

IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE UN MODELO FÍSICO REDUCIDO DE UN PUENTE LOSA MEDIANTE REGISTRO DE VIBRACIONES

IDENTIFICATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF A REDUCED-SCALE PHYSICAL MODEL OF A SLAB BRIDGE THROUGH VIBRATION RECORDING

Germán Lucero^a, Juan P. Ascheri^a, Oscar Möller^a

^a*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina, gerlucerotuc@gmail.com*

Palabras clave: Dinámica estructural, Identificación de sistemas, Modelo físico, Parámetros dinámicos, Errores de medición.

Resumen: El monitoreo de la salud estructural (SHM) tiene como objetivo la detección temprana de daños en sistemas estructurales. Un paso importante en este proceso es la identificación de las propiedades dinámicas tales como frecuencias naturales y formas modales. En este trabajo se estudia un modelo físico a escala de un puente losa. Se registra aceleración-tiempo en 26 puntos con 3 acelerómetros. La acción dinámica es un impacto de muy corta duración, aplicada en un punto donde genera participación de varios modos, con el objetivo de registrar la etapa de vibración libre que facilita la identificación de frecuencias y formas modales mediante métodos en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo. Los resultados se comparan con los que se obtienen de un modelo numérico aplicando elementos finitos dentro del campo elástico lineal. Se concluye que los métodos en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo tienen una buena correlación en los modos más bajos mientras que existe una mayor dispersión en los modos superiores.

Keywords: Structural dynamics, System identification, Physical model, Dynamic parameters, Measurement errors.

Abstract: Structural health monitoring (SHM) aims at early detection of damage in structural systems. An important step in this process is the identification of dynamic properties such as natural frequencies and modal shapes. In this work, a physical scale model of a slab bridge is studied. Acceleration-time is recorded at 26 points with 3 accelerometers. The dynamic action is a very short duration impact, applied at a point where it generates participation of several modes, with the aim of recording the free vibration stage that facilitates the identification of frequencies and modal shapes by methods in the frequency domain and in the time domain. The results are compared with those obtained from a numerical model applying finite elements within the linear elastic field. It is concluded that the methods in the frequency domain and in the time domain have a good correlation in the lower modes while there is a greater dispersion in the higher modes.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de las propiedades dinámicas como frecuencias, amortiguamiento y formas modales es de interés en cuanto al monitorio de la salud estructural. En este contexto, existen múltiples técnicas de Análisis Modal Operacional (OMA), que no requieren datos de entrada. Las técnicas de identificación se pueden dividir en dos grandes ramas, las técnicas en el dominio de la frecuencia y las técnicas en el dominio del tiempo. Las primeras, como Peak Picking, PP, estima los parámetros seleccionando picos en el espectro de frecuencia (Brownjohn, J., 2002), o Descomposición en el Dominio de la Frecuencia, FDD, en donde se puede estimar los parámetros modales a partir de la descomposición en valores singulares de la matriz de densidad espectral (Brincker, R. et al., 2000). Y las segundas, como Identificación de Subespacios Estocásticos, SSI, es un método de identificación en el dominio del tiempo que trabaja directamente con los datos temporales medidos, sin necesidad de convertirlos en espectros o correlaciones, (Peeters, B., 2000, Peeters, B. et al. 1999)

En este trabajo, se registra la respuesta de aceleración-tiempo en varios puntos de un puente losa a escala metálico con tres acelerómetros con el fin de identificar los parámetros dinámicos, frecuencias y modos de vibración con los tres métodos mencionados, PP, FDD y SSI.

Se analiza el período de vibración libre posterior a la excitación generada por un impacto de muy corta duración, repitiendo este análisis para 10 impactos consecutivos a fin de elaborar una estadística de modos y frecuencias. Se comparan dos tiempos de inicio de vibración libre, a los 0.15 y 0.20 segundos. Los parámetros que se obtienen se los relaciona con los resultados de un modelo numérico aplicando elementos finitos.

El trabajo se divide en tres partes principales: sincronización del instrumental, ensayo experimental e identificación de frecuencias y formas modales.

2. SINCRONIZACIÓN DEL INSTRUMENTAL

El equipamiento que se utiliza para el registro de las aceleraciones son tres acelerómetros de fabricación nacional en un trabajo en conjunto entre la Escuela de Ingeniería Electrónica y el Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras, ambos pertenecientes a la Universidad Nacional de Rosario. Las frecuencias de muestreo están en el rango de los 10 a los 4000 Hz y la amplitud de aceleración es de hasta $\pm 8g$. Éstos, se calibran con un acelerómetro marca Dytran Instruments, Model 7503A1, Inc., Serial Number 10156, made in U.S.A. Los registros que se toman son las aceleraciones en eje vertical Z.

La sincronización de los instrumentos se lleva mediante un ensayo de vibración libre amortiguada, en donde se colocan los tres sensores junto al acelerómetro patrón en paralelo sujetos a una masa de 50 kg que oscila en eje vertical. A esta masa, se le da un desplazamiento forzado de 10 cm y se libera para que oscile libremente hasta que se detiene, como se esquematiza en Figura 1. Este desplazamiento genera aceleraciones que se registran con los cuatro acelerómetros.

Debido al amortiguamiento, se reinicia la oscilación cada 200 segundos aproximadamente y se repite el proceso en un total de cuatro ciclos. El ensayo se realiza dos veces, el cual permite obtener un factor de ajuste promediado específico para cada sensor. Dicho factor de corrección, aplicado posteriormente a los registros de aceleraciones, modifica el período de la onda del instrumento a calibrar, alineándolo con el sensor patrón. En la Figura 2, se esquematiza el registro original de las señales del acelerómetro patrón y los sensores sin corrección. Luego, se observan los registros corregidos por los factores de ajuste obtenidos para cada acelerómetro, modificando el período de la señal. Cuando se aplican los factores de corrección, el resultado conduce a una superposición de señales.

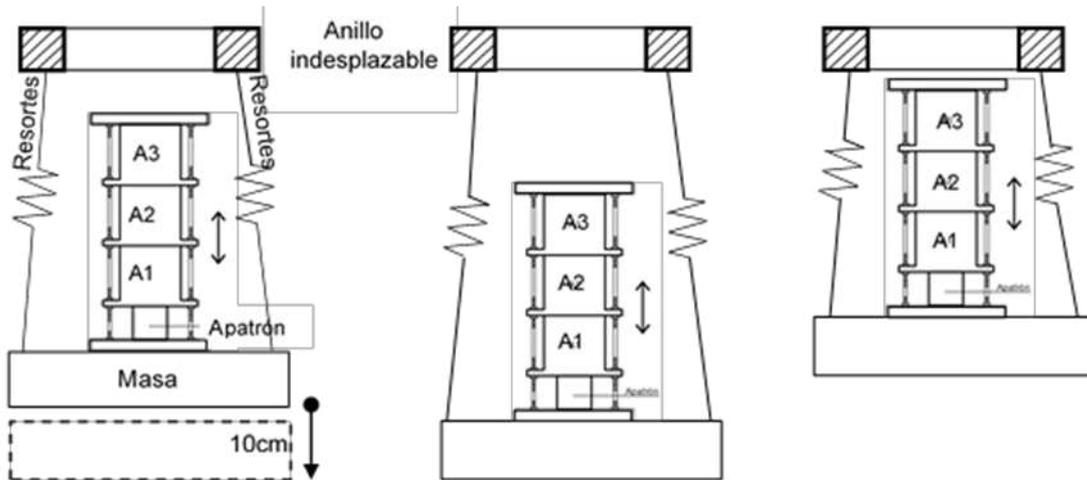


Figura 1: Esquema del ensayo

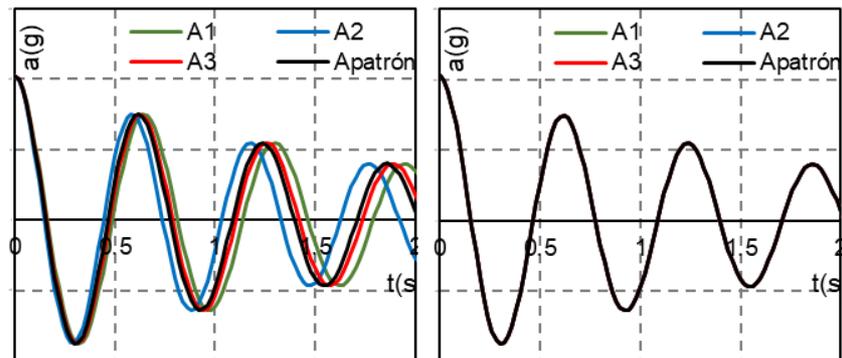


Figura 2: Sincronización del instrumental

3. MODELO NUMÉRICO Y ENSAYO EXPERIMENTAL

El modelo físico consiste en una chapa de 1.30 m de ancho, 1.70 m entre ejes de apoyos y 5 mm de espesor nominal. Las restricciones de vínculos consisten en un apoyo fijo y un apoyo móvil continuos. Tiene un peso aproximado de 0.9 kN. Se definen en la chapa 25 puntos como se indica en la Figura 5 más un punto “A” en donde se coloca un acelerómetro fijo que se utiliza como referencia para todas las mediciones. Para el registro de las aceleraciones se colocan sobre cada punto una placa base de plástico que sirven como soporte para el acelerómetro en cada medición. Estas placas son impresiones en 3d de masa y rigidez despreciable respecto a la masa y rigidez del puente. En un análisis de sensibilidad previo al ensayo se define la posición del punto A que tiene la característica que en los modos que se estudian, la componente modal es no nula. La posición del impacto es un punto simétrico, entre los nodos 16, 17, 21 y 22.

Se construye un modelo numérico de elementos finitos con el cual se realizan las comparaciones con los valores de los parámetros dinámicos identificados de las mediciones experimentales. El continuo se discretiza con 884 elementos de placa de 5x5 cm con 945 nodos, de espesor nominal de 5 mm, módulo de elasticidad de 200000 MPa s/CIRSOC 301 (2005), relación de amortiguamiento de 0.03 y densidad 7850 kg/m³. Se realizan 50 simulaciones considerando al espesor como variable de campo aleatorio en el modelo numérico, ver detalles en Möller, O. et al., 2024. Las frecuencias naturales y formas modales

con las que se comparan los resultados del modelo físico son el promedio del procesamiento de estas 50 simulaciones. Se definen las secciones A-A, B-B y C-C, ubicados en los laterales y en la mitad del modelo físico. En estos cortes, se realizan las comparaciones de las formas modales entre el ensayo experimental y el modelo numérico. En la Figura 3 se muestra una imagen del puente losa a escala y el modelo de elementos finitos.

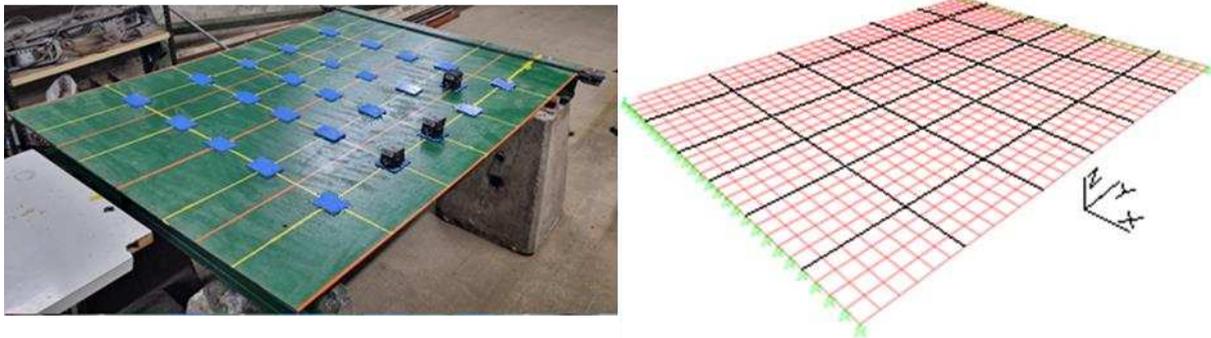


Figura 3: Modelo físico y modelo de elementos finitos

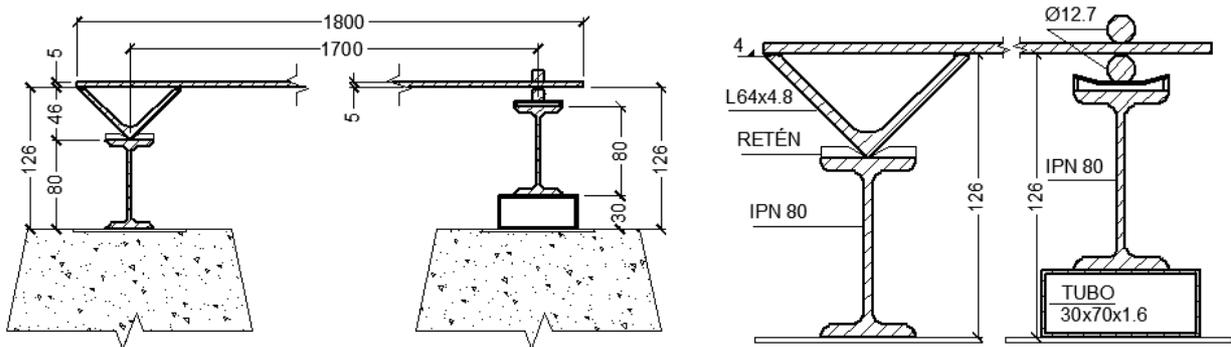


Figura 4: Detalle de apoyos

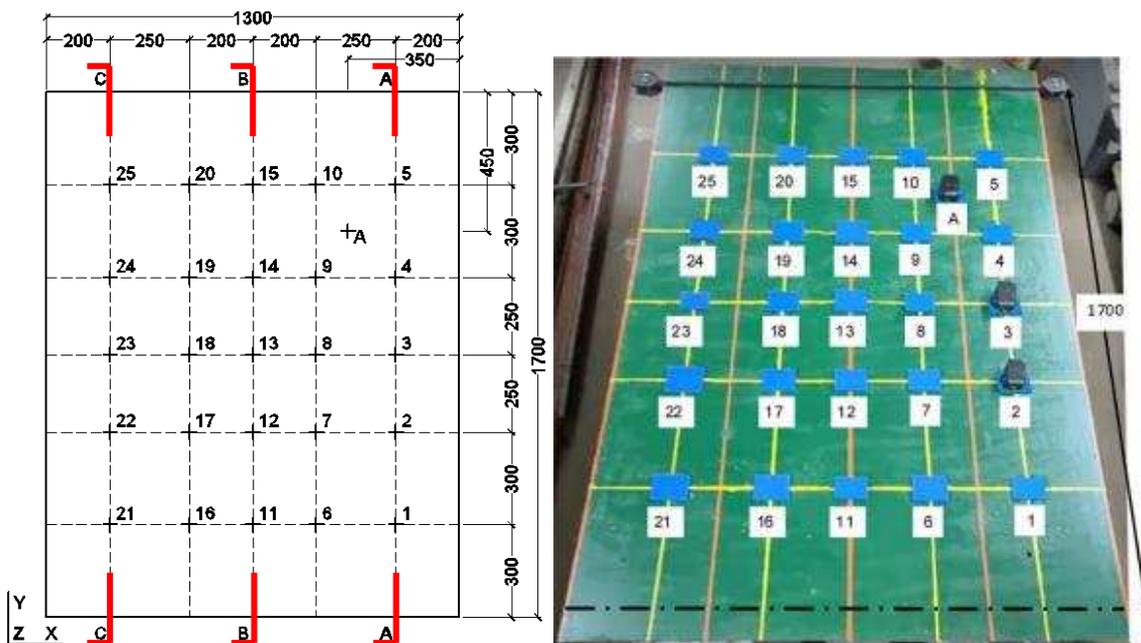


Figura 5: Ubicación de los puntos de medición

Los acelerómetros se ubican en los diferentes puntos del modelo para medir la respuesta aceleración-tiempo. Cada vez que se cambian las posiciones, se toma una nueva medición en simultáneo con el de referencia. La frecuencia de muestro con las que se realizan las mediciones es de 500 Hz. Los distintos setups de los sensores se definen en la Tabla 1:

Setup	Posiciones	Setup	Posiciones	Setup	Posiciones
1	A-1-2	6	A-11-12	11	A-21-22
2	A-3-4	7	A-13-14	12	A-23-24
3	A-5-6	8	A-15-16	13	A-25
4	A-7-8	9	A-17-18		
5	A-9-10	10	A-19-20		

Tabla 1: Posiciones de los acelerómetros

Para cada uno de los setups, se realizan diez impactos a fin de elaborar una estadística de los modos y frecuencias. El impacto corresponde a la caída libre de una barra de acero ADN 420 de 90 cm de longitud y 12 mm de diámetro desde una altura de 40 cm. El proceso consiste en realizar en una misma grabación cinco impactos, a continuación, se reinicia la grabación y se hacen los cinco impactos restantes, hasta completar los diez en el mismo setup. Posteriormente, se pasa al siguiente setup, y se repite el proceso hasta cubrir todos los puntos de medición.

Se muestra en la Figura 6 un registro típico de aceleración-tiempo de cuatro impactos consecutivos sin procesar, y su posterior corrección con los factores de ajuste obtenidos respecto al acelerómetro patrón. Se encuentran separados 20 segundos para que entre un golpe y el siguiente no se generen superposiciones. Se observa que en el registro sin procesar la deriva es distinta para cada uno de los tres acelerómetros. El sensor **A1**, corresponde al que está ubicado en el punto de referencia A, mientras que el **A2** y el **A3** son los que se desplazan.

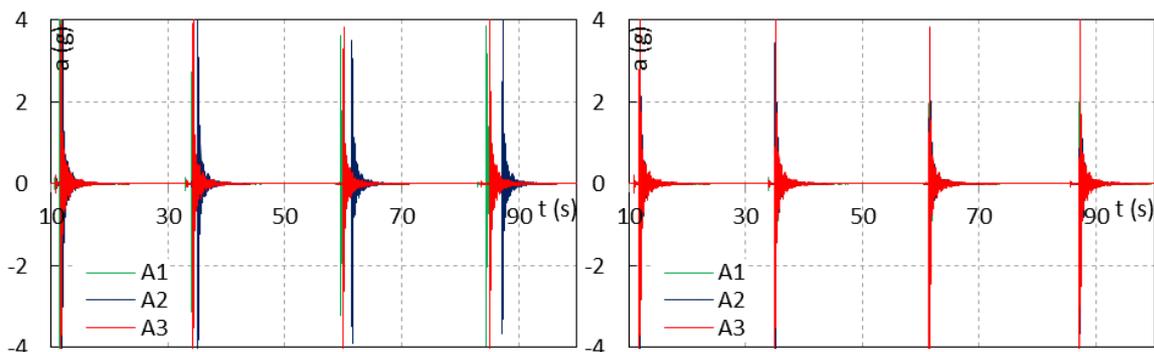


Figura 6: Registro sin procesar y sincronización típica de cuatro impactos consecutivos

A partir de la excitación generada mediante un impacto de muy corta duración, es importante determinar el instante en que comienza el periodo de vibración libre para identificar los modos y frecuencias naturales de vibración. Se establece un umbral de aceleración de 0.5g y luego dos posibles inicios de la etapa de la vibración libre: con $t = 0.15$ segundos, en donde se estima el final del periodo de vibración forzada, y $t = 0.20$ segundos que ofrece un margen adicional.

El ensamblaje de los múltiples setups se realiza mediante el acelerómetro de referencia **A1**. En los tres métodos de identificación usados, PP, FDD, SSI, las componentes modales que se obtienen para cada setup, se escalan al punto de referencia A, lo que permite posteriormente la unión de los 25 puntos. Existen otras técnicas de ensamblaje en la literatura para la estimación

del vector modal, no utilizadas en este trabajo, como ensamblaje de formas modales post-identificación (Au, S. et al., 2012, Cara, F. et al., 2014, Yan, W. et al., 2015) y técnicas de unión pre-identificación (Mevel, L. et al., 2002; Döhler, M. et al., 2010).

Se utiliza el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) para determinar si los modos están correlacionados, en las frecuencias naturales, entre el modo teórico y el experimental. Su valor es acotado entre 0 y 1, siendo 1 indicativo de formas consistentes y 0 indica que los modos no son consistentes. Se calcula con la expresión (1)

$$MAC(A, X) = \frac{|\{\psi_X\}^T \{\psi_A\}|^2}{(\{\psi_X\}^T \{\psi_X\})(\{\psi_A\}^T \{\psi_A\})} \quad (1)$$

Donde $\{\psi_X\}, \{\psi_A\}$ son los modos experimentales y analíticos respectivamente. Generalmente se acepta que un índice MAC mayor a 0.9 refleja que los modos comparados están bien correlacionados. Además, se calcula el Coeficiente de Variación (CV) para analizar la homogeneidad o no de los resultados experimentales. Un CV alto podría indicar problemas en la medición o en las condiciones del ensayo.

4. IDENTIFICACIÓN DE MODOS Y FRECUENCIAS

4.1. Frecuencias

En la Tabla 2 se indican las frecuencias naturales identificadas f_n^{PP} , f_n^{FDD} , f_n^{SSI} , con los tres métodos y la f_n^{Num} , frecuencias a partir del modelo numérico. Además, para las frecuencias identificadas en el dominio del tiempo se muestran los resultados para los dos inicios estudiados, para 0.15 y 0.20 segundos. Al ser el sistema ligeramente amortiguado, las frecuencias amortiguadas y naturales prácticamente son iguales.

Se observa que en la Tabla 2 no aparece el modo 5, porque tiene una frecuencia casi igual al modo 4 en el modelo numérico y no pudo ser identificado de las mediciones experimentales.

Modo	f_n^{PP}	f_n^{FDD}	$f_n^{SSI-0.15}$	$f_n^{SSI-0.20}$	f_n^{Num}
1	3.906	3.906	4.011	4.012	4.001
2	8.545	8.545	8.675	8.680	8.063
3	15.625	15.625	15.563	15.562	16.204
4	20.752	20.752	20.812	20.828	21.388
6	32.959	32.959	33.553	33.578	36.550

Tabla 2: Frecuencias naturales en Hz

Debido a la discretización del dominio de la frecuencia, la ubicación de los picos del espectro de las frecuencias es idéntica para ambos métodos, PP y FDD. Las frecuencias en el dominio del tiempo se calculan como el promedio de los diez impactos y se observa que, para los distintos inicios, 0.15 y 0.20 segundos, son muy similares entre sí. La diferencia máxima es inferior al 0.1%.

En Tabla 3 se calculan las relaciones de frecuencias identificadas experimentalmente; y respecto al modelo numérico. Además, se obtiene el coeficiente de variación CV, que es el desvío estándar s de los diez impactos sobre su promedio \bar{x} . Debido a la mínima variación en el dominio del tiempo, la comparación se realiza solamente con el inicio de 0.15 segundos.

Por ambos métodos los valores resultantes, son de magnitudes muy similares. La relación entre las frecuencias la mayor diferencia no supera el 3%, y la menor el 0.3%. Sin embargo, cuando se las relaciona respecto al modelo numérico, las diferencias crecen hasta casi un 10% en el modo 6. El coeficiente de variación, menor al 0.1% en todos los casos, indica una casi nula dispersión en la obtención de las frecuencias.

Modo	f_n^{PP-FDD}/f_n^{SSI}	f_n^{PP-FDD}/f_n^{Num}	$f_n^{SSI-0.15}/f_n^{Num}$	$f_n^{SSI-0.15}/f_n^{Num}$	$CV=s^{SSI-0.15}/\bar{x}^{SSI}$
1	0.974	0.976	1.002	1.003	0.00131
2	0.985	1.060	1.076	1.076	0.00015
3	1.004	0.964	0.960	0.960	0.00024
4	0.997	0.970	0.973	0.974	0.00021
6	0.982	0.902	0.918	0.919	0.00022

Tabla 3: Relaciones y CV

4.2. Formas modales

En la Figura 7 se indican algunas formas modales en las secciones A-A, B-B y C-C. En líneas grises se muestran las diez formas generadas a partir de los impactos según cada método, considerando el inicio de vibración libre en 0.15 segundos. En color, se representa el promedio de las cincuenta simulaciones numéricas de la forma modal, la cual es idéntica en todos los gráficos.

Cualitativamente se observa que las formas modales, normalizadas con la componente máxima positiva de los 25 puntos medidos, tienen una buena correlación con los datos numéricos, aunque para el método en el dominio del tiempo, existe una mayor dispersión, sobre todo para los modos superiores.

Cuantitativamente, según el criterio de aseguramiento modal (MAC), en las frecuencias naturales, para los tres primeros modos, los valores son superiores al 0.95, lo que indica una buena correlación entre lo que se obtiene experimentalmente y lo que se calcula numéricamente. En el dominio de la frecuencia, esta tendencia continúa para los siguientes modos, pero en el dominio del tiempo la correlación disminuye hasta 0.8 para el modo 6. En la Figura 8 se muestra el índice MAC de los cinco modos para los dos primeros impactos y para 0.15 segundos.

En Tabla 4 y en Tabla 5 se indican los resultados del coeficiente de variación sobre los 10 impactos calculados en los puntos medidos para 0.15 y 0.20 segundos de las secciones definidas en la Figura 5. La escala de referencia es: en color verde menor a 0.1, en amarillo entre 0.1 y 0.2, en naranja entre 0.2 y 0.5, y en rojo mayor a 0.5. Las posiciones que no tienen coeficientes, representan los puntos de medición en donde los promedios de las componentes modales son cercanos al cero, lo que conduce a coeficientes de variaciones no representativos. Las cuatro últimas columnas son el promedio de cada sección y la última columna es el promedio de todas las secciones, es decir, el promedio de los coeficientes en A-A, B-B y C-C.

Se observa que los resultados obtenidos con los métodos en el dominio de la frecuencia presentan mayor homogeneidad en los primeros cuatro modos, respecto al del dominio del tiempo, en donde existe mayor dispersión. Hasta los primeros tres modos, PP y FDD, los valores de CV no llegan a superar 0.10. Para el SSI los valores de CV son elevados si se los compara con los anteriores. Para el último modo los valores de CV superan 0.50 en todas las técnicas.

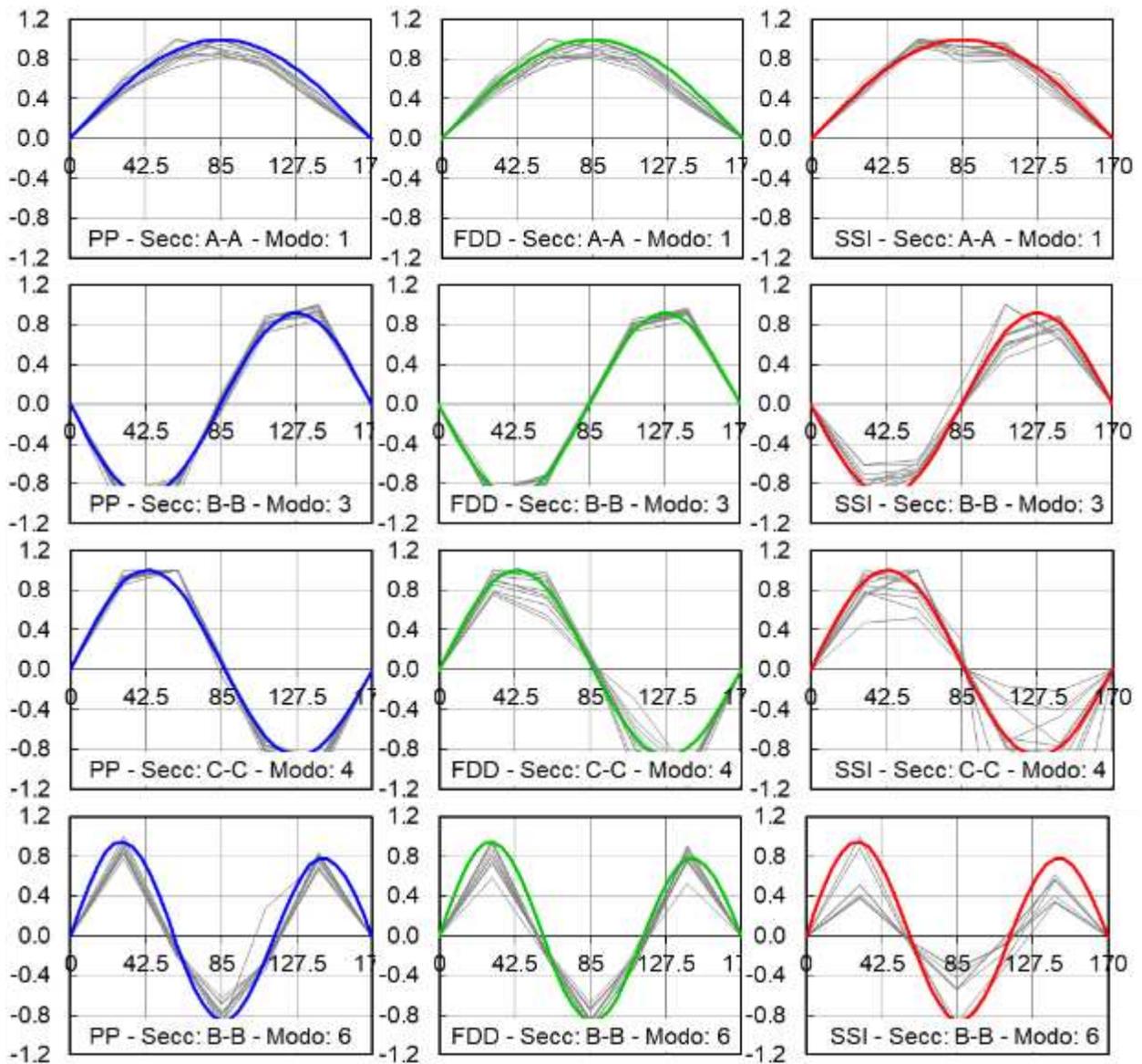


Figura 7: Formas modales

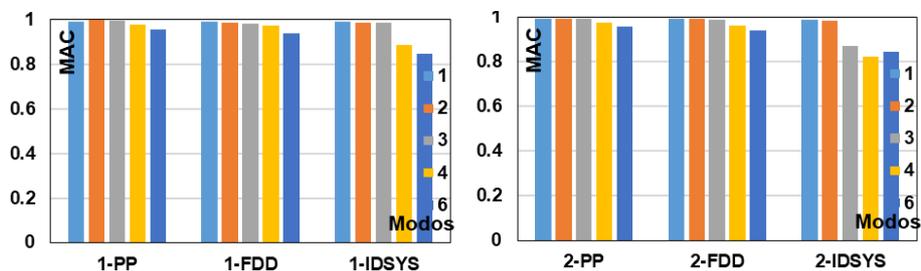


Figura 8: Índice MAC para $t=0.15$ s

Los resultados entre los dos distintos inicios, 0.15 y 0.20 segundos, tienen un comportamiento similar, mayor homogeneidad entre los métodos PP y FDD y mayores diferencias con respecto a SSI.

Mét.	Modo	Sección A-A					Sección B-B					Sección C-C					A-A	B-B	C-C	TOT
		30	60	85	110	140	30	60	85	110	140	30	60	85	110	140				
PP	1	0.120	0.103	0.076	0.062	0.109	0.071	0.093	0.089	0.128	0.118	0.138	0.123	0.090	0.077	0.064	0.094	0.100	0.099	0.097
	2	0.023	0.034	0.000	0.018	0.032						0.042	0.037	0.048	0.037	0.043	0.022		0.041	0.031
	3	0.066	0.054		0.084	0.058	0.080	0.074		0.054	0.052	0.069	0.065		0.047	0.010	0.066	0.065	0.048	0.059
	4	0.062	0.067		0.045	0.048						0.043	0.000		0.067	0.061	0.055		0.043	0.049
	5	0.063	2.713	0.132	0.822	0.028	0.072	0.212	0.118	0.798	0.079	0.147	2.022	0.149	0.848	0.146	0.752	0.256	0.662	0.557
	6	0.122	0.107	0.080	0.069	0.115	0.075	0.094	0.098	0.132	0.118	0.140	0.122	0.105	0.134	0.075	0.099	0.103	0.115	0.106
FDD	1	0.070	0.092	0.000	0.038	0.061						0.078	0.052	0.088	0.106	0.066	0.052		0.078	0.065
	2	0.151	0.215		0.093	0.026	0.053	0.060		0.042	0.040	0.062	0.112		0.277	0.060	0.121	0.049	0.128	0.099
	3	0.251	0.419		0.111	0.014						0.102	0.213		0.313	0.059	0.199		0.172	0.185
	4	0.448	1.378	0.200	0.319	0.025	0.139	0.168	0.107	0.228	0.136	0.722	2.504	0.175	0.385	0.232	0.474	0.155	0.804	0.478
	5	0.080	0.034	0.088	0.066	0.168	0.173	0.095	0.134	0.150	0.128	0.190	0.227	0.120	0.131	0.213	0.087	0.136	0.176	0.133
	6	0.213	0.269	0.071	0.071	0.177						0.267	0.343	0.147	0.164	0.172	0.160		0.219	0.190
SSI	1	0.360	0.411		0.356	0.177	0.151	0.091		0.258	0.114	0.525	0.636		0.338	0.221	0.326	0.153	0.430	0.303
	2	0.671	0.775		0.424	0.430						0.187	0.213		0.843	0.695	0.575		0.484	0.530
	3	0.320	0.515	0.262	0.335	0.364	0.414	0.274	0.412	0.776	0.251	0.434	2.189	0.598	0.838	0.300	0.359	0.425	0.872	0.552
	4																			
	5																			
	6																			

Tabla 4: Coeficiente de Variación para componentes modales para t=0.15 s

Mét.	Modo	Sección A-A					Sección B-B					Sección C-C					A-A	B-B	C-C	TOT
		30	60	85	110	140	30	60	85	110	140	30	60	85	110	140				
PP	1	0.078	0.074	0.040	0.054	0.086	0.050	0.061	0.063	0.075	0.062	0.072	0.069	0.039	0.040	0.068	0.067	0.062	0.058	0.062
	2	0.032	0.024	0.013	0.013	0.040						0.089	0.087	0.035	0.034	0.068	0.024		0.063	0.043
	3	0.061	0.043		0.048	0.025	0.049	0.059		0.040	0.041	0.080	0.087		0.083	0.068	0.044	0.047	0.079	0.057
	4	0.039	0.030		0.050	0.037						0.094	0.113		0.077	0.057	0.039		0.085	0.062
	5	0.105	9.005	0.156	0.767	0.044	0.133	0.152	0.111	0.143	0.075	0.121	7.035	0.127	0.263	0.151	2.015	0.123	1.540	1.226
	6	0.074	0.048	0.028	0.041	0.073	0.044	0.044	0.060	0.070	0.040	0.066	0.043	0.051	0.114	0.072	0.053	0.051	0.069	0.058
FDD	1	0.102	0.103	0.028	0.036	0.052						0.054	0.043	0.073	0.078	0.057	0.064		0.061	0.063
	2	0.143	0.211		0.096	0.013	0.047	0.058		0.028	0.021	0.109	0.164		0.270	0.097	0.116	0.038	0.160	0.105
	3	0.273	0.443		0.128	0.023						0.161	0.275		0.337	0.064	0.217		0.209	0.213
	4	0.615	1.570	0.205	0.292	0.032	0.157	0.146	0.079	0.232	0.127	0.666	2.283	0.148	0.377	0.264	0.543	0.148	0.748	0.479
	5	0.050	0.036	0.087	0.056	0.190	0.131	0.098	0.141	0.153	0.121	0.183	0.216	0.150	0.174	0.203	0.084	0.128	0.185	0.133
	6	0.235	0.299	0.054	0.069	0.127						0.211	0.274	0.135	0.178	0.228	0.157		0.205	0.181
SSI	1	0.287	0.592	0	0.176	0.133	0.311	0.251		0.285	0.279	0.547	0.799	0	0.334	0.272	0.238	0.282	0.390	0.303
	2	0.394	0.535	0	0.397	0.090						0.189	0.117	0	0.712	0.334	0.283		0.270	0.277
	3	1.346	1.492	0.466	0.759	0.538	0.637	0.307	0.431	0.664	0.256	0.894	3.567	0.694	0.949	1.236	0.920	0.459	1.468	0.949
	4																			
	5																			
	6																			

Tabla 5: Coeficiente de Variación para componentes modales para t=0.20 s

5. CONCLUSIONES

Este trabajo resume el proceso de identificación de parámetros dinámicos de un modelo a escala de un puente losa metálico, y los resultados se comparan con los de un modelo numérico en donde se considera incertidumbre en la rigidez a flexión mediante campos aleatorios.

Se realiza el ensayo de sincronización de los acelerómetros de fabricación nacional con un acelerómetro patrón a fin de obtener factores de ajuste para corregir las derivas en el tiempo. Es necesario trabajar con los factores de ajuste aplicados a los registros para cada acelerómetro porque una deriva mínima que no se corrige puede conducir a resultados erróneos.

La comparación entre los valores de las frecuencias naturales identificadas con las técnicas PP, FDD y SSI presentan diferencias máximas de 3%. La dispersión de resultados entre las 10 mediciones es insignificante con valores de CV menores a 0.1%.

Sin embargo, cuando se las compara con los resultados del modelo numérico, estas diferencias van en aumento, sobre todo en los modos superiores de vibración, en donde alcanza hasta un 10% para el modo 6.

Probablemente sea necesario optimizar el modelo numérico, variando no sólo el espesor, sino también otros parámetros, como ser, las restricciones de vínculo, el módulo de elasticidad, entre otros.

Respecto a las formas modales, el análisis cualitativo y cuantitativo, para los tres métodos utilizados en la identificación conducen a resultados satisfactorios para los tres primeros modos, y regulares para los modos superiores, con mayores diferencias en la identificación en el dominio del tiempo. El criterio de aseguramiento modal (MAC), tiene valores superiores a 0.95 en el dominio de la frecuencia en los modos más bajos, mientras que, en el dominio del tiempo, los valores disminuyen hasta 0.8 en el modo 6.

Asimismo, los resultados del coeficiente de variación indica que en PP y FDD existe una mayor homogeneidad en el promedio de las componentes de los diez impactos, mientras que SSI presenta una mayor variabilidad. Esta tendencia es similar para 0.15 y 0.20 segundos.

Como trabajo futuro, resulta conveniente profundizar las causas de estas mayores dispersiones en las formas modales, en particular con identificación en el dominio del tiempo.

REFERENCIAS

- Au, S.K., Zhang, F.L., (2012). “Fast Bayesian Ambient Modal Identification Incorporating Multiple Setups”, *J. Eng. Mech.* 138 – pp. 800–815.
- Brincker, R., Ventura, C. E. & Andersen, P. (2001). “Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition”. *Society for Experimental Mechanics*, Vol. 19 – pp. 698-703.
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). “Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition”. *Smart Materials and Structures*. Vol.10 – pp. 441–445.
- Brownjohn, J. (2002). “Ambient vibration studies for system identification of tall buildings”. *Earthquake Engineering; Structural Dynamics*. Vol. 32 Issue 1 – pp. 71-95.
- Cara, F.J., Juan, J., Alarcón, E., (2014). “Estimating the modal parameters from multiple measurement setups using a joint state space model”, *Mech. Syst. Signal Process.* 43 – pp. 171–191.
- Döhler, M., Andersen, P., Mevel, L (2010). “Data Merging for Multi-Setup Operational Modal Analysis with Data-Driven SSI”, in: *28th Int. Modal Anal. Conf. Fr. Eur.* HAL CCSD, Jacksonville, Florida USA.
- Hizal, C. (2021). “Frequency domain data merging in operational modal analysis based on least squares approach”. *Measurement*. Vol. 170, 108742.
- Mevel, L., Basseville, M., Benveniste, A., Goursat, M. (2002). “Merging sensor data from multiple measurement set-ups for non-stationary subspace-based modal analysis”, *J. Sound Vib.* 249 – pp. 719–741.
- Möller, O., Ascheri, J. & Lucero, G. (2024). “Probabilidad de estados de daño en estructuras utilizando parámetros dinámicos e inferencia bayesiana”. *Mecánica Computacional en Prensa*.
- Peeters, B. (2000). “System Identification and Damage Detection in Civil Engineering”. *Katholieke Universiteit Leuven – Faculteit Toegepaste Wetenschappen*.
- Peeters, B., De Roeck, G. (1999). “Reference-Based Stochastic Subspace Identification For output-Only Modal Analysis”. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 13(6) – pp. 855-878.
- Yan, W., Papadimitriou, C., Katafygiotis, L.S., Chronopoulos, D., (2020). “An analytical perspective on Bayesian uncertainty quantification and propagation in mode shape assembly”, *Mech. Syst. Signal Process.* 135, 106376.