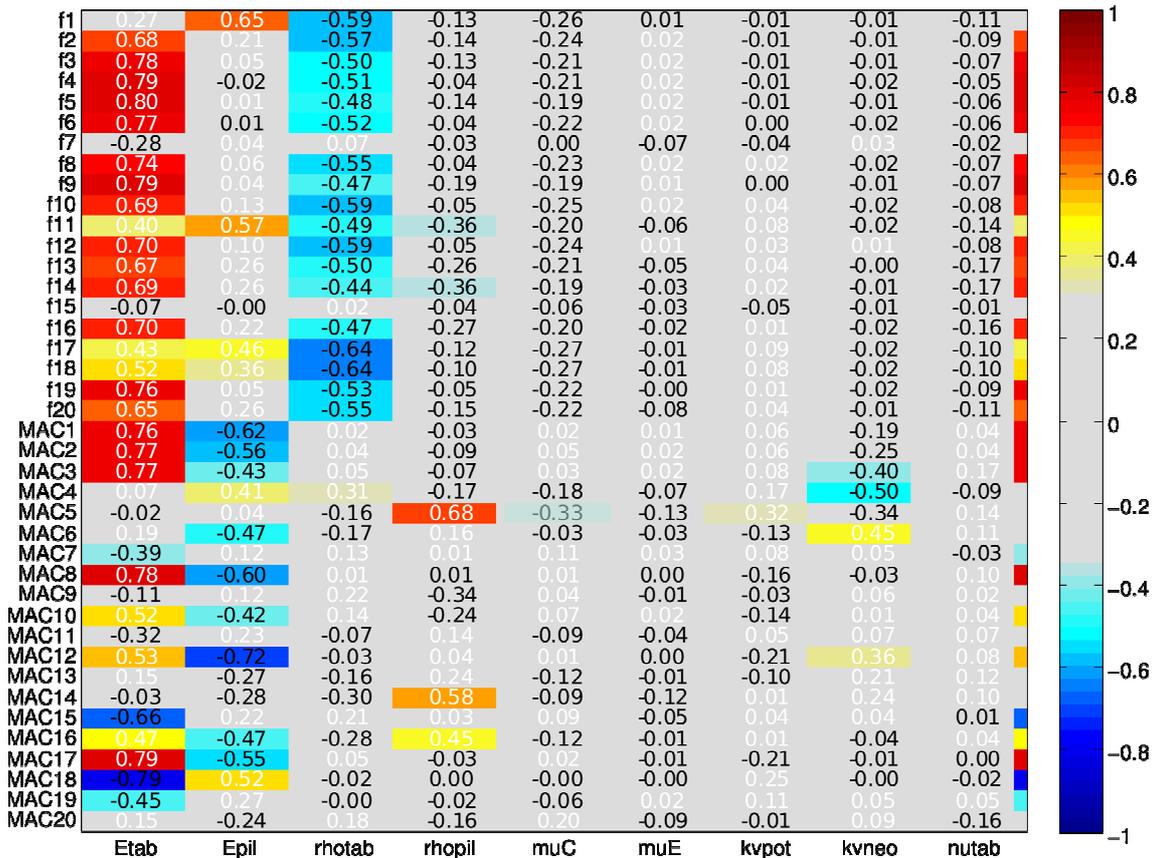


Figura 9: Matriz de correlación resultante del análisis de sensibilidad. Valores altos (cerca de 1.0) indican elevada correlación directa, valores bajos (cerca de -1.0) indican alta correlación inversa, valores cercanos a cero indican poca o nula correlación.

5.3 Optimización

El objetivo de la optimización es encontrar los valores de los parámetros considerados que consiguen un mejor ajuste de los resultados numéricos con los experimentales. Existen varias estrategias para solucionar este problema que se trata esencialmente de encontrar el mínimo de una función, la denominada función objetivo. Esa función da una idea de la desviación entre el modelo numérico y los resultados experimentales de forma que cuando es nula significa que los resultados son coincidentes. La función objetivo incluye dos términos, uno relacionado con las frecuencias y otra con las formas modales a través del número MAC:

$$f = \sum_{i=1}^n \frac{|f_i^{num} - f_i^{exp}|}{f_i^{exp}} + \sum_{i=1}^n (1 - MAC(\hat{\phi}_i^{num}, \hat{\phi}_i^{exp})) \quad (2)$$

donde n son los modos experimentales empleados en la optimización. Es práctica habitual en este campo excluir del proceso de optimización aquellos modos experimentales cuyo valor máximo del MAC no ha superado el valor de 0.85 en ninguno de los modelos creados en el análisis de sensibilidad. Esa metodología se sigue en este trabajo y como resultado se excluyen los modos 7, 13-18 y 20. Así pues, se emplean 12 modos para la optimización lo cual es un número muy alto si comparamos con otros trabajos similares [6, 8].

Existen varias estrategias para solucionar este problema que se trata esencialmente de la minimización de un residuo, por ejemplo los métodos basados en gradientes. En este tipo de

problemas la estrategia más válida es el algoritmo genético que es frecuentemente empleado en estudios de este tipo [10] y es el que vamos a utilizar en la optimización de nuestro modelo. El algoritmo genético se basa en la selección natural y modifica repetidamente una población de individuos. En cada paso se seleccionan unos individuos para ser los padres de la siguiente generación y los hijos se obtienen por cruce y mutación de esos padres. Además, un número prefijado de individuos (elite) cuya función objetivo sea la menor de entre la población constituyen la elite y pasan a la siguiente generación de forma automática. A lo largo de generaciones sucesivas la población evoluciona hacia una solución óptima. El proceso empleado en este trabajo se recoge en el diagrama de flujo de la figura 10. La elección de la población inicial, la forma de seleccionar los progenitores de cada generación, la manera de cruzarlos y la función de mutación son algoritmos claves en este procedimiento y no pueden establecerse unas guías generales ya que son muy particulares de cada problema. Sin embargo, la discusión de este asunto queda fuera del alcance de este artículo.

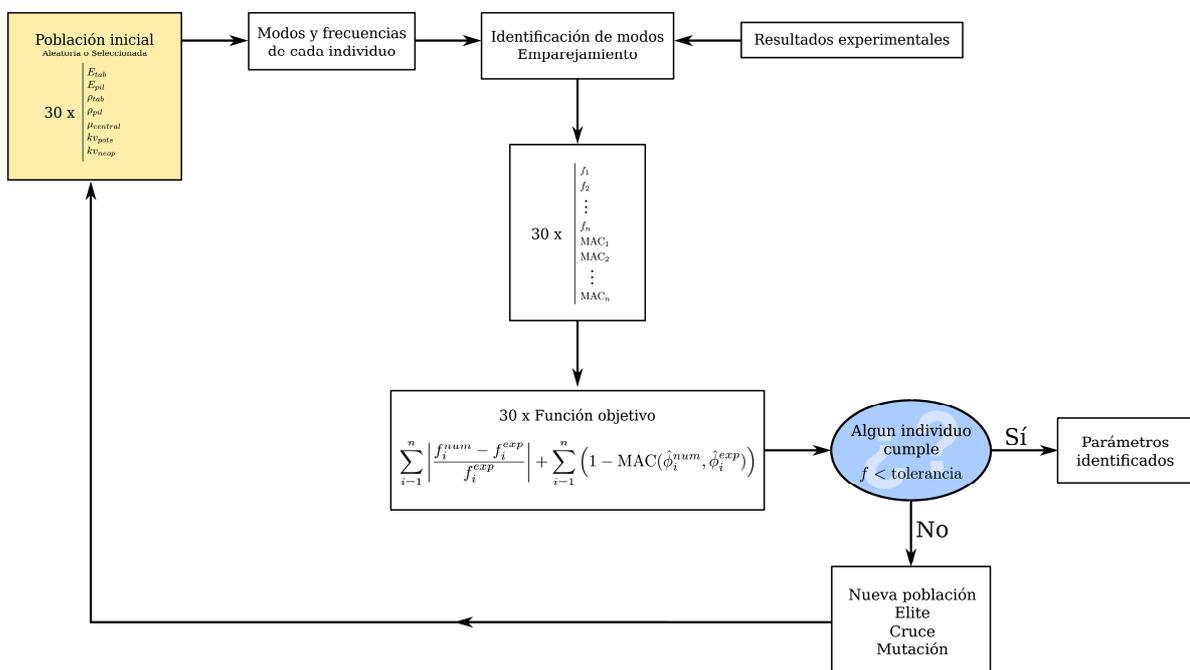


Figura 10: Diagrama de flujo del proceso de optimización mediante algoritmo genético. Se parte de una población inicial de 30 individuos que se evalúa a través de la función objetivo. A la vista de los resultados obtenidos se obtiene una nueva generación. Las sucesivas generaciones evolucionan hacia una solución óptima.

El proceso de optimización ha de controlarse con cuidado ya que los resultados podrían ser engañosos. Por ejemplo, en el caso de una pila la flexibilidad adicional que podría provenir de la cimentación puede ajustarse en la optimización mediante una reducción del módulo elástico del material. Sin embargo, si se modeliza la cimentación mediante un muelle los valores obtenidos también podrían ser engañosos ya que la rigidez de la pila estará influida tanto por la constante del muelle como por el módulo elástico y habrá varias combinaciones que proporcionen la misma rigidez al tablero.

En la tabla 4 se recogen los valores obtenidos para los diferentes parámetros tras el proceso de optimización. En la tabla 5 se muestran las frecuencias de los modos optimizados antes y después de la aplicación del algoritmo genético, así como el error acumulado en valor absoluto. El error total desciende de un 23.6 % a un 8.9 %. La principal mejora tiene lugar en el modo 11, que es el único modo de torsión considerado. Puede verse también que algunos modos empeoran su aproximación pero es el precio que hay que pagar por aproximar otros.

Parámetro	Descripción	Valor fijado	Unidades
E_{tab}	Módulo elástico tablero	38.7	GPa
E_{pil}	Módulo elástico pilas	33.4	GPa
ρ_{tab}	Densidad tablero	2386	kg/m ³
ρ_{pil}	Densidad pilas	2471	kg/m ³
μ_C	Masa no estructural central	842	kg/m ²
$k_{v,pot}$	Rigidez vertical apoyos POT	9560	MN/m
$k_{v,neo}$	Rigidez vertical apoyos neopreno	2320	MN/m

Tabla 4: Parámetros fijados en la optimización mediante algoritmo genético.

Modo	Tipo	Experimental [Hz]	Antes		Después	
			[Hz]	Error [%]	[Hz]	Error [%]
1	Lateral	0.648	0.665	2.6	0.648	0.0
2	Lateral	1.238	1.235	0.2	1.210	2.3
3	Lateral	2.230	2.232	0.1	2.198	1.4
4	Vertical	3.279	3.257	0.7	3.289	0.3
5	Lateral	3.536	3.575	1.1	3.519	0.5
6	Vertical	3.758	3.795	1.0	3.808	1.3
8	Vertical	4.471	4.486	0.3	4.463	0.2
9	Lateral	4.917	5.096	3.6	4.947	0.6
10	Vertical	5.056	5.155	2.0	5.075	0.4
11	Torsion	5.309	5.829	9.8	5.337	0.5
12	Vertical	6.036	6.132	1.6	5.964	1.2
19	Vertical	10.743	10.805	0.6	10.723	0.2
Total				23.6		8.9

Tabla 5: Comparación entre las frecuencias experimentales y las frecuencias numéricas obtenidas antes y después de la optimización. El error global decrece claramente y el modo de torsión 11 mejora de forma evidente. El error aumenta en algunos modos, por ejemplo el 2, como contrapartida.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 Conclusiones

En este trabajo se presenta la actualización de un modelo numérico que representa un puente continuo de hormigón armado y pretensado que soporta una vía doble de tren de alta velocidad sobre balasto. La calibración se realiza tomando como base los resultados de un trabajo experimental de identificación modal en el cual se han identificado 20 modos de vibración del tablero con sus respectivas frecuencias. De esos 20 modos, sólo 11 se identifican bajo vibración ambiental. Los 9 restantes aparecen únicamente cuando se utilizan las vibraciones libres tras el paso de un tren sobre la estructura. Es importante indicar que los modos de torsión solamente aparecen en este último escenario. Esto se debe a que la excitación ambiental no fue capaz de excitarlos durante la campaña experimental; sin embargo, el paso de los vehículos los excita significativamente al ser una acción excéntrica ya que el tablero soporta una vía doble.

Con vistas a la elección de un tipo de modelo adecuado se realiza un estudio preliminar de modelos numéricos de diferente complejidad. En estos se modeliza el tablero empleando (1) vigas, (2) láminas y (3) hexaedros de continuo. A la vista de los resultados obtenidos, se elige el modelo de láminas por ser una solución de compromiso entre precisión y velocidad de cálculo. La actualización del modelo se realiza en dos fases:

1. En el análisis de sensibilidad se determina qué parámetros del modelo tienen una influencia significativa en los resultados de interés, en este caso los 20 modos y frecuencias propias identificados en el trabajo experimental. El análisis de sensibilidad muestra que los módulos elásticos de tablero y pilas así como la densidad del tablero son las variables más importantes. Por otro lado, la influencia de la masa no estructural de los extremos (impostas, canaletas...) y el valor del módulo de Poisson del material del tablero es despreciable y esos parámetros no se incluyen en la optimización.

2. La optimización se realiza empleando el algoritmo genético que se basa en las leyes de la selección natural empleando los siete parámetros determinados en el paso anterior. Las propiedades del algoritmo dependen en gran medida del criterio de selección de progenitores, de la forma de cruzarlos y de la función de mutación; pero estos aspectos quedan fuera del objeto de este artículo. Como resultado del proceso se obtienen unos valores para los diferentes parámetros.

6.2 Trabajo futuro

- Una vez actualizado el modelo, el siguiente paso es validarlo mediante las medidas dinámicas que ofrece la monitorización permanente que está dispuesta en el viaducto.

Para reproducir los efectos dinámicos producidos por el paso de los trenes se pueden utilizar modelos de cargas móviles en los que cada eje del tren se representa mediante una carga de valor constante que cruza el puente. Este tipo de modelos sólo recogen el problema de forma parcial. Si se quiere considerar la vibración del tren, el intercambio de energía entre tren y puente o la influencia de las irregularidades de la vía se hace necesario el uso de modelos de interacción. En el Grupo de Mecánica Computacional de la UPM se han desarrollado modelos avanzados de este tipo que recogen tanto la interacción vertical como lateral en puentes de ferrocarril [2, 3], esos modelos permiten una aproximación mucho más realista al problema. Los cálculos realizados con cargas móviles muestran un acuerdo satisfactorio con las medidas; sin embargo, no se presentan en este trabajo por motivos de brevedad.

- Con el modelo actualizado y validado se estudiará el efecto en los modos y frecuencias de diferentes daños previsibles en la estructura, así como la repercusión de esa degradación en la respuesta dinámica del puente. De esa forma se podrá facilitar la identificación de futuros daños.

- Como trabajo adicional se quiere profundizar en la identificación automática de modos y frecuencias a partir de la instrumentación permanente. Esa identificación no será tan rica como la presentada en el apartado 3 de este artículo, pero tiene la gran ventaja de ser continua. Eso permitirá relacionar factores ambientales (p. ej. la temperatura) y operacionales (p. ej. el tipo de tren que excita la estructura) con los resultados obtenidos. A partir de ahí es posible eliminar el efecto de esos factores en las frecuencias experimentales con objeto de aislar las variaciones que se deban exclusivamente al daño. Para poder evaluar las posibilidades de esta aproximación es imprescindible contar con modelos estructurales suficientemente precisos como el obtenido en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la ayuda del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del subprograma INNPACTO y del proyecto VIADINTEGRA (Ref. IPT-370000-2010-012).

REFERENCIAS

- [1] R. Allemang. The Modal Assurance Criterion - twenty years of use and abuse. *Journal of Sound and Vibration*, 2003.
- [2] Pablo Antolín, José M. Goicolea, Javier Oliva, y Miguel Á. Astiz. Nonlinear train-bridge lateral interaction using a simplified wheel-rail contact method within a finite element framework. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2012.
- [3] Pablo Antolín, Nan Zhang, José M. Goicolea, He Xia, Miguel Á. Astiz y Javier Oliva. Consideration of non linear wheel-rail contact forces for dynamic vehicle-bridge interaction in high-speed railways. *Journal of Sound and Vibration*, 2013.
- [4] M. Brehm, V. Zabel y C. Bucher. An automatic mode pairing strategy using an enhanced modal assurance criterion based on modal strain energies. *Journal of Sound and Vibration*, 2010.
- [5] H. Van der Auweraer y B. Peeters. International research projects on structural health monitoring: an overview. *Structural Health Monitoring*, 2:341–358, 2003.
- [6] Wei-Hua Hu, Elsa Caetano y Álvaro Cunha. Structural health monitoring of a stress-ribbon footbridge. *Engineering Structures*, 2012.
- [7] M. D. McKay, R. J. Beckman y W. J. Conover. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 1979.
- [8] Peter Moser y Babak Moaveni. Environmental effects on the identified natural frequencies of the Dowling Hall footbridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011.
- [9] E. Reynders, M. Schevenels y G. De Roeck. Macec 3.1: a Matlab toolbox for experimental and operational modal analysis. *Structural Health Monitoring*, 2010.
- [10] Diogo Ribeiro. Efeitos Dinamicos Induzidos por Trafego em Pontes Ferroviarias: Modelação Numerica, Calibração e Validação Experimental. PhD thesis, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2012.
- [11] D. Sheskin. Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures. Chapman & Hall/CRC, London, 3ª edición, 2004.