

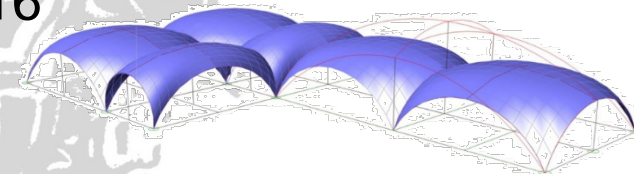
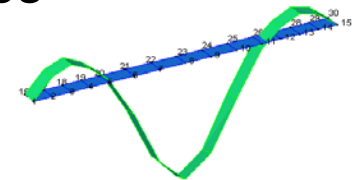
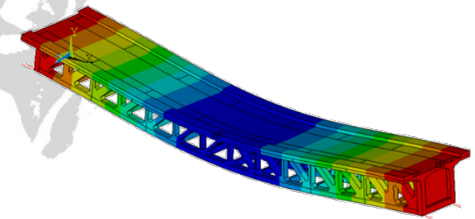
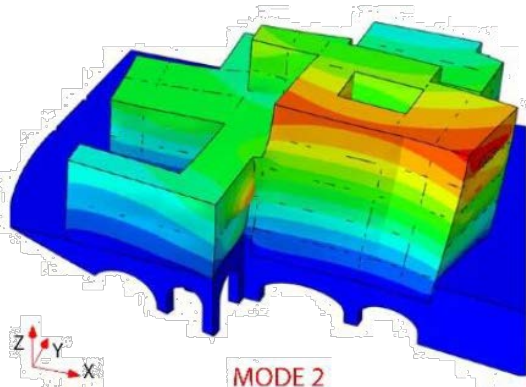
Dinámica Estructural:

De los problemas vibratorios al mantenimiento estructural predictivo

Andrés Sáez

Departamento de Mecánica de Medios Continuos
y Teoría de Estructuras
Universidad de Sevilla

Málaga, 20 de mayo de 2016



- ❖ Introducción
- ❖ Problemas vibratorios en Ingeniería Estructural
- ❖ Determinación experimental de las propiedades dinámica de una estructura
- ❖ Monitorización de estructuras: Mantenimiento estructural predictivo
- ❖ Calibración de modelos de elementos finitos
- ❖ Conclusiones

❖ **Introducción**

- ❖ Problemas vibratorios en Ingeniería Estructural
- ❖ Determinación experimental de las propiedades dinámica de una estructura
- ❖ Monitorización de estructuras: Mantenimiento estructural predictivo
- ❖ Calibración de modelos de elementos finitos
- ❖ Conclusiones

❖ Introducción

Acciones dinámicas en Ingeniería Estructural

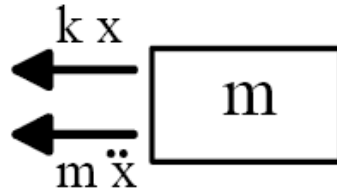
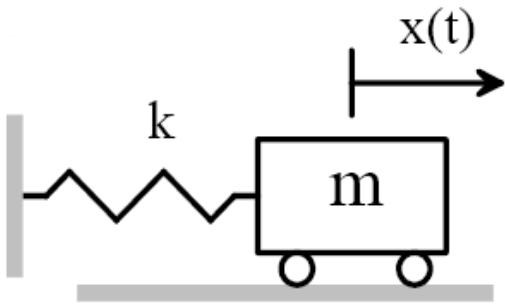
Estructuras cada vez más esbeltas → los fenómenos dinámicos ganan importancia



Acciones:



Vibración libre de estructuras de 1 g.d.l.



$$m\ddot{x} + kx = 0$$

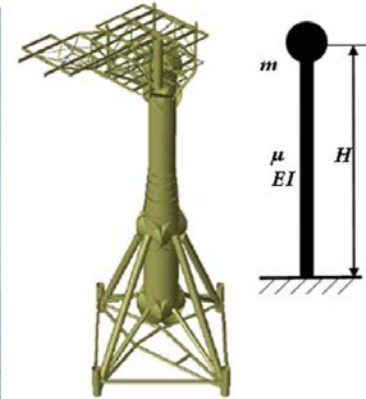
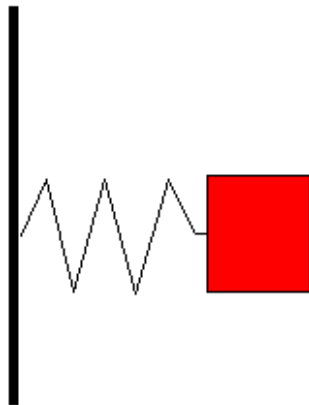


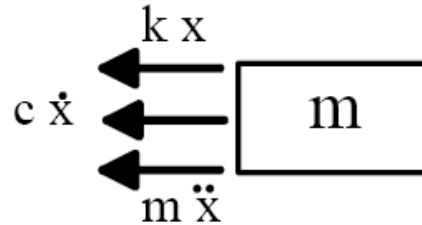
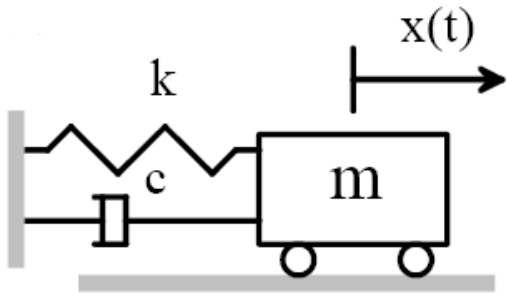
Fig. 3.6 Physical modeling realization from a realistic monotower wellhead platform (left) and its geometry modeling for finite element analysis (middle) to a simplified SDOF model (right) for hand calculation of eigenfrequencies (Courtesy of Aker Solutions for the left and the middle figure)

$$x(t) = A_1 \cos \omega_n t + A_2 \text{sen } \omega_n t$$

FRECUENCIA NATURAL

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

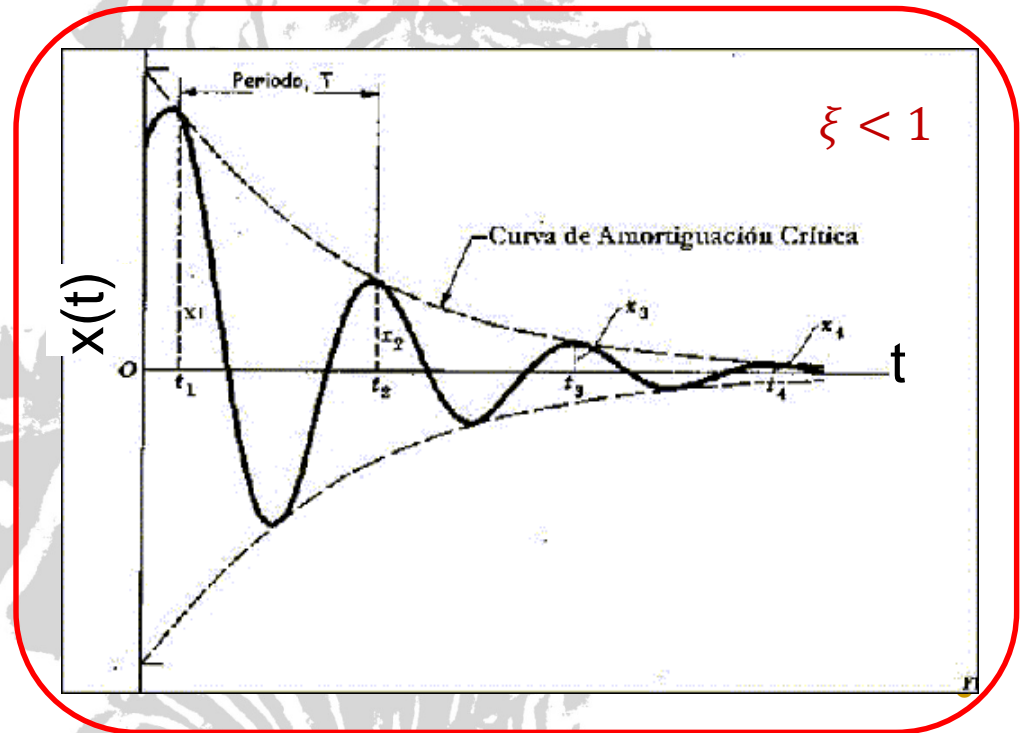
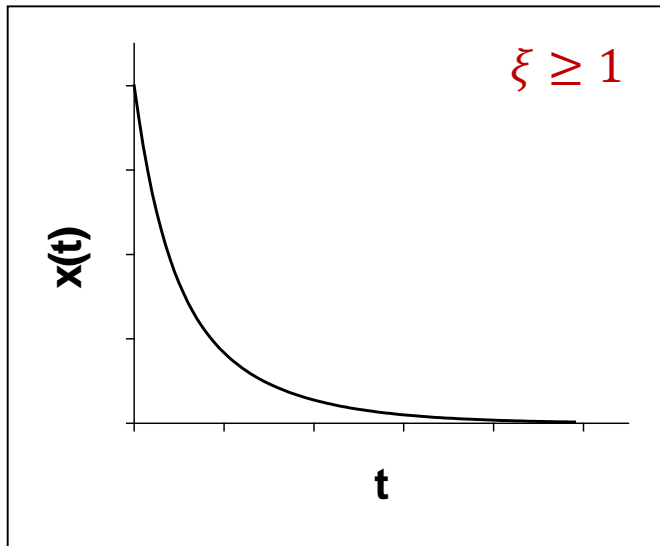
Vibración libre de estructuras de 1 g.d.l. amortiguadas



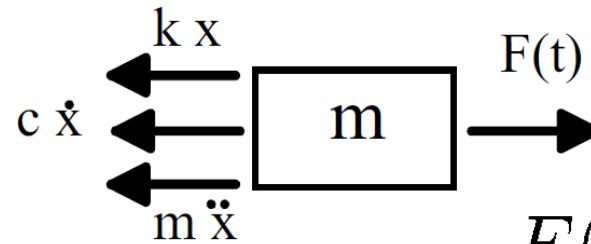
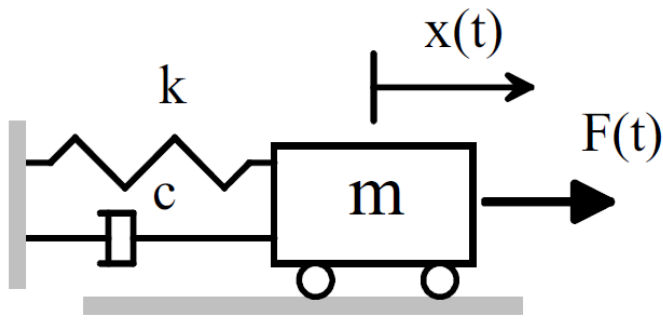
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega_n}$$

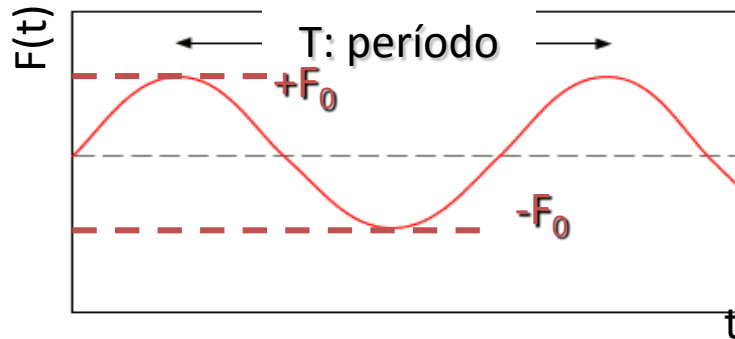
Factor de Amortiguamiento



Respuesta de estructuras de 1 g.d.l. a carga armónica



$$F(t) = F_0 \text{ sen } \omega t$$



$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \text{ sen } \omega t$$

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t)$$

Solución de la ecuación homogénea: físicamente corresponde a la **respuesta transitoria**

Solución particular de la ecuación completa: físicamente corresponde a la **respuesta permanente**

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_o \text{ sen } \omega t \quad x(t) = x_h(t) + x_p(t)$$

RESPUESTA TOTAL = TRANSITORIA + PERMANENTE

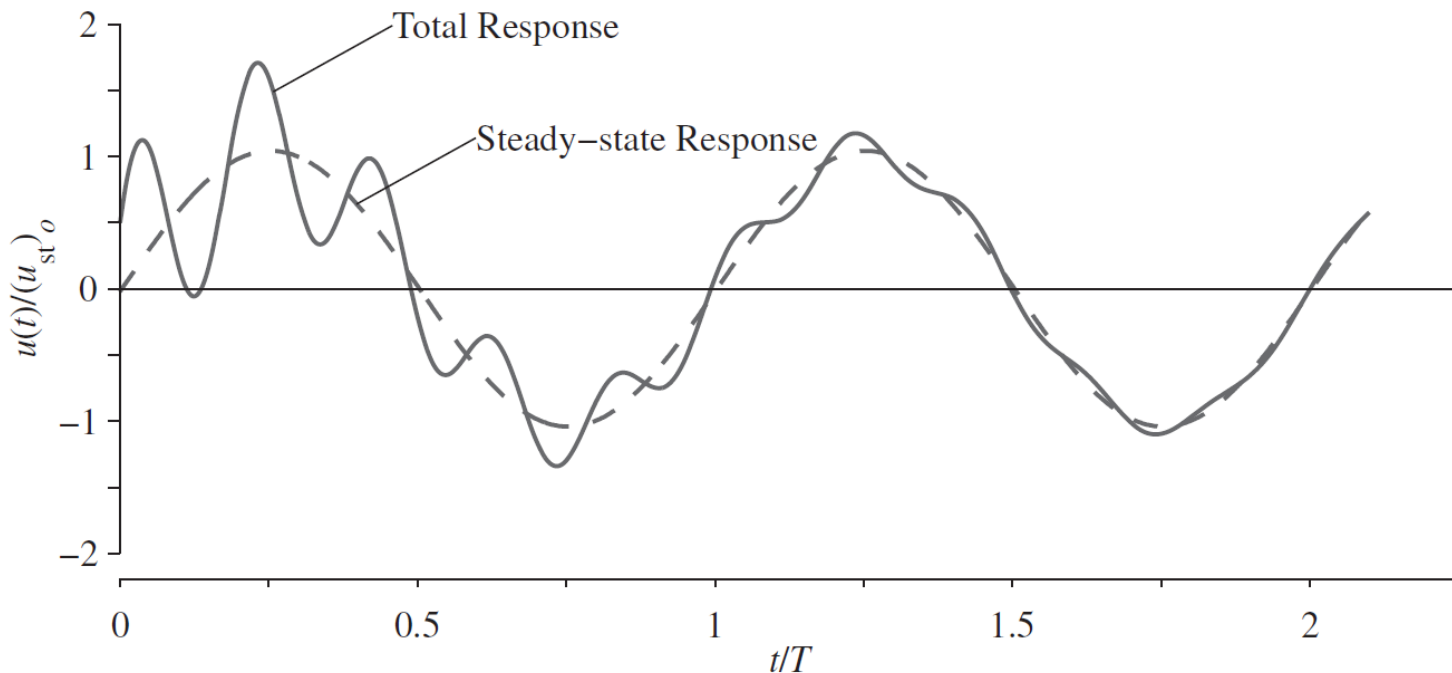
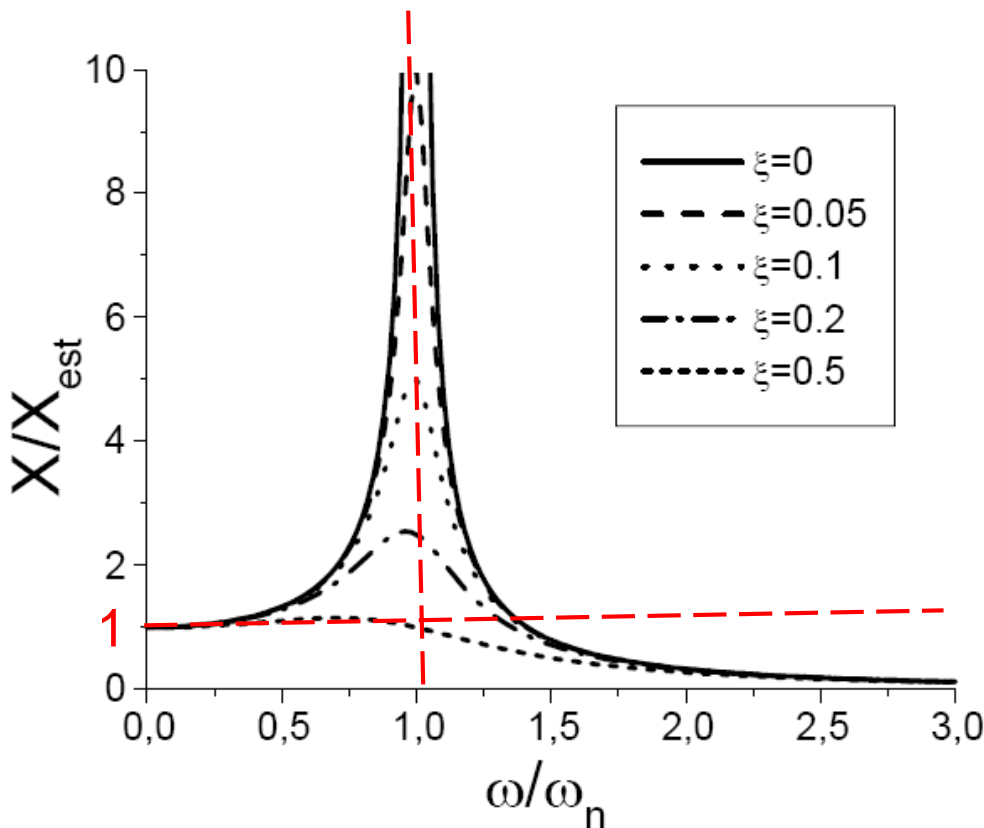


Figure 3.2.1 Response of damped system to harmonic force; $\omega/\omega_n = 0.2$, $\zeta = 0.05$, $u(0) = 0.5p_o/k$, and $\dot{u}(0) = \omega_n p_o/k$.

Coeficiente de Amplificación Dinámica

$$x_p(t) = X \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

$$\frac{X}{F_o/k} = \frac{X}{X_{est}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}}$$



❖ Cuando $\omega \ll \omega_n \rightarrow X \sim X_{est}$, i.e., los efectos dinámicos son despreciables:

VALIDEZ DEL CÁLCULO ESTÁTICO

(el desplazamiento máximo está controlado por la rigidez de la estructura, con poca influencia de su masa o amortiguamiento)

❖ Cuando $\omega \approx \omega_n \rightarrow$ se produce la amplificación máxima (**RESONANCIA**). Esto sucede para una frecuencia:

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \sim \omega_n \text{ (para } \xi < 0,2)$$

con una amplificación

$$\left. \frac{X}{X_{est}} \right|_{max} = \frac{1}{2\xi \sqrt{1 - \xi^2}} \sim \frac{1}{2\xi} \text{ (para } \xi < 0,2)$$

(basándonos en esta idea podemos establecer procedimientos experimentales para la estimación de ξ y ω_n)

❖ Cuando $\omega \gg \omega_n$

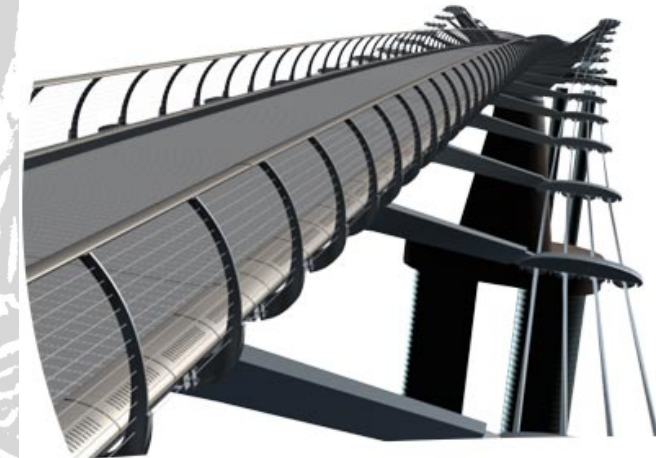
$$\left. \frac{X}{X_{est}} \right|_{\omega \rightarrow \infty} \rightarrow 0$$

- ❖ Introducción
- ❖ **Problemas vibratorios en Ingeniería Estructural**
- ❖ Determinación experimental de las propiedades dinámicas de una estructura
- ❖ Monitorización de estructuras: Mantenimiento estructural predictivo
- ❖ Calibración de modelos de elementos finitos
- ❖ Conclusiones

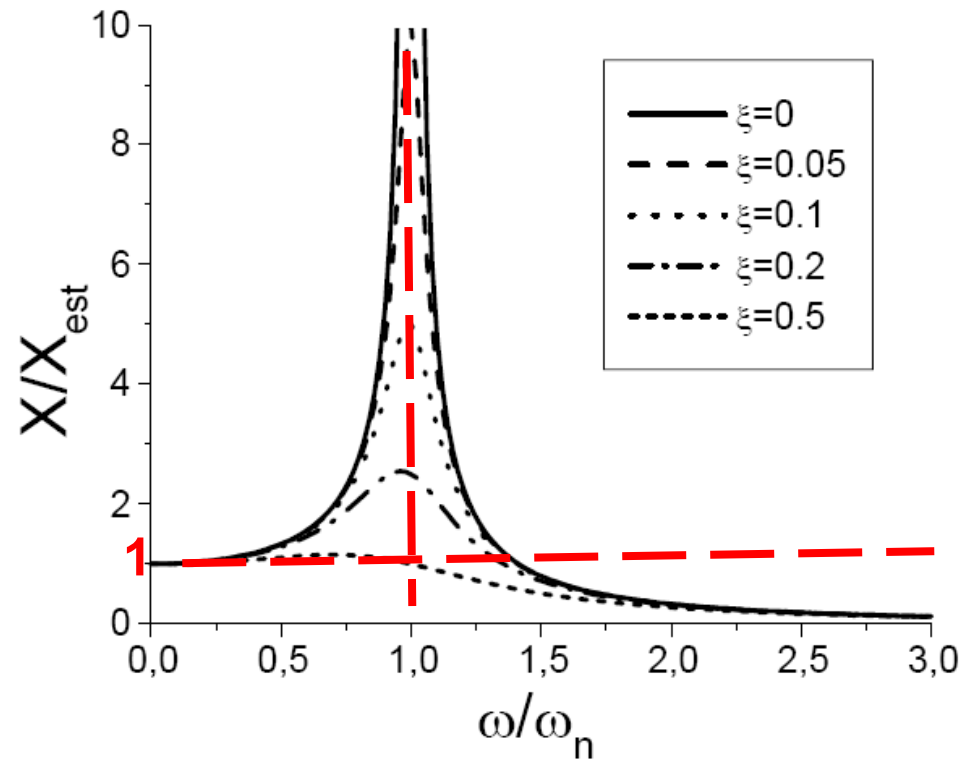
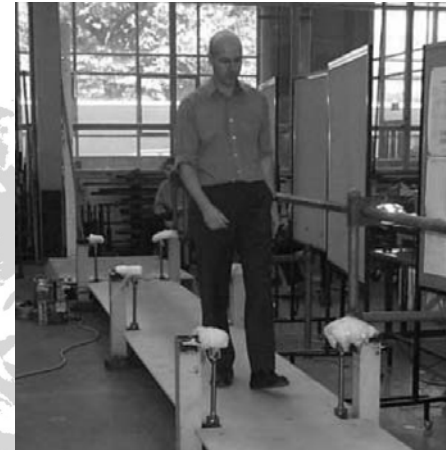
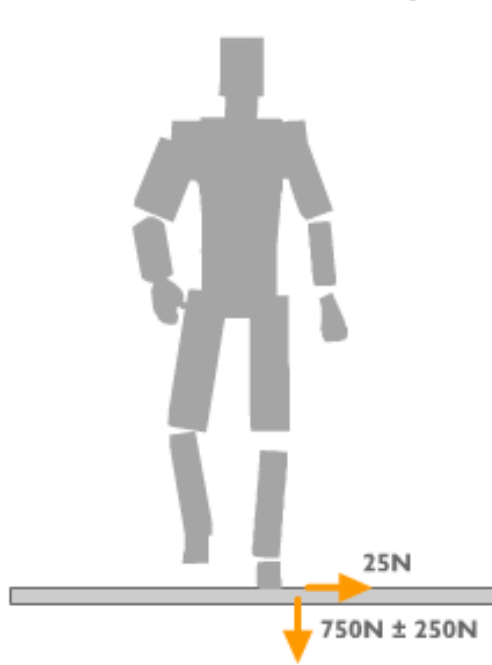
Puente del Milenio (Londres)



<http://www.arup.com/>



Puente del Milenio (Londres)



Puente del Milenio (Londres)

challenge **modifications**

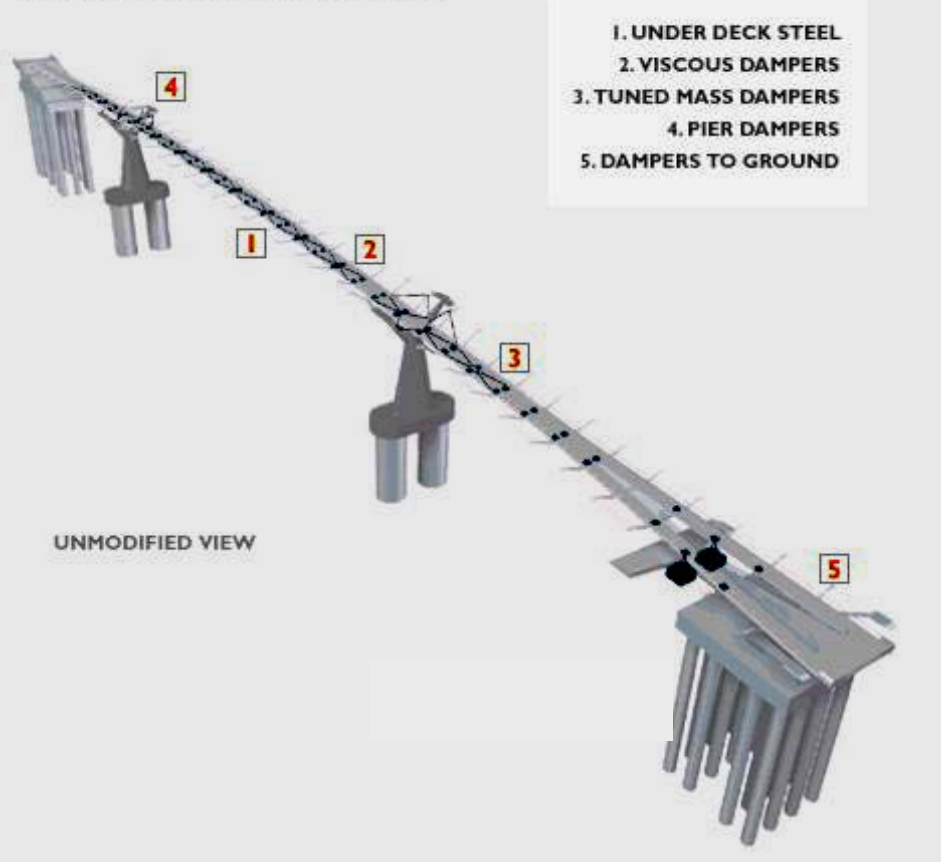


FIGURE 7
VERTICAL DAMPERS



FIGURE 8
PIER DAMPERS



FIGURE 9
CHEVRON DAMPER

ESTRATEGIAS DE DISEÑO PARA GARANTIZAR EL NIVEL DE CONFORT EN PASARELAS PEATONALES

Puente sobre el río Tajo, "Arcos de Alconétar".



El puente sobre el río Tajo, en el Embalse de Alcántara, denominado “Arcos de Alconétar”, pertenece a la Autovía de la Plata. Está constituido por dos estructuras gemelas de 400 m de longitud, cuyo vano principal es un arco metálico de tablero superior, de 220 m de luz y 42,50 m de flecha.

Puente sobre el río Tajo, "Arcos de Alconétar".

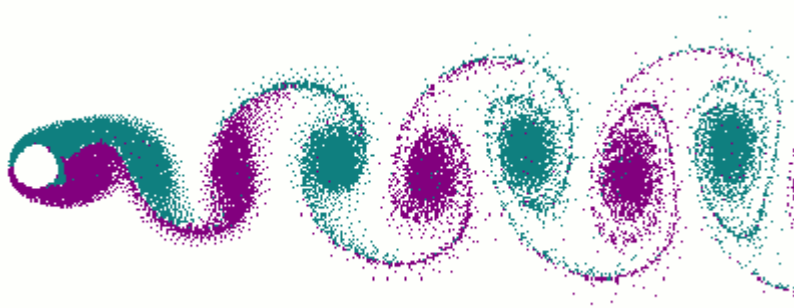


Figura 58. Deflector. Detalle.



Figura 59. Modelo seccional del arco, sin deflectores, montado en túnel de viento.

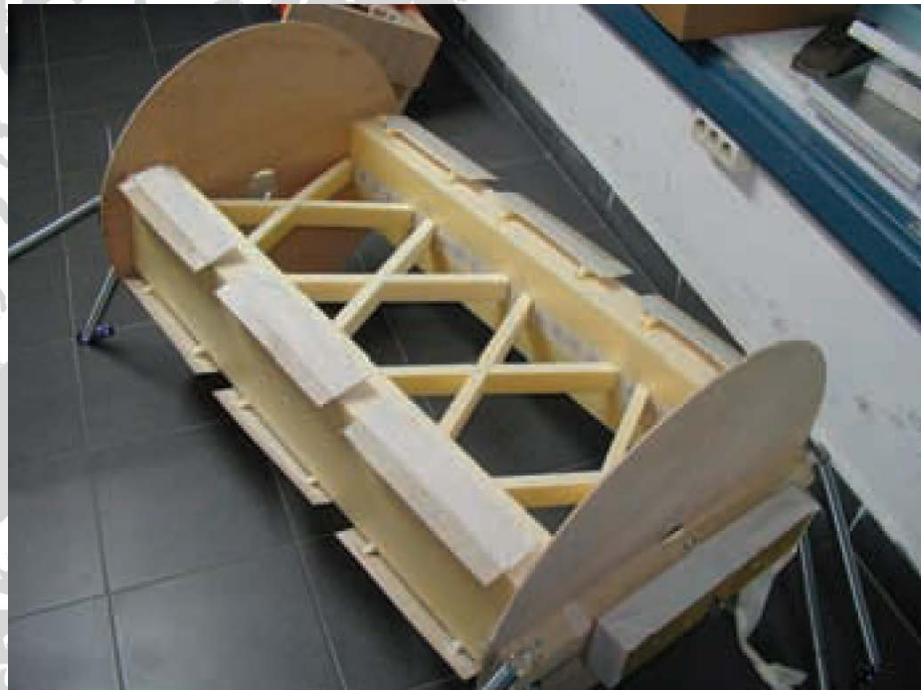


Figura 60. Modelo provisto de deflectores.

Conclusiones hasta el momento (I):

- ❖ Importancia de los efectos dinámicos sobre las estructuras
- ❖ Necesidad de contar con modelos que los representen adecuadamente en fase de proyecto
- ❖ Necesidad de contar con herramientas para medir experimentalmente las propiedades dinámica de estructuras ya construidas
- ❖ Necesidad de contar con estrategias de control de vibraciones

Conclusiones hasta el momento (II - oportunidades):

FRECUENCIA NATURAL

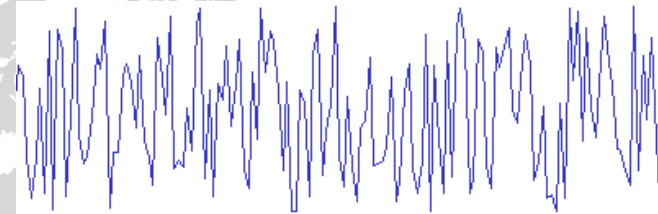
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- ❖ Monitorización del estado (salud) de estructuras: mantenimiento estructural predictivo
- ❖ Calibración de modelos de elementos finitos, para ajustarlos a la realidad ya construida (mantenimiento, estrategias de reparación...)

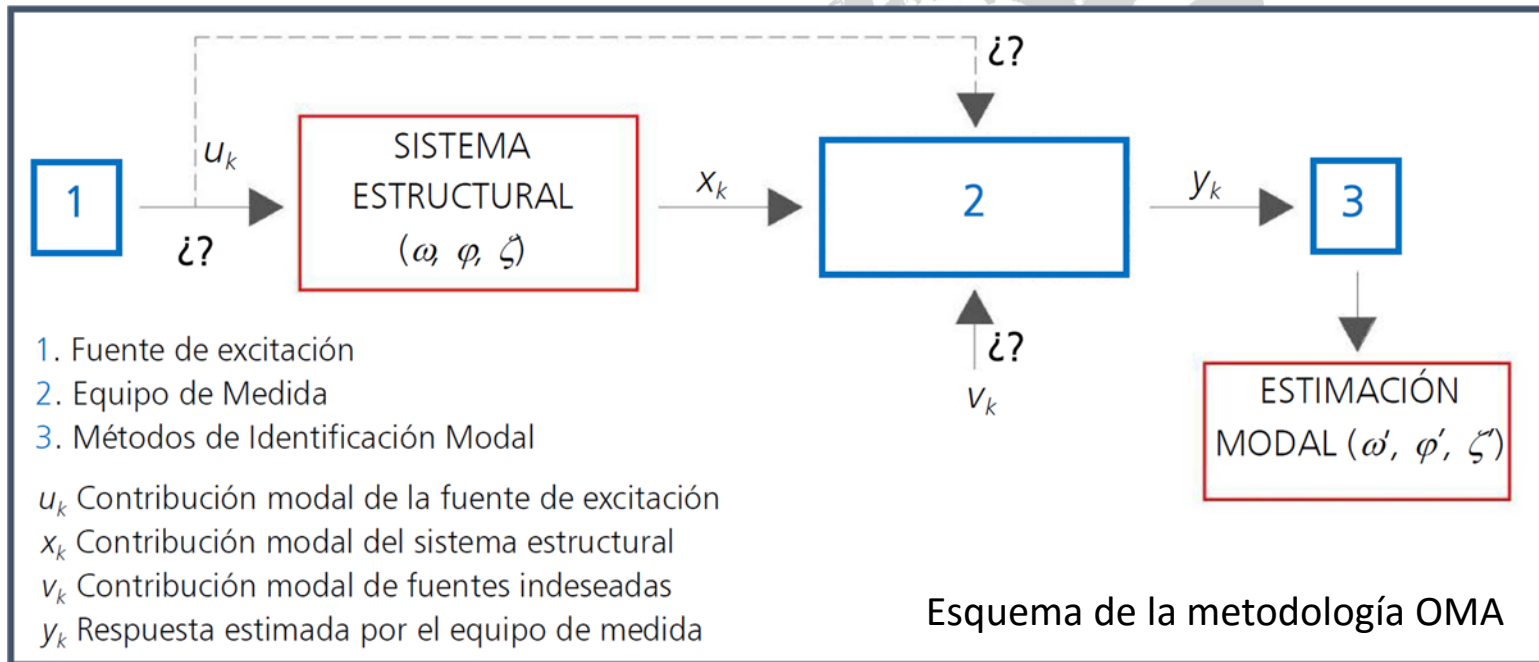
- ❖ Introducción
- ❖ Problemas vibratorios en Ingeniería Estructural
- ❖ **Determinación experimental de las propiedades dinámica de una estructura**
- ❖ Monitorización de estructuras: Mantenimiento estructural predictivo
- ❖ Calibración de modelos de elementos finitos
- ❖ Conclusiones

Análisis Modal Experimental (EMA): realizamos un ensayo de vibración forzada con excitación conocida y, a partir de la respuesta observada de la estructura, determinamos sus propiedades dinámicas (modales)

¿Podríamos utilizar la **vibración ambiental** como Fuente excitadora?:



EL ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL (OMA)

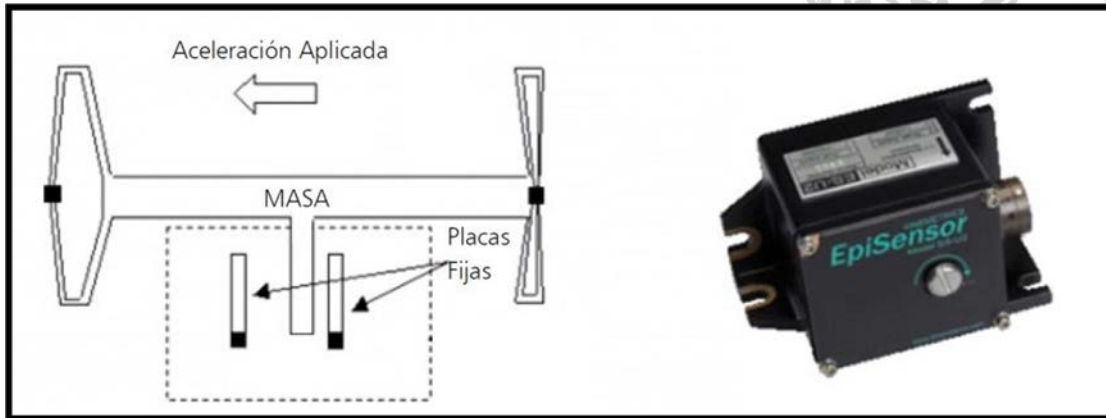


OBJETIVO: Determinación de propiedades dinámicas de la estructura (modos, frecuencias) a partir de excitación ambiental.

EL ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL OMA



Equipo de adquisición de datos



Acelerómetro



Contents lists available at ScienceDirect

Mechanical Systems and Signal Processing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jnlabr/ymssp



Tutorial Review

Explaining operational modal analysis with data from an arch bridge

Filipe Magalhães, Álvaro Cunha*

University of Porto, Faculty of Engineering (FEUP), R. Dr. Robe



Fig. 1. View of Infante D. Henrique Bridge from downstream (Porto at the left side).

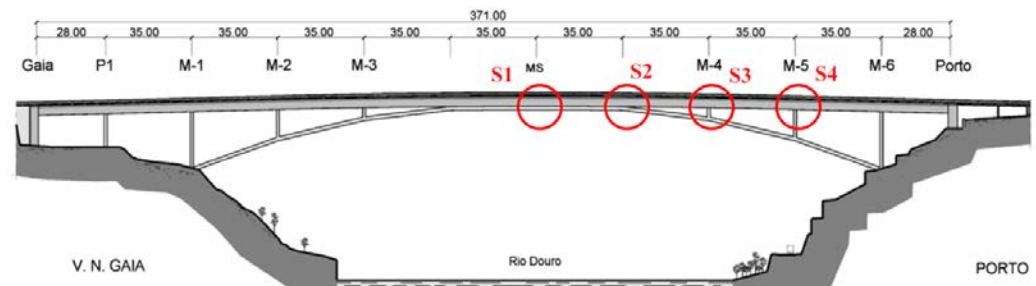


Fig. 2. Elevation of the bridge showing the instrumented sections: S1–S4.

- ❖ Introducción
- ❖ Problemas vibratorios en Ingeniería Estructural
- ❖ Determinación experimental de las propiedades dinámica de una estructura
- ❖ **Monitorización de estructuras: Mantenimiento estructural predictivo**
- ❖ Calibración de modelos de elementos finitos
- ❖ Conclusiones

The Structural Health Monitoring Process

1. Operational evaluation

Defines the damage to be detected and begins to answer questions regarding implementation issues for a structural health monitoring system.

2. Data acquisition

Defines the sensing hardware and the data to be used in the feature extraction process.

3. Feature extraction

The process of identifying damage-related information from measured data.

4. Statistical model development for feature discrimination

Classifies feature distributions into damaged or undamaged category.

- Data Cleansing
- Data Normalization
- Data Fusion
- Data Compression

(implemented by software and/or hardware)

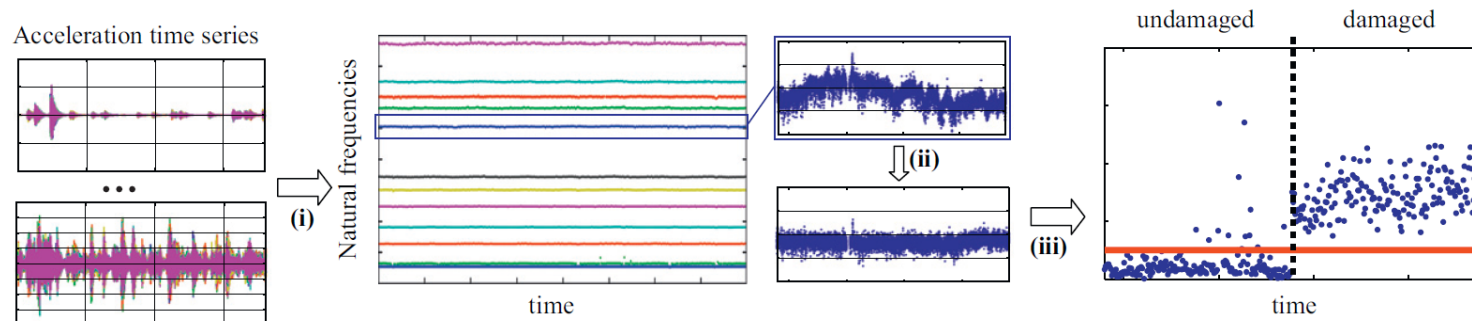


Fig. 12. Main processing steps of a vibration-based health monitoring system.

SHM Applications

- Buildings (critical or even historical)
- Bridges
- Tunnels
- Wind Generators



>> Practically: any critical structure

An introduction to structural health monitoring

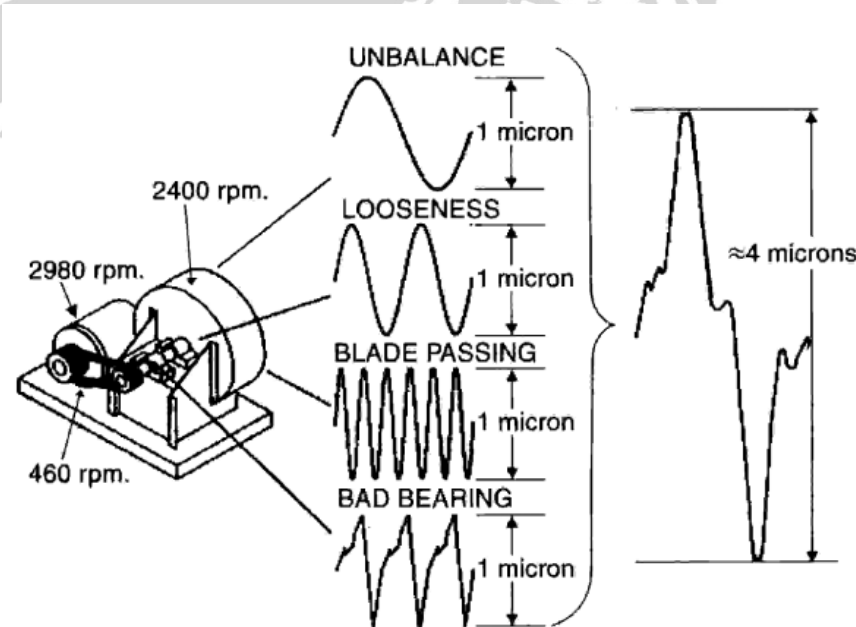
BY CHARLES R. FARRAR¹ AND KEITH WORDEN^{2,*}

¹*Engineering Science and Applications Division, Los Alamos National Laboratory Los Alamos, Los Alamos, NM 87545, USA*

²*Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, UK*



Se trata por tanto de extender al campo de las estructuras civiles las técnicas de análisis de vibraciones para el mantenimiento predictivo de máquinas:



Objetivo de los planes de mantenimiento predictivo:

Detectar defectos en fase incipiente, de manera que podamos actuar con antelación y obtener importantes beneficios reduciendo los costes de operación y mantenimiento.

- ❖ Necesitamos modelos numéricos (MEF) debidamente calibrados
- ❖ Las medidas deben ser ajenas a influencias externas (condiciones ambientales, etc.) y sensibles a defectos en fase inicial.



Fig. 1. View of Infante D. Henrique Bridge from downstream (Porto at the left side).

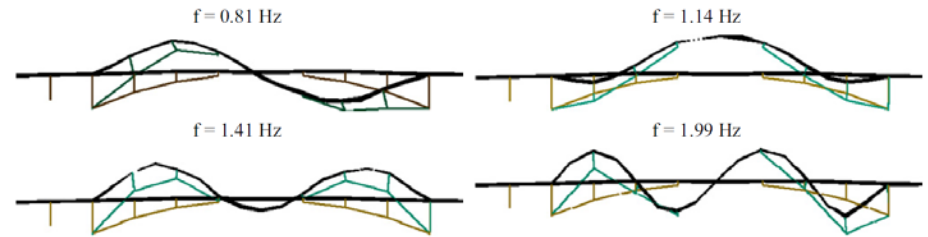


Fig. 4. First four identified vertical bending modes.

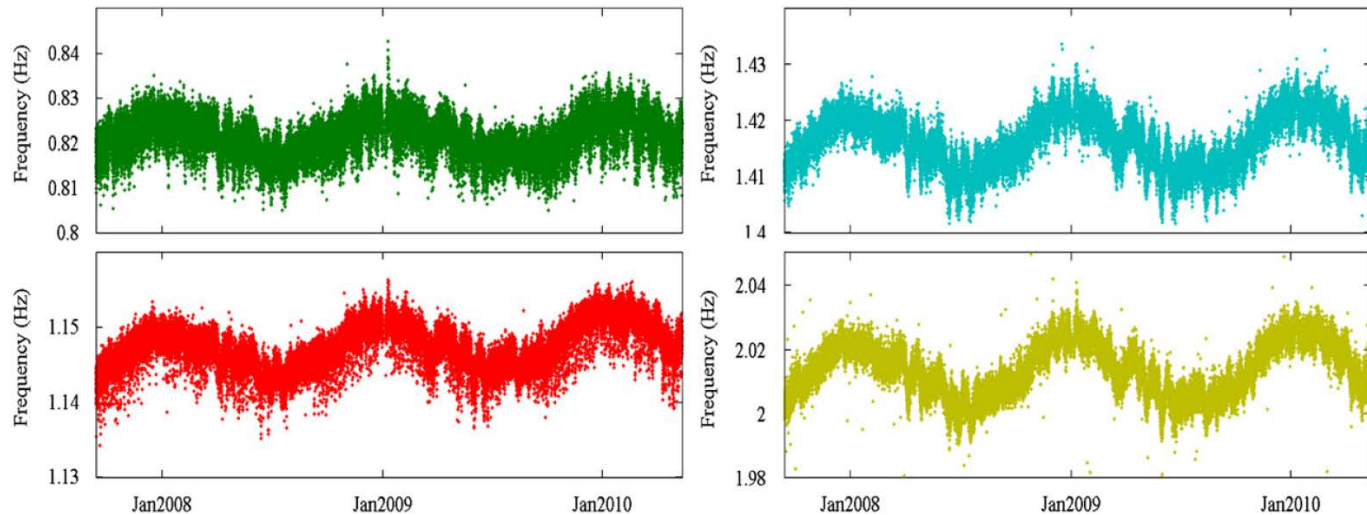


Fig. 11. Time evolution of the natural frequencies of the first four vertical bending modes.

- ❖ Introducción
- ❖ Problemas vibratorios en Ingeniería Estructural
- ❖ Determinación experimental de las propiedades dinámica de una estructura
- ❖ Monitorización de estructuras: Mantenimiento estructural predictivo
- ❖ **Calibración de modelos de elementos finitos**
- ❖ Conclusiones

La forma más sencilla de realizar la actualización de los modelos de elementos finitos es **minimizar las diferencias entre los resultados numéricos y experimentales** → La **función** construida con dicho **objetivo** es usualmente definida como un problema de mínimos cuadrados:

$$f(\theta) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^m \left[z_j(\theta) - \tilde{z}_j \right]^2 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^m r_j(\theta)^2 = \frac{1}{2} \cdot \|r(\theta)\|^2$$

magnitudes resultantes del
modelo numérico

magnitudes obtenidas de
forma experimental

variables del modelo sobre las que establecemos el ajuste (actualización), i.e., parámetros físicos de la estructura, tales como el modulo de elasticidad del material, la rigidez de los aparatos de apoyo...

← La elección de estas variables y su rango de variación admitido es clave!!

Problema de optimización → Algoritmos genéticos, etc.

- ✓ Problema de optimización matemático **vs** Parámetros con significado físico:

Definición de intervalos de búsqueda + Ajuste manual

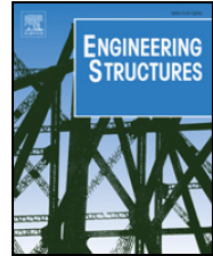


ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Engineering Structures

journal homepage: www.elsevier.com/locate/engstruct



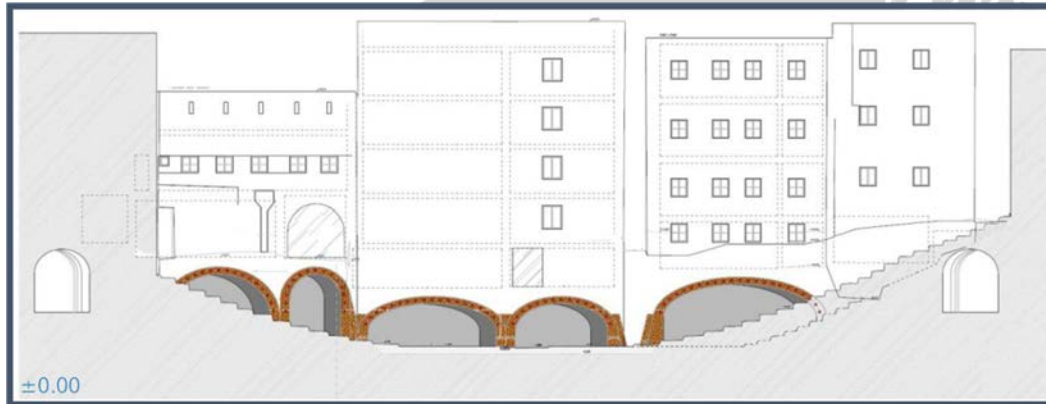
Improved bridge evaluation through finite element model updating using static and dynamic measurements

Hendrik Schlune*, Mario Plos¹, Kent Gylltoft²

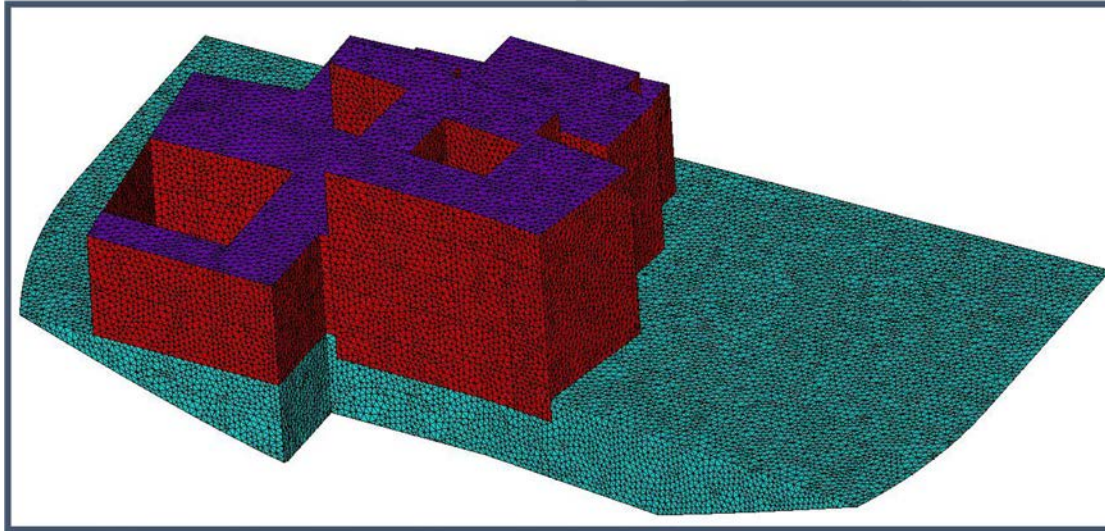
Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Concrete Structures, Chalmers University of Technology, SE-412 96 Göteborg, Sweden

EL TEATRO ROMANO DE CÁDIZ: ANÁLISIS DE SU ESTABILIDAD ESTRUCTURAL TRAS LA INTERVENCIÓN

Descripción de la intervención

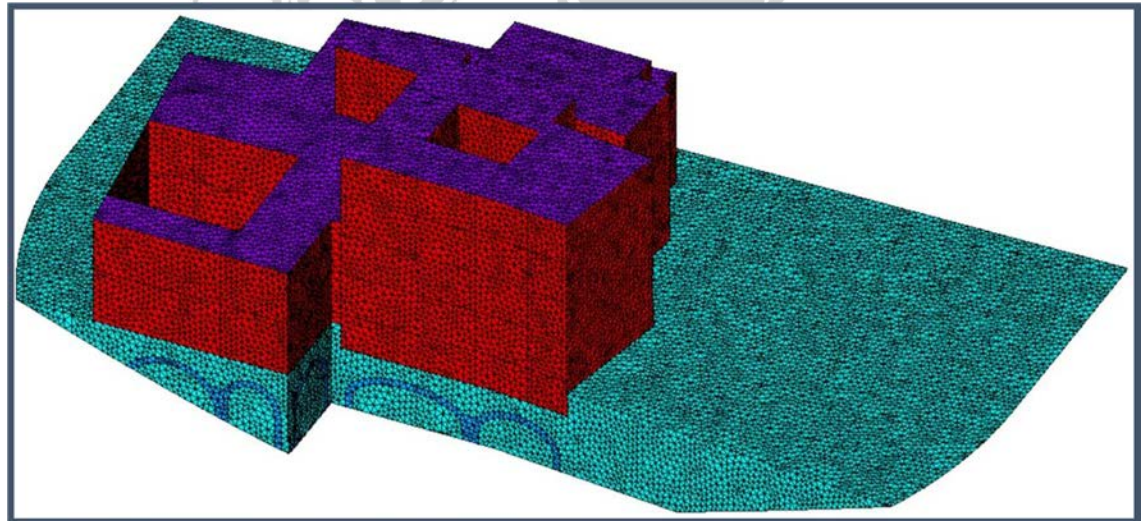


EL TEATRO ROMANO DE CÁDIZ: ANÁLISIS DE SU ESTABILIDAD ESTRUCTURAL TRAS LA INTERVENCIÓN



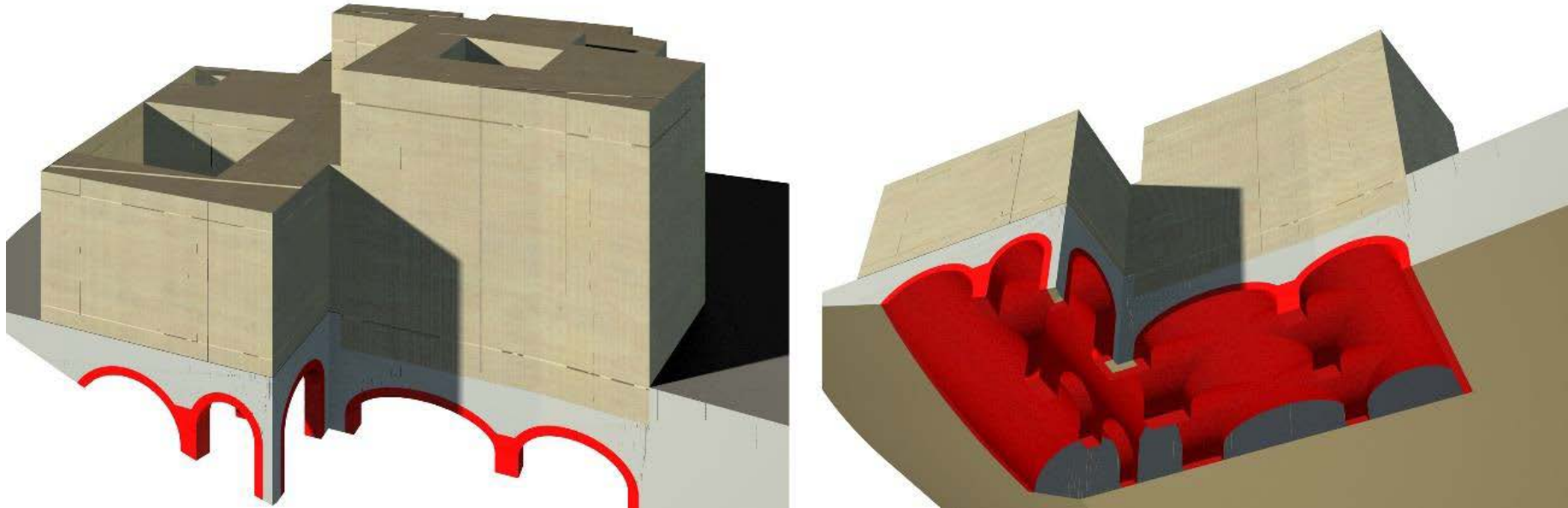
Modelo de elementos finitos en la situación inicial

Modelo de elementos finitos tras la ejecución de las bóvedas

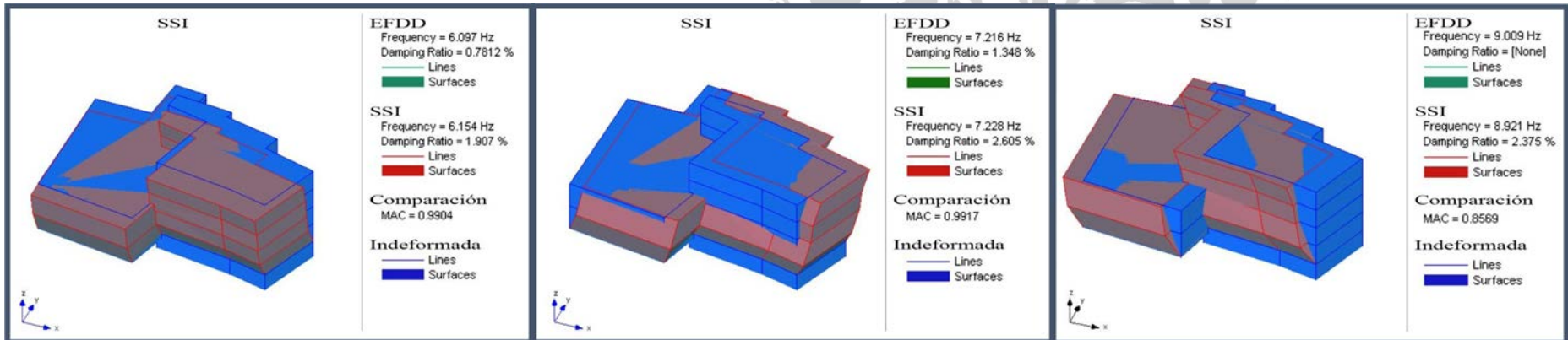
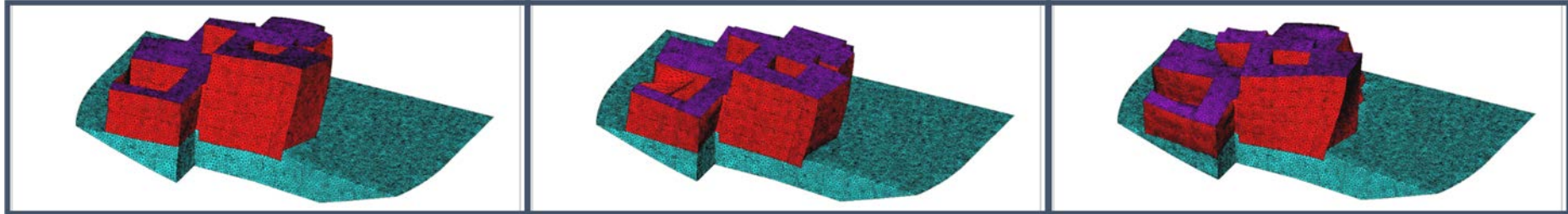


EL TEATRO ROMANO DE CÁDIZ: ANÁLISIS DE SU ESTABILIDAD ESTRUCTURAL TRAS LA INTERVENCIÓN

Estimación del impacto de la intervención sobre las construcciones que gravitan sobre el Teatro Romano:



EL TEATRO ROMANO DE CÁDIZ: ANÁLISIS DE SU ESTABILIDAD ESTRUCTURAL TRAS LA INTERVENCIÓN



	Fase previa (Hz)		Fase post-ejecución de las bóvedas (Hz)		Fase final (Hz)
	Experimental	Analítico	Experimental	Analítico	Analítico
1	6.15	6.14	6.17	6.15	6,14
2	7.22	7.15	7.23	7.16	7,13
3	8.90	8.97	8.90	9.04	8,98

EL TEATRO ROMANO DE CÁDIZ: ANÁLISIS DE SU ESTABILIDAD ESTRUCTURAL TRAS LA INTERVENCIÓN

OMA empleado como técnica complementaria a otras técnicas de control:



Fig. 7. Total station of topographical control (left). Target (right).

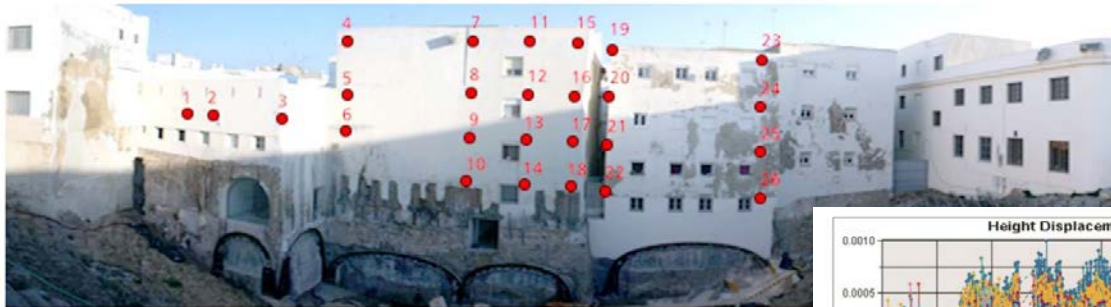
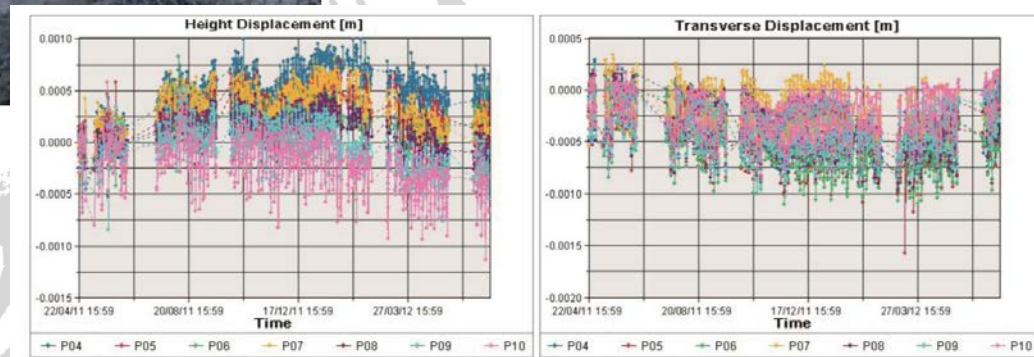


Fig. 8. Targets location.



- ❖ Introducción
- ❖ Problemas vibratorios en Ingeniería Estructural
- ❖ Determinación experimental de las propiedades dinámica de una estructura
- ❖ Monitorización de estructuras: Mantenimiento estructural predictivo
- ❖ Calibración de modelos de elementos finitos
- ❖ **Conclusiones**

Conclusiones:

- ❖ Importancia de los efectos dinámicos sobre las estructuras
- ❖ Contamos con modelos que los representan adecuadamente en fase de proyecto
- ❖ Contamos con herramientas para medir experimentalmente las propiedades dinámica de estructuras ya construidas
- ❖ Contamos con estrategias de control de vibraciones
- ❖ Basado en la variación en servicio de las propiedades dinámicas de una estructura podemos establecer estrategias de monitorización de su estado y, en consecuencia, de mantenimiento estructural predictivo (SHM – *Structural Health Monitoring*)
- ❖ En base a las propiedades dinámica medidas experimentalmente, podemos calibrar el modelo de elementos finitos correspondiente, para ajustarlo a la realidad ya construida (mantenimiento, estrategias de reparación...)