



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# XIII JORNADES DE XARXES D'INVESTIGACIÓ EN DOCÈNCIA UNIVERSITÀRIA

Noves estratègies organitzatives i metodològiques en la formació  
universitària per a respondre a la necessitat d'adaptació i canvi



JORNADAS  
DE REDES DE INVESTIGACIÓN  
EN DOCENCIA UNIVERSITARIA **XIII**

Nuevas estrategias organizativas y metodológicas en la formación  
universitaria para responder a la necesidad de adaptación y cambio

ISBN: 978-84-606-8636-1

**Coordinadores**

**María Teresa Tortosa Ybáñez**

**José Daniel Álvarez Teruel**

**Neus Pellín Buades**

© **Del texto: los autores**

© **De esta edición:**

**Universidad de Alicante**

**Vicerrectorado de Estudios, Formación y Calidad**

**Instituto de Ciencias de la Educación (ICE)**

**ISBN: 978-84-606-8636-1**

**Revisión y maquetación: Neus Pellín Buades**

**Publicación: Julio 2015**

# **Adaptación de la docencia en el cálculo de estructuras a las nuevas tecnologías**

David Bru Orts; Salvador Ivorra Chorro; F.J. Baeza de los Santos; Miguel Angel Crespo Zaragoza;  
Vicente Brotons Torres, Miguel Navarro Menargues

*Departamento de Ingeniería Civil- Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Alicante*

## **RESUMEN (ABSTRACT)**

La implantación de las nuevas metodologías de enseñanza a partir de las directrices establecidas en el Espacio Europeo de Educación Superior, ha supuesto una renovación necesaria en los materiales docentes utilizados. En este sentido, el presente artículo muestra los avances en el uso de programas informáticos para la resolución de estructuras desarrollado a lo largo de las diferentes asignaturas que conforman las titulaciones de Ingeniería Civil, el Máster de Caminos, Canales, y Puertos, así como el Máster de Ingeniería de los Materiales, Agua y Terreno de la Universidad de Alicante. De esta forma el alumno es capaz de aproximarse a la realidad laboral, pudiendo comparar los resultados analíticos resueltos de forma tradicional, con los obtenidos con software comerciales ampliamente extendidos en el campo profesional. El uso de dichas herramientas se ha introducido de forma progresiva a lo largo de todos los cursos de las titulaciones anteriormente comentadas. Inicialmente, el alumno se familiariza con la resolución de estructuras a través de elementos barra, combinando diferentes materiales y acciones. Finalmente, el alumno desarrolla elementos placa, así como modelos reológicos y análisis dinámicos de estructuras. Por este motivo, y con el fin de completar la educación de los alumnos, en el presente trabajo se ha tratado de aproximar al alumno a las estructuras reales y a su posterior modelización numérica.

**Palabras clave:** Estructuras, modelos numéricos, ensayos de campo, dinámica, participación.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alicante, lleva formando Ingenieros civiles desde hace más de cuarenta años. Inicialmente las titulaciones de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas, y de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, han ido transformándose en el Grado de Ingeniería Civil y el Master de Caminos, Canales y Puertos, conforme lo estipulado en el Espacio Europeo de Educación Superior (EEES). Este trabajo se enmarca dentro de las investigaciones para el desarrollo de las nuevas asignaturas de cálculo de estructuras, permitiendo acercar al alumno al proceso de modelización numérica de estructuras reales mediante programas informáticos. Además, forma parte de la línea de trabajo del grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Civil, de la Universidad de Alicante, “GRESMES: Grupo de Ensayo, Simulación y Modelización de Estructuras”, desarrollado en las Redes propuestas para los últimos años [1]. De esta forma, los trabajos realizados durante los últimos años, han servido para la preparación del material docente para el desarrollo de las actividades en el interior de las aulas, mediante el desarrollo de prácticas de laboratorio, y prácticas de cálculo de estructuras con ordenador, así como para la elaboración de posters informativos dispuestos en las aulas para facilitar la comprensión del comportamiento mecánico de las estructuras. Estos trabajos preliminares, sirvieron como base para fomentar la introducción de los alumnos al análisis de las estructuras desde un punto de vista mucho más práctico e intuitivo. Por ello, en el presente año, gracias al desarrollo de la Red 2015, se ha intentado dar un paso más en la aproximación de los alumnos a la realidad del cálculo de las estructuras, modelizando estructuras reales.

Figura 1. Perspectiva general-Visita puente sobre el Rio Tajo. Cáceres



Figura 2. Fase construcción-Visita puente sobre el Rio Tajo. Cáceres



## 2. METODOLOGÍA

El presente artículo trata de mostrar tres casos desarrollados en las asignaturas de Puentes (33553), Cálculo Avanzado de Estructuras (33551) e Ingeniería Sísmica (49620). En dichos casos, la metodología empleada consistió en primer lugar, en la realización de una visita a obra, con el fin de explicar las singularidades de la misma, y facilitar la mejoría del trabajo en grupo de los alumnos, gracias al desarrollo de actividades fuera de la propia universidad. En segundo lugar, se procedió a la modelización de la estructura de forma simplificada mediante un programa de cálculo informático. En esta segunda fase, y gracias a las explicaciones pertinentes durante la visita a obra, se procedió a la realización de las simplificaciones habituales según el nivel de profundización a alcanzar en el posterior análisis del modelo. Las tres estructuras analizadas consistieron en un puente en arco de hormigón ejecutado sobre el río Tajo, en la provincia de Cáceres. Una pasarela metálica en cajón en la provincia de Alicante, y un forjado de madera, analizado dentro de los nuevos laboratorios de la Universidad de Alicante.

Figura 3. Alzado real del puente arco analizado.

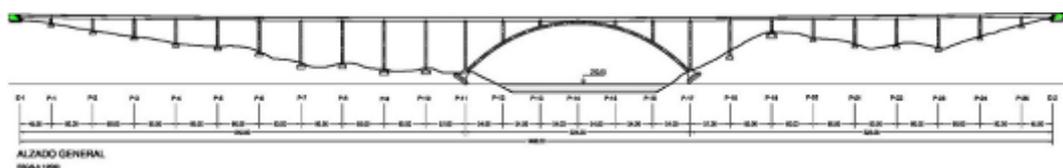


Figura 4. Alzado del modelo numérico simplificado.

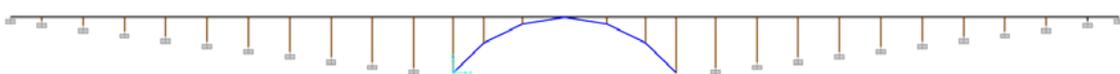


Figura 5. Diagramas de esfuerzos flectores por la acción de la sobrecarga de uso.



Figura 6. Alzado. Forma modal del primer modo de vibración.



Figura 7. Alzado. Forma modal del segundo modo de vibración.



### 3. RESULTADOS

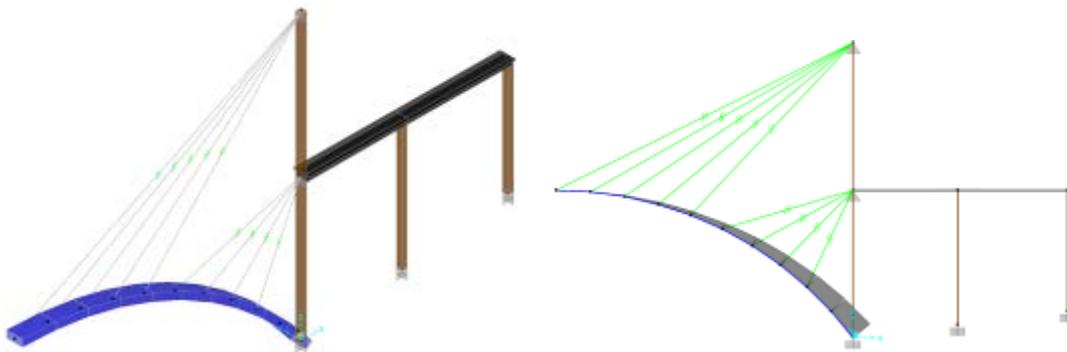
#### 3.1. Primera visita: Puente en arco de hormigón en la provincia de Cáceres.

El puente analizado se corresponde con una serie de puentes desarrollados en la Línea de Alta Velocidad Madrid-Extremadura, Figura 1 y Figura 2. En concreto, la longitud del viaducto es de 1488m, estando dividido en tres partes fundamentales. Por un lado los vanos de aproximación lateral, y por otro, el arco de 324m de luz que permite salvar el río Tajo. La disposición de las pilas bajo el arco, queda distribuida en vanos de 54m. Sin embargo, en los vanos de aproximación lateral, dichas pilas se distribuyen en una longitud de 57m, Figura 3. El elemento más singular de la estructura, el arco, se dispone con directriz curva y sección en cajón de canto variable entre los 3.50m y los 4m. Además, el ancho del mismo, también presenta una sección variable de 12m en la zona de arranque y 6m en la zona de clave. Por otro lado, el tablero de los vanos de acceso lateral está formado por un cajón de hormigón pretensado de 4m de canto y de 5m y 6.50m de ancho para la cabeza superior e inferior de la sección. Asimismo, el tablero se remata con sendas alas laterales hasta completar los 14m de ancho total exigido para la plataforma. Por último, las pilas están constituidas con una sección en cajón rectangular de 3m de ancho constante, siendo los espesores para todos los elementos estructurales de valor 0.5m.

Tabla 1. Periodos de vibración, frecuencias y masas movilizadas. Puente arco.

Modo	Periodo	Frecuencia	Masa movilizada en "X"	Masa movilizada en "Y"	Masa movilizada en "Z"
-	s	Hz	%	%	%
1	5.36	0.18	0	54	0
2	4.05	0.25	0	31	0

Figura 8. Fase constructiva del arco. Izq.: Perspectiva del modelo numérico. Drcha.: Diagramas de esfuerzos axiales.



Los objetivos a desarrollar en esta visita, consistieron en la modelización simplificada del viaducto, tanto en su fase final, como durante la fase constructiva, con el objeto de determinar las frecuencias de vibración, las distribuciones de esfuerzos, así como los posibles planos de debilidad a priori de estas tipologías estructurales. Parámetros, previamente explicados durante las sesiones de teoría de las asignaturas previamente citadas. Para el análisis del viaducto en su configuración final, se realizó el modelo mostrado en la Figura 4. Dicho modelo se simplificó en lo referente a la disposición de las pilas, debido a su despreciable efecto frente a cargas verticales. Así mismo se consideró como condiciones de contorno en las zonas de apoyo de las pilas con el terreno, restricción total al movimiento. Las conexiones de las pilas con el tablero, se consideraron como articulaciones que permitieran el giro por flexión. Las Figuras 5, 6 y 7, muestran los resultados para la hipótesis de carga vertical de  $4.5 \text{ kN/m}^2$ , así como los resultados asociados al análisis modal. Uno de los principales resultados a destacar, para la compresión de estas tipologías estructurales por los alumnos, era el efecto de las cargas puntuales de las pilas sobre el arco. Estas generaban importantes esfuerzos flectores, sobre la estructura, que debían ser compensados con los esfuerzos axiales naturales del arco, para evitar la fisuración del hormigón en zonas de clave y riñones. Por otro lado, también era importante destacar para los alumnos, las formas modales de los primeros modos de vibración del viaducto. Estos modos están claramente vinculados a formas de vibración lateral, Figuras 6 y 7, con periodos de vibración de  $5.36\text{s}$  y  $4.05\text{s}$ , conforme la Tabla 1. Esto hecho, pone de manifiesto, los posibles problemas frente a inestabilidades laterales debido a la acción de un posible sismo, o a la acción del viento, en la dirección perpendicular al eje longitudinal del tablero.

Por otro lado, el segundo objetivo a desarrollar por parte de los alumnos, fue la realización de un modelo numérico que representara los esfuerzos en la estructura durante las fases de construcción. En la Figura 8, se muestra el modelo desarrollado. Dicho modelo, permitió asimilar por parte de los alumnos, la importancia del estudio de las fases constructivas en el desarrollo de una estructura real.

### 3.2. Segunda visita. Pasarela metálica en el barrio de San Gabriel, Alicante.

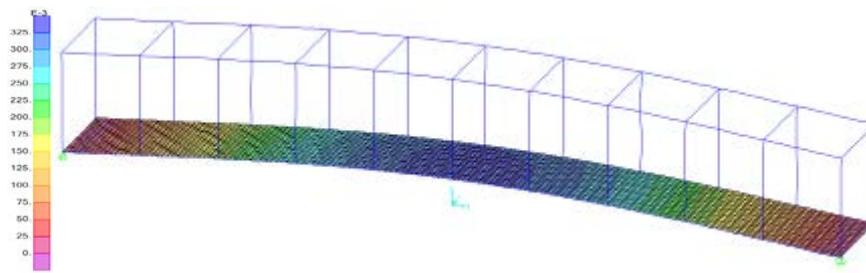
La segunda estructura analizada consistió en una pasarela peatonal metálica, dispuesta en el barrio de San Gabriel, Alicante, Figura 9. Dicha estructura presenta una longitud total entre apoyos de 20m, con un ancho de paso de 2.36m. La estructura está conformada por perfiles UPN soldados en cajón, formando una celosía con cordones dispuestos cada 2m. Además, para permitir el paso de los peatones sobre la misma, y servir como elemento de arriostramiento lateral, la estructura dispone de una losa de hormigón armado de 8cm de espesor.

El objetivo buscado en el desarrollo de esta segunda visita, consistió en introducir de forma más directa los conceptos del análisis dinámico de estructuras a los alumnos, especialmente los conceptos asociados a los efectos de resonancia. Estos efectos son fácilmente excitables en estructuras destinadas al paso de peatones debido a su ligereza y su baja rigidez. Para ello, durante el desarrollo de la experiencia de campo, se procedió a excitar la estructura bajo su modo fundamental de vibración, gracias a la colaboración de los alumnos. Para ello se procedió a excitar de forma regular a la frecuencia de resonancia de la estructura, en la zona central del vano, mediante el salto repetitivo de tres alumnos de forma sincronizada.

Figura 9. Vista general de la estructura en San Gabriel.



Figura 10. Forma modal del primer modo de vibración.



Una vez finalizada la experiencia de campo, y comprobados por parte de los alumnos los efectos de la resonancia de forma experimental, se procedió a realizar un modelo numérico y a analizar las frecuencias y formas modales de vibración, Figura 10 y 11. Si analizamos las figuras anteriores y los resultados mostrados en la Tabla 2, se observa que el primer modo de vibración está asociado a un desplazamiento vertical, sin embargo, el segundo modo, se corresponde con un movimiento lateral. Estos resultados, se traducen en que la estructura puede presentar problemas de vibraciones excesivas tanto por excitaciones verticales como horizontales [2]. Estos efectos, toman una elevada importancia dentro del campo de análisis de los Estados Límites de Servicio, y por lo tanto, dentro de las comprobaciones estructurales que deben analizar los alumnos en su práctica profesional, ya que los problemas de vibraciones no afectan directamente a daños de la estructura, pero si al confort de los usuarios.

Tabla 2. Periodos de vibración, frecuencias y masas movilizadas. Pasarela metálica

Modo	Periodo	Frecuencia	Masa movilizada en "X"	Masa movilizada en "Y"	Masa movilizada en "Z"
-	s	Hz	%	%	%
1	0.248	4.02	0.1	0	78.5
2	0.21	4.75	0	29	0

Figura 11. Forma modal del segundo modo de vibración.

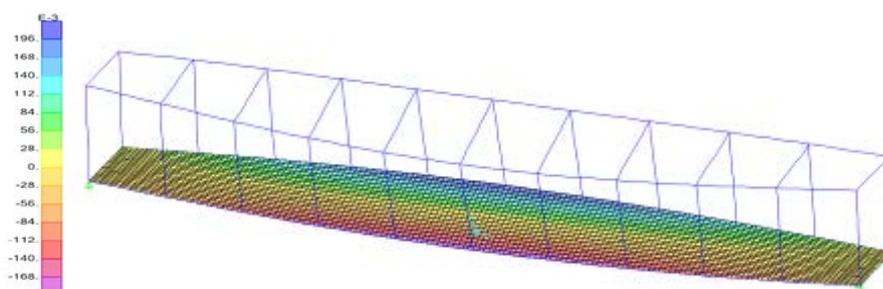
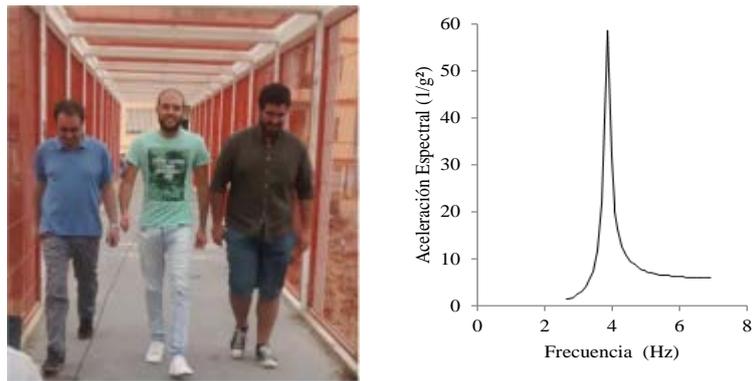


Figura 12. Izq.: Alumnos durante el proceso de excitación. Drcha.: Análisis de la señal.



Por otro lado, con el objetivo de mostrar a los alumnos el efecto de la resonancia a través del modelo numérico, se introdujo una función senoidal para la simulación del efecto de la acción cíclica debida a la interacción de tres peatones en la zona central del vano, actuando a la frecuencia de resonancia de la estructura. En la Figura 12, se muestra el proceso de excitación durante el desarrollo experimental por parte de los alumnos, y el análisis de la señal registrada en el modelo numérico tras el tratamiento digital de la señal. Se observa como claramente la frecuencia de vibración excitada es la debida al modo vertical. En la Figura 13, se muestran los resultados de aceleraciones obtenidas en el modelo numérico tras el proceso de excitación durante 10s, así como la curva de amortiguamiento durante los 15s restantes. A través de dichos resultados, se pudo explicar de forma práctica y sencilla, el significado de la resonancia y su efecto real en las estructuras.

Figura 13. Aceleraciones registradas durante el ensayo en el modelo numérico.

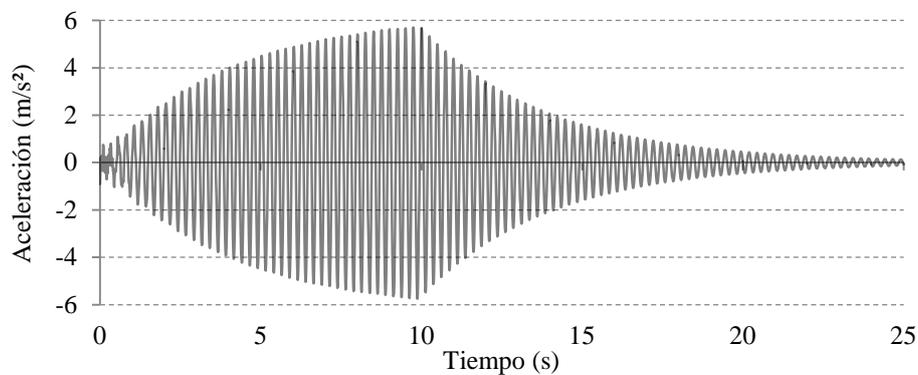


Figura 14. Tercera visita. Izq.: Forjado. Drcha.: Proceso de excitación.



### 3.3. Tercera visita. Forjado de madera en laboratorios de la Universidad de Alicante.

La tercera estructura analizada consistió en un forjado de madera, dispuesto en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Civil, en la Universidad de Alicante. Dicho forjado estaba constituido por dos vigas de madera laminada de  $80 \times 160 \text{ mm}^2$  de sección transversal y 3.04m de longitud, separadas transversalmente entre sí 1.1m. Sobre dichas vigas, se dispuso un tablero de madera compuesto de fibras encoladas de densidad media, DM, de dimensiones  $2.1 \times 2.84 \text{ m}^2$  y 3cm de espesor, Figura 14. La unión del tablero con las vigas de madera se realizó mediante el uso de conectores metálicos flexibles. Por último, para aislar las vibraciones del conjunto del laboratorio de la estructura real, se dispusieron apoyos elastoméricos bajo las zonas de apoyo de las vigas.

El objetivo buscado en el desarrollo de la tercera visita, consistió en aproximar de forma más clara al alumno, al procedimiento de muestreo y preparación experimental de una prueba de carga dinámica sobre una estructura real. De esta forma, se pretendía cerrar el ciclo de análisis presentado en el desarrollo de las tres estructuras analizadas, pasando por un proceso puramente numérico a un proceso puramente experimental. De tal forma que el alumno fuera capaz de realizar, interpretar y modelizar numéricamente el comportamiento dinámico de una estructura. Por este motivo, en esta tercera visita, se planteó el análisis mediante excitación de la estructura tras el paso de flujo de peatones sobre el forjado a diferentes velocidades (90 pasos/minuto y 135 pasos/minuto), Figura 14. Estas velocidades se asocian con velocidades de paso lento y paso ligero. A través de dicho ensayo, se mostró a los alumnos el uso de acelerómetros piezoeléctricos, así como los sistemas de adquisición de datos y los valores de frecuencias de muestreo en función de las frecuencias propias de vibración de la estructura. En la Figura 18, se muestran varios ejemplos de acelerómetros dispuestos durante el proceso previo de calibración, siendo la frecuencia de muestreo de 100Hz.

El análisis de los resultados obtenidos durante el proceso de excitación de la estructura permitió determinar las formas modales experimentales, así como el amortiguamiento estructural del sistema. Dichos valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Periodos de vibración, frecuencias y amortiguamientos. Forjado de madera.

Modo	Periodo	Frecuencia	Amortiguamiento
-	s	Hz	%
1	0.06	17.21	3.76
2	0.04	25.15	2.34
3	0.03	37.42	2.43
4	0.02	45.14	2.54

#### 4. CONCLUSIONES

Tras varios años de introducción de aplicaciones informáticas en la docencia de las asignaturas de cálculo de estructuras, acorde a las nuevas metodologías de enseñanza, se ha podido desarrollar una metodología didáctica capaz de relacionar los métodos clásicos de cálculo de estructuras, con los procedimientos experimentales, y las técnicas de modelización numérica, más acordes con la actualidad. En este sentido, el presente trabajo muestra de forma resumida los avances realizados con el fin de que los ingenieros de la Universidad de Alicante, completen su formación académica con un conocimiento lo más completo posible en lo referente al análisis global de las estructuras. De esta forma, el alumno llega a comprender la estructura real, tanto por las visitas a obra, como por la modelización numérica de dichas estructuras, así como con la comprobación mediante técnicas experimentales in situ, del comportamiento real de la estructura y su posible posterior comprobación y calibración del modelo numérico.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Baeza F. J., Ivorra S., Bru D., Segovia E. (2012). New technologies implementation in structures's teaching of civil engineering degrees inside the European higher education area, *Proceedings of EDULEARN12 Conference*, Barcelona, pp. 2985-2992.
- [2]. Ivorra S., Foti D., Bru D., Baeza F. J. (2013). Dynamic Behavior of a Pedestrian Bridge in Alicante, Spain. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 10.1061/(ASCE).