



# ESTUDIO MONITORIZACIÓN DE LOSA MACIZA DE UN PUENTE



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

Máster de Estructuras 2017/2018

Autores: Cabezas Martín, Juan Francisco

Montalbán Herrera, Francisco

Asignatura: Evaluación no destructiva

Profesora: Guillermo Rus Carlborg

## Índice

1. Introducción .....	2
2. Análisis Modal .....	2
Análisis Modal Experimental.....	2
Análisis Modal Operacional.....	2
3. Descripción de la losa del puente .....	3
4. Estudio mediante modelo de elementos finitos (MEF) .....	3
5. Análisis Modal Operacional.....	5
5.1. Cálculo de los parámetros reales .....	5
5.2. Actualización del modelo .....	5
6. Monitorización a largo plazo.....	6
7. Toma de decisión de la disposición óptima de los sensores.....	6

## 1. Introducción

Para realizar la monitorización de la losa de un puente ya construido se debe de seguir los siguientes pasos:

- Se realiza un modelo de elementos finitos (MEF), para conocer los parámetros fundamentales teóricos del puente.
- A continuación se hace un Análisis Modal Operacional, con el cual se van a calcular los parámetros reales del puente.
- Comparamos ambos parámetros y ajustamos los del modelo a los reales
- Con el modelo ajustado, se estudian la forma de los modos de vibración para analizar la colocación óptima de sensores para monitorización.

## 2. Análisis Modal

El análisis modal de una estructura nos permite conocer las características propias de la misma, como son sus frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamiento. En el estudio mediante elementos finitos se está suponiendo que el material es homogéneo y se ha construido de la manera correcta, pero en la realidad puede que no sea así. Por ello, una vez realizadas las estructuras se deben volver a medir esas características fundamentales.

Para conocerlas existen dos técnicas que permiten conocerlas:

### Análisis Modal Experimental

Este método se basa en aplicar a la estructura un carga impulso con un periodo de tiempo muy corto y mediante la colocación de sensores en diferentes zonas analizar la respuesta de estos a la excitación.

Con esta técnica para conocer las características del sistema se necesita conocer la señal de entrada y la señal de salida y con ella calcula la función de transferencia del sistema

$$F(t) \rightarrow H(t) \rightarrow u(t) \quad H(t) = u(t)/F(t)$$

En muchas ocasiones es muy difícil excitar la estructura ya que no se dispone de instrumental necesario para llegar a grandes longitudes, y a la misma vez la excitación puede llegar a provocar daños.

### Análisis Modal Operacional

Este método se basa en la medida de la respuesta de la estructura usando solo el ambiente y las fuerzas de servicio que actúan sobre la misma, como fuerza de excitación. Este tipo de fuerza se conoce comúnmente como ruido blanco.

El ruido blanco se caracteriza por el hecho de que sus valores de señal en dos tiempos diferentes no guardan correlación. Como consecuencia de ella agitan todas las frecuencias con la misma energía por lo que su densidad espectral es constante. Por lo tanto la fuerza de entrada se considera como unitaria.

Únicamente conociendo la repuesta se puede obtener la función de transferencia y así conocer las características propias de la estructura.

$$F(t) \rightarrow H(t) \rightarrow u(t) \quad H(t) = u(t)/1$$

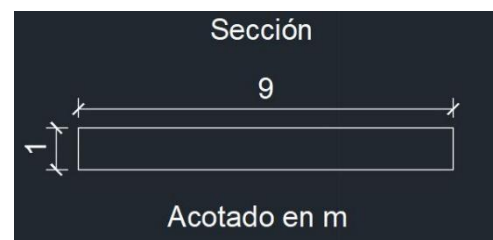
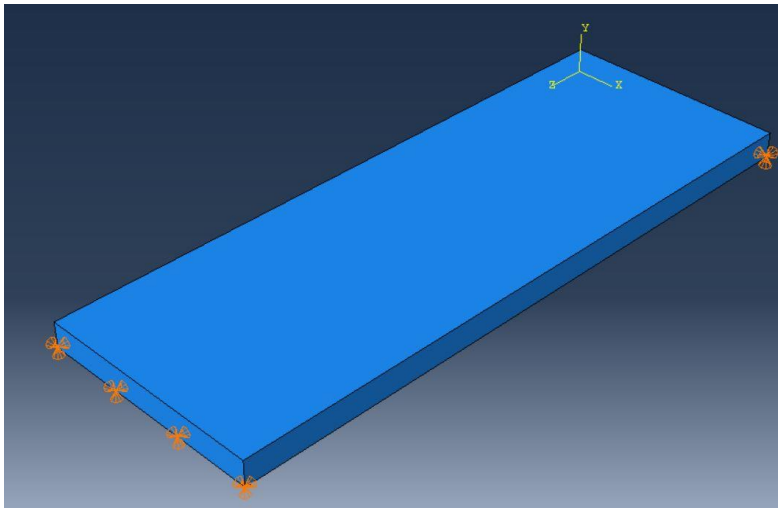
Las ventajas que posee esta técnica son:

- Menor tiempo de preparación del ensayo
- Menor coste (no se necesita excitadores)
- No se aplican cargas a la estructura que puedan ocasionar defectos
- Respuesta representativa de las condiciones reales de utilización
- No interrumpe el funcionamiento

Los inconvenientes:

- Repuestas pequeñas, mezcladas con ruido
- Excitación desconocida
- Necesidad de equipos muy sensibles
- Necesario un análisis de datos cuidadoso

### 3. Descripción de la losa del puente



Es una losa de hormigón maciza que posee una dimensión de 9x25 metros con un canto de 1 metro. Se encuentra apoyada en los extremos en pilares y sin ningún apoyo en el centro del vano.

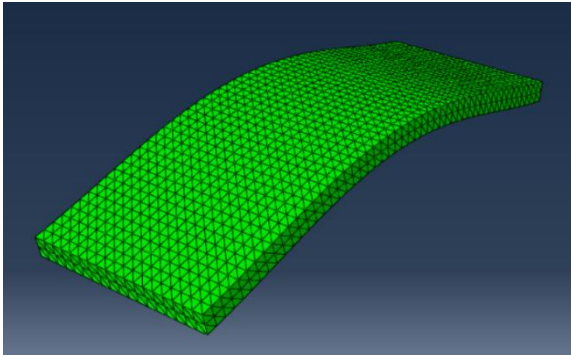
Las características del hormigón son las siguientes:

- Densidad: 2350 Kg/m<sup>3</sup>
- Módulo de Young (E): 28000000000 Pa
- Módulo de Poisson: 0.3

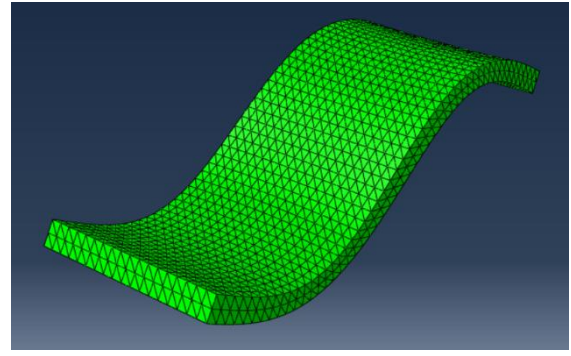
### 4. Estudio mediante modelo de elementos finitos (MEF)

Para la realización del estudio mediante MEF se ha usado el programa informático Abaqus, con el cual se ha generado la losa y obtenido la forma de los modos de vibración y las frecuencias naturales correspondiente a cada uno.

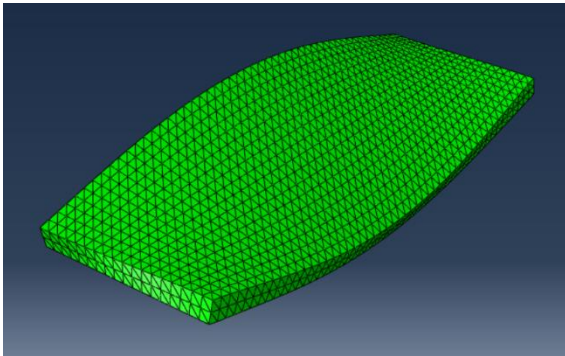
A continuación se muestran los modos de vibración obtenidos.



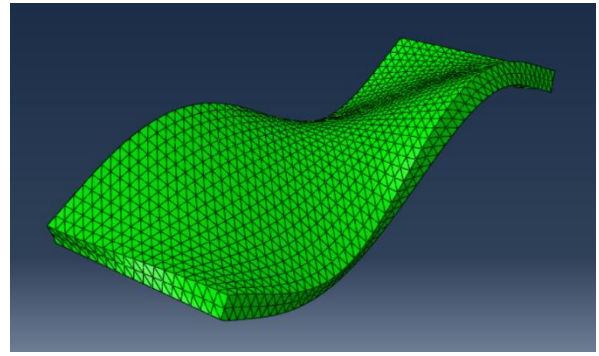
Modo 1 (Frecuencia 3,8769 Hz)



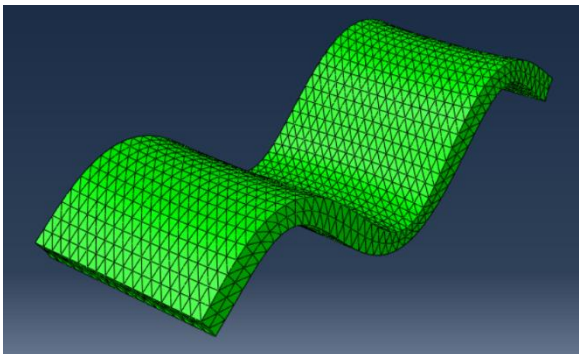
Modo 2 (Frecuencia 9,8094 Hz)



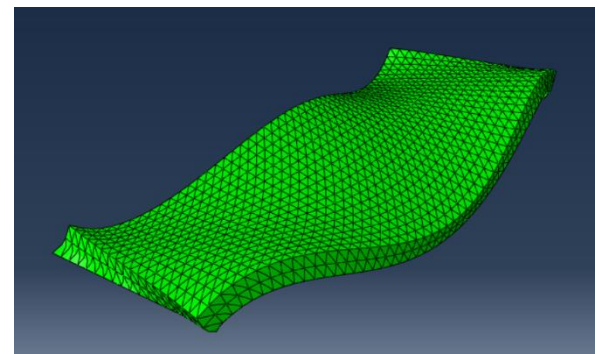
Modo 3 (Frecuencia 10,019 Hz)



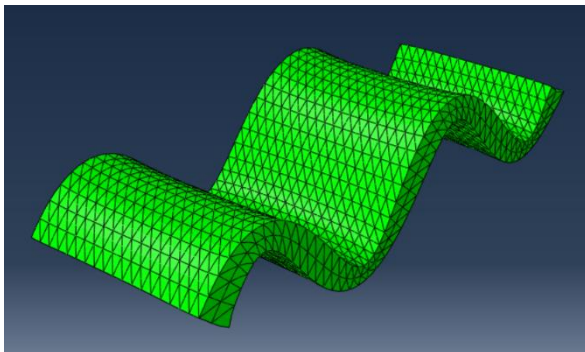
Modo 4 (Frecuencia 22,205 Hz)



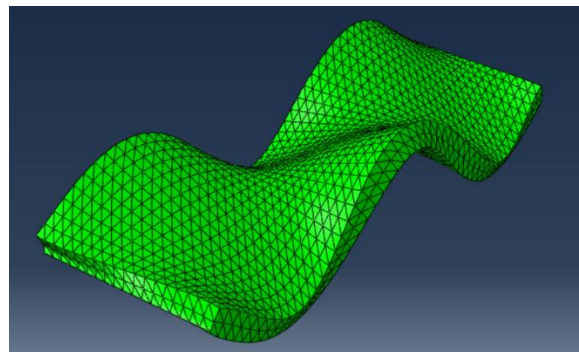
Modo 5 (Frecuencia 24,050 Hz)



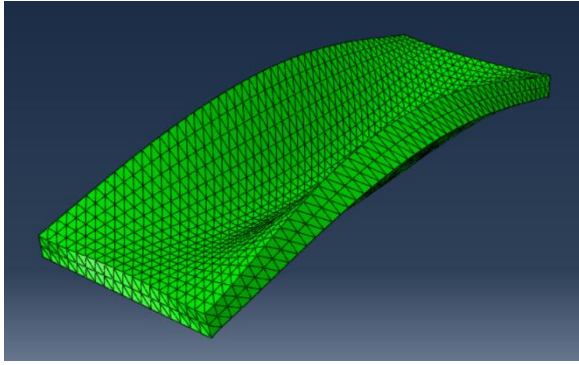
Modo 6 (Frecuencia 24,416 Hz)



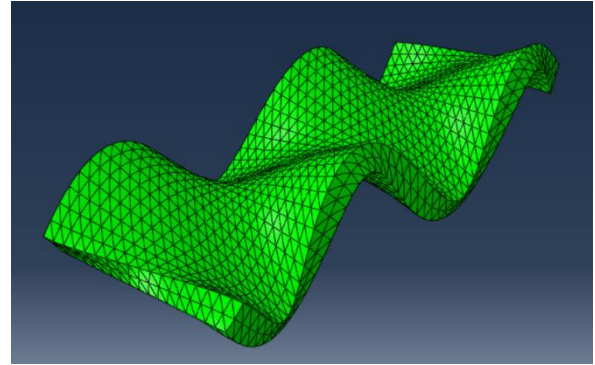
Modo 7 (Frecuencia 35,119 Hz)



Modo 8 (Frecuencia 37,522 Hz)



Modo 9 (Frecuencia 46,806 Hz)



Modo 10 (Frecuencia 53,715 Hz)

## 5. Análisis Modal Operacional

### 5.1. Cálculo de los parámetros reales

Una vez realizado el estudio de las características fundamentales (modos de vibración y frecuencias fundamentales) por elementos finitos se debe realizar el estudio operacional para obtener las frecuencias y modos reales y de esa manera poder actualizar el modelo de MEF para que sea correcto.

Para realizar el Análisis Modal Operacional se instalan en la losa del puente unos acelerómetros inalámbricos, los cuales obtendrán las aceleraciones producidas por el ruido blanco, para después analizarlas y poder sacar la función de transferencia de donde se obtendrán las características.



Los acelerómetros usado son de la marca GeoSig, los cuales tiene una gran sensibilidad para registrar el movimiento producido.

Al haber realizado un estudio de los modos de vibración en el modelo de MEF, una opción es colocar los sensores cada 5 metros para de esta manera obtener mucha información de la estructura.

Los datos obtenidos son acelerogramas que mediante el uso de algunas técnicas se transforman al dominio de la frecuencia de donde ya se pueden obtener los modos de vibración y frecuencias naturales (Peak Picking, Descomposición en el Dominio de la Frecuencia).

### 5.2. Actualización del modelo

Con los modos de vibración y frecuencias naturales reales calculadas el siguiente paso que se debe dar es compararlos con los datos del modelo de MEF. Los datos del modelo tienen que

ser parecidos a los obtenidos, si esto no fuera así hay que modificar el modelo para que los datos sean lo más parecido a los obtenidos.

## 6. Monitorización a largo plazo

Para el proceso de monitorización a largo plazo emplearemos un acelerómetro en varias localizaciones de interés de la estructura.

El objetivo consiste en obtener información continuada sobre los modos de vibración de la estructura y así, si se produce alguna alteración en los mismos, percatarnos de los cambios producidos en el material, como pueden ser la pérdida de rigidez o masa.

El acelerómetro es un tipo de transductor piezoeléctrico que produce una señal proporcional a la aceleración a la que se somete. Poseen un amplio rango de frecuencias de medición y sensibilidad. Suele ser de pequeño tamaño, aunque si la masa es importante en comparación con la estructura, debe tenerse en cuenta (se omite cuando es menor de un 10% de la masa de nuestra estructura). Para nuestro caso de losa maciza no habría que tenerlo en cuenta.

El tipo de acelerómetro que emplearemos para medir aceleraciones en nuestra losa de puente será de la empresa PCB Piezotronics, modelo 393B31. Sus características principales son:

- Rango de medida de aceleraciones:  $\pm 0.5g$  ( $4.9 \text{ m/s}^2$ ).
- Rango de frecuencias naturales desde 0,1 a 200 Hz.
- Tamaño (diámetro x altura): 57.2 mm x 71.1 mm.
- Peso: 635 gramos.



## 7. Toma de decisión de la disposición óptima de los sensores

En este último apartado se lleva a cabo la toma de decisión relacionada con el número óptimo y disposición correcta de los sensores del tipo anteriormente comentado.

La elección óptima se realizará mediante una matriz de decisión que estará afectada por las alternativas a elegir y los criterios de elección que nos servirán de apoyo para la valoración relativa de las alternativas.

Además, cada criterio irá acompañado de un peso que marca la importancia relativa entre criterios.

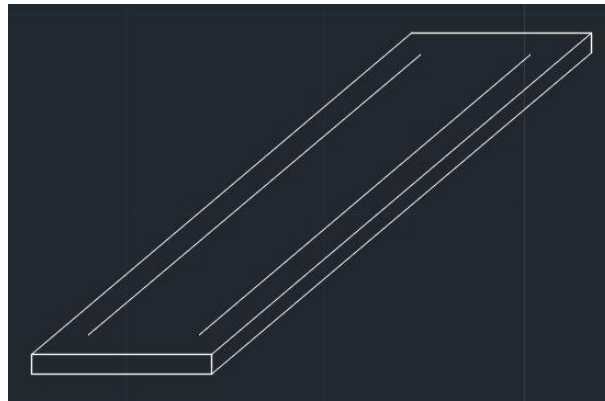


Las alternativas propuestas dependen de los propios modos de vibración de la losa de puente considerada. Con esta suposición, el número y la disposición de los sensores se focaliza en encontrar los máximos de cada modo en el que vibra la estructura.

Los criterios para tener en cuenta en la evaluación de las alternativas serán el coste como criterio 1 (relacionado con el número de sensores), el criterio 2 si la disposición de una alternativa nos permite obtener buena información sobre los demás modos de vibración y, por último, el criterio 3 la importancia relativa entre los modos.

La valoración de cada alternativa respecto a cada criterio se valorará desde 1 hasta 5, considerando 5 como la mejor puntuación para ese criterio.

Mencionar, que se han considerado dos líneas paralelas para la colocación de los acelerómetros, ambas a 1 metro del margen del tablero.



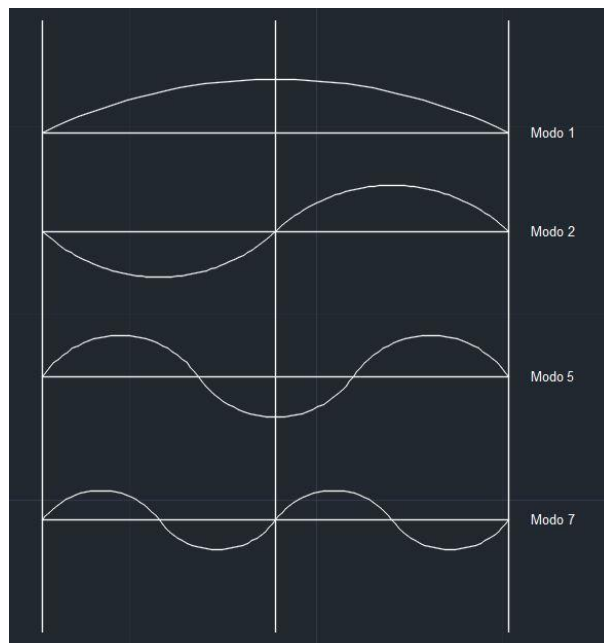
Para la elección de las alternativas se han tenido en cuenta los modos representativos de desplazamientos verticales provocados por la flexión respecto al eje corto de la pieza, sin tener en cuenta torsión de la losa ni flexión respecto a la longitud más larga.

Por tanto, las alternativas evaluar serían las siguientes:

- Alternativa 1: se dispone de 1 acelerómetro que nos permite monitorizar el máximo del Modo 1 en el centro del vano.
  - El coste será menor al emplear 1 acelerómetro (2 si contamos la disposición en el otro margen de la losa).
  - Si colocamos sólo un sensor en el centro obtenemos poca información sobre el resto de las formas de vibrar que posee la estructura.
  - Al tratarse del primer modo de vibración su importancia es mayor respecto a los demás modos.
- Alternativa 2: se dispone de 2 acelerómetros que nos permiten monitorizar los dos máximos del Modo 2.
  - El coste será algo mayor.
  - Si colocamos dos sensores seguimos obteniendo poca información sobre el resto de los modos de la estructura.
  - Al tratarse del segundo modo de vibración su importancia es menor respecto al primer modo.



- Alternativa 3: se dispone de 3 acelerómetros que nos permiten monitorizar los tres máximos del Modo 5.
  - El coste sigue creciendo.
  - Si colocamos tres sensores seguimos obteniendo poca información sobre el resto de los modos de la estructura, aunque más información que las alternativas anteriores.
  - Al tratarse del quinto modo de vibración su importancia es bastante menor que en las alternativas anteriores.
- Alternativa 4: se dispone de 4 acelerómetros que nos permiten monitorizar los 4 máximos del Modo 7.
  - El coste sigue creciendo.
  - Si colocamos cuatro sensores obtenemos buena información del resto de modos, aunque nos faltaría medir en el centro de vano para recoger información del primer modo.
  - Al tratarse del séptimo modo de vibración su importancia relativa es la más baja importante.
- Alternativa 5: se dispone de 5 acelerómetros que nos permiten monitorizar los 4 máximos del Modo 7 más el centro de vano.
  - El coste es el mayor de todas las alternativas.
  - Con esta disposición obtenemos buena información del resto de modos, incluido el Modo 1.
  - Se considera una mayor importancia al monitorizar el perfectamente el Modo 1.



Con las alternativas y criterios descritos, pasamos a evaluar cada alternativa con respecto a cada criterio en la matriz de decisión siguiente:

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
Alternativa 1	5	1	5
Alternativa 2	4	2	3
Alternativa 3	3	3	3
Alternativa 4	2	4	1
Alternativa 5	1	5	3

A continuación, se muestran los pesos considerados para cada criterio:

Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
0,25	0,5	0,25

Considerando el criterio referido a la importancia de obtener información de los demás modos como el criterio con mayor peso puesto que es nuestro principal objetivo.

Destacados los pesos de cada criterio pasamos a realizar la ponderación de las evaluaciones de cada alternativa y la suma total.

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	TOTAL
Alternativa 1	1,25	0,5	1,25	3
Alternativa 2	1	1	0,75	2,75
Alternativa 3	0,75	1,5	0,75	3
Alternativa 4	0,5	2	0,25	2,75
Alternativa 5	0,25	2,5	0,75	3,5

Como podemos observar, la alternativa con mayor valoración es la opción 5 que considera 5 sensores (10 si contamos la disposición en el otro margen de la losa), 4 sensores se dispondrían según los máximos de modo 7 y 1 sensor en el centro del vano que nos permite obtener información del primer Modo 1.