

LAS PRÁCTICAS DE CAMPO COMO MÉTODOLÓGÍA DOCENTE EN EL ESTUDIO DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS

Adam, Jose M.¹; Pellicer, Teresa M.²; Moragues, Juan J.³

1: Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil
Universitat Politècnica de València
e-mail: joadmar@upv.es, web: <http://www.upv.es>

2: Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil
Universitat Politècnica de València
e-mail: tpa@upv.es, web: <http://www.upv.es>

3: Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil
Universitat Politècnica de València
e-mail: jmorague@cst.upv.es, web: <http://www.upv.es>

PALABRAS CLAVE: Docencia; Daños en Estructuras; Prácticas de Campo; Caso Práctico

RESUMEN

El estudio de fallos en estructuras reales es muy importante para la formación de expertos en el ámbito de la ingeniería estructural. Por un lado, permite formar expertos en los campos de la patología y/o diagnóstico de fallos. Por otro lado, permite mejorar el diseño de nuevas estructuras mediante el aprendizaje adquirido del estudio de fallos, así como asentar las bases de la ética en la profesión. En este artículo se presenta una de las metodologías docentes implementadas en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universitat Politècnica de València, basada en la visita y análisis de los daños existentes en una obra emblemática de la ciudad de Valencia. El interés docente de la visita es muy alto, dado que los fallos observados “in situ” se vinculan con los conceptos teóricos estudiados previamente en clase. La visita continua con la redacción de un informe por parte de los alumnos, donde se analizan los daños observados, junto con su causa y posible evolución. Posteriormente, se realiza un debate en clase, donde se analizan en detalle los daños, aportando los alumnos sus diversos puntos de vista. La estructura escogida para realizar la visita de campo es el Museo de las Ciencias Príncipe Felipe, por tratarse una obra bien conocida por los alumnos donde, dada la magnitud y complejidad de la obra, la casuística de daños en los elementos de hormigón es muy variada.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los fallos siempre ha servido para mejorar los diseños en el ámbito de la ingeniería, siendo extrapolable a todos los campos: aeronáutico, civil, mecánico, químico etc. Además, realizar un buen diagnóstico de los daños existentes en una estructura, es el primer paso para poder acometer las actuaciones necesarias con el fin de restituir la capacidad resistente deseada. Para llegar a ser un buen especialista en el campo de la ingeniería estructural o, más en concreto, en el de la patología de las estructuras, no es suficiente con disponer de amplios conocimientos relacionados con el diseño y cálculo de estructuras, sino que además se precisa del estudio de un buen número de estructuras dañadas.

Dado que la formación de un buen experto en el diagnóstico de daños en estructuras requiere de un estudio continuado, cada vez es más frecuente la organización de congresos orientados al análisis de fallos en estructuras. También existen revistas científicas donde se publican artículos en los que se analiza el fallo de estructuras, con lo que el acceso a casos reales es relativamente sencillo. Sin embargo,

la actividad más formativa es la observación directa de una estructura, localizando los fallos que pudiera tener, evaluándolos y analizándolos en el mismo lugar y bajo las condiciones en las que se han producido.

Vista la necesidad que tiene el estudio de casos reales de estructuras con fallos para la correcta formación de expertos en ingeniería estructural, desde la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (ETSICCP) y desde el Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil (DIC) de la Universitat Politècnica de València (UPV) se ha apostado por formar a expertos en patología de estructuras, y a su vez aprovechar el estudio de fallos para aprender a mejorar los diseños, transmitiendo también los valores éticos fundamentales de la ingeniería estructural. Estos principios los han tenido previamente en consideración otros profesores, como por ejemplo el profesor Delatte en la Cleveland State University [1-3] y el profesor Petroski de la Duke University [4-5]. Los objetivos perseguidos en la UPV se han conseguido a través de tres vías:

- a) En las aulas, mediante el estudio de casos de fallos reales en estructuras. Se realizan actividades consistentes en: estudio de artículos científicos donde se presentan fallos reales, estudio de casos “clásicos” de fallos, debates en clase sobre fallos recientes aparecidos en prensa, etc.
- b) Visitas a construcciones con fallos, con el fin de analizar “in situ” las causas de los fallos y su posible transcendencia.
- c) Difusión y publicación de fallos en congresos y revistas científicas. En este sentido, se ha participado en la publicación de artículos en revistas, se han presentado ponencias en congresos orientados a la difusión y estudio de fallos, y se han editado números especiales de revistas científicas relacionados con el estudio de fallos [6-8].

En este artículo se presenta una de las metodologías docentes implementadas en la ETSICCP y en el DIC de la UPV, basada en la visita y análisis de una obra emblemática de la ciudad de Valencia, que presenta una casuística de fallos muy diversa. El interés docente de la visita es alto, dado que los fallos observados “in situ” se vinculan con los conceptos teóricos estudiados previamente en clase.

Después de una introducción, este artículo continúa con la presentación de las tres asignaturas donde se incorpora la metodología docente descrita. Posteriormente se describen las principales particularidades del edificio objeto de la visita, para pasar después a describir el modo en que se organiza la visita, la presentación de resultados por los alumnos, y el debate posterior. A continuación se muestran y ordenan los daños observados en el edificio objeto de estudio, pasando finalmente a presentar las principales conclusiones obtenidas de esta experiencia.

2. MARCO DE LAS ASIGNATURAS DENTRO DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

En la actualidad, la ETSICCP de la UPV dispone en sus planes de estudio de dos asignaturas relacionadas con el análisis de daños en estructuras. La asignatura “Patología y Rehabilitación” se imparte en el Grado en Ingeniería de Obras Públicas, mientras que la asignatura “Mantenimiento y Conservación de Estructuras” se incluye en el Máster en Ingeniería de Caminos. Por otro lado, el DIC oferta la asignatura “Patología y Rehabilitación”, dentro del Máster en Ingeniería del Hormigón.

Las asignaturas descritas continúan con la tradición iniciada al incluir en el anterior plan de estudios de la titulación de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos la asignatura “Patología y Rehabilitación”, como optativa en el quinto curso. En el anterior programa de doctorado del DIC ya existía una asignatura de una índole similar a la existente actualmente en el Máster en Ingeniería del Hormigón.

A través de las tres asignaturas mencionadas, se pretende conseguir los siguientes objetivos:

- Formar al alumno en el campo de los daños en estructuras y en su posterior diagnóstico e intervención.

- Aprovechar el estudio de fallos en las estructuras para consolidar los conocimientos adquiridos sobre ingeniería estructural.
- Mostrar las técnicas de gestión, mantenimiento y conservación de estructuras existentes.
- Concienciar al alumno sobre los aspectos éticos de la profesión.

2.1 “Patología y Rehabilitación” (Grado en Ingeniería de Obras Públicas)

La asignatura se ubica en el cuarto curso del Grado en Ingeniería de Obras Públicas. Se trata de una asignatura que cursan todos los alumnos que escogen el módulo “Tecnología Específica de Construcciones Civiles”. En esta asignatura, los alumnos reciben un total de 60 horas de clase, que se reparten en 38 como teoría en aula, y 22 como prácticas. Entre las prácticas, se diferencian las prácticas de aula, las de laboratorio y las de campo. La asignatura se organiza en tres bloques temáticos, del siguiente modo:

1. Temas preliminares.
2. Diagnóstico de estructuras dañadas
3. Técnicas de intervención

El tema “Mecanismos de daño” se incluye en el primer bloque temático y sirve de base para poder pasar a realizar la evaluación o diagnóstico de una estructura dañada. Dentro de las tareas docentes que se desarrollan en este tema, se planifica una visita de campo, que consiste en el estudio de los daños existentes en el Museo de las Ciencias Príncipe Felipe.

2.2 “Mantenimiento y Conservación de Estructuras” (Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos)

Se trata de una asignatura que cursan todos los alumnos del primer curso del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Esta asignatura forma parte de la apuesta que realizó en su día la ETSICCP, con el fin de ofrecer a sus alumnos los suficientes conocimientos con los que afrontar uno de los sectores de la construcción que menos afectado se ha visto por la actual crisis económica. En esta asignatura, los alumnos reciben un total de 45 horas de clase, de las cuales 23 son de carácter teórico y 22 de carácter práctico. Dentro de las sesiones prácticas, se realiza una sesión de campo, donde se trabaja en los daños estructurales del Museo de las Ciencias Príncipe Felipe.

La asignatura queda dividida en 5 bloques temáticos.

1. Daños en estructuras
2. Gestión del mantenimiento de estructuras
3. Diagnóstico y evaluación de estructuras dañadas
4. Monitorización y control de estructuras
5. Técnicas de actuación

El primer bloque sirve de base para que los alumnos conozcan los daños más comunes que pueden manifestarse en las estructuras, para así poder gestionar las labores de mantenimiento. Dentro de este primer bloque se realiza la sesión práctica ya mencionada.

2.3 “Patología y Rehabilitación” (Máster en Ingeniería del Hormigón)

Esta asignatura está estructurada de un modo muy similar a la asignatura del Grado en Ingeniería de Obras Públicas, aunque con mayor profundidad en sus contenidos, como corresponde a unos estudios de Máster. La carga lectiva está formada por 50 horas de clase, descompuestas en 30 de teoría en aula, y 20 de prácticas.

Al igual que en las asignaturas descritas en los puntos 2.1 y 2.2, el estudio de los mecanismos de daño se complementa con la visita al Museo de las Ciencias Príncipe Felipe.

Es de destacar la heterogeneidad en el perfil del alumnado de esta asignatura, que va desde Ingenieros Civiles, a Arquitectos, Ingenieros Industriales, etc.

3. EL MUSEO DE LAS CIENCIAS PRÍNCIPE FELIPE

El Museo de las Ciencias Príncipe Felipe (ver Figura 1a) se enmarca dentro del complejo denominado Ciutat de les Arts i les Ciències. El complejo está integrado por varias construcciones: Hemisfèric, Museo de las Ciencias Príncipe Felipe, Umbracle, Oceanográfico, Palacio de las Artes Reina Sofía, Puente de l'Assut de l'Or, y Àgora.

El Museo de las Ciencias Príncipe Felipe fue diseñado por Santiago Calatrava, inaugurándose en el año 2000. La superficie construida en el museo es ligeramente superior a los 40.000 m². En cuanto a sus dimensiones, mide 220 m de largo, 80 m de ancho y 55m de altura [9]. Para su construcción se emplearon 58.000 m³ de hormigón y 14.000 t de acero.

El museo se ha convertido en uno de los símbolos de la ciudad de Valencia. Se trata de un edificio con unas características arquitectónicas muy particulares, que despierta el interés de los valencianos y de los turistas que recibe la ciudad. Prueba de ello es que se trata de uno de los edificios que más visitas recibe en la ciudad de Valencia.

Considerando las particularidades del museo, junto con el estado del hormigón del exterior, se trata de una edificación muy adecuada para poder realizar visitas de campo. Al tratarse de un edificio que forma parte de la simbología de la ciudad, la visita despierta un gran interés en los alumnos.



Figura 1: a) Vista general del Museo de las Ciencias Príncipe Felipe; b) Visita de campo con los alumnos

4. ORGANIZACIÓN DE LA VISITA DE CAMPO

La visita de campo se realiza inmediatamente después de haber presentado en clase la parte teórica de los mecanismos de daño en estructuras de hormigón. Además de consolidar los conceptos teóricos planteados en clase, la visita también persigue familiarizar al alumno con los protocolos a seguir al realizar la inspección de estructuras dañadas.

La visita se realiza en grupos de 20-25 alumnos, que a su vez trabajan en subgrupos de 3-4 alumnos. Los alumnos analizan “in situ” los daños observados, realizando fotografías que posicionarán en un plano en planta del edificio. Posteriormente, los alumnos redactan un informe, destacando los principales daños observados, e indicando las causas y posible evolución futura. Este informe es evaluado por el profesor, contribuyendo a la nota final de la asignatura.

Una vez los alumnos han entregado el informe, se realiza un debate en clase donde se presentan diapositivas con los principales daños del edificio, con el objeto de que los alumnos aporten sus ideas y haya una discusión sobre el origen y evolución de los daños.

5. ANÁLISIS DE LOS DAÑOS EXISTENTES

El Museo de las Ciencias Príncipe Felipe tiene un valor arquitectónico innegable, con lo que se ha convertido en uno de los símbolos de Valencia. Sin embargo, el propósito de la práctica de campo que se realiza es centrarse en el estudio de los daños existentes. Pese a tratarse de edificio construido hace poco más de 15 años, existe una casuística muy variada de daños, algunos de origen estructural, otros derivados del propio comportamiento del hormigón, y otros debidos a deficiencias en la definición de detalles o problemas durante la construcción. Por ello, el edificio representa una excelente herramienta donde los alumnos pueden asentar los conocimientos teóricos adquiridos sobre los mecanismos de daño en estructuras de hormigón. A continuación se detallan los principales daños que se pueden observar en el museo, intentando establecer las causas y posible evolución futura.

Junto con los daños en forma de fisuras, que son evidentes, son de destacar una serie de defectos debidos al diseño o construcción inadecuada de algunos elementos. Es general la aparición de humedades en la unión entre diferentes elementos constructivos, como es el caso de la unión losa-pilar mostrada en la Figura 2a. En este caso, la junta entre la losa y el pilar no tiene la impermeabilidad necesaria, y el agua de lluvia atraviesa la junta y discurre por las caras del pilar, con las consiguientes manchas de humedad y cambio de coloración del hormigón. Esta situación provoca un importante problema estético, quizás inadmisibles para un edificio tan representativo como este. Junto con el problema estético, la presencia de humedades en la unión pilar-loza, puede generar un problema de durabilidad a medio plazo.

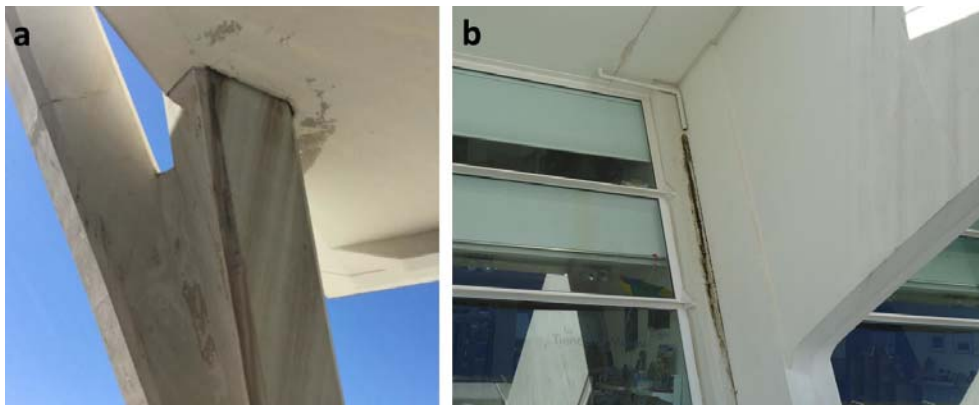


Figura 2: Humedades en paramentos de hormigón. a) Unión viga-loza; b) Bajante

Relacionado también con la presencia de agua sobre superficies de hormigón, se observa el diseño inadecuado de una serie de bajantes de agua, una de las cuales se muestra en la Figura 2b. Las bajantes provocan que el agua de lluvia discurra sobre las paredes de hormigón, con los mismos problemas estéticos y de durabilidad descritos en el caso de la unión losa-pilar.



Figura 3: a) Fisuras y humedades debidas al paso del agua a través de una losa de forjado; b) Humedades y presencia de deposiciones de carbonato cálcico

El problema de la humedad sobre los paramentos de hormigón es generalizado, y no se manifiesta únicamente del modo indicado con anterioridad. Es común la aparición de fisuras en elementos superficiales, como son losas de forjado y muros, que vienen acompañadas por la presencia de humedad. En la Figura 3 se muestran dos losas de forjado que han sufrido el paso del agua de lluvia a través de fisuras existentes. En la Figura 3a se puede ver que el agua ha arrastrado el óxido de las armaduras, apareciendo manchas sobre la superficie de hormigón. Por otro lado, en la Figura 3b se observa una zona de un forjado donde el paso del agua a través de las fisuras existentes ha provocado la deposición de carbonato cálcico, formándose elementos similares a las “estalactitas” que aparecen en las cuevas.

La Figura 4 muestra las coqueras o poros superficiales que aparecen en una cornisa y en un pilar. En ambos casos, el defecto está originado en la fase de construcción. Ambos elementos están inclinados, con un ángulo con la horizontal menor que 90°. La presencia de coqueras en la Figura 4a se debería a que el contacto del hormigón fresco con el encofrado no era perfecto. Debido a la inclinación del encofrado, podría haber ocurrido que la presión del hormigón contra el encofrado fuera baja, no apareciendo lechada de cemento en el contacto con el encofrado. Por otro lado, en la Figura 4b se muestra un defecto que se repite en casi todos los pilares de una misma fachada, y que parece deberse a un problema del encofrado, que originó coqueras o poros en una de las caras el pilar.



Figura 4: Coqueras o poros en superficies. a) Cornisa; b) Pilar

Un daño que aparece de manera repetitiva en los muros de hormigón armado de las fachadas del museo es el debido a la contracción térmica inicial del hormigón, que provoca fisuras en el arranque del muro, cerrándose a mitad de su altura. Las reacciones de hidratación del cemento provocan que el hormigón, en sus primeras horas tras el vertido, experimente temperaturas elevadas. Al enfriarse el hormigón, tiende a contraerse. Sin embargo, el muro tiene coaccionada su contracción en la zona del arranque, debido a la presencia de la cimentación del muro. La tracción originada por este efecto, provoca la fisuración que se puede ver en la Figura 5a.



Figura 5: a) Fisuras por contracción térmica inicial en un muro; b) Corrosión en uno de los pilares

En numerosos elementos y zonas del museo se detecta la presencia de corrosión en las armaduras. Por ejemplo, la Figura 5b muestra la corrosión de una armadura en un pilar, debido al recubrimiento inadecuado de la propia armadura. Situaciones como esta requerirían de una actuación inmediata de reparación, debido a que la corrosión de la armadura provoca un incremento de volumen del acero, que a su vez provoca el desprendimiento del recubrimiento de hormigón, con la abertura de nuevas vías de acceso para el ataque de las armaduras. Este tipo de ataque es sumamente importante para la durabilidad de la estructura debido a la ubicación del museo, a poco más de un kilómetro del mar.

Algunas de las cornisas presentan fisuras perpendiculares al borde, como las representadas en la Figura 6a. Las fisuras tienen una abertura considerable, apreciable a simple vista. Considerando las dimensiones de estos elementos y la disposición de las fisuras, se puede considerar la retracción hidráulica del hormigón como posible origen.

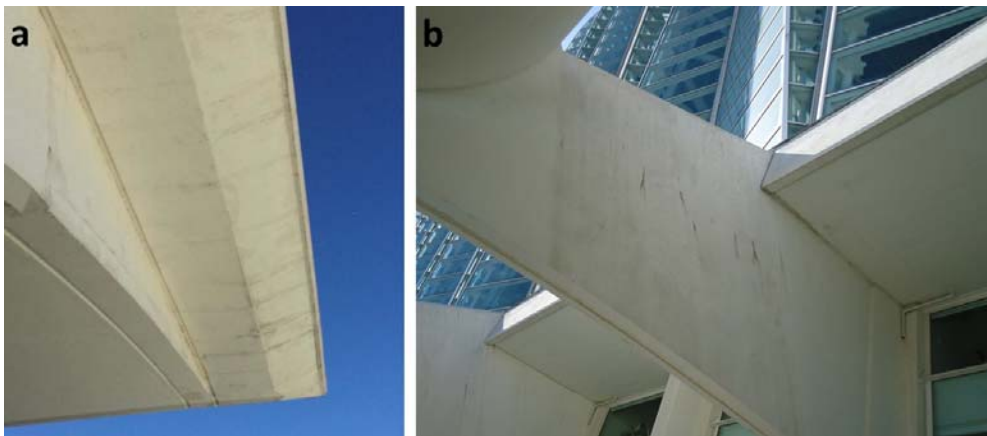


Figura 6: a) Fisuras en cornisas; b) Fisuras en ménsulas

En una de las fachadas laterales del edificio, existen unas grandes losas de hormigón que descansan sobre ménsulas como la que se pueden ver en la Figura 6b. La totalidad de las ménsulas presentan un nivel de fisuración importante, debido a las tracciones existentes en su cara superior por el efecto de los momentos negativos actuantes. Las fisuras tienen una abertura que sobrepasa los límites de la normativa española y, en muchos casos, están acompañadas de manchas de óxido. La profundidad de las fisuras también es considerable, sobrepasando, en algunos casos, la mitad del canto de la viga. Aparte de la trascendencia estructural que puedan tener estas fisuras, es de destacar el problema de durabilidad que representan para el hormigón y sus armaduras.

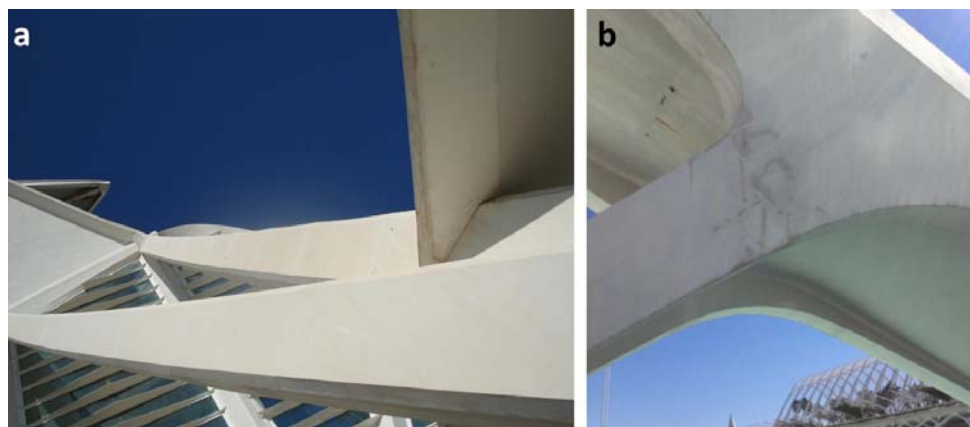


Figura 7: a) Inclinación en pilares de las fachadas principales; b) Reparación a base de "parcheos" en superficies de hormigón

En cada una de las dos fachadas principales se disponen 10 pilares inclinados, en los que se observa una deformación con respecto a su eje, que es apreciable a simple vista (ver Figura 7a). El origen de esta deformación es discutible y requeriría de un estudio en profundidad. A priori, se pueden proponer como

posibles causas la deformación del encofrado durante la construcción de los pilares, o bien la deformación de los propios pilares debido a su peso propio.

Tras las visitas realizadas, se ha podido contrastar la presencia de “parcheos” en algunas superficies de hormigón, dejando entrever algunas de las actuaciones de reparación realizadas (ver Figura 7b). Sin embargo, algunas de las reparaciones no han resultado efectivas, desprendiéndose el mortero de reparación de la superficie de hormigón.

6. CONCLUSIONES

El estudio de fallos en estructuras reales ha demostrado ser una muy buena herramienta para formar a expertos en el diseño y cálculo de estructuras. En este artículo se ha mostrado la experiencia seguida en la Universitat Politècnica de València mediante una visita de campo a una edificación emblemática de la ciudad de Valencia, como es el Museo de las Ciencias Príncipe Felipe. La estructura del edificio presenta una casuística muy variada de daños, lo que le da un valor docente importante para el aprendizaje de los mecanismos de daño en estructuras de hormigón.

Los daños existentes en el edificio varían desde los derivados del propio comportamiento del hormigón, a los daños debidos a la acción de cargas. Existen otros tipos de daños, derivados de la presencia de humedades o coqueas y poros en las superficies del hormigón. En muchos casos, se detecta la presencia de corrosión en las armaduras, provocando la rotura del recubrimiento o bien apareciendo manchas de óxido en las fisuras existentes.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Delatte, N. An approach to forensic engineering education in the USA. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Forensic Engineering*. Vol. 165/3, pp. 123-129 (2012).

[2] Delatte, N. Failure literacy in structural engineering. *Engineering Structures*. Vol. 32/7, pp.1952-1954 (2010).

[3] Delatte, N.J., Bosela, P.A., Sutton, R. and Bagaka's, J. Implementing forensics and failures in the civil engineering curriculum. *4th International Conference on Forensic Engineering: From failure to understanding*, London, December 2008.

[4] Petroski, H. *To Engineer Is Human: The Role of Failure in Successful Design*. St. Martin's Press, New York, 1985.

[5] Petroski, H. *To Forgive Design*. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 2012.

[6] Adam, J.M. and Pallares, F.J. Editorial – Learning from Structural Failures. *Engineering Structures*. Vol. 32, p. 1791 (2010).

[7] Adam, J.M., Ingham, J. Editorial – Structural Failures in Earthquakes. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 34, p. 536 (2013).

[8] Adam, J.M. Editorial - Analysis of structural failures using numerical modeling. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. Vol. 27/1, pp. 2-3 (2013).

[9] <http://www.cac.es/es/museu-de-les-ciencies> (acceso a la web: 18/07/2016).