

---

# Investigación e Innovación Educativa en Docencia Universitaria. Retos, Propuestas y Acciones

Edición de.

Rosabel Roig-Vila  
Josefa Eugenia Blasco Mira  
Asunción Lledó Carreres  
Neus Pellín Buades

Prólogo de.

José Francisco Torres Alfosea  
Vicerrector de Calidad e Innovación Educativa  
Universidad de Alicante

---

Edición de:

Rosabel Roig-Vila  
Josefa Eugenia Blasco Mira  
Asunción Lledó Carreres  
Neus Pellín Buades

© Del texto: los autores (2016)

© De esta edición:

Universidad de Alicante  
Vicerrectorado de Calidad e Innovación educativa  
Instituto de Ciencias de la Educación (ICE) (2016)

ISBN: 978-84-617-5129-7

Revisión y maquetación: Neus Pellín Buades

**Segundo año de desarrollo de las actividades de coordinación vertical  
en las asignaturas de estructuras en el Grado de Ingeniería Civil, el  
Máster de Caminos y Máster de Materiales, Agua y Terreno**

David. Bru Orts; F. Borja Varona Moya; F. Javier. Baeza de los Santos; Miguel Navarro  
Menargues; Salvador Ivorra Chorro

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

**RESUMEN (ABSTRACT)**

La red desarrollada durante el curso académico 2015-2016 se basa en el seguimiento de los planteamientos establecidos en redes desarrolladas en cursos anteriores, centradas en las asignaturas de Cálculo de Estructuras I (33510), Cálculo de Estructuras II (33515) y Cálculo Avanzado de Estructuras (33551), dentro del Grado de Ingeniería Civil. En dichas redes se planteó una serie de prácticas de laboratorio y de ordenador, así como material docente (libros, página web, etc..) con el fin de mejorar el trabajo en grupo y la asimilación de los conceptos por parte de los alumnos. De la misma forma, se realizaron trabajos de campo y actividades de modelización numérica. De esta forma, en la actual red, se pretende continuar con las labores de implantación de actividades grupales, tanto de campo, como de modelización numérica, en los estudios de Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, así como a las asignaturas de los estudios del Máster de Ingeniería de Materiales, Agua y Terreno, estando focalizados esta vez los esfuerzos, en el desarrollo de actividades relacionadas con la evaluación y análisis de edificios existentes.

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

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de desarrollo de actividades educativas que mejoren la comprensión de los conceptos teóricos expuestos por el cuerpo de profesores a los alumnos ha cobrado una importancia relativa creciente con los años, especialmente tras la implantación de las titulaciones de grado en las Universidades Españolas. Esto ha sido así, debido a las nuevas directrices establecidas en el Espacio Europeo de Educación Superior. Por este motivo, en el año 2012 se iniciaron las labores de adaptación de los antiguos planes de estudio a las nuevas metodologías de enseñanza, dentro del grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Civil, de la Universidad de Alicante, “GRESMES: Grupo de Ensayo, Simulación y Modelización de Estructuras”. Para ello, gracias a la participación en ediciones anteriores del programa Redes de la Universidad de Alicante [1-2], se desarrollaron dos líneas de trabajo bien diferenciadas, pero que en conjunto buscaban la mejor asimilación de los conceptos estructurales por parte del alumno, así como la mejor colaboración y motivación de los estudiantes entre sí. En primer lugar, se promovió la realización de cuadernillos de prácticas, así como otros materiales docentes, que mejoraron la introducción de software informático específico en el campo de la ingeniería civil, a través de sesiones de prácticas de ordenador. En segundo lugar, se desarrollaron prácticas de laboratorio que permitían al alumno correlacionar los conceptos de las clases de teoría y de ordenador, con la realidad física de la Ingeniería Civil.

En el curso académico 2014-2015, continuando con las líneas de trabajo comentadas anteriormente, y dentro del marco del programa Redes de la Universidad de Alicante, se intentó avanzar en estas líneas de trabajo, dando un paso más hacia adelante, e intentando aproximar a los alumnos a la realidad del cálculo de estructuras reales [3].

### 1.1 Problema/cuestión.

Tras las experiencias adquiridas en los años de docencia posteriores a la implantación de los títulos de Grado, así como de los títulos de Máster, dentro del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante, y de cara a la ampliación de la oferta educativa en la titulación del Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, especialmente con la aparición de nuevas asignaturas relacionadas con la intervención de estructuras existentes, como por ejemplo la asignatura de Ampliación, Reparación y Refuerzo de Estructuras (49420). Se decidió plantear el

problema de la evaluación de edificios existentes frente a las acciones sísmicas y la evaluación estructural del mismo, a fin de conocer el nivel de daño de la estructura y su posible refuerzo. De esta forma, además de continuar con las labores de consolidación de los requisitos establecidos para la implantación de los títulos de Grado y Master [4-8], se pretende ahondar en los conocimientos adquiridos por los alumnos tras cursar los primeros años de docencia, y tras haber realizado las sesiones prácticas, tanto de campo como de laboratorio [9-10]. De tal forma que se introduzca una metodología de análisis de edificaciones actualmente existentes, a fin de dotar a los alumnos de la capacidad para dictaminar el estado actual de una estructura.

## 1.2 Revisión de la literatura.

Tradicionalmente la metodología de docencia en las titulaciones de Ingeniería Civil estaba centrada en facilitar a los estudiantes de un gran número de herramientas matemáticas, especialmente en los primeros semestres de la titulación. Posteriormente, y en base a estos conocimientos iniciales, se facilitaba al alumno las herramientas para abordar estructuras reales o en fase de proyecto, por medio de las instrucciones transmitidas a través de las asignaturas relacionadas con el Diseño de Estructuras de Hormigón o Metálicas. Sin embargo, dicha estructuración de la docencia ocasionaba elevados niveles de abandono y falta de motivación en las titulaciones de Ingeniería Civil. Por ello, y tal y como se ha venido desarrollando durante los últimos años de docencia, se ha procurado introducir a los alumnos de forma más gradual, y especialmente, de forma más práctica, la realidad de las estructuras que, una vez titulados, los alumnos deberán proyectar y evaluar. Ejemplos de esta nueva tendencia en las dinámicas educativas, se muestran en la incorporación de prácticas de ordenador, de laboratorio, así como de prácticas de campo [9-17]. En dichos trabajos se proponían actividades grupales y dinámicas de participación colaborativa entre los diferentes alumnos, además de permitirles de forma práctica observar el comportamiento real de las estructuras.

Las metodologías de enseñanza citadas en las partes precedentes del documento, están centradas en un análisis elástico y lineal de las estructuras. Sin embargo, dentro del ámbito de la rehabilitación y evaluación estructural, se establece como metodología fundamental el análisis del comportamiento no lineal de las estructuras, especialmente en el ámbito de las acciones sísmicas. Actualmente el proceso de evaluación mediante técnicas no lineales no ha sido totalmente implantado en los protocolos habituales de

actuación de las normativas europeas, si bien están aceptados, su nivel de desarrollo es mucho menor que en el caso de las normativas estadounidenses. Este hecho provoca un mayor nivel de motivación desde el punto de vista del cuerpo docente, a fin de aproximar a los alumnos a las técnicas que con total seguridad se irán asentando en la evaluación de edificios en los años venideros. Asimismo, los estudiantes, una vez conocidas dichas nuevas técnicas serán capaces de enfrentar los resultados obtenidos con métodos de análisis lineales mediante las técnicas clásicas de evaluación a partir del espectro de respuesta, con los obtenidos con los procedimientos no lineales de evaluación. Por otro lado, las técnicas actualmente utilizadas como procedimiento estándar de evaluación de edificios contempladas en la Norma de Construcción Sismo Resistente, NCSE-02, no permite analizar el proceso evolutivo del daño, salvo para el uso de un procedimiento en el dominio del tiempo. Por este motivo, desde el punto de vista docente, los actuales ingenieros civiles deben ser capaces de aplicar las diferentes técnicas a fin de poder diagnosticar correctamente el riesgo sísmico de un edificio.

Hoy en día existen dos metodologías fundamentales para la evaluación de la capacidad sísmica de un edificio, dentro del campo de la ingeniería civil. En primer lugar, el análisis no lineal en el dominio del tiempo (NL\_RHA), y en segundo lugar el análisis mediante procedimientos estáticos no lineales (NSPs). Si bien es cierto que el primer tipo de análisis presenta un resultado más exacto, desde el punto de vista numérico, debido al propio sistema de excitación de la estructura, también presenta un mayor consumo de recursos, especialmente en relación al tiempo de cálculo necesario. Por otro lado, en relación al segundo modo de cálculo, en la actualidad se han editado diferentes normas técnicas que favorecen la interpretación y aplicación de dicho método de cálculo. Algunas de estas normas son la instrucción ATC-40 [18], FEMA356 [19] y el Eurocódigo 8 [20]. Asimismo, diferentes autores han profundizado en este campo del análisis de estructuras, Krawinkler y Seneviratna [21], analizando de forma particular las ventajas y desventajas del uso del método en el caso de un edificio de 4 plantas con estructura de acero, bajo la acción de un evento sísmico. Otros autores como Freeman [22] y Chopra y Goel [23], son de gran ayuda de cara a la explicación docente del uso de esta metodología de cálculo, y favorecen en gran medida el aprendizaje por parte de los alumnos. En la actualidad se viene empleando los siguientes métodos de cálculo para el análisis estático no lineal, “método a partir del espectro de capacidad”, “método N2”, “método de los coeficientes de desplazamiento” y “método del análisis modal no lineal”.

Finalmente, uno de los aspectos que no se debe olvidar en el análisis y evaluación de edificios o estructuras existentes, es la capacidad de poder realizar pruebas de campo y/o laboratorio, a fin de confirmar el comportamiento de los materiales que constituyen el sistema estructural. A partir de dichos resultados es posible verificar y calibrar los modelos numéricos a fin de obtener resultados próximos al comportamiento real de la estructura.

### 1.3 Propósito.

El motivo del desarrollo de la presente red es continuar con los trabajos iniciados en años anteriores dentro del marco del programa Redes de la Universidad de Alicante. De esta forma, se pretende aproximar al alumnado a la realidad del cálculo y la modelización estructural de estructuras reales, permitiendo avanzar en la concepción global del cálculo estructural, en comparación con los análisis realizados en los cursos anteriores, y especialmente, se centran los esfuerzos en la evaluación de estructuras existentes.

A fin de poder desarrollar el objetivo planteado en la red, se plantea una estrategia de formación continua mediante una coordinación vertical entre las diferentes asignaturas dentro del área del cálculo estructural para las diferentes titulaciones gestionadas, Grado de Ingeniería Civil, Máster de Caminos, Canales y Puertos y Máster de Materiales, Agua y Terreno, de tal forma que se combinen las actividades docentes realizadas tradicionalmente en dichas titulaciones, asociadas con didácticas sin carácter informático, con actividades de modelización numérica. De esta forma, se pretende conseguir sinergias entre las diferentes metodologías de enseñanza, permitiendo una mejor asimilación global, por parte del alumno, del comportamiento real de las estructuras.

## **2. DESARROLLO DE LA CUESTIÓN PLANTEADA**

El trabajo desarrollado durante el transcurso de este proyecto, se ha dividido en varias partes en función de las características a desarrollar por parte de los alumnos. En primer lugar, y de cara a su aplicación docente, se ha establecido una metodología de enseñanza a partir de la cual se establecían las bases teóricas para el análisis de estructuras existente en el rango estático no lineal dentro del dominio de la frecuencia. A continuación, se han expuesto las bases para el análisis de las estructuras en el dominio del tiempo. Estas metodologías de análisis se han planteado con el objeto de

poder analizar una serie de estructuras, las cuales han consistido en un silo de almacenamiento de agua, un edificio de hormigón armado, y finalmente, un puente de ferrocarril.

Posteriormente a la fase de análisis teórico y numérico de las estructuras, y con el fin de completar la formación de los alumnos, se realizaron prácticas de laboratorio con el objeto de mostrar el comportamiento real del hormigón, así como visitas de obra en alguna de las estructuras analizadas durante la fase de teoría.

## 2.1 Evaluación estructural mediante análisis estático no lineal

Dentro del análisis y evaluación de estructuras en el rango no lineal, y especialmente dentro de la evaluación frente a acciones sísmicas, se debe destacar la metodología expuesta en el Eurocódigo 8[20], a partir del cual se determina la demanda sísmica y la capacidad estructural del sistema mediante el método N2. La principal diferencia del uso del método N2 frente al análisis en el dominio del tiempo, es la reducción de coste computacional debido a la evaluación mediante la introducción de cargas estáticas equivalentes. De esta forma, se asume que la acción externa que actúa sobre la estructura se incrementa proporcional y linealmente, hasta alcanzar el valor máximo de demanda, a diferencia de lo que sucede en el cálculo en el dominio en el tiempo.

De forma más concreta, el método N2 se fundamenta en el cálculo de la curva de capacidad de la estructura, o lo que es lo mismo, en la evaluación de la relación entre la reacción horizontal en la base y el movimiento horizontal en la parte superior de la estructura. Una vez determinada dicha curva, se debe transformar la curva de capacidad para el sistema de varios grados de libertad, al sistema equivalente de un solo grado de libertad, y proceder a su bilinealización, a fin de equiparar la respuesta del sistema, a la respuesta de un sistema elasto-plástico perfecto. Partiendo de la pendiente del nuevo sistema equivalente bilinealizado, se procede a determinar el periodo de vibración equivalente,  $T^*$ . En la Figura 1, se muestra un ejemplo del proceso de transformación de la curva real a la curva elasto-plástica perfecta, teniendo en consideración que las áreas encerradas entre la curva real y la curva elasto-plástica deben ser iguales. En dicha curva el valor de  $F_y^*$ , y  $d_y^*$ , se corresponden con los valores asociados al esfuerzo y desplazamiento elásticos, previo a la plastificación, del sistema de un solo grado de libertad equivalente.  $E_m^*$ , es la energía de deformación real justo en el momento de la formación del mecanismo plástico, y  $d_m^*$ , es el valor de la deformación última de

colapso de la estructura para el sistema de un solo grado de libertad. Por lo tanto, el valor del desplazamiento correspondiente al límite elástico para el sistema de un solo grado de libertad equivalente, se puede calcular en base a la Ecuación 1. Finalmente, el periodo y el desplazamiento objetivo para el sistema idealizado a un solo grado de libertad puede obtenerse de las Ecuaciones 2 y 3. Donde  $m^*$  es la masa asociada al grado de libertad equivalente, y  $S_e(T^*)$ , el valor de la ordenada del espectro elástico de respuesta de aceleración en el periodo  $T^*$ .

$$d_y^* = 2 \left( d_m^* - \frac{E_m}{F_y^*} \right) \quad (1)$$

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_y^*}{F_y^*}} \quad (2)$$

$$d_{et}^* = S_e(T^*) \left[ \frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \quad (3)$$

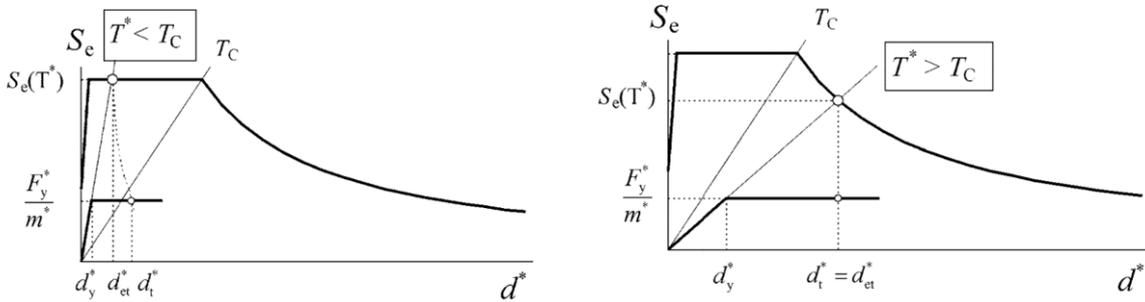
Finalizado el proceso de determinación de la capacidad no lineal de una estructura, el siguiente paso en la evaluación de una estructura, consiste en determinar la demanda de movimiento máximo necesaria para resistir los esfuerzos debidos a la acción sísmica. Para poder establecer dicho valor, el método N2 establece varios criterios en función del periodo predominante de la estructura, diferenciando entre estructuras con periodos cortos o periodos medio-largos, Figura 1. En el caso de analizar una estructura dentro del rango de comportamiento de periodos cortos, es decir, con valores,  $T^* < T^C$ , el valor del desplazamiento objetivo,  $d_t$  será igual a  $d_{et}^*$ , siempre y cuando la demanda de aceleraciones quede por debajo de la capacidad de respuesta elástica de la curva de capacidad, es decir,  $\frac{F_y^*}{m^*} \geq S_e(T^*)$ . En caso contrario, el desplazamiento objetivo  $d_t$ , tomará el siguiente valor, Ecuación (4), siendo.

$$q_u = \frac{S_e(T^*) m^*}{F_y^*}.$$

Para el caso de estructuras con periodos de vibración dentro del rango de periodos medio-largos, el valor de  $d_t$  será el mismo a  $d_{et}^*$ , por lo que la demanda de desplazamiento objetivo presentará el mismo valor para el análisis bajo comportamiento elástico como para comportamiento elásto-plástico.

$$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \left( 1 + (q_u - 1) \frac{T_c}{T^*} \right) \geq d_{et}^* \quad (4)$$

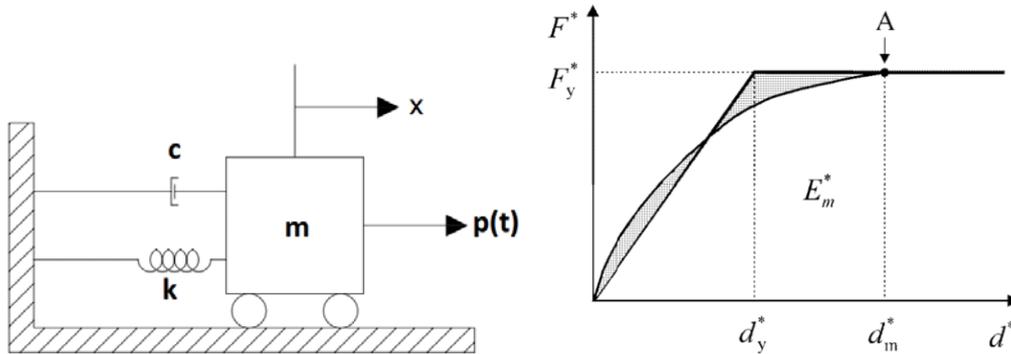
Figura 1. Determinación del desplazamiento objetivo para el método N2. Izq.: Caso de estructuras con periodos cortos. Drcha.: Caso de estructuras con periodos medios y largos. Fuente: Eurocódigo 8



## 2.2. Evaluación estructural mediante análisis no lineal en el tiempo

El análisis del comportamiento de las estructuras dentro del dominio del tiempo, se caracteriza por la necesidad de resolver la ecuación diferencial mostrada en la Ecuación 5, siendo  $m$ , el valor de la masa movilizada,  $c$ , el valor del amortiguamiento estructural,  $k$ , la rigidez del sistema,  $p(t)$ , la función de excitación exterior del sistema,  $x$ , el valor del desplazamiento,  $\dot{x}$ , la velocidad, y  $\ddot{x}$ , la aceleración del sistema. La citada ecuación, expresada para un sistema de un solo grado de libertad, puede expresarse como el sistema en equilibrio mostrado en la Figura 2. Sin embargo, dicho sistema debe extenderse al total de grados de libertad presentes en la estructura analizada, por lo que los valores de masa, rigidez, amortiguamiento, etc... estarán representados por matrices asociadas a los grados de libertad de la estructura. Por ello, una vez conocida las componentes de cada una de las matrices, y conociendo la variación de las mismas con el tiempo (posibles problemas de fisuración con pérdida de rigidez etc...) es posible evaluar la respuesta del sistema, con la única limitación de fijar un adecuado espaciado entre los intervalos de tiempo a calcular la ecuación diferencial. Para la evaluación en el dominio del tiempo de una estructura, es fundamental conocer la función excitadora que actúa sobre la estructura. En este sentido, y desde el punto de vista del análisis sísmico, la Norma de Construcción Sismoresistente, NCSE-02, establece las características necesarias en relación al tipo y número de acelerogramas sintéticos a utilizar, a fin de representar la correcta acción sísmica actuante en la zona donde esté ubicada la estructura.

Figura 2. Izq.: Sistema masa-resorte-amortiguador de un solo grado de libertad. Drcha.: Relación entre la curva de capacidad real y la idealizada como sistema elasto-plástico perfecto. Fuente: Eurocódigo 8



$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p(t) \quad (5)$$

### 2.3. Evaluación de la ductilidad estructural

La ductilidad estructural se define como la capacidad de disipar energía mediante deformación plástica del propio material constituyente. De esta forma, es importante diseñar las estructuras con cierta capacidad dúctil a fin de limitar la demanda debida a las acciones exteriores que actúan sobre nuestra estructura. Por este motivo, y de cara a la evaluación estructural de edificios existentes, se planteó como un punto fundamental en el desarrollo de la presente Red, el incluir dichos conceptos a la hora de formar al alumno dentro del campo de la Ingeniería Civil. Sin embargo, y dado que los conceptos de comportamiento plástico ya han sido introducidos a los alumnos en cursos anteriores para materiales como el acero, nylon, o aluminio [1], se quiso centrar en esta Red el estudio a los elementos de hormigón. En este sentido, la ductilidad en las estructuras de hormigón está directamente relacionada con el nivel de confinamiento, debido a que un aumento de la armadura transversal de confinamiento en los elementos de hormigón armado, se traduce en un incremento de su resistencia a compresión. En la Figura 4 se muestra la curva tensión-deformación del hormigón confinado y sin confinar, donde puede apreciarse que el hormigón no confinado es un material que una vez alcanza su máxima resistencia se comporta de manera frágil. Sin embargo, el hormigón armado y confinado dispone de una mayor resistencia y de una alta ductilidad en comparación con el hormigón no armado y no confinado. En este sentido, durante el desarrollo de la presente Red se mostraron a los alumnos las limitaciones establecidas por la actual instrucción NCSE-02, en relación a la disposición de armaduras de

confinamiento tanto en vigas y pilares en función del nivel de ductilidad exigible a la estructura, Figura 3, así como se explicó la importancia de poder evaluar si la disposición constructiva de un edificio existente, es capaz de desarrollar el nivel de ductilidad exigida por la norma actual.

Finalmente, y dado el carácter teórico-práctico de la Red, se desarrollaron una serie de prácticas con el objetivo de que los alumnos fueran capaces de determinar la capacidad plástica de un elemento de hormigón. Para ello se utilizó la formulación propuesta por Mander [24], y se analizaron varias secciones de armado. De forma genérica, se muestra en la Figura 4 los resultados asociados a cuatro secciones de hormigón 30x30cm<sup>2</sup>, con hormigón HA-30 y cuantía de armado longitudinal 1231mm<sup>2</sup>, con distribución de cercos cada 100 y 300mm y con diámetros de cerco de 6mm y 14mm respectivamente. Asimismo, también se muestran los valores para la misma sección sin confinar. Puede verse como el efecto de aumentar el diámetro de los cercos y disponerlos a una distancia próxima a 1/3 del canto de la pieza, genera un aumento significativo tanto de la resistencia última del hormigón, como de la capacidad de deformación plástica del mismo. Este hecho es de vital importancia de cara a poder justificar el aumento de demanda de distribución de cercos en las proximidades de las uniones viga-pilar de los edificios de hormigón, Figura 3.

Figura 3. Distribución de armados para diferentes niveles de ductilidad en pilares, según NCSE02

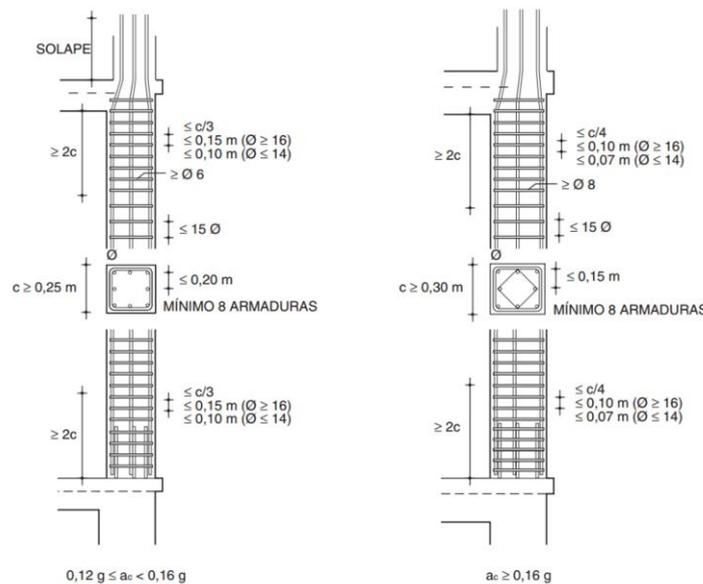
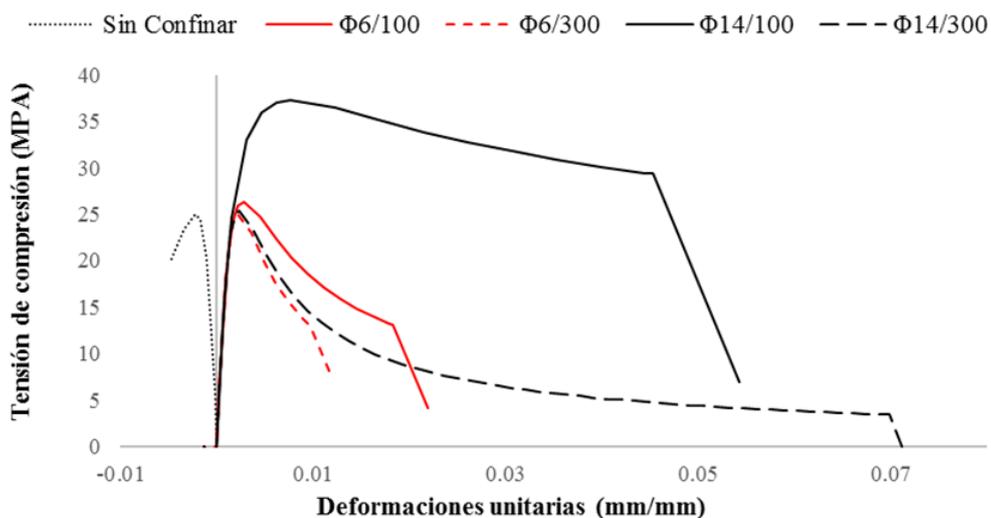


Figura 4. Diagrama Tensión-Deformación para el hormigón confinado y sin confinar



#### 2.4. Evaluación estructural sobre edificaciones reales

Dentro del desarrollo de la Red y con el objeto de poder poner en práctica los conocimientos planteados, se estableció el análisis de tres tipologías estructurales. En primer lugar, se presentó a los alumnos una estructura fácilmente asimilable a un sistema de un solo grado de libertad. Dicha estructura consistía en un silo de almacenamiento de agua de altura total 8.125m, altura de depósito de 3.125m, espesor de muros de 0.25m, altura del soporte 5m, diámetro del soporte de 0.55m, y diámetro del depósito, 5m. Como altura real efectiva de la zona de acumulación de agua se ha considerado una altura de 2.625m, por lo que el volumen de posible almacenamiento de agua es aproximadamente de 41.74m<sup>3</sup>. En la Figura 5, se muestra un ejemplo del depósito real, y del modelo numérico planteado mediante elementos finitos. Dicho modelo presenta un total de 192 elementos tipo Shell para modelizar la cascara del depósito, y 12 elementos tipo frame, con el objeto de modelizar el soporte de hormigón. Desde el punto de vista de los materiales se ha utilizado un hormigón HA-25, con módulo elástico 24855 MPA, peso específico de 2400 kg/m<sup>3</sup>, y un coeficiente de Poisson de valor 0.2. En relación al armado del pilar soporte, se han dispuesto un total de 8 barras longitudinales de 10mm de diámetro, cada una. Dichas barras se han colocado con un recubrimiento de 5cm al borde exterior. Finalmente, y con el objeto de evitar el fallo por cortante, se han dispuesto cercos circulares de diámetro igual a 8mm, separados entre sí 20cm.

Por otro lado, en una segunda fase, se desarrolló el análisis de un edificio de hormigón armado de 15 plantas, con una altura total de 39.75m, Figura 6. La separación

entre forjados dispuesta es igual a 2.65m, con una superficie de ocupación en planta de 249.66m<sup>2</sup>. La estructura resistente está conformada por pilares de sección 30x25cm<sup>2</sup>, vigas principales de 50x25cm<sup>2</sup> y vigas secundarias de 25x25cm<sup>2</sup>, de tal forma que la estructura está conformada por un total de 7 pórticos principales y 4 pórticos secundarios en el sentido transversal, con separación entre pilares de 4.5m. En la Figura 7, se muestra un detalle del modelo numérico utilizado para el análisis de la estructura. Dicho modelo está conformado por un total de 1095 elementos frames y 448 nudos. Desde el punto de vista de los materiales se utilizaron las mismas características que las utilizadas para la estructura anterior. En relación al armado, se dispuso de 3 redondos de 16mm en cada una de las caras en todos los elementos estructurales para la armadura longitudinal. Para el caso de la armadura de cortante, se han dispuesto cerco cuadrados de 10mm de diámetro, cada 15cm en el sentido longitudinal del elemento.

Finalmente, y de cara a completar la formación de los alumnos, se evaluó el comportamiento dinámico de un puente de ferrocarril metálico de 20.80m de longitud entre ejes de apoyos, Figura 8. La estructura presenta una vía de ancho 3.60m de eje a eje de perfil, con un tablero constituido por dos cerchas metálicas laterales unidas mediante viguetas, una losa de hormigón de 25cm no colaborante. Cada celosía está formada por 12 módulos de montantes y diagonales de 1.73m de longitud. Las viguetas que unen ambas celosías están situadas en las uniones del cordón inferior con los montantes y diagonales, separadas, por tanto, 1.73m. Los perfiles metálicos dispuestos, consistentes en perfiles HEB-260 para los cordones, perfiles HEB-160 en las dos diagonales más próximas a los apoyos, IPE-240 en las tres diagonales siguientes e IPE-200 en el resto de diagonales, es decir, las dos del centro de vano. Perfiles HEB-180 para los montantes. Para las viguetas transversales se disponen perfiles HEB-260 articulados en sus extremos.

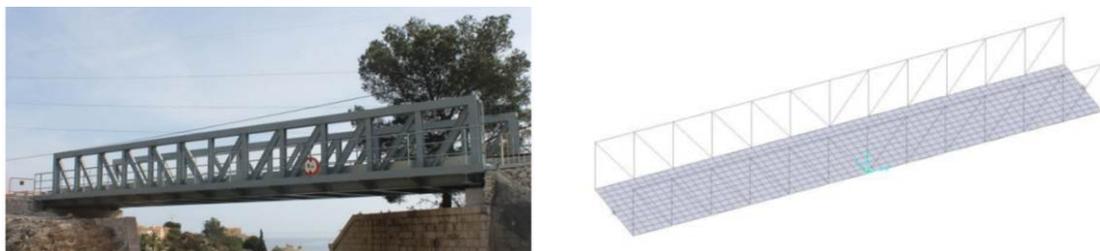
Figura 5. Estructura propuesta nº1. Izq.: Ejemplo real de un depósito de agua. Fuente: Página web de la empresa Arapol. Drcha.: Modelización numérica mediante elementos finitos



Figura 6. Estructura propuesta nº2. Izq.: Ejemplo real de estructura de hormigón. Drcha.: Modelización numérica mediante elementos finitos



Figura 7. Estructura propuesta nº3. Izq.: Ejemplo real de estructura acero. Drcha.: Modelización numérica mediante elementos finitos



En base a los conocimientos expuestos inicialmente, se procedió a la evaluación estructural de dichas edificaciones Para ello se aplicaron las técnicas comentadas,

evaluando en cada caso, diferentes estados de servicio. En primer lugar se analizó la estabilidad frente a acciones sísmicas mediante el método N2 y el análisis Time History del silo de hormigón armado para el almacenamiento de agua. Para ello se definió un espectro de respuesta elástico para el término municipal de Agost, Alicante, con una aceleración sísmica básica de 0.11g. El terreno de cimentación se estableció como terreno de categoría II, con coeficiente C igual a 1.3. Asimismo, y de cara a la posterior evaluación en el dominio del tiempo, se obtuvo también el acelerograma sintético equivalente, para un amortiguamiento estructural del 5%, Figura 8.

El análisis de los resultados obtenidos durante la investigación de la estructura número 1, mostró que los periodos de vibración de la misma se situaban entre 1.146s y 0.173s para el primer y el segundo modo de vibración, Figura 9. Este hecho mostró que la estructura recibiría la mayor aceleración sísmica para el segundo modo de vibración. Sin embargo, debido a que la masa movilizada se centraba en el primer modo de vibración, se pudo determinar que la estructura absorbería el daño sísmico principalmente en el dominio no lineal, tal y como muestra la aparición de rótulas plásticas a lo largo de la altura del fuste, tras el evento sísmico. Figura 9.

El análisis de los resultados obtenidos durante la investigación de la estructura número 2, permitió mostrar a los alumnos el comportamiento no lineal de un edificio estandar de hormigón armado. En este caso particular, debido a la flexibilidad de la estructura, la edificación es capaz de soportar la demanda sísmica dentro del rango elástico, siendo sin embargo su capacidad máxima la asociada a un desplazamiento de 0.5m. En la Figura 10 se muestra un destalle del punto de intersección de la curva de capacidad y de demanda, así como del estado de plastificación de las rótulas para la situación de colpaso.

Figura 8. Acción sísmica. Izq.: Espectro de respuesta elástico. Drcha.: Acelerograma sintético equivalente

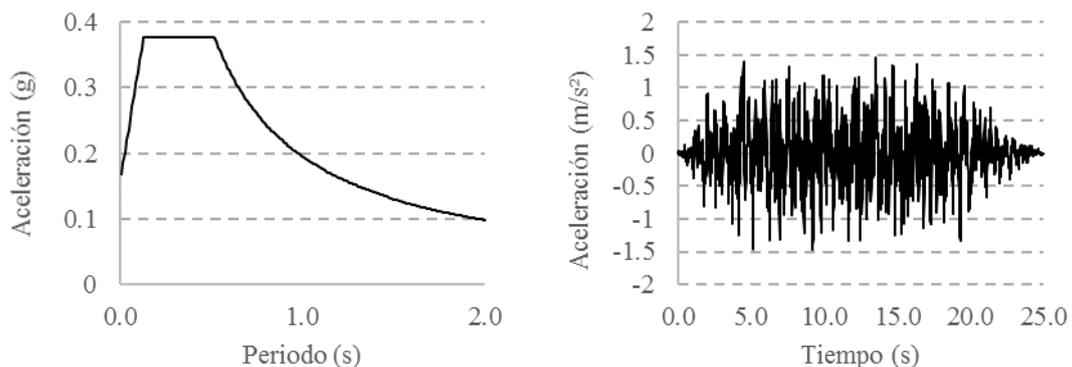


Figura 9. Izq.: Formas modales de vibración. Drcha.: Demanda sísmica de desplazamiento al inicio de la fisuración y en el punto de funcionamiento ante la acción sísmica (P.P.)

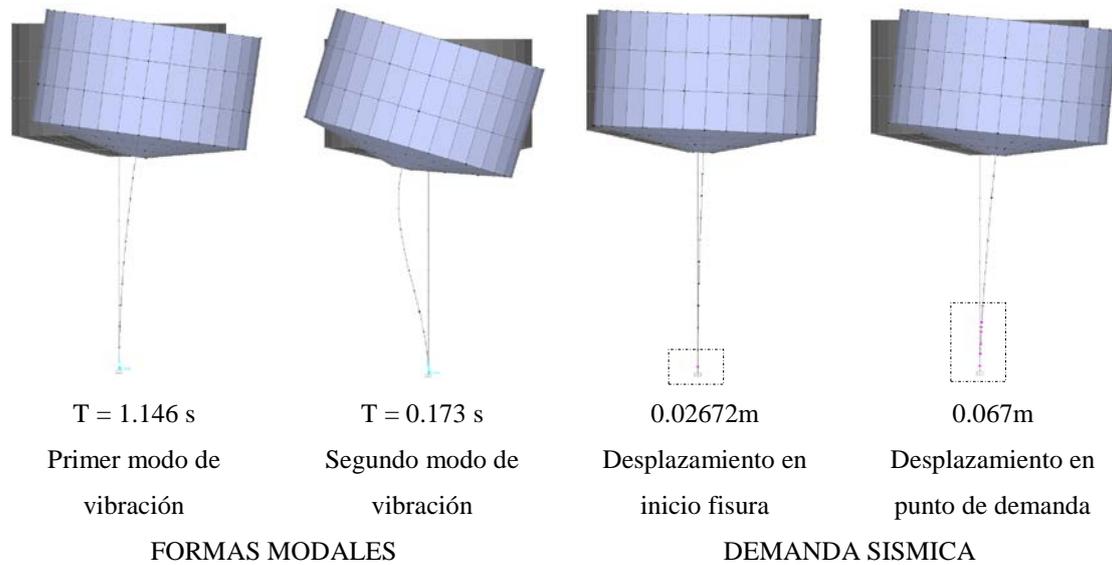
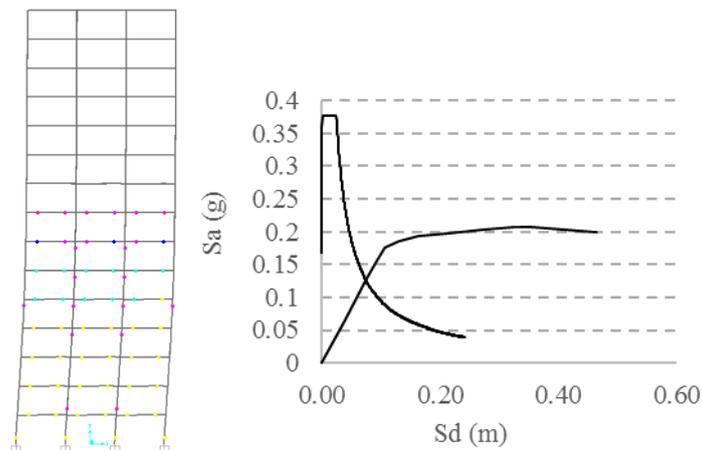


Figura 10. Izq.: Disposición de rótulas plásticas para desplazamiento 0.5m. Drcha.: Representación de la curva de capacidad y de demanda en el sistema ADSR



El análisis de los resultados obtenidos durante la investigación de la estructura número 3 se centró en la evaluación del puente bajo la acción del tren de cargas sobre la estructura. En este sentido se definió un tren de cargas asociado a un tren diesel de la serie 2500, Figura 11 y Figura 12, y se evaluaron las frecuencias propias de vibración, así como las cargas inducidas con el paso del ferrocarril. Tras el paso del ferrocarril, se determinó que la frecuencia fundamental de vibración alcanzaba el valor de 5.273Hz, Figura 13, y el amortiguamiento estructural asociado a dicha frecuencia de vibración, obtenido mediante la técnica del decrecimiento logarítmico, alcanzó un valor de 0.7% respecto del amortiguamiento crítico. Finalmente, y de cara a determinar el efecto del

paso del ferrocarril sobre la infraestructura ferroviaria, se calibró el modelo numérico a partir de las masa y las frecuencias reales de vibración movilizadas, y se determinó el factor de impacto debido al paso del ferrocarril a la velocidad de 50km/h, obteniéndose un valor de 1.044. Dichos resultados mostraron la baja influencia de las cargas dinámicas en el caso de un puente de corta luz, así como las buenas propiedades mecánicas actuales del puente de cara a soportar cualquier tipo de acciones externa.

Figura 11. Tren diésel de la serie 2500



Figura 12. Tren de cargas por eje asociado con el tren diésel de la serie 2500

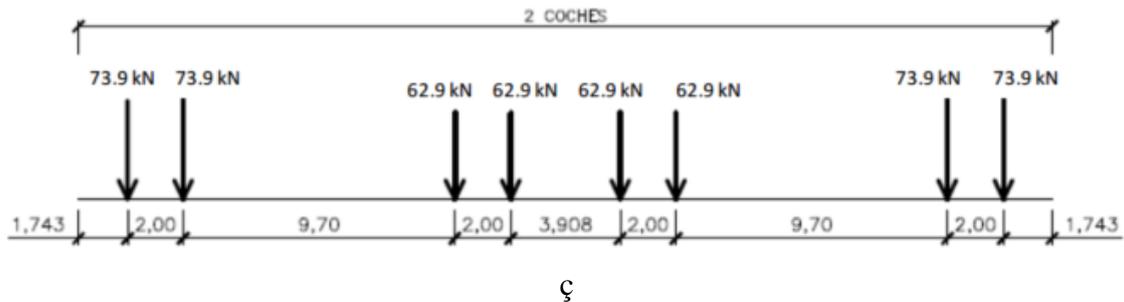
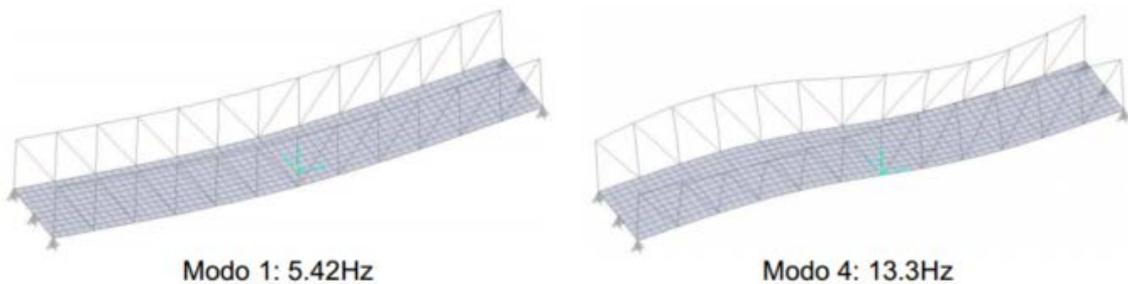


Figura 13. Modos de vibración de la estructura analizada número 3



## 2.5. Carácter participativo de la red

En la fase final del desarrollo de la Red planteada durante el curso académico 2015-2016, se plantearon una serie de actividades grupales tanto en obra como en los laboratorios de la Universidad de Alicante. El objetivo final de dichas actividades consistía en continuar con las labores de motivación y aproximación de los alumnos al campo de la ingeniería civil ya planteados en las anteriores ediciones del programa Redes. De esta forma, en una primera fase, los alumnos, mediante prácticas de ordenador, eran capaces de desarrollar las actividades teóricas propuestas, Figura 14. De esta forma los alumnos eran capaces de desarrollar ellos mismos los modelos de cálculo y comprender el comportamiento no lineal de las estructuras. En segundo lugar, a partir de las sesiones prácticas se pudo aproximar a los alumnos a la realidad del comportamiento estudiado en las sesiones de teoría. De esta forma, se establecieron unas sesiones de laboratorio donde se ensayaron con los alumnos el comportamiento a compresión y flexión de diferentes probetas de hormigón, con el fin de comparar dichos resultados con los obtenidos en las sesiones de teoría, Figura 14. Asimismo, se establecieron una serie de visitas de campo para evaluar el nivel de armado en edificios reales, con el objetivo de comprobar si la disposición del acero en pilares y vigas, era el adecuado a fin de conseguir el nivel de ductilidad establecido por la norma, Figura 15. Además, también se planificaron visitas de campo con el objeto de presenciar el proceso de prueba de carga dinámica sobre un puente de ferrocarril, y así evaluar in situ la situación estructural de una obra real, Figura 15.

## 3. CONCLUSIONES

Finalmente, tras el cierre del proyecto del programa Redes de la Universidad de Alicante, desarrollado durante el curso 2015-2016, se pudo continuar con las metodologías de enseñanza ya iniciadas en los programas de Redes de convocatorias anteriores, dentro del mismo departamento, y en especial, dentro del grupo de investigación GRESMES. En este sentido, este último año académico ha permitido dar un paso más en la metodología de evaluación de estructuras existentes, permitiendo desarrollar una dinámica de enseñanza integral que relacionara los conceptos de teoría, los ensayos de laboratorio, y las prácticas de campo, pero enfocando los esfuerzos en la introducción de técnicas de análisis no lineales.

Figura 14. Fases de desarrollo de las sesiones de prácticas con alumnos



Figura 15. Fases de desarrollo de las sesiones de prácticas de campo con alumnos



#### **4. DIFICULTADES ENCONTRADAS**

El proceso de preparación y desarrollo del presente proyecto presentó una serie de dificultades relacionadas con la idoneidad y la accesibilidad a las estructuras analizadas. En particular, en relación a la visita de una de las obras analizadas, su dificultad de acceso, produjo una disminución en el tamaño del grupo de vistas. Por otro lado, en relación al uso del programa informático seleccionado para el análisis de las estructuras, se optó por continuar manejando el software establecido en los cursos anteriores. Este hecho, al igual que en las ediciones anteriores, planteaba el problema de forzar a los alumnos al uso de un determinado tipo de programa comercial, limitando de esta forma el aprendizaje desde un punto de vista abierto.

#### **5. PROPUESTAS DE MEJORA**

A partir de los resultados obtenidos, se ha podido evidenciar la importancia de la implantación de asignaturas y líneas de trabajo específicamente dirigidas a la evaluación de estructuras existentes, especialmente debido a mayor nivel de precisión otorgado por el uso de programas informáticos. Esto genera la posibilidad de analizar estructuras

tanto en el campo no lineal, como en el campo lineal en el dominio del tiempo, permitiendo de esta forma conocer en un grado mucho mayor, el comportamiento de la estructura, en comparación con las técnicas clásicas actualmente presentes en los planes docentes.

Por otro lado, y de cara a solucionar el problema relacionados con el programa comercial, se propone la sustitución paulatina de parte de las prácticas desarrolladas con el actual software, o bien por otros programas comerciales a fin de mejorar las capacidades por parte de los alumnos, o bien, mediante el uso de programas comerciales que permitan la programación de las ecuaciones necesarias para la resolución de los problemas analizados durante las sesiones con los alumnos, con el objeto de que los alumnos sean totalmente conscientes de la formulación utilizada en el proceso de evaluación de las estructuras.

## **6. PREVISIÓN DE CONTINUIDAD**

El trabajo realizado dentro de la presente Red y sus predecesoras se encuentra en constante desarrollo. Los puntos pendientes que definen las líneas de actuación para los próximos cursos pueden resumirse en: ampliar la temática tratada en las aplicaciones; revisión de la oferta y diseño de cursos de formación extracurriculares que complementen la formación del alumnado; gestión y difusión de los recursos docentes electrónicos actuales y futuros.

## **7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] Baeza, F.J., Bru, D., Ivorra, S. & Segovia, E. (2012) Red para el diseño y adaptación de las prácticas de laboratorio de las asignaturas de cálculo de estructuras en ingeniería civil al EEES. En J.D. Álvarez Teruel, M.T. Tortosa Ybáñez y N. Pellín Buades, *Diseño de acciones de investigación en docencia universitaria* (pp. 940-954), Universidad de Alicante.

[2] Baeza, F.J., Bru, D., Ivorra, S. & Segovia, E. (2013) Diseño y adaptación de las prácticas de cálculo de estructuras del grado de ingeniería civil. En J.D. Álvarez Teruel, M.T. Tortosa Ybáñez y N. Pellín Buades, *La producción científica y la actividad de innovación docente en proyectos de redes* (pp. 140-156), Universidad de Alicante.

[3] Bru Orts, D., Varona Moya, F. B., Baeza de los Santos, F. J., Crespo Zaragoza, M.A. & Ivorra Chorro, S. (2016). Coordinación vertical de las asignaturas de estructuras en el Grado de Ingeniería Civil, el Máster de Caminos, y el Máster de Materiales, Agua

y Terreno. *Innovaciones metodológicas en docencia universitaria: resultados de investigación* (pp. 213-227). Alicante. Instituto de Ciencias de la Educación (ICE).

[4] Orden ministerial CIN/307/2009, de 9 de febrero. (BOE núm. 42, pág. 17166 de 18 de febrero de 2009) por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico de Obras Públicas.

[5] Normativa para la elaboración de títulos de Grado de la UA. BOUA 24 julio 2007.

[6] BOUA 4 julio 2008. Normativa de la UA para la implantación de títulos de grado.

[7] Ivorra, S., Bañón, L., Saval, J.M., Escapa, A., Ortuño, A., & Serrano, M. (2010). Red de desarrollo y diseño curricular en la futura titulación de graduado en Ingeniería Civil Programa Redes: Proyectos y resultados. Editorial Universidad de Alicante, pp. 787-807.

[8] Orden ministerial CIN/309/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

[9] Bru, D., Baeza, F.J., Ivorra, S. & Segovia, E. (2012). Reorganización de la docencia de estructuras en el grado de ingeniería civil adaptado al EEES. *En X Jornadas Redes: La participación y el compromiso*.

[10] Ivorra, S., Segovia, E. & Bru, D. (2011). Cuaderno de prácticas informáticas de Cálculo de Estructuras.

[11] Jenkins, S.R., Pocock, J.B., Zuraski, P.D., Meade, R.B., Mitchell, Z.W. & Farrington, J.J. (2002). Capstone course in an integrated engineering curriculum. *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.* 128(2), 75-82.

[12] Setareh, M. (2001). Development of a teaching tool for building construction. *J. Archit. Eng.*, 7(1), 6-12.

[13] Romero, M.L. & Museros, P. (2002). Structural Analysis through Model Experiments and Computer Simulation. *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, 128(4) 170-175.

[14] Feisel, L.D. & Rosa, A.J (2005).. The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education. *J. Eng. Educ.*, 94(1), 121-130.

[15] Chacón, R., Real, E. & Mirambell, E. (2013). La revista Eduacero. Una publicación digital estudiantil arbitrada para la difusión libre de la enseñanza de estructuras metálicas. *En III Jornadas Internacionales de Enseñanza de la Ingeniería Estructural*.

- [16] Lapuebla, A., Pons, D., Espinós, A., Romero, M.L. & Jiménez, A.J. (2013). Diseño de prácticas de laboratorio para la asignatura “Estructuras” del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales. *En III Jornadas Internacionales de Enseñanza de la Ingeniería Estructural*.
- [17] Bru, D., Ivorra, S., Baeza, F.J. & Segovia, E. (2013). Innovación en la docencia de cálculo de estructuras mediante prácticas de laboratorio *En III Jornadas Internacionales de Enseñanza de la Ingeniería Estructural*.
- [18] Applied Technology Council (ATC) (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, vols. 1-2, Report No. ATC-40*, Redwood City, California.
- [19] Applied Technology Council (ATC) (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, Report No. FEMA440*, Redwood City, California.
- [20] CEN, Eurocode 8 (2004). *Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, EN 1998-1:2004, Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- [21] Krawinkler, H., & Seneviratna, G.D.P.K. (1998). *Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation*, *Engineering Structures* (20), pp. 452-464.
- [22] Freeman, S.A. (1998). *Development and use of capacity spectrum method*. Proceedings of the Sixth U.S. National Conference on Earthquake engineering, Seattle, USA. (269).
- [23] Chopra, A.K., & Goel, R. K. (2002) *Modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings*, *Earthquake Eng. Struct. Dyn* 31, pp. 561-582.
- [24] Mander, J. B. Priestley M. J. N. & Park R. (1984) *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*, *Journal of Structural Engineering*, ASCE 114(3), pp. 1804-1826.