

8 Experimentación

En este capítulo se van a desarrollar diferentes ensayos llevados a cabo en los laboratorios de la Escuela Superior de Ingenieros y en la pasarela de la Plaza del Agua situada junto a ellos.

Se comienza con un ensayo muy simple como es el de una viga biapoyada, se continúa con un par de ensayos con una placa metálica, luego se muestra el de una pletina y por último se ensaya una pasarela real. Se van a comparar los resultados experimentales de cada uno de ellos con los teóricos o con los proporcionados por un modelo de elementos finitos.

En todos los ensayos realizados se emplean acelerómetros del tipo 256 HX-100, excepto en el de la pasarela que se emplean acelerómetros sísmicos del modelo 86. En la Figura 8.1 se muestran las fotografías de ambos tipos de acelerómetros.

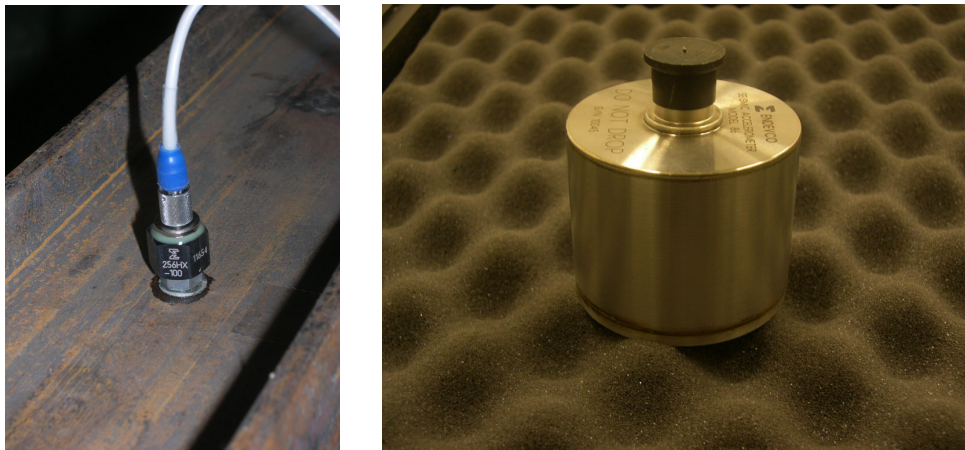


Figura 8.1 Acelerómetros de los tipos 256 HX-100 y 86 empleados para los ensayos.

Los acelerómetros sísmicos no se han unido a la estructura a ensayar utilizando ningún sistema de fijación, ya que se considera que su peso propio es suficiente para mantenerlo ligado a dicha estructura. Además, las amplitudes de las vibraciones a las que se someten en este ensayo son mínimas por lo que es altamente improbable que se pierda el contacto.

Sin embargo, los ensayos que se realizan con los otros acelerómetros requieren que el sistema de fijación sea bastante rígido. Esto es debido a que las estructuras sobre las que se colocan van a ser sometidas a impactos y a vibraciones con amplitudes mucho mayores. El sistema de fijación empleado está formado por una base y un elemento que la une al acelerómetro. La base se une a la estructura utilizando un adhesivo fuerte como es el cianocrilato, y está compuesta por la unión de una pequeña arandela y una tuerca. En esta tuerca se enrosca el elemento de unión. En la Figura 8.2 aparecen todos los elementos descritos.



Figura 8.2 Elementos del sistema de fijación para el acelerómetro 256 HX-100.

Para la adquisición de los datos se ha empleado un equipo portátil que se muestra a continuación. Este aparato se encuentra conectado a un ordenador en el que se analizan los registros tomados.



Figura 8.3 Equipo portátil empleado para la adquisición de datos.

En la adquisición de datos se ha usado un filtro de paso alto de 0.7 Hz. Las mediciones realizadas de la aceleración en el dominio del tiempo se transforman al dominio de la frecuencia realizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Se ha usado una ventana exponencial para evitar el *leakage*. Para evitar el *aliasing* se ha realizado el muestreo, al menos, a una frecuencia el doble de la frecuencia de interés.

Se han empleado dos tipos diferentes de excitadores para realizar los ensayos: un martillo y un excitador electromagnético. El excitador electromagnético permite aplicar ondas senoidales con una frecuencia controlable, no siendo posible ni medir la fuerza

que aplica ni producir otra señal diferente. Debido a esto, sólo se podrá emplear para realizar análisis modales operacionales. A este excitador se le pueden añadir diferentes masas. La masa que se emplea para todos los ensayos es de 17.9 kg, salvo en los que se indique lo contrario. Por otro lado, el martillo se emplea para todos los ensayos en los que se aplican impactos a la estructura, siendo posible medir la fuerza aplicada. Este último excitador se emplea tanto para análisis modal convencional como para el operacional.

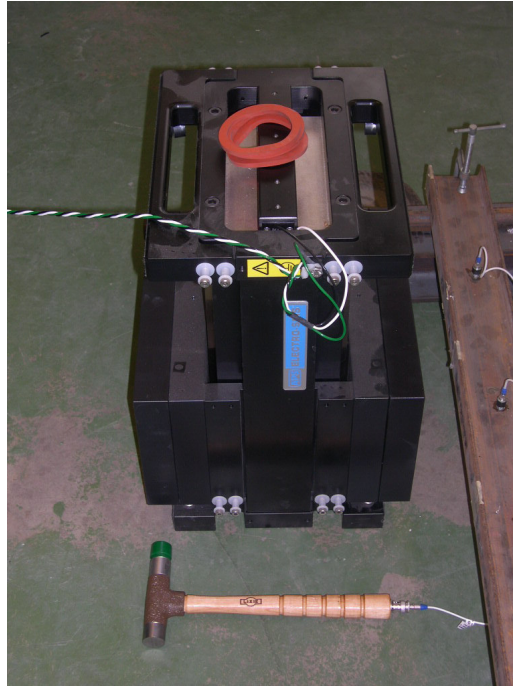


Figura 8.4 Excitadores electromagnético y de impacto empleados en los ensayos.

También se ha empleado otro tipo de excitador para comprobar el correcto funcionamiento de los acelerómetros. Es un excitador de calibración. Sólo hay que montar el acelerómetro a calibrar sobre el excitador y verificar que su respuesta coincide con la esperada.



Figura 8.5 Excitador empleado para la calibración de los acelerómetros 256 HX-100.

Para los análisis modales operacionales realizados los datos obtenidos se han analizado mediante la Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD) y el SSI-DATA utilizando un algoritmo CVA para el cálculo de las matrices. Como resultado se muestran las frecuencias naturales y los amortiguamientos de los modos de vibración identificados. También se ha calculado la correlación MAC entre los modos obtenidos por los dos métodos y se han obtenido las gráficas de los valores singulares de la matriz de densidad espectral para cada instante.

8.1 Viga biapoyada

En este ensayo se ha tomado un perfil IPN-80 de 1.30 m de longitud y se ha colocado con el alma paralela al suelo. Se ha apoyado por sus extremos sobre dos cilindros que se encuentran soldados a otros perfiles IPE. Para evitar los desplazamientos de la viga se ha fijado mediante un par de gatos. En la Figura 8.6 se muestra la viga descrita con los acelerómetros colocados y junto al excitador electromagnético. Se han utilizado seis acelerómetros 256 HX-100 para medir las aceleraciones.



Figura 8.6 Ensayo de una perfil IPN-80 biapoyado.

Los puntos en los que se han colocado los acelerómetros se han elegido de manera que no se encuentren sobre ningún nodo de ninguno de los cuatro primeros modos de vibración.

Primero se ha realizado un análisis modal de la viga utilizando un martillo de impacto y golpeando en dos posiciones diferentes de la viga. A continuación se ha hecho uno modal operacional, para el cual se ha empleado primero el martillo de impacto como excitador y luego el excitador electromagnético. También se han probado diferentes configuraciones para modelar las condiciones de contorno de viga biapoyada. Finalmente se comparan todos los resultados experimentales con los teóricos correspondientes.

8.1.1 Análisis teórico

Para calcular los valores teóricos se ha utilizado un prontuario en el que se proporcionan expresiones para los cuatro primeros modos de vibración, así como los puntos en los que se encuentran sus nodos.

La expresión para obtener las frecuencias naturales es la siguiente:

$$w_i(Hz) = \frac{A_i}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{l^4 \mu}} \quad (8.1.1)$$

donde E representa el módulo de Young, I la inercia de la viga, l su longitud y μ la masa por unidad de longitud. Los valores de A_i y de las frecuencias correspondientes se muestran en la Tabla 8.1.

	Primer modo	Segundo modo	Tercer modo	Cuarto modo
Valor de A_i	9.87	39.5	88.9	158
Frecuencias naturales (Hz)	43.795	175.270	394.468	701.079

Tabla 8.1 Valores de A_i y de las frecuencias naturales para los cuatro primeros modos de vibración para un perfil IPN-80 biapoyado.

8.1.2 Análisis modal

Este análisis se ha realizado golpeando la estructura primero en el centro y luego a un cuarto del extremo. Los resultados que se muestran a continuación son los autoespectros y las funciones de respuesta en frecuencia para los seis acelerómetros. También se ha calculado la función de coherencia entre las señales de todos los acelerómetros y la del martillo.

- Impacto central

Primero se muestran los autoespectros en los que se pueden apreciar dos picos claramente en torno a las frecuencias de 45 y 390 Hz. Si se observa la gráfica para un valor de 180 Hz se ve que no hay un pico tan claro como los otros dos, pero la curva no está tan plana como en el resto del dibujo. Esto se debe a que a dicha frecuencia se excita el segundo modo de vibración de la viga, pero como se está golpeando un nodo de dicho modo no se puede medir dicha resonancia.

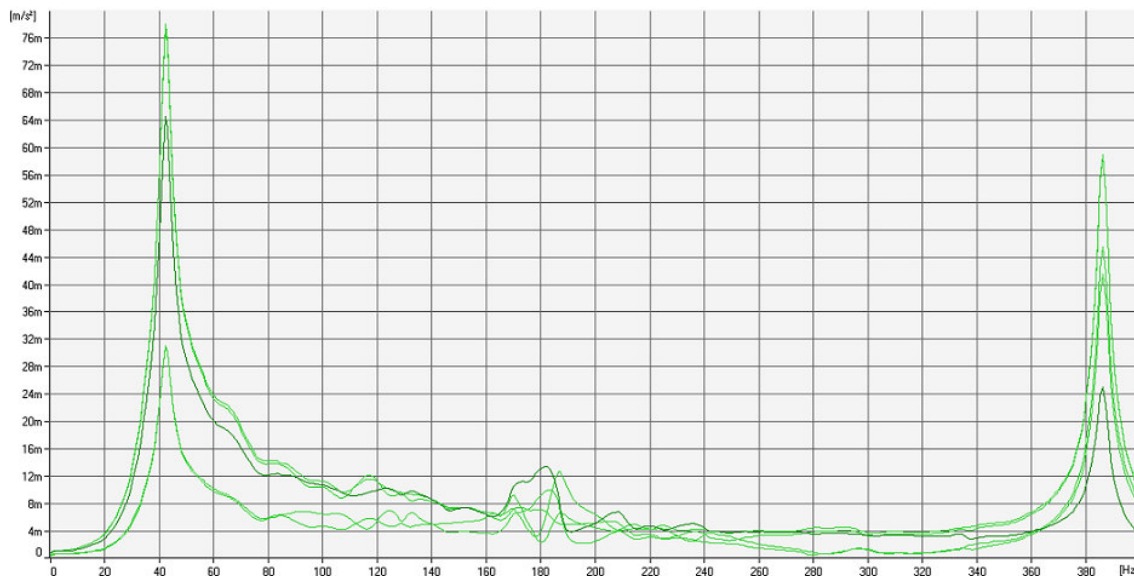


Figura 8.7 Autoespectros medidos para una viga biapoyada al aplicarle un impacto central.

También se han medido las funciones de coherencia que se muestran en la Figura 8.8. Sus valores distan mucho de los que se deben obtener teóricamente. Esto se debe principalmente a la gran sensibilidad del transductor de fuerza que lleva colocado el

martillo y que recoge cualquier mínimo movimiento, como el que se produce al sujetarlo.

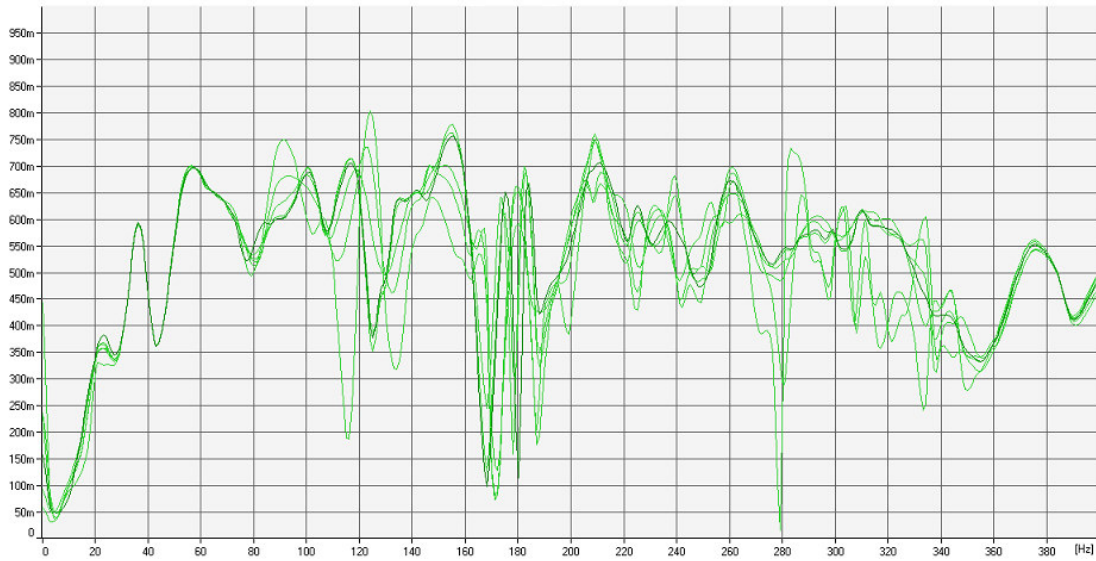


Figura 8.8 Funciones de coherencia medidas para una viga biapoyada al aplicarle un impacto central.

Por último se muestran las funciones de respuesta en frecuencia que se han obtenido. En dicha gráfica se puede observar lo mismo que se ha comentado para la de los autoespectros.

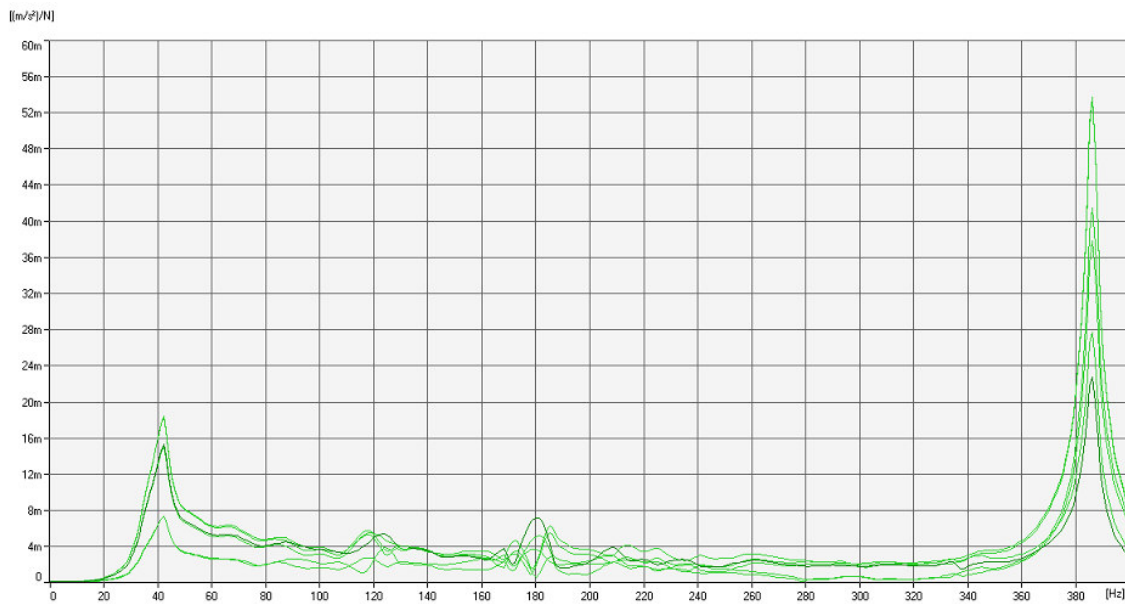


Figura 8.9 Funciones de respuesta en frecuencia medidas para una viga biapoyada al aplicarle un impacto central.

- Impacto a un cuarto del extremo

Al aplicar el golpe en un punto que no coincide con ningún nodo de los tres primeros modos, se excitan sus correspondientes frecuencias de resonancia. Así, se puede ver en la gráfica de los autoespectros que aparecen tres picos, dos para las mismas frecuencias que en el caso anterior y otro a una frecuencia de 170 Hz aproximadamente.

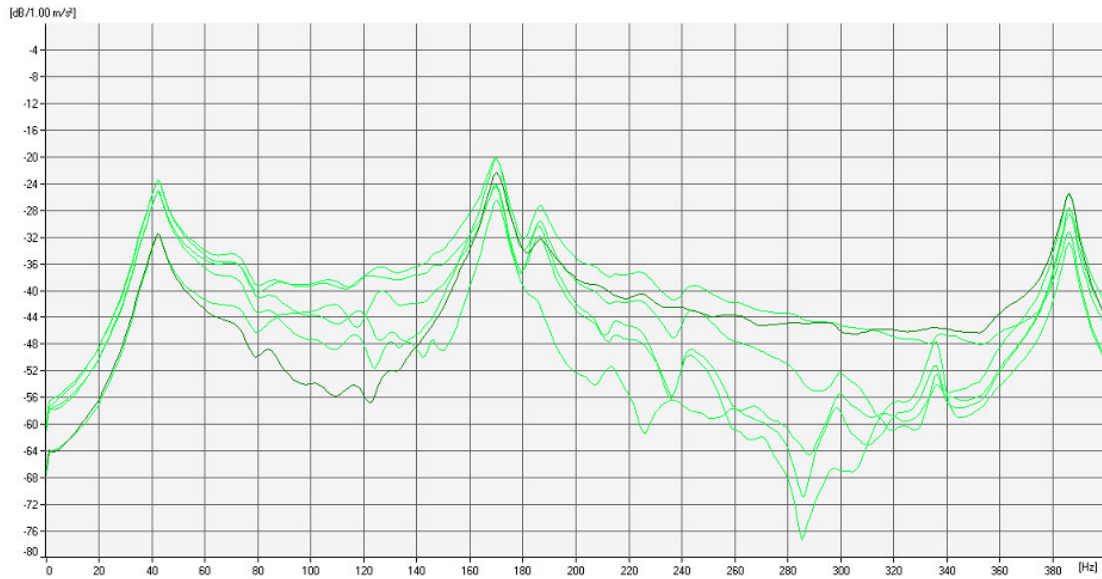


Figura 8.10 Autoespectros medidos para una viga biapoyada al aplicarle un impacto a un cuarto del extremo.

Las funciones de coherencia medidas en este caso son peores que en el caso anterior no llegando ni a alcanzar el valor de 0.5.

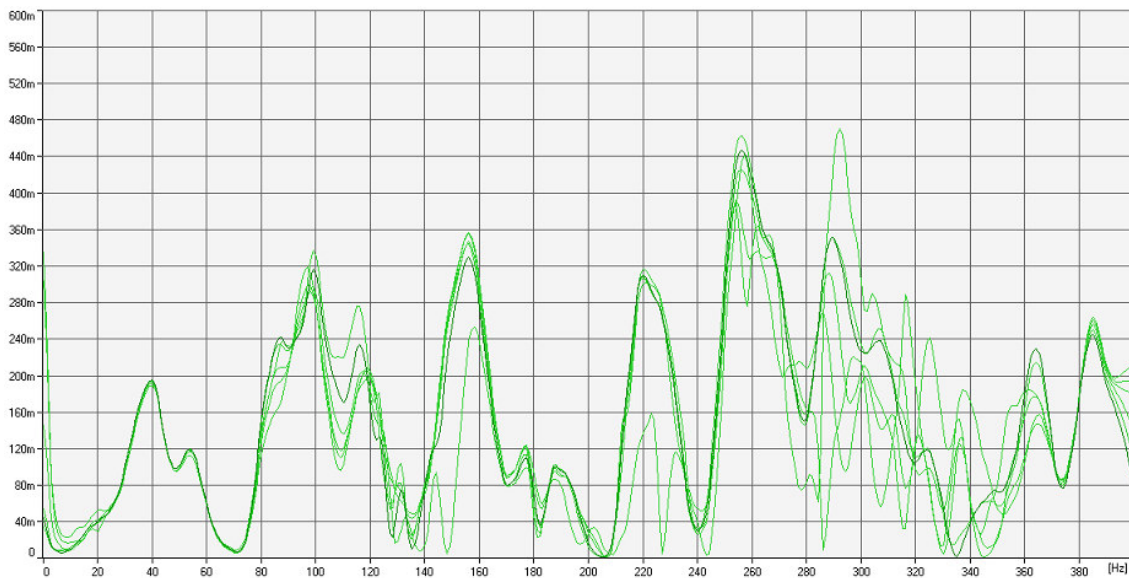


Figura 8.11 Funciones de coherencia medidas para una viga biapoyada al aplicarle un impacto a un cuarto del extremo.

Finalmente se representan las funciones de respuesta en frecuencia para los seis puntos de medida, en la que se puede apreciar claramente los tres picos mencionados anteriormente.

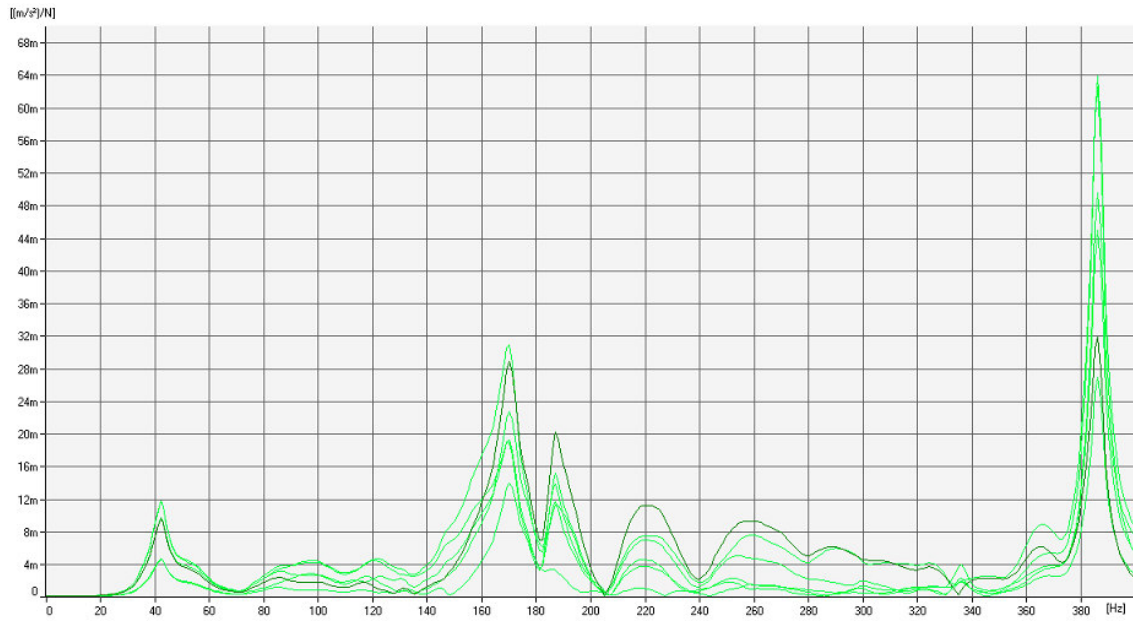


Figura 8.12 Funciones de respuesta en frecuencia medidas para una viga biapoyada al aplicarle un impacto a un cuarto del extremo.

8.1.3 Análisis modal operacional empleando un martillo excitador

La gráfica de los valores singulares de la matriz de densidad espectral medida presenta claramente tres picos que se corresponden con las tres primeras frecuencias naturales de la estructura.

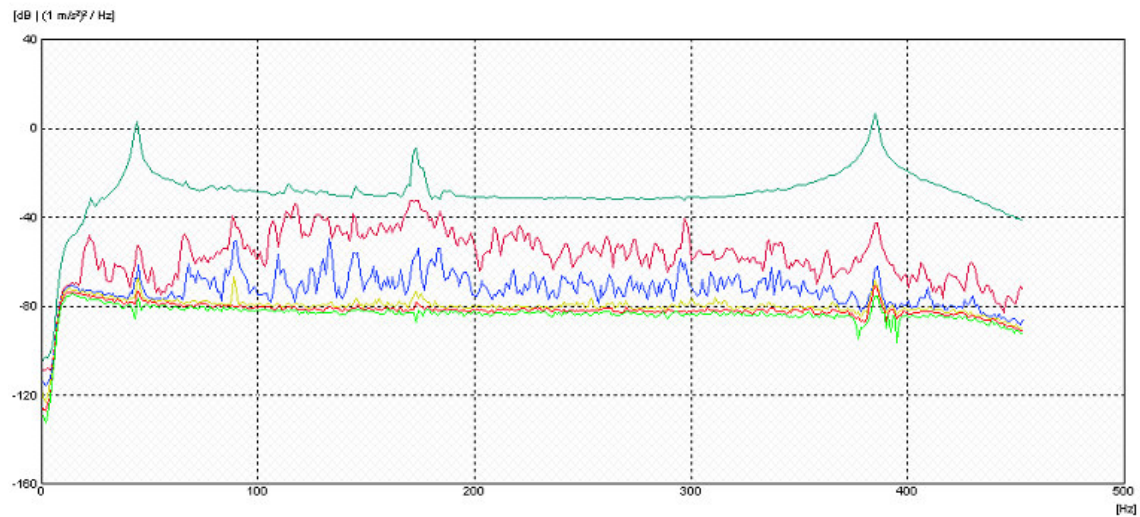


Figura 8.13 Valores singulares de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una viga biapoyada excitando con un impacto.

Los modos obtenidos en este análisis reproducen perfectamente los teóricos, y son iguales para los dos casos que se muestran a continuación.

- Impacto central

Los resultados que se han obtenido se muestran en las tablas siguientes:

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)
FDD	43.999	172.612	385.030	1.554	0.384	0.215
SSI	43.926	172.962	384.885	0.762	0.170	0.160

Tabla 8.2 Valores de las frecuencias naturales y de los amortiguamientos obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una viga biapoyada excitada con un impacto central.

Se puede observar muy buena concordancia entre las frecuencias naturales calculadas por los dos métodos, mientras que en los amortiguamientos las diferencias si son bastante grandes. Los tres modos calculados por los dos métodos son idénticos.

MAC	Primer modo SSI	Segundo modo SSI	Tercer modo SSI
Primer modo FDD	1	0.0072	0.0190
Segundo modo FDD	0.0104	0.9999	0.0611
Tercer modo FDD	0.0195	0.0660	1

Tabla 8.3 Valores de MAC obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una viga biapoyada excitada con un impacto central.

- Impacto a un cuarto del extremo

Los resultados calculados se muestran en las tablas siguientes. Cabe decir lo mismo de las frecuencias, amortiguamientos y modos de vibración que en el caso anterior.

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)
FDD	45.153	173.033	385.698	1.7	0.426	0.200
SSI	44.942	172.962	385.346	0.985	0.379	0.142

Tabla 8.4 Valores de las frecuencias naturales y de los amortiguamientos obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una viga biapoyada excitada con un impacto a un cuarto del extremo.

MAC	Primer modo SSI	Segundo modo SSI	Tercer modo SSI
Primer modo FDD	1	0.0029	0.0128
Segundo modo FDD	0.0047	1	0.0628
Tercer modo FDD	0.0102	0.0633	1

Tabla 8.5 Valores de MAC obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una viga biapoyada excitada con un impacto a un cuarto del extremo.

Las frecuencias naturales en este caso son casi iguales que en el caso anterior, aunque ligeramente mayores, mientras que en los amortiguamientos aparecen más discrepancias.

8.1.4 Análisis modal operacional empleando un excitador electromagnético

- Frecuencia 1 Hz

Las medidas realizadas en este caso son bastante malas debido a la presencia de armónicos. Por este motivo, ninguno de los dos métodos obtiene ningún resultado fiable. En la siguiente figura se muestra la representación de los valores singulares de la matriz de densidad espectral. Se puede ver un pico pero no es un modo real, es un armónico. Esto se ha comprobado viendo la animación de dicho modo. Todas las señales medidas presentan pequeños picos para todos los valores enteros de frecuencia.

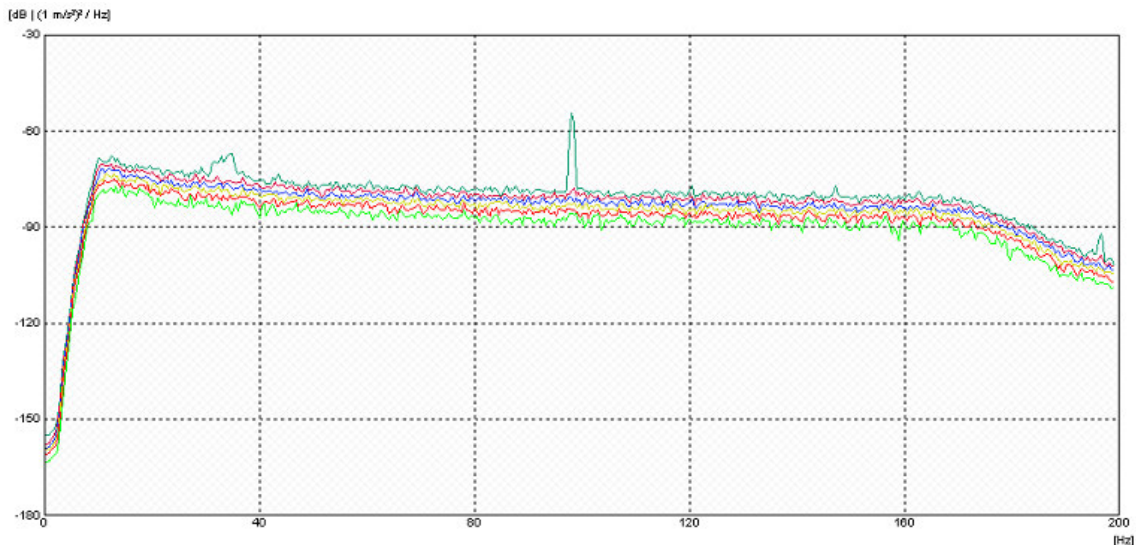


Figura 8.14 Valores singulares de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una viga biapoyada utilizando un excitador electromagnético con una frecuencia de 1 Hz.

- Frecuencia 30 Hz

En este caso aparecen armónicos cada 30 Hz, que son los picos que presenta la gráfica junto con las resonancias.

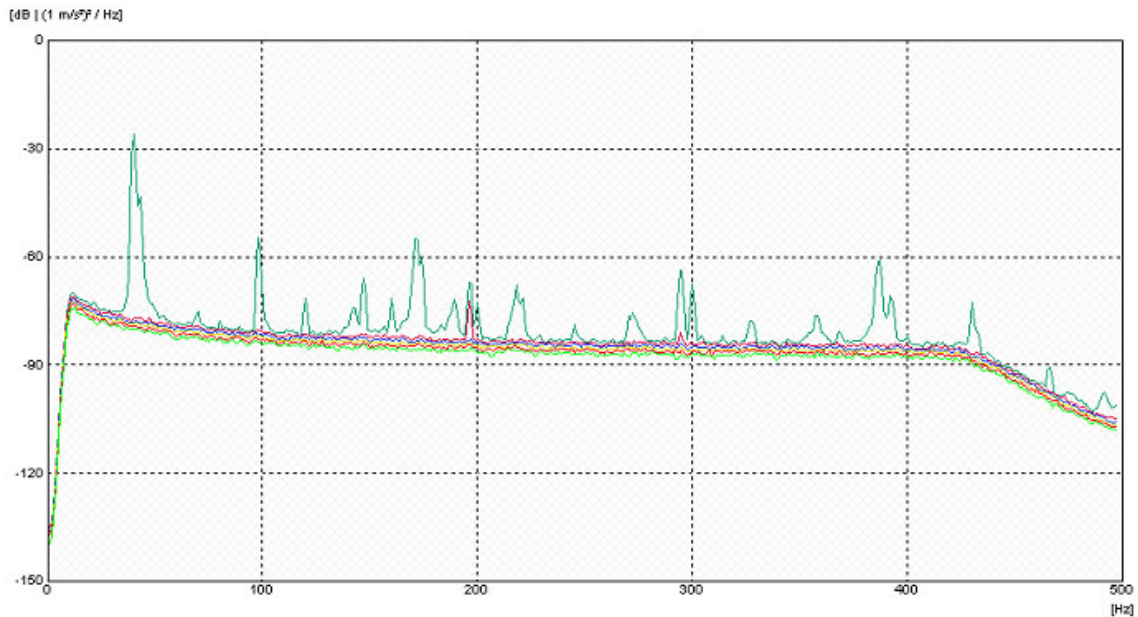


Figura 8.15 Valores singulares de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una viga biapoyada utilizando un excitador electromagnético con una frecuencia de 30 Hz.

Los resultados que se han obtenido se muestran en las tablas siguientes:

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)
FDD	40.023	171.298	386.741	1.137	0.435	0.165
SSI	40.076	171.582	385.231	0.058	0.733	0.539

Tabla 8.6 Valores de las frecuencias naturales y de los amortiguamientos obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una viga biapoyada utilizando un excitador electromagnético con una frecuencia de 30 Hz.

Las frecuencias naturales calculadas por los dos métodos son muy parecidas, mientras que los amortiguamientos difieren mucho más. Los tres modos calculados por los dos métodos son idénticos.

MAC	Primer modo SSI	Segundo modo SSI	Tercer modo SSI
Primer modo FDD	1	0.0268	0.0486
Segundo modo FDD	0.0081	0.9995	0.0682
Tercer modo FDD	0.0691	0.0899	0.9992

Tabla 8.7 Valores de MAC obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una viga biapoyada utilizando un excitador electromagnético con una frecuencia de 30 Hz.

También se ha realizado este mismo ensayo pero colocando una masa de 30.6 kg. sobre el excitador. En la siguiente figura se han marcado varios picos de la gráfica de valores singulares normalizados de la matriz de densidad espectral. El primero de ellos se corresponde con la primera frecuencia natural. El segundo es un armónico. El tercero y el cuarto representan el mismo modo de vibración. El quinto y el sexto también son armónicos. Y los dos últimos representan el tercer modo de vibración.

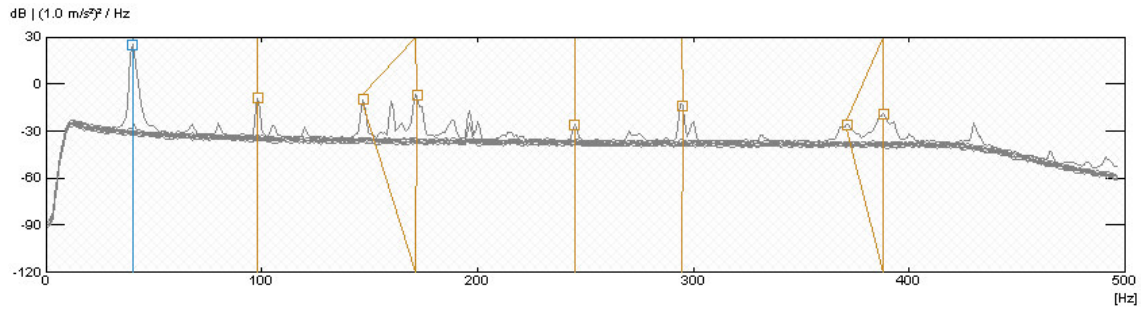


Figura 8.16 Valores singulares normalizados de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una viga biapoyada utilizando un excitador electromagnético con una frecuencia de 30 Hz y una masa de 30.6 kg.

Los resultados que se han obtenido utilizando una masa mayor se muestran en las tablas siguientes:

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)
FDD	40.014	171.465	387.947	1.163	0.301	0.405
SSI	40.046	166.766	388.684	0.058	0.733	0.539

Tabla 8.8 Valores de las frecuencias naturales y de los amortiguamientos obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una viga biapoyada utilizando un excitador electromagnético con una masa de 30.6 kg.

Hay muy buena concordancia entre las frecuencias naturales calculadas por los dos métodos, mientras que en los amortiguamientos las diferencias son bastante grandes. Los tres modos calculados por los dos métodos son prácticamente idénticos.

MAC	Primer modo SSI	Segundo modo SSI	Tercer modo SSI
Primer modo FDD	1	0.0159	0.0781
Segundo modo FDD	0.0077	0.9985	0.0259
Tercer modo FDD	0.0576	0.0872	0.9983

Tabla 8.9 Valores de MAC obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una viga biapoyada utilizando un excitador electromagnético con una masa de 30.6 kg.

8.1.5 Comparación entre los valores teóricos y los experimentales

En la Tabla 8.10 se comparan todos los resultados experimentales obtenidos para este ensayo de la viga biapoyada con los teóricos. Existe un gran parecido entre todos los valores de las frecuencias naturales, siendo la máxima diferencia menor del 9%. Observando los errores se puede concluir que tanto la primera frecuencia como la segunda se calculan de forma más exacta en los ensayos de impactos. Mientras que la tercera se obtiene con menor error de los ensayos con el excitador electromagnético. Comparando los errores entre los resultados analizados con FDD o con SSI no se puede concluir que ninguno de los dos proporcione estimaciones más precisas.

		w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	Error w_1 (%)	Error w_2 (%)	Error w_3 (%)
Impacto central	FDD	43.999	172.612	385.030	0.47	1.52	2.39
	SSI	43.926	172.962	384.885	0.30	1.32	2.43
Impacto en el extremo	FDD	45.153	173.033	385.698	3.10	1.28	2.22
	SSI	44.942	172.962	385.346	2.62	1.34	2.31
Excitador 30 Hz	FDD	40.023	171.298	386.741	8.61	2.27	1.96
	SSI	40.076	171.582	385.231	8.49	2.10	2.34
Excitador 30 Hz doble masa	FDD	40.014	171.465	387.947	8.63	2.17	1.65
	SSI	40.046	166.766	388.684	8.56	4.85	1.47

Tabla 8.10 Comparación de los valores teóricos de las frecuencias naturales con los experimentales para una viga biapoyada.

Las diferencias entre los valores teóricos y experimentales pueden deberse a varias causas. En este caso las más importantes son los apoyos, ya que no se ha podido reproducir exactamente la condición de viga biapoyada. Se puede mejorar utilizando un número mayor de gatos para sujetarla. Otra fuente de inexactitud ha sido que los gatos no ejercen la fuerza en la misma vertical del cilindro sobre el que se apoya la viga, por lo que se está aplicando un pequeño momento que puede ayudar a la flexión de la viga. Esto hace que la frecuencia teórica necesaria para excitar los modos sea menor. Probablemente esta sea la causa de que sólo cuatro de las veinticuatro frecuencias naturales estimadas sean superiores al valor teórico esperado.

8.1.6 Comparación entre diferentes apoyos

Se han realizado ensayos probando diferentes configuraciones para los apoyos. Los mejores resultados se han obtenido empleando los gatos. En otro se ha hecho uso de dos trozos de neopreno (uno para cada apoyo) y en otro simplemente se ha dejado apoyada sin más. Las diferencias entre los resultados obtenidos en los tres casos son bastante importantes.



Figura 8.17 Fotografías de las tres condiciones de contorno ensayadas.

- Simplemente apoyada

En este caso no se han obtenido buenos resultados y sólo se ha podido reconocer el segundo modo de vibración con una exactitud relativamente buena. En el gráfico de los valores singulares normalizados de la matriz de densidad espectral no se aprecian claramente las frecuencias naturales.

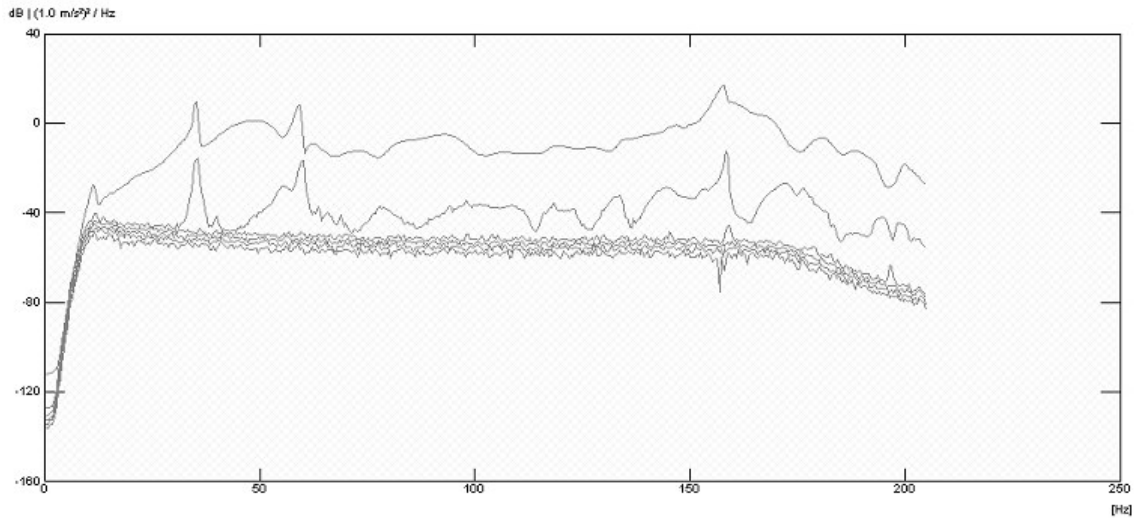


Figura 8.18 Valores singulares normalizados de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una viga simplemente apoyada.

- Con neoprenos

Sólo se ha podido identificar la primera frecuencia de vibración empleando la Descomposición en el Dominio de la Frecuencia, y su modo de vibración no es tan exacto como en los demás casos. Con el método SSI no se ha podido obtener ninguna frecuencia natural.

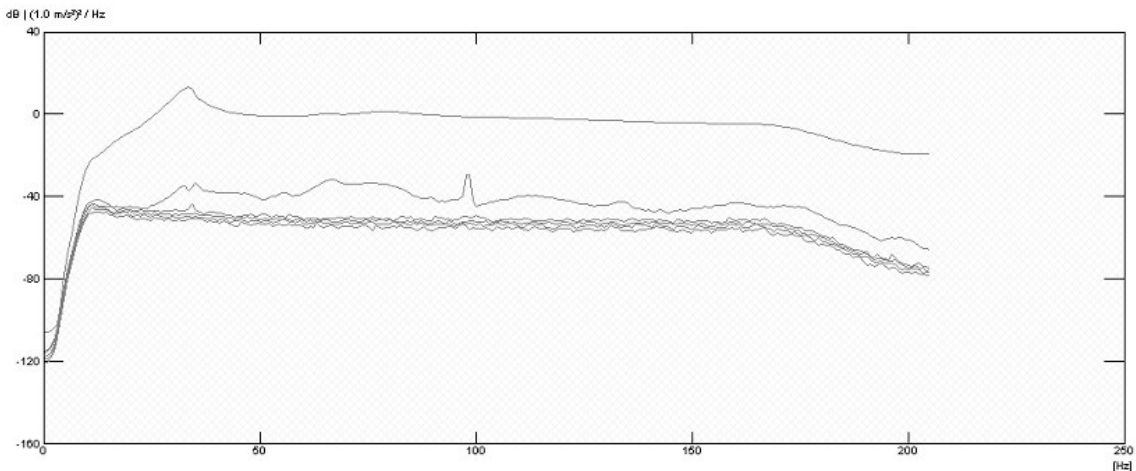


Figura 8.19 Valores singulares normalizados de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una viga biapoyada sobre neoprenos.

8.2 Placa biapoyada

Se ha ensayado una placa de aluminio de $48 \times 29.5 \text{ cm}$, con un espesor de 1 cm . Se han apoyado sus laterales más cortos sobre dos cilindros que se encuentran soldados a dos perfiles IPE. Para evitar los desplazamientos de la placa se ha fijado mediante tres gatos en cada lado. En la Figura 8.19 se muestra la placa descrita con los acelerómetros colocados. Se han utilizado nueve acelerómetros 256 HX-100 para medir las aceleraciones.

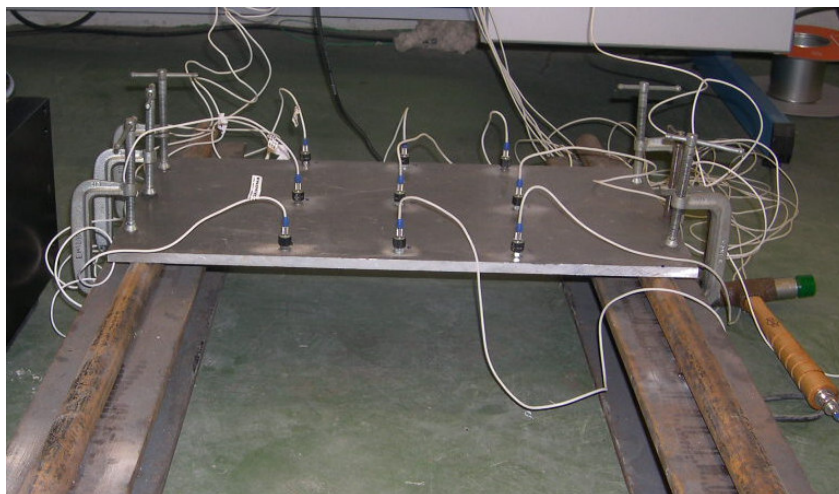


Figura 8.20 Ensayo de la placa biapoyada realizado.

Los puntos en los que se han colocado los acelerómetros se han elegido de manera que se encuentren uniformemente distribuidos sobre la placa.

Sólo se realizan en este caso análisis modales operacionales, utilizando como fuente de excitación un martillo de impacto. Se van a estudiar los casos en los que el impacto se dé en la zona central de la placa y a un cuarto del extremo de la misma.

8.2.1 Análisis teórico

Se ha realizado un modelo de elementos finitos empleando *ANSYS* para estimar los valores teóricos de este ensayo. Las frecuencias naturales y los amortiguamientos obtenidos se muestran en la siguiente tabla para los siete primeros modos de vibración.

	Primer modo	Segundo modo	Tercer modo	Cuarto modo	Quinto modo	Sexto modo	Séptimo modo
Frecuencia natural (Hz)	100.34	237.01	410.30	600.82	812.62	975.24	1176.5
Amortiguamiento (%)	0.773	1.247	0.858	1.272	1.554	0.985	1.357

Tabla 8.11 Frecuencias naturales y amortiguamientos obtenidos para una placa biapoyada utilizando el M.E.F.

En la Figura 8.21 se muestran las deformadas correspondientes a los siete primeros modos de vibración.

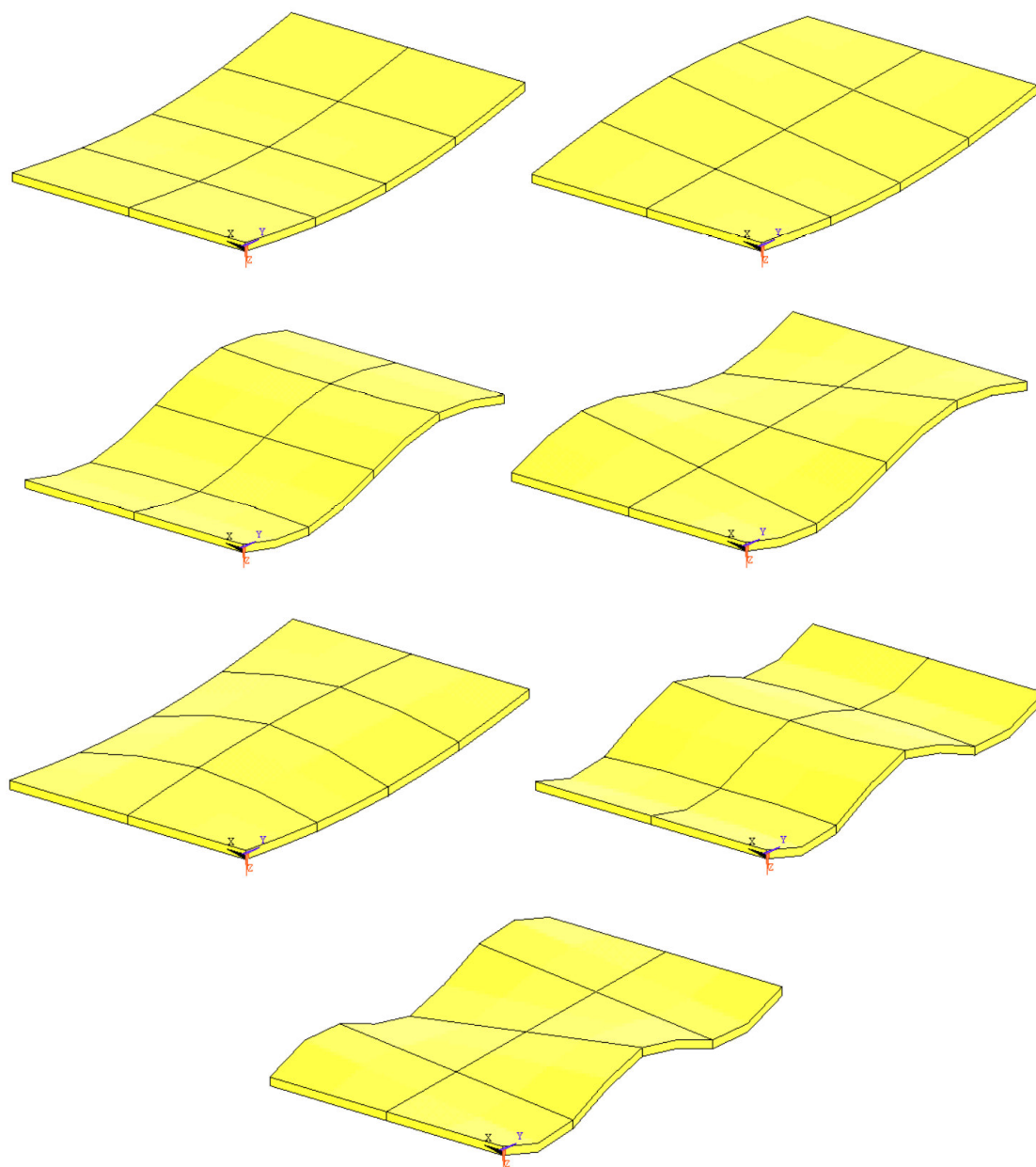


Figura 8.21 Deformadas correspondientes a los siete primeros modos de vibración de una placa biapoyada.

8.2.2 Análisis modal operacional empleando un martillo excitador

- Impacto central

En este ensayo se han obtenido unos resultados bastante buenos. Se han identificado perfectamente los seis primeros modos de vibración por los métodos FDD y SSI. Primero se muestra una gráfica con los valores singulares en la que se pueden apreciar muy bien cuatro de los picos.

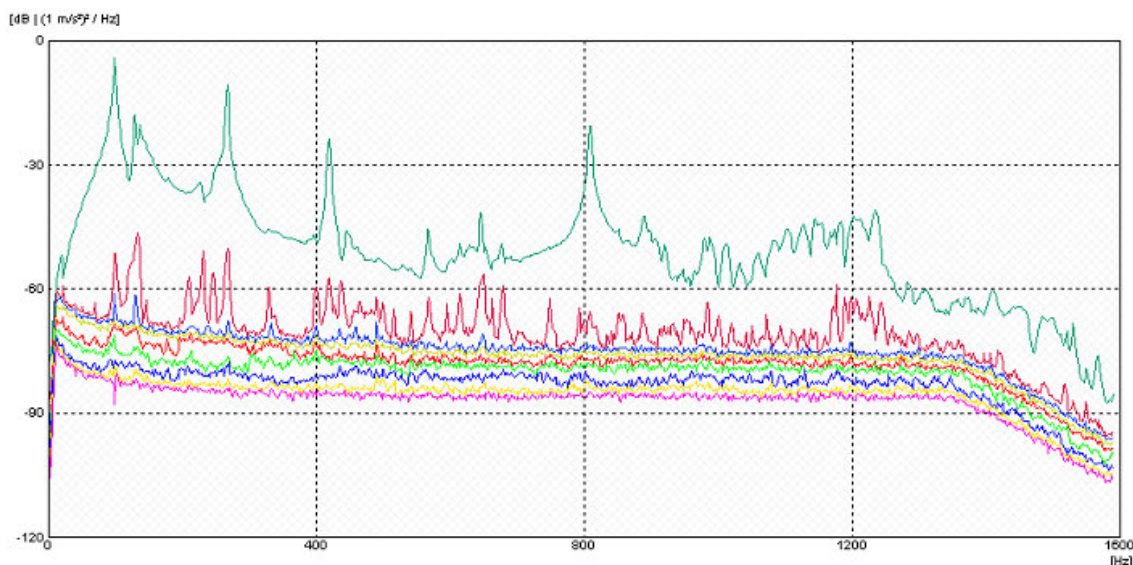


Figura 8.22 Valores singulares de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una placa biapoyada excitando con un impacto en su zona central.

A continuación se muestran los valores de las frecuencias naturales y amortiguamientos obtenidos.

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	w_4 (Hz)	w_5 (Hz)	w_6 (Hz)
FDD	98.963	267.328	418.922	646.086	809.189	984.964
SSI	98.010	266.237	419.006	642.165	809.470	983.156

Tabla 8.12 Valores de las frecuencias naturales obtenidas para los seis primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa biapoyada excitada con un impacto central.

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)	ζ_6 (%)
FDD	1.312	0.473	0.361	0.252	0.183	0.626
SSI	0.137	0.417	0.022	2.600	0.200	1.320

Tabla 8.13 Valores de los amortiguamientos obtenidos para los seis primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa biapoyada excitada con un impacto central.

Como en los casos anteriores se puede ver que las frecuencias naturales estimadas por los dos métodos son prácticamente iguales, mientras que los coeficientes de amortiguamiento son bastante diferentes. En la siguiente tabla se muestra el valor del MAC entre los seis modos estimados por el FDD y el SSI.

MAC	Primer modo SSI	Segundo modo SSI	Tercer modo SSI	Cuarto modo SSI	Quinto modo SSI	Sexto modo SSI
Primer modo FDD	0.9997	0.0125	0.0070	0.0171	0.4034	0.0955
Segundo modo FDD	0.0156	0.9998	0.0228	0.0125	0.0066	0.0187
Tercer modo FDD	0.0196	0.0298	0.9998	0.0573	0.0153	0.0817
Cuarto modo FDD	0.0552	0.0374	0.0452	0.9912	0.0988	0.0319
Quinto modo FDD	0.4022	0.0061	0.0061	0.0219	0.9999	0.0217
Sexto modo FDD	0.0259	0.0789	0.0920	0.0830	0.2027	0.9464

Tabla 8.14 Valores de MAC obtenidos para los seis primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa biapoyada excitada con un impacto central.

Se pueden hacer unas representaciones, llamadas diagramas de estabilidad, que proporcionan una idea de lo bien que se pueden ver ciertos modos de vibración al realizar el análisis de los datos. Indican las frecuencias a la que pueden encontrarse los modos. En la siguiente figura se muestra el diagrama de estabilidad del análisis realizado mediante el SSI, en el que aparecen marcas rojas, verdes y marrones. Las rojas indican que el modo que se ha obtenido durante el proceso de cálculo a esa frecuencia es estable, mientras que las verdes indican que es inestable. Por otro lado las marrones sólo dan información de la existencia de ruido. Lo ideal es que para un modo dado, exista para su frecuencia natural una columna entera de marcas rojas. Pero esto no suele pasar. Cuanto mejor es la medida, menor cantidad de marcas marrones aparecen y las marcas rojas aparecen concentradas en columnas, indicando la presencia de frecuencias naturales.

En la Figura 8.22 se puede apreciar la existencia de seis columnas de marcas rojas y verdes que indican la posible existencia de una frecuencia natural para dicho valor.

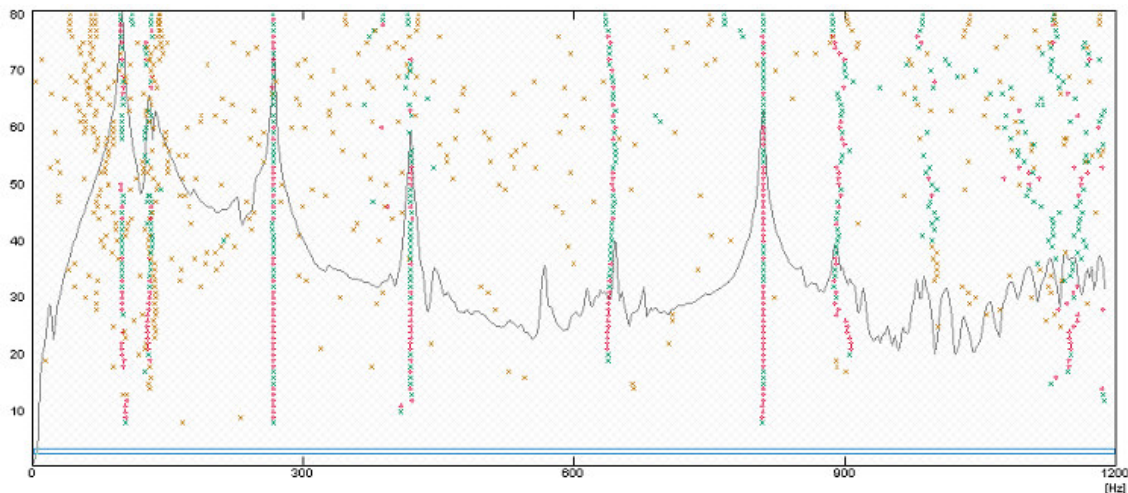


Figura 8.23 Diagrama de estabilidad obtenido del análisis modal operacional de una placa biapoyada mediante el SSI, cuando se excita con un impacto en su zona central.

- Impacto a un cuarto del extremo

Los resultados de este ensayo no fueron tan buenos como los del anterior, pero han permitido obtener los tres primeros modos de vibración por los dos métodos (FDD y SSI) con bastante exactitud. La gráfica de los valores singulares de la matriz de densidad espectral no aparece tan clara, si bien se puede distinguir que los dos picos de mayor amplitud representan el primer y el tercer modo. El segundo se encuentra en la zona central entre esos picos de menor altura.

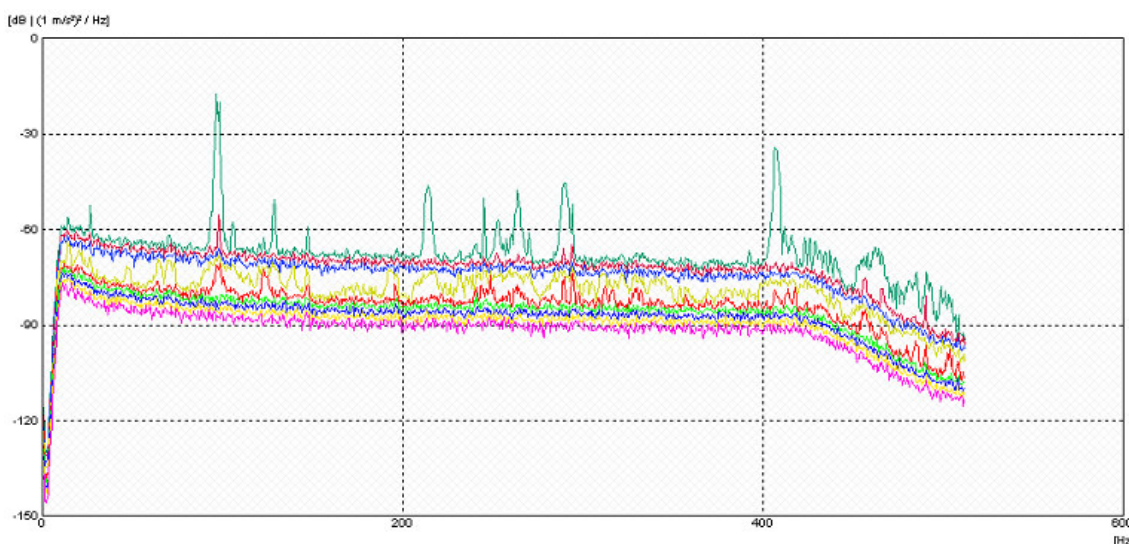


Figura 8.24 Valores singulares de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una placa biapoyada excitando con un impacto a un cuarto del extremo.

Los resultados de frecuencias naturales y de amortiguamientos son los siguientes:

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)
FDD	96.365	263.737	406.847	0.165	0.226	0.191
SSI	96.765	260.889	406.939	0.085	0.268	0.053

Tabla 8.15 Valores de las frecuencias naturales y de los amortiguamientos obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa biapoyada excitada con un impacto a un cuarto del extremo.

Hay muy buena concordancia entre las frecuencias naturales calculadas por los dos métodos, mientras que en los amortiguamientos las diferencias si son bastante grandes. Los tres modos calculados por los dos métodos son prácticamente idénticos.

MAC	Primer modo SSI	Segundo modo SSI	Tercer modo SSI
Primer modo FDD	0.9995	0.0068	0.0251
Segundo modo FDD	0.0643	0.9797	0.0512
Tercer modo FDD	0.0261	0.0843	0.9998

Tabla 8.16 Valores de MAC obtenidos para los tres primeros modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa biapoyada excitada con un impacto a un cuarto del extremo.

En este caso el diagrama de estabilidad se muestra mucho más confuso puesto que se pueden distinguir hasta cinco columnas de marcas rojas y verdes, mientras que sólo tres de ellas representan realmente a modos de vibración.

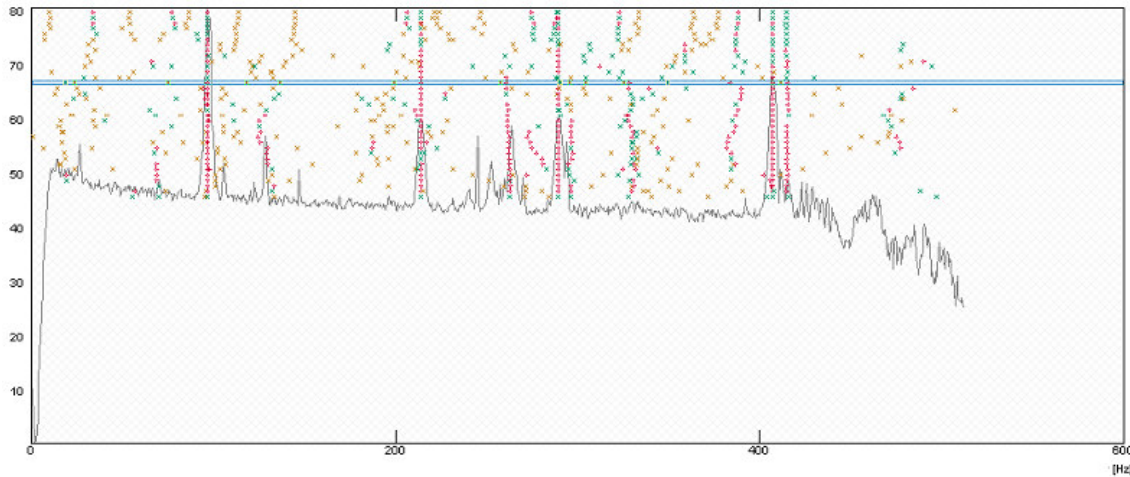


Figura 8.25 Diagrama de estabilidad obtenido del análisis modal operacional de una placa biapoyada mediante el SSI, cuando se excita con un impacto a un cuarto del extremo.

8.2.3 Comparación entre los valores teóricos y los experimentales

A continuación se muestra la comparación entre los valores de frecuencia naturales y amortiguamientos obtenidos experimentales con los que se han calculado mediante elementos finitos. La primera y la tercera frecuencia natural se estiman con bastante precisión en ambos casos, mientras que la segunda tiene un porcentaje de error un orden mayor. Esto se puede deber a las condiciones de contorno. Al igual que ocurría en el caso de una viga biapoyada, aquí también pueden mejorarse los apoyos empleando mayor número de gatos u otro sistema de fijación. En este caso tampoco se han podido colocar los gatos de forma que su fuerza caiga sobre los cilindros en los que apoya la placa.

		w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	Error w_1 (%)	Error w_2 (%)	Error w_3 (%)
Impacto central	FDD	98.963	267.328	418.922	1.37	12.79	2.10
	SSI	98.010	266.237	419.006	2.32	12.33	2.12
Impacto en el extremo	FDD	96.365	263.737	406.847	3.96	11.28	0.84
	SSI	96.765	260.889	406.939	3.56	10.08	0.82

Tabla 8.17 Comparación de los valores teóricos de las frecuencias naturales con los experimentales para una placa biapoyada.

De los amortiguamientos no se obtienen medidas fiables. Los porcentajes de error son elevadísimos. El mínimo porcentaje de error no es inferior al 50%, cifra que resulta inadmisibles para aplicaciones en las que este parámetro sea relevante.

		ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	Error ζ_1 (%)	Error ζ_2 (%)	Error ζ_3 (%)
Impacto central	FDD	1.312	0.473	0.361	69.73	62.07	57.93
	SSI	0.137	0.417	0.022	82.28	66.56	97.44
Impacto en el extremo	FDD	0.165	0.226	0.191	78.65	81.88	77.74
	SSI	0.085	0.268	0.053	89.00	78.51	93.82

Tabla 8.18 Comparación de los valores teóricos de los coeficientes de amortiguamiento con los experimentales para una placa biapoyada.

8.3 Placa en voladizo

Se ha ensayado una placa de aluminio de 48 x 29.5 cm, con un espesor de 1 cm, la misma que en el caso anterior. Se ha sujetado por uno de sus laterales más cortos sobre el excitador electromagnético. Para evitar los desplazamientos de la viga se ha fijado mediante gatos. Se han utilizado doce acelerómetros 256 HX-100 para medir las aceleraciones.

Los acelerómetros se han colocado aprovechando las mismas localizaciones que en el caso anterior, y se han añadido tres más que se han colocado en el extremo libre.

Sólo se realizan en este caso análisis modales operacionales, utilizando primero como fuente de excitación un martillo de impacto. Se va a estudiar el caso en el que el impacto se dé en el extremo de la misma. Luego se utilizará como fuente el excitador electromagnético, con varias frecuencias diferentes: 2, 30, 45 y 100 Hz.

8.3.1 Análisis teórico

Se ha realizado un modelo de elementos finitos para estimar los valores teóricos de este ensayo, con el programa de Elementos Finitos ANSYS, versión 7.0. Las frecuencias naturales y los amortiguamientos obtenidos se muestran en la siguiente.

	Primer modo	Segundo modo	Tercer modo	Cuarto modo	Quinto modo	Sexto modo	Séptimo modo
Frecuencia natural (Hz)	36.343	130.58	226.62	436.84	638.17	722.51	846.07
Amortiguamiento (%)	1.031	1.41	1.071	1.626	1.477	2.021	0.968

Tabla 8.19 Frecuencias naturales y amortiguamientos obtenidos para una placa en voladizo utilizando el M.E.F.

En la Figura 8.26 se muestran las deformadas correspondientes estos siete modos de vibración.

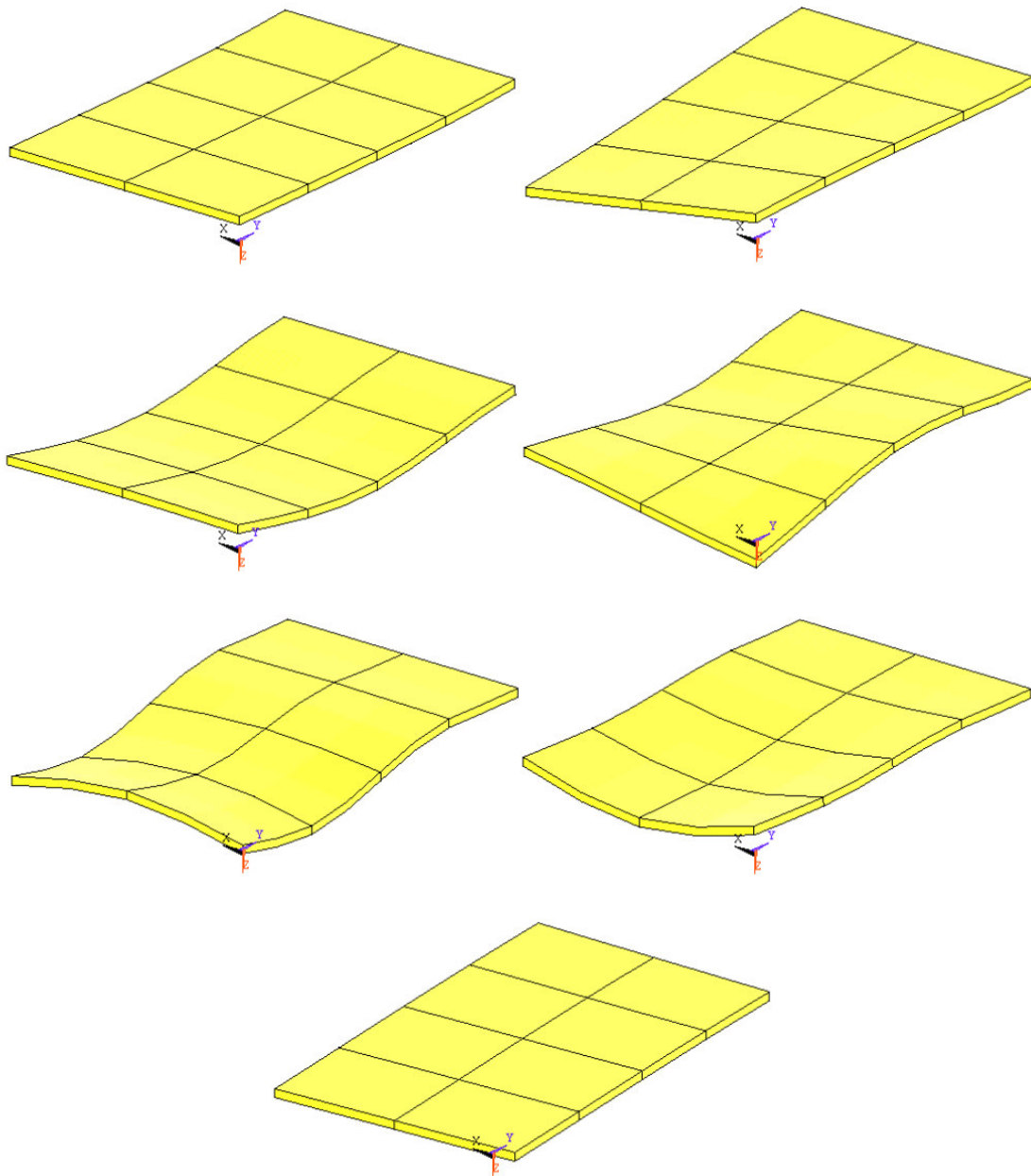


Figura 8.26 Deformadas correspondientes a los siete primeros modos de vibración de una placa biapoyada.

8.3.2 Análisis modal operacional empleando un martillo excitador

En la Figura 8.27 se muestra una fotografía del ensayo realizado en este caso. Se han empleado dos perfiles IPE para sujetar la placa de forma que uno queda bajo ella y el otro encima. Para evitar movimientos relativos se han utilizado seis gatos, para fijar todo el conjunto y proporcionarle rigidez a la unión.

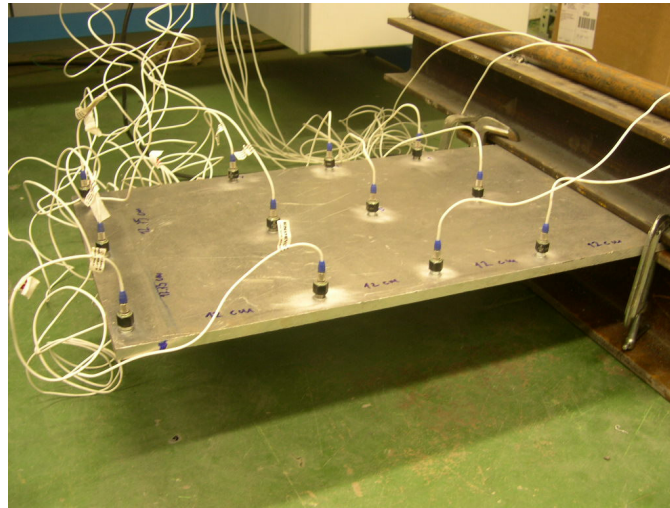


Figura 8.27 Ensayo de la placa en voladizo realizado.

Primero se muestra la gráfica con los valores singulares normalizados de matriz de densidad espectral, en la que pueden apreciarse seis picos más o menos claros que se corresponden con las seis primeras frecuencias naturales. Las líneas verticales muestran cuales han sido los picos elegidos como frecuencias naturales y que representan los modos.

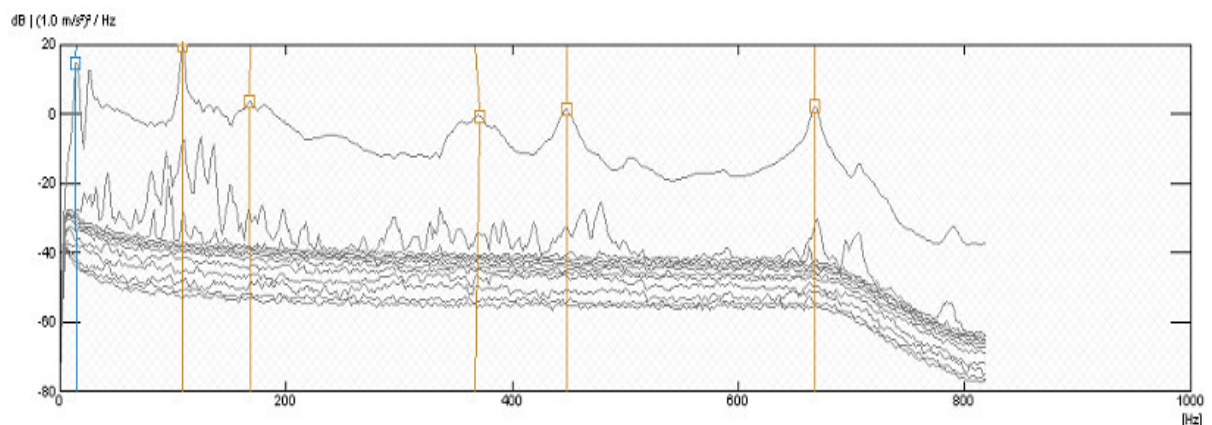


Figura 8.28 Valores singulares normalizados de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una placa en voladizo cuando se excita con un impacto en su extremo libre.

En este caso no se ha obtenido ningún resultado mediante el método SSI. Si se observa el diagrama de estabilidad de la Figura 8.28 se puede ver que hay varias columnas de marcas verdes con alguna roja. Pero no son suficientes para que se pueda detectar con este método los modos de vibración.

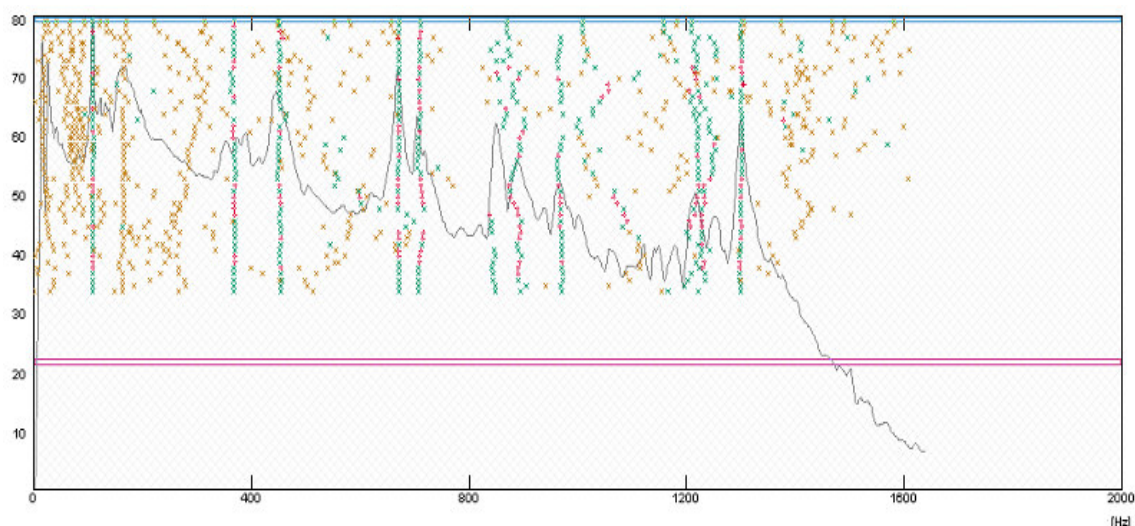


Figura 8.29 Diagrama de estabilidad obtenido del análisis modal operacional de una placa en voladizo mediante el SSI, cuando se excita con un impacto en su extremo libre.

A continuación se muestran los valores de las frecuencias naturales y amortiguamientos obtenidos.

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	w_4 (Hz)	w_5 (Hz)	w_6 (Hz)
FDD	15.3	108.4	163.7	370	448.5	668.6

Tabla 8.20 Valores de las frecuencias naturales obtenidas para los seis primeros modos de vibración utilizando el método FDD para el caso de una placa en voladizo excitada con un impacto en su extremo libre.

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)	ζ_6 (%)
FDD	4.484	1.159	8.07	4.464	2.517	0.5624

Tabla 8.21 Valores de los amortiguamientos obtenidos para los seis primeros modos de vibración utilizando el método FDD para el caso de una placa en voladizo excitada con un impacto en su extremo libre.

8.3.3 Análisis modal operacional empleando un excitador electromagnético

En este caso se ha colocado la placa sobre la parte superior del excitador electromagnético. Se ha fijado con tres gatos de forma que no se permite el movimiento relativo entre ambos. Se han empleado frecuencias de 2, 30, 45 y 100 Hz para excitar la placa. La configuración se muestra a continuación:

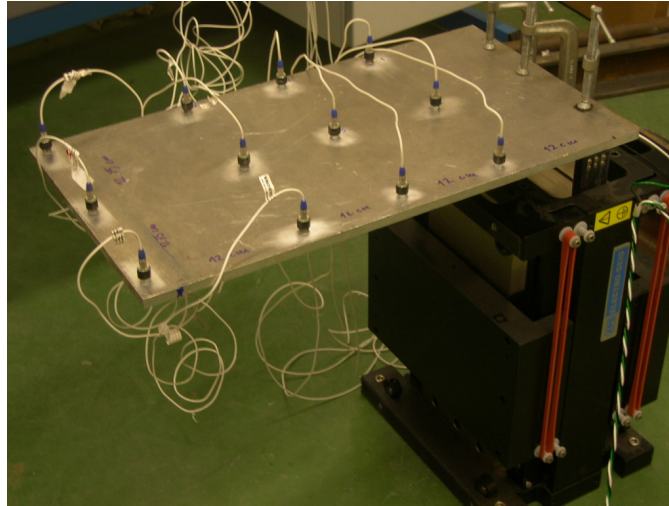


Figura 8.30 Ensayo de la placa en voladizo sobre el excitador electromagnético.

- Frecuencia 2 Hz con armónicos

La frecuencia de excitación que se ha aplicado es de 2 Hz, pero en el análisis de los datos no se ha introducido ningún filtro que impida el paso de los armónicos que introduce esta señal de excitación. El resultado es que todas las señales medidas presentan pequeños picos cada 2 Hz que hacen que los registros tomados sean de una calidad bastante mala. Con estos datos no se ha podido registrar ningún modo de vibración. Sirva esto de ejemplo para destacar la importancia de elegir los parámetros adecuados en el análisis de los datos.

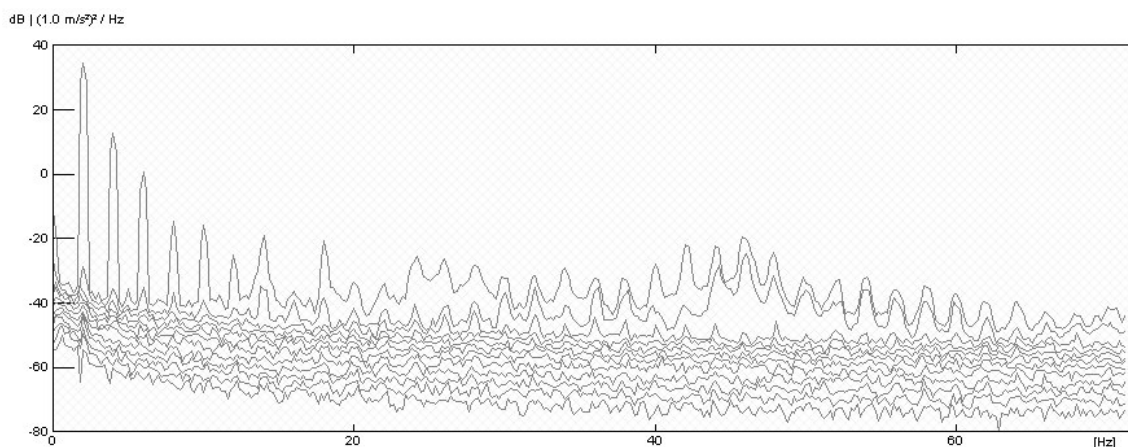


Figura 8.31 Valores singulares normalizados de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una placa en voladizo cuando se excita con una frecuencia de 2 Hz sin usar un filtro para evitar los armónicos.

En el diagrama de estabilidad también se puede apreciar un gran rizado de la señal, además de comprobar que hay pocas marcas rojas alineadas.

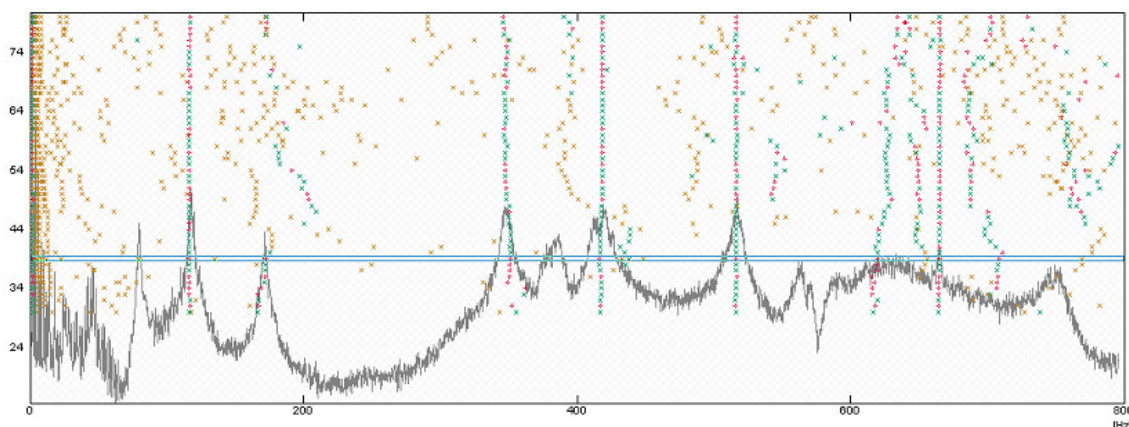


Figura 8.32 Diagrama de estabilidad obtenido del análisis modal operacional de una placa en voladizo mediante el SSI, cuando se excita con una frecuencia de 2 Hz sin usar un filtro para evitar los armónicos.

Cabe mencionar que sólo se ha conseguido identificar un modo de sólido rígido en el que todos los puntos de medida tienen un movimiento de traslación en dirección perpendicular al plano de la placa, en el que todos ellos oscilan con la misma amplitud.

- Frecuencia 2 Hz sin armónicos

En este caso si se ha empleado el filtro necesario para que no aparezcan los armónicos. No se consigue identificar el primer modo de vibración, pero sí el modo de sólido rígido que se describía en el caso anterior.

A continuación se muestran los valores de las frecuencias naturales y amortiguamientos obtenidos.

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	w_4 (Hz)
FDD	117.750	171.360	347.579	440.093
SSI	117.363	181.325	347.892	418.565

Tabla 8.22 Valores de las frecuencias naturales calculadas para los cuatro modos de vibración obtenidos utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa en voladizo excitada con una frecuencia de 2 Hz.

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)
FDD	1.005	0.949	0.586	1.053
SSI	3.541	1.846	0.716	0.306

Tabla 8.23 Valores de los amortiguamientos calculados para los cuatro modos de vibración obtenidos utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa en voladizo excitada con una frecuencia de 2 Hz.

Como en los casos anteriores, se puede ver que las frecuencias naturales estimadas por los dos métodos son parecidas en casi todos los casos, mientras que los coeficientes de amortiguamiento son bastante diferentes. En la siguiente tabla se muestra el valor del MAC entre los cuatro modos estimados por el FDD y el SSI.

MAC	Primer modo SSI	Segundo modo SSI	Tercer modo SSI	Cuarto modo SSI
Primer modo FDD	0.9991	0.1839	0.1565	0.0095
Segundo modo FDD	0.0354	0.9757	0.0384	0.3961
Tercer modo FDD	0.1712	0.1415	0.9965	0.1041
Cuarto modo FDD	0.0082	0.3575	0.0453	0.9906

Tabla 8.24 Valores de MAC obtenidos para los cuatro modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa en voladizo excitada con una frecuencia de 2 Hz.

- Frecuencia 30 Hz

En la gráfica de los valores singulares de la matriz de densidad espectral se puede apreciar la presencia de armónicos cada 30 Hz. El pico más pronunciado se produce a la frecuencia de 30 Hz debido a la fuente de excitación, no a la presencia de una frecuencia natural para dicho valor.

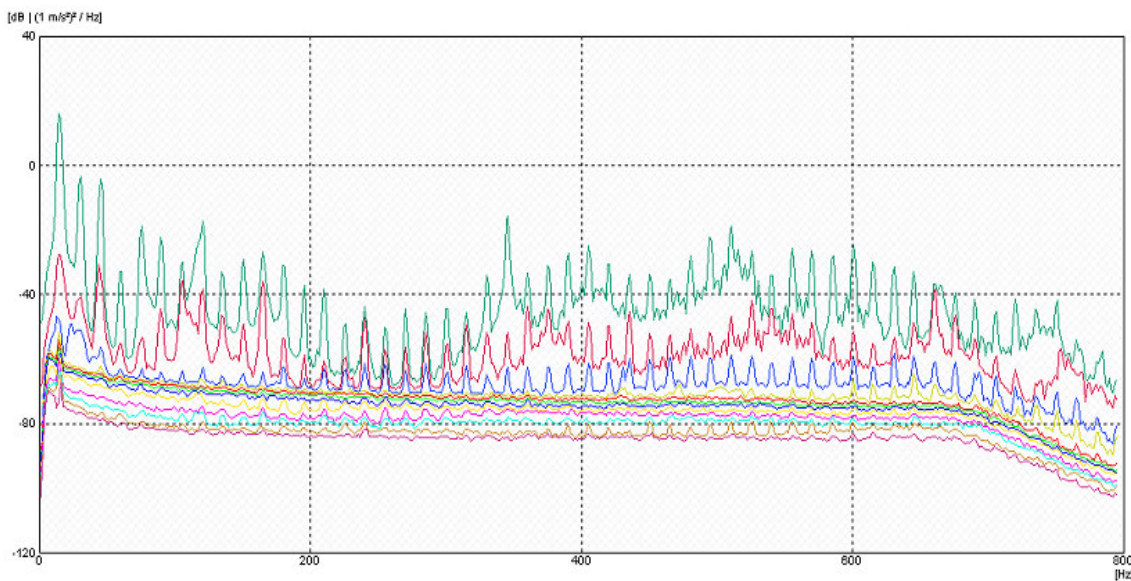


Figura 8.33 Valores singulares de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una placa en voladizo excitando con una frecuencia de 30 Hz.

Se consigue identificar los cinco primeros modos de vibración con ambos métodos de identificación (FDD y SSI). Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	w_4 (Hz)	w_5 (Hz)
FDD	14.941	44.877	345.243	510.214	664.426
SSI	14.994	44.380	345.253	509.558	664.209

Tabla 8.25 Valores de las frecuencias naturales calculadas para los cinco modos de vibración obtenidos utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa en voladizo excitada con una frecuencia de 30 Hz.

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)
FDD	7.354	1.776	0.214	0.081	0.224
SSI	0.127	0.239	0.212	0.906	0.297

Tabla 8.26 Valores de los amortiguamientos calculados para los cinco modos de vibración obtenidos utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa en voladizo excitada con una frecuencia de 30 Hz.

Como en los casos anteriores se puede ver que las frecuencias naturales estimadas por los dos métodos son prácticamente iguales, mientras que los coeficientes de amortiguamiento son bastante diferentes, excepto para el tercer modo que ambos métodos coinciden. En la siguiente tabla se muestra el valor del MAC entre los cinco modos estimados por el FDD y el SSI.

MAC	Primer modo SSI	Segundo modo SSI	Tercer modo SSI	Cuarto modo SSI	Quinto modo SSI
Primer modo FDD	1	0.0732	0.0235	0.2756	0.3763
Segundo modo FDD	0.1121	0.999	0.1453	0.0272	0.0517
Tercer modo FDD	0.0199	0.1645	0.9996	0.148	0.0485
Cuarto modo FDD	0.2678	0.2833	0.0924	0.9944	0.049
Quinto modo FDD	0.3842	0.0333	0.0411	0.0634	0.9966

Tabla 8.27 Valores de MAC obtenidos para los cinco modos de vibración utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa en voladizo excitada con una frecuencia de 30 Hz.

- Frecuencia 45 Hz

Aquí también aparecen armónicos cada 45 Hz. Además el pico más elevado también coincide con la frecuencia de excitación.

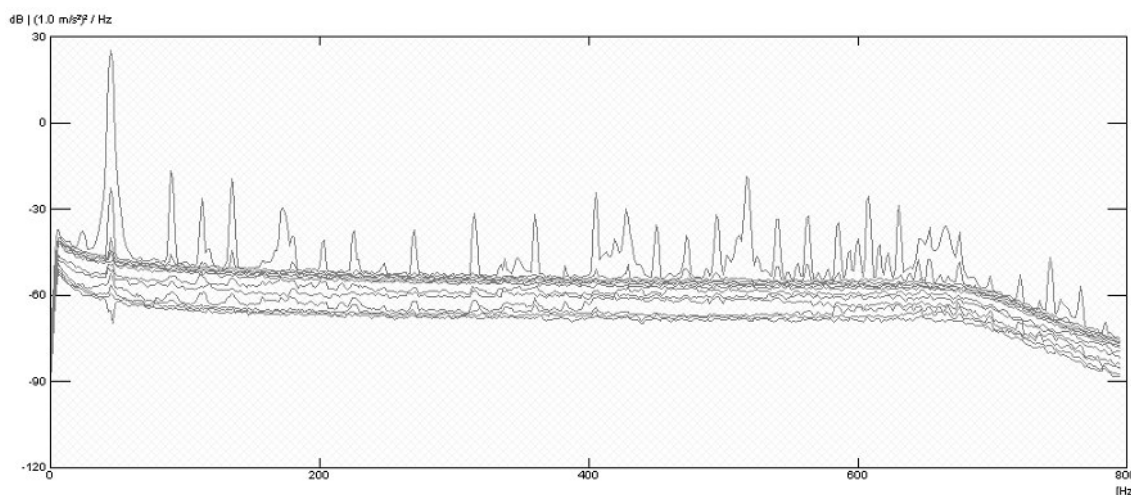


Figura 8.34 Valores singulares normalizados de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una placa en voladizo cuando se excita con una frecuencia de 45 Hz.

Sólo se han podido identificar dos modos de vibración mediante el método SSI (para la frecuencia de 136.207 Hz con 3.15% de amortiguamiento, y otro a 662.942 Hz y 0.546% de amortiguamiento) y otros dos con el FDD (uno a 134.997 Hz con un

amortiguamiento de 0.687%, y otro a 665.827 Hz con 0.363% de amortiguamiento). La correlación MAC entre ambos pares de modos es bastante buena.

- Frecuencia 100 Hz

En la gráfica de los valores singulares de la matriz de densidad espectral se puede apreciar la presencia de armónicos cada 100 Hz. El pico de mayor amplitud se produce a la frecuencia de 100 Hz debido a la fuente de excitación, no a la presencia de una frecuencia natural para dicho valor.

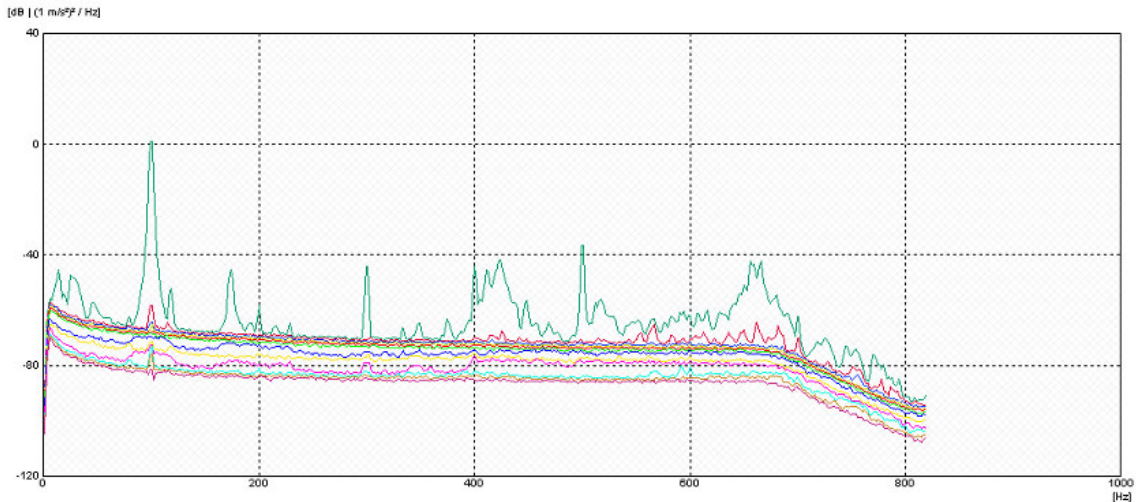


Figura 8.35 Valores singulares de la matriz de densidad espectral, obtenidos del análisis modal operacional de una placa en voladizo excitando con una frecuencia de 100 Hz.

Utilizando el método FDD se pueden obtener cinco modos de vibración en el rango de frecuencias observado, mientras que con el SSI sólo se obtienen un par de ellos. Los resultados se muestran a continuación:

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	w_4 (Hz)	w_5 (Hz)
FDD	13.436	174.009	424.373	500.281	654.962
SSI	-	177.150	409.175	-	-

Tabla 8.28 Valores de las frecuencias naturales calculadas para los cinco modos de vibración obtenidos utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa en voladizo excitada con una frecuencia de 100 Hz.

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)
FDD	11.69	0.724	0.332	0.153	0.335
SSI	-	1.599	1.094	-	-

Tabla 8.29 Valores de los amortiguamientos calculados para los cinco modos de vibración obtenidos utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa en voladizo excitada con una frecuencia de 100 Hz.

MAC	Primer modo SSI	Segundo modo SSI
Primer modo FDD	0.1787	0.1992
Segundo modo FDD	0.9996	0.4278
Tercer modo FDD	0.3593	0.9877
Cuarto modo FDD	0.294	0.9519
Quinto modo FDD	0.0612	0.0853

Tabla 8.30 Valores de MAC obtenidos para los modos de vibración calculados utilizando los métodos FDD y SSI para el caso de una placa en voladizo excitada con una frecuencia de 100 Hz.

8.4 Experimento puente-tren

8.4.1 Puesta a punto del experimento y adquisición de datos

La estructura a analizar es un modelo a escala de un puente de dos vanos. Para ello se ha usado una pletina de acero de 2.55 metros de longitud y una sección de $100 \times 10 \text{ mm}^2$.

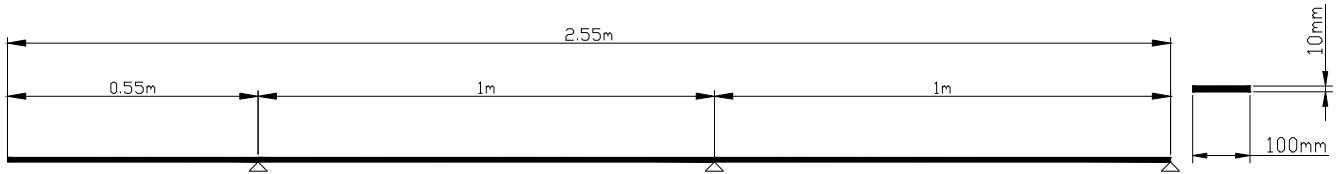


Figura 8.36 Geometría del modelo para el experimento puente-tren.

El comportamiento de un puente de ferrocarril al paso de un tren es un fenómeno dinámico complejo. En este experimento se ha usado como excitación dinámica el paso de un tren sobre la estructura en estudio. Se ha considerado el paso del tren con tres configuraciones: la locomotora, locomotora más un vagón y, por último, la locomotora más dos vagones, como se describe en Galván y Domínguez [16].

Se han colocado 4 acelerómetros piezoeléctricos, modelo 256 HX-100, en distintos puntos de la estructura, habiéndose medido la aceleración en estos puntos. Para la adquisición de datos se ha usado un sistema portátil de 4 canales.

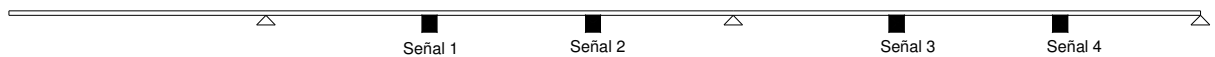


Figura 8.37 Esquema de la localización de los apoyos y de los acelerómetros para el experimento puente-tren.

8.4.2 Resultados experimentales

Se muestra a continuación los resultados obtenidos cuando cruza el puente la locomotora a su velocidad máxima.

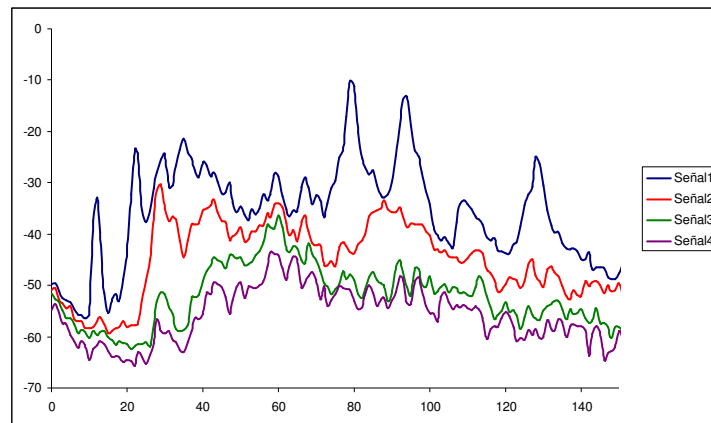


Figura 8.38 Aceleraciones registradas por los cuatro acelerómetros cuando la locomotora cruza el puente a su máxima velocidad.

La siguiente gráfica muestra los resultados obtenidos cuando circulan además de la locomotora los dos vagones.

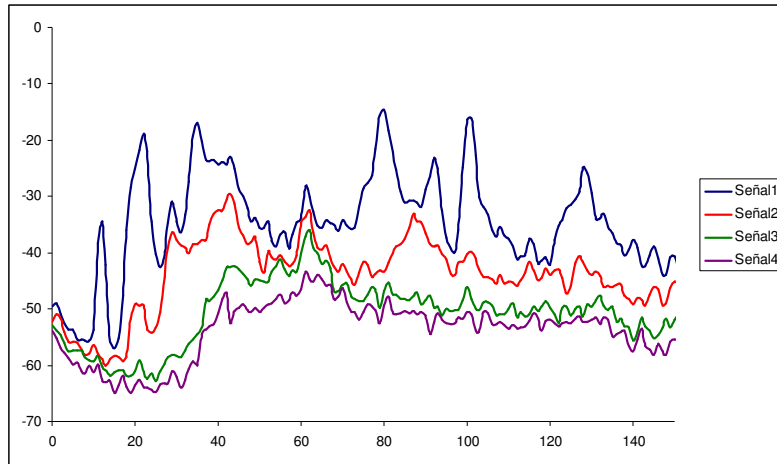


Figura 8.39 Aceleraciones registradas por los cuatro acelerómetros cuando la locomotora cruza el puente con los dos vagones.

En la siguiente gráfica se compara las vibraciones inducidas por el paso del tren cuando circula a la velocidad máxima, en distintas configuraciones. Se muestra la señal obtenida del acelerómetro número 1.

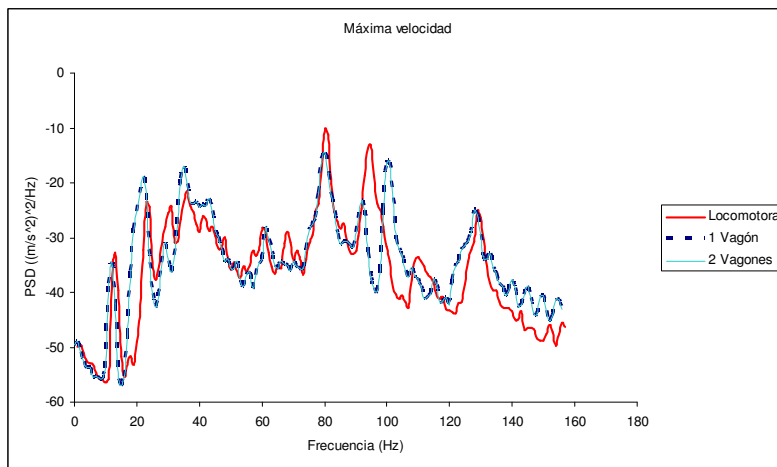


Figura 8.40 Señales medidas por el acelerómetro 1 para los casos en que circule la locomotora sola, con un vagón o con dos vagones.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos cuando el tren circula a velocidad lenta, según dos configuraciones. Se muestra la señal obtenida del acelerómetro número 1.

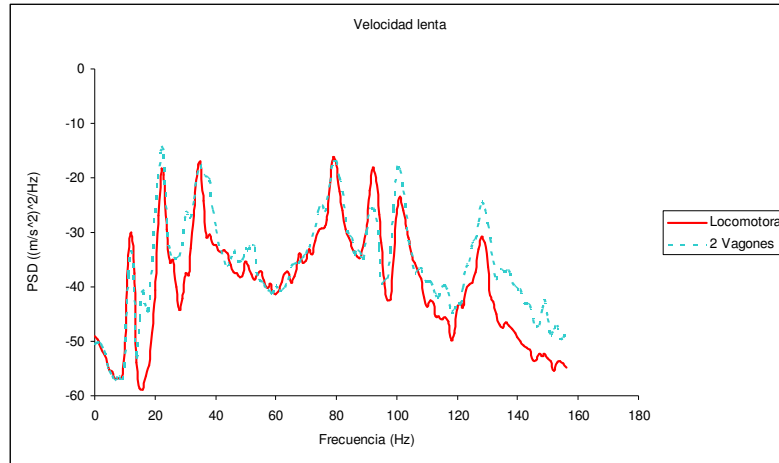


Figura 8.41 Señales medidas por el acelerómetro 1 para los casos en que circule a velocidad lenta la locomotora sola o con dos vagones.

Por último se comparan las vibraciones inducidas por el tren cuando este circula cargado con dos vagones, según vaya a una velocidad u otra. Se muestra la señal obtenida del acelerómetro número 1.

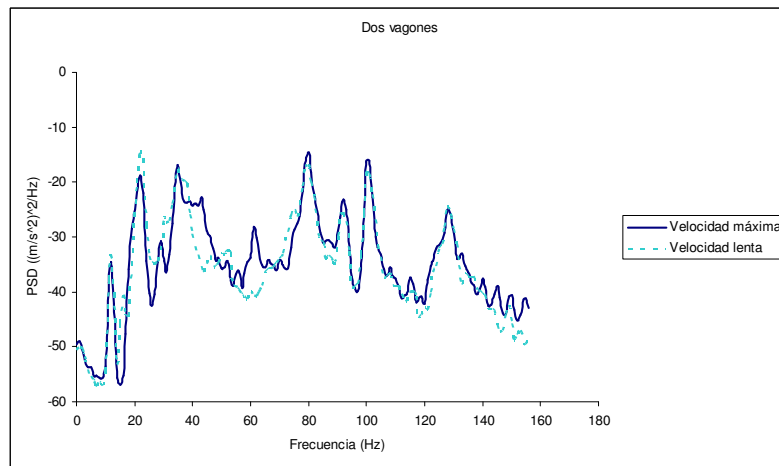


Figura 8.42 Señales medidas por el acelerómetro 1 circulando a velocidad lenta y a velocidad máxima.

Frecuencias naturales y modos de vibración

Las frecuencias naturales de la estructura se determinan experimentalmente identificando los picos en el espectro de aceleración. De este modo se obtienen las seis primeras frecuencias naturales de la estructura:

PRIMERA	SEGUNDA	TERCERA	CUARTA	QUINTA	SEXTA
12 Hz	22 Hz	35 Hz	79 Hz	93 Hz	129 Hz

Tabla 8.31 Frecuencias naturales obtenidas del ensayo puente-tren.

Para obtener los modos de vibración se obtienen los valores de amplitud y fase del espectro de desplazamientos, en los cuatro puntos en los que se han colocado los acelerómetros, para cada frecuencia. De este modo se obtienen:

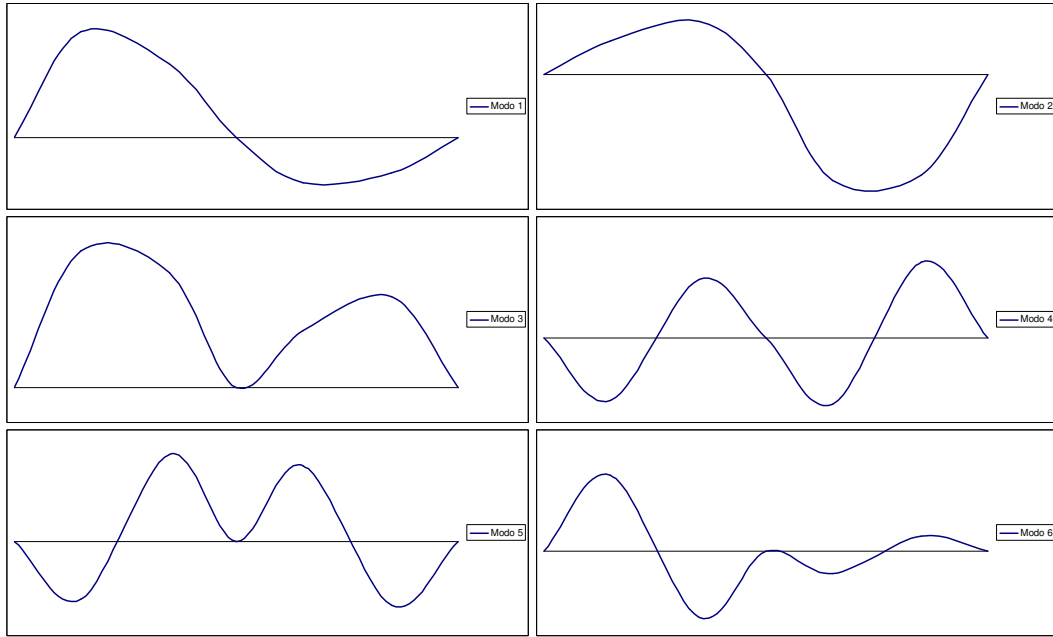


Figura 8.43 Modos de vibración obtenidos para el ensayo puente-tren.

8.4.3 Análisis modal de la estructura usando el método de los elementos finitos y comparación con los valores experimentales

Para corroborar los resultados experimentales se ha realizado un modelo con el programa de Elementos Finitos *ANSYS*, modelando el puente con 255 elementos viga (*Beam3*), obteniendo tanto las frecuencias naturales como los modos de vibración de la estructura. En la simulación numérica no se ha tenido en cuenta el amortiguamiento.

Las frecuencias naturales de la estructura obtenidas mediante la simulación numérica son:

PRIMERA	SEGUNDA	TERCERA	CUARTA	QUINTA	SEXTA
14 Hz	27 Hz	43 Hz	97 Hz	119 Hz	154 Hz

Tabla 8.32 Frecuencias naturales obtenidas mediante M.E.F. para el experimento puente-tren.

A continuación se comparan los valores obtenidos numéricamente con los obtenidos mediante experimentación, tanto de las frecuencias naturales como de los modos de vibración. Para ello, los modos de vibración han sido normalizados de la misma forma:

PRIMERA	SEGUNDA	TERCERA	CUARTA	QUINTA	SEXTA
12 Hz	22 Hz	35 Hz	79 Hz	93 Hz	129 Hz
14 Hz	27 Hz	43 Hz	97 Hz	119 Hz	154 Hz

Tabla 8.33 Comparación entre las frecuencias obtenidas experimentalmente y las calculadas por el M.E.F.

Se muestra a continuación la diferencia entre los valores que se muestran en la tabla anterior en tanto por ciento:

PRIMERA	SEGUNDA	TERCERA	CUARTA	QUINTA	SEXTA
14.29	18.52	18.60	18.56	21.85	16.23

Tabla 8.34 Diferencias en % entre las frecuencias obtenidas experimentalmente y las calculadas por el M.E.F.

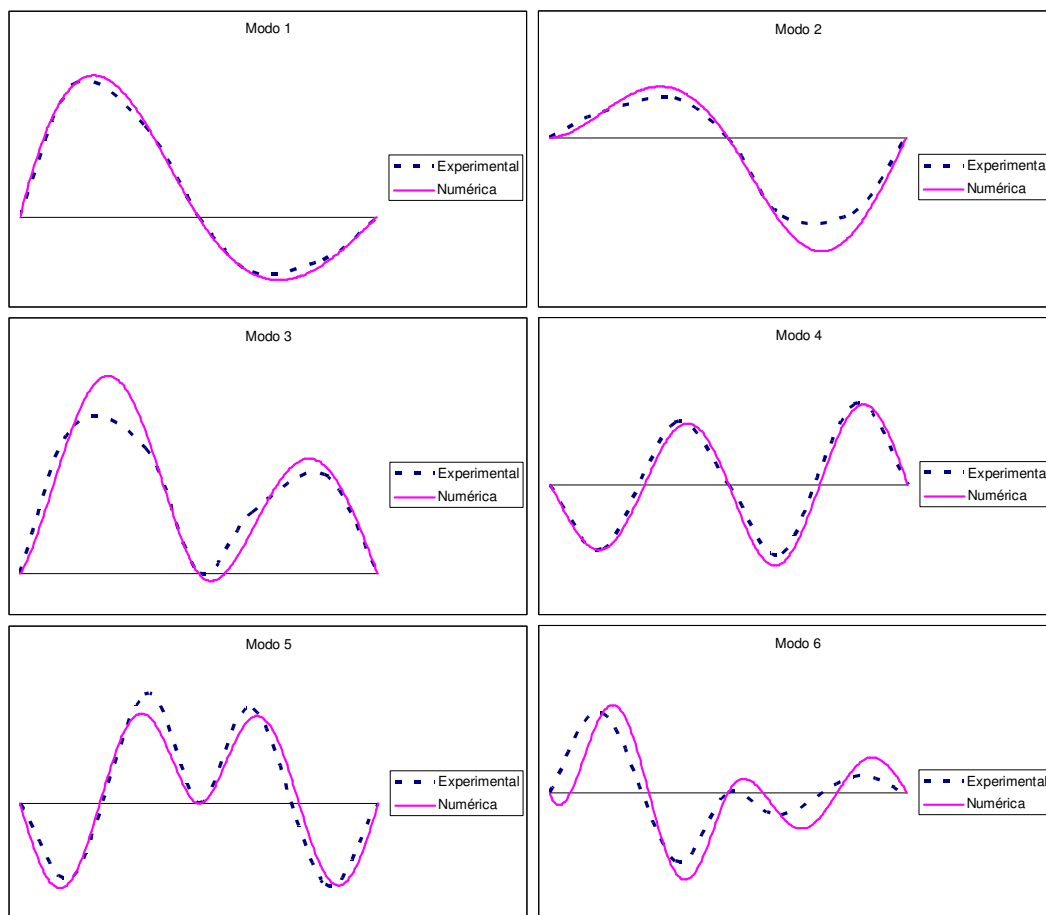


Figura 8.44 Comparación entre los modos de vibración obtenidos experimentalmente y los calculados por el M.E.F.

8.5 Pasarela de la Plaza del Agua

8.5.1 Descripción del puente

La pasarela curva está dispuesta en el contorno exterior de la Plaza del Agua, como se describe en Galvín (2004). Su anchura total es de 16,60 m y la longitud total, medida perpendicularmente entre estribos es de 32,60 m. La característica singular de este puente es la curvatura, con un radio en planta de 26 m en el borde interior y 42 m en el borde exterior. El tablero del puente esta formado por una losa de tres vanos de hormigón pretensado, de 0,65 m de espesor, dotada de unos acartelamientos en la zona de los apoyos intermedios. La posición de las pilas intermedias, formadas por fustes verticales de hormigón armado, está acondicionada por la anchura del canal, existiendo una separación entre ejes de 20,80 m, medidos sobre la perpendicular. La posición de los estribos se ajusta a las formas de la Plaza del Agua.

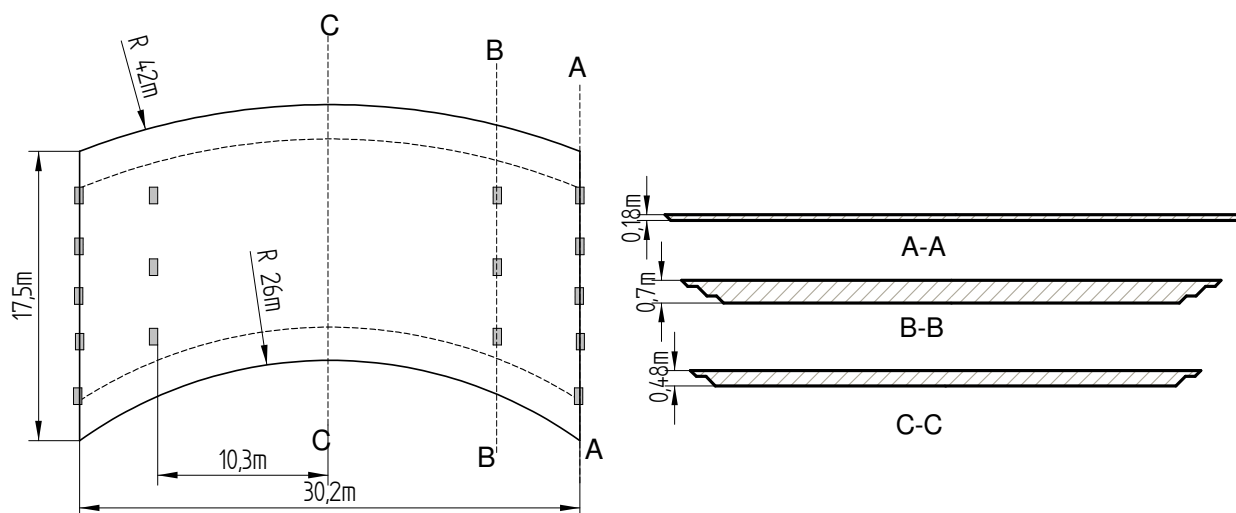


Figura 8.45 Esquema de la Pasarela curva sobre la Plaza del Agua y sus secciones tipo.

8.5.2 Modelo de Elementos Finitos

Antes de realizar el ensayo dinámico de la pasarela, se ha realizado un modelo riguroso de la estructura usando el Método de los Elementos Finitos. La losa ha sido modelada usando 2612 elementos *Shell* de 6 nodos, con 6 grados de libertad por nodo. Así mismo se han modelado los acartelamientos de la losa (zonas de mayor espesor) y los bordes del puente (zonas de menor espesor). Las pilas han sido modeladas usando 36 elementos *Beam 3D*. Para el hormigón pretensado de la losa se ha supuesto un módulo de Young de 40 GPa, mientras que para el hormigón armado de las pilas se ha supuesto 35 GPa. Para ambos materiales se ha considerado un coeficiente de Poisson de 0.15.

Resolviendo el modelo se concluye:

- Gran parte de la respuesta dinámica del puente está asociada al movimiento vertical de la losa.
- Existe un conjunto de modos asociados al comportamiento local de los bordes de la estructura, formados por unas losas en voladizo de menor espesor.

Los resultados obtenidos del análisis dinámico del modelo se usan para determinar la posición de los acelerómetros en el ensayo de campo.

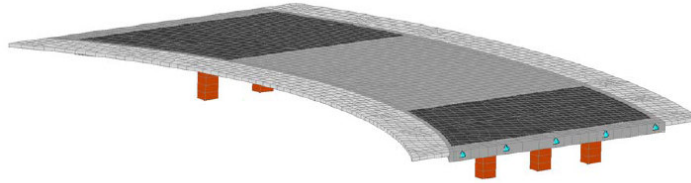


Figura 8.46 Modelo de elementos finitos utilizado en el ensayo de la pasarela de la Plaza del Agua.

8.5.3 Ensayo

Se mide la respuesta de la estructura en 35 puntos seleccionados mediante el modelo de elementos finitos, usando 9 acelerómetros piezoeléctricos de tipo sísmico. Para obtener la respuesta en los 35 puntos se llevaron a cabo cinco series de medidas, manteniendo en todas las series dos acelerómetros fijos usados como referencia. Normalmente, cuando se realizan ensayos para caracterizar dinámicamente grandes estructuras a partir de la excitación ambiente, no todas las localizaciones pueden ser medidas de una vez, por lo que hay que dividir el ensayo en varias series, manteniendo en todas ellas sensores fijos (acelerómetros de referencia). Estos acelerómetros tienen que ser colocados en posiciones óptimas en las que se espera que todos los modos de vibración puedan ser medidos.

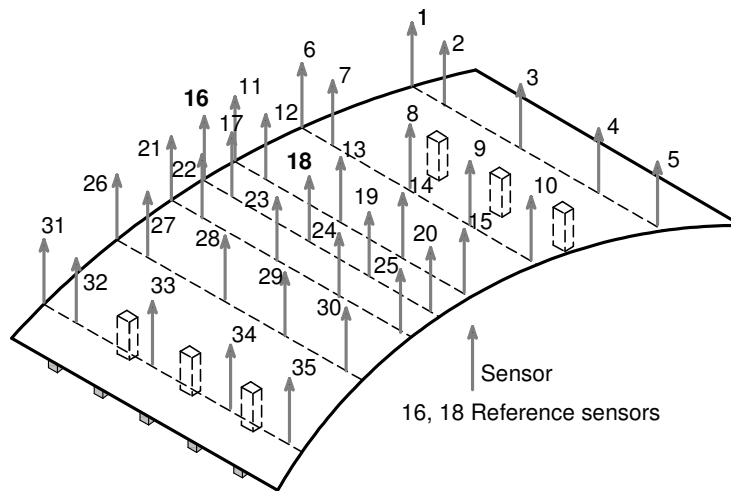


Figura 8.47 Localizaciones de los acelerómetros.

La frecuencia de muestreo fue de 81.97 Hz, obteniéndose 40985 muestras para cada canal. Se registraron 500 segundos de respuesta por canal en cada serie de medida. En todos los registros se usó un filtro de paso alto de 0.7 Hz y un filtro *anti-aliasing* con una frecuencia de corte de 40 Hz.



Figura 8.48 Excitaciones de la estructura: tráfico, viento y atracciones de un parque temático cercano.

8.5.4 Análisis de los Datos

Las dos técnicas de identificación empleadas son: Descomposición en el Dominio de la Frecuencia e Identificación en el Subespacio Estocástico.

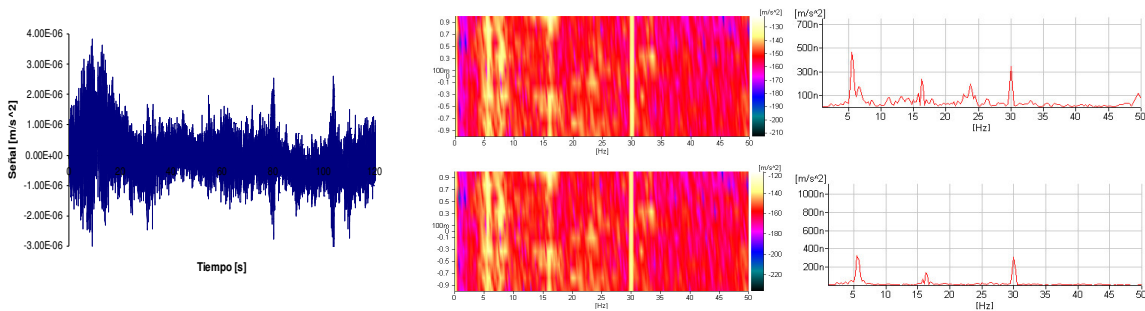


Figura 8.49 Señal adquirida por uno de los acelerómetros de referencia, evolución del espectro con el tiempo y espectro de las señales adquiridas por los acelerómetros de referencia.

8.5.5 Resultados

La Tabla 8.35 resume los modos de vibración obtenidos por ambos métodos de identificación y los resultados del análisis numérico.

$f_{EFDD} (Hz)$	$f_{SSI} (Hz)$	$f_{MEF} (Hz)$	$\xi_{EFDD} (\%)$	$\xi_{SSI} (\%)$
5.588	5.676	5.12	2.992	2.144
7.95	7.6	7.09	2.769	3.649
13.73	13.05	11.52	3.867	4.34
16.19	16.16	14.01	2.095	1.998
20.01	19.19	19.28	1.525	3.864
24.64	24.83	22.67	0.6556	4.051
25.97	25.92	24.99	0.4168	0.8781
29.52	29.6	28.35	2.183	2.138
30.02	30.21	30.12	0.02451	4.032

Tabla 8.35 Resultados obtenidos en el ensayo de la pasarela de la Plaza de Agua.

Se encuentra un excelente grado de acuerdo entre las medidas experimentales y el modelo numérico. La correlación obtenida mediante MAC es muy buena. En todos los casos, los coeficientes de amortiguamiento están por debajo del 5%.

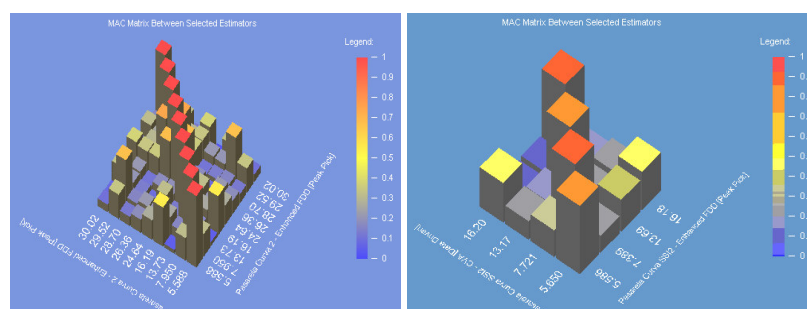


Figura 8.50 Auto-MAC FDD y MAC entre FDD-SSI para los cuatro primeros modos de vibración obtenidos del ensayo de la pasarela sobre la Plaza de Agua.

En la Figura 8.51 se representan los modos de vibración obtenidos a partir de las dos técnicas de identificación usadas y los calculados mediante el M.E.F.

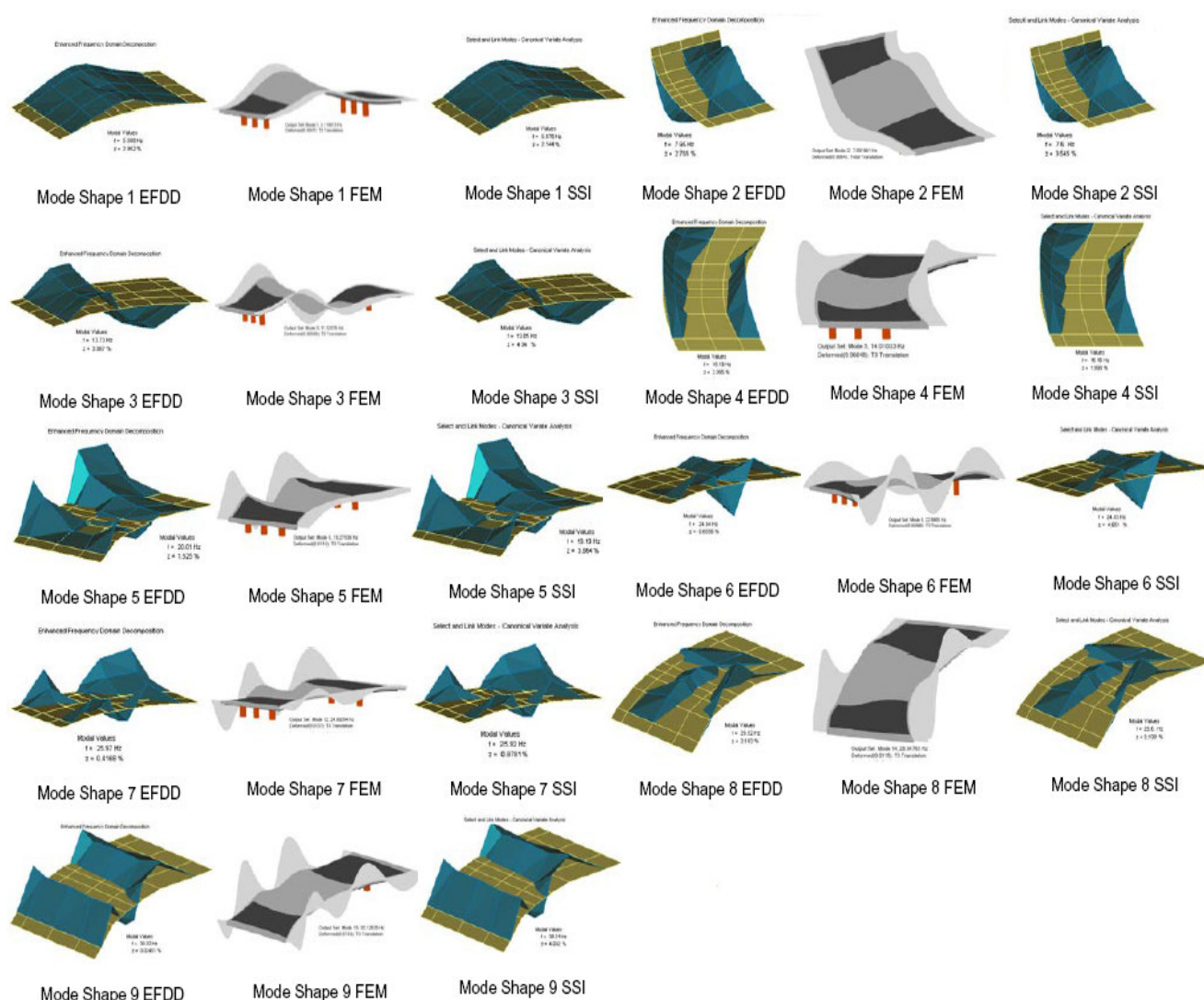


Figura 8.51 Deformadas correspondientes a los nueve primeros modos de vibración de la pasarela sobre la Plaza del Agua, obtenidos mediante FDD, SSI y M.E.F.