

Estudio de la fisuración de una viga de hormigón armado con un modelo de elementos finitos

Sánchez Ramos, Ismael⁽¹⁾; Ait-Salem Duque, Omar⁽¹⁾; Huerta Gómez de Merodio, M^a Consuelo⁽²⁾

(1) MSC Software Simulating Reality
ismael.sanchezramos@mscsoftware.com

(2) Dpto. de Estructuras. E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid

En este artículo se va a abordar el estudio, mediante la realización de un modelo de elementos finitos, del comportamiento de una viga de hormigón armado ante distintos niveles de fisuración. Para su elaboración se han utilizado resultados de ensayos estáticos y dinámicos realizados en el Laboratorio de Estructuras de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de Madrid. Además se va a realizar una descripción del modelo realizado, así como la determinación de sus parámetros de análisis. Para concluir, se llevará a cabo una comparación de los resultados ensayos-modelo y una simulación del crecimiento de una grieta mediante la técnica VCCT.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este proyecto es el de, con un mismo modelo de elementos finitos, poder simular el comportamiento global (estático y dinámico) de una viga de hormigón armado ante distintos niveles de fisuración.

En años precedentes se han realizado, en el Laboratorio de estructura de la ETSIIM, modelos de elementos finitos de la una viga de hormigón armado en los que se intentaba simular su comportamiento estático y dinámico. Sin embargo, o bien se lograban unos ajustes satisfactorios de la parte estática o bien de la parte dinámica, es decir, con un mismo modelo nunca se ha conseguido una simulación global de esta problemática.

Así pues, los objetivos de este proyecto son:

- Dar solución al problema de la fisuración en estructuras de hormigón armado, mediante la elaboración y el ajuste de un modelo de elementos finitos, con el que se podrá predecir el comportamiento global de las mismas ante diferentes niveles de degradación, sin necesidad de recurrir continuamente a resultados de ensayos.
- Validar el modelo implementado, comparando los resultados obtenidos a nivel global, dinámico y estático con los resultados de los ensayos.
- Poner a punto un procedimiento de cálculo no lineal sofisticado y explicar algunos de los algoritmos utilizados por el mismo.
- Iniciar el estudio en detalle del crecimiento de las grietas en el hormigón una vez alcanzado el estado de fisuración. Con la opción VCCT (*Virtual Crack Closure Technique*) se simulará el crecimiento de una grieta y se analizará el comportamiento de la misma.

Debido a la alta no linealidad del problema que nos ocupa, para poder conseguir un ajuste fiable del mismo, se va a hacer uso de procedimientos de cálculo e integración sofisticados. Por ello, se ha utilizado, un programa de cálculo no lineal en código implícito por el método de los elementos finitos llamado Marc y desarrollado por la empresa MSC.Software.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO

A la hora de realizar un modelo de elementos finitos de una viga de hormigón armado es importante tener en cuenta dos aspectos principales: el modelo de las armaduras y su relación de compatibilidad de desplazamientos con el hormigón y el modelo de la ley de comportamiento del hormigón.

Para ello se han utilizado las siguientes opciones del programa de cálculo:

- **Elementos REBAR:** mediante esta opción se va a definir el material de las armaduras, su posición relativa dentro de la estructura y el número, orientación y área de la sección transversal de las mismas.
- **Opciones ISOTROPIC, PLASTICITY y CRACK DATA:** en el caso que nos ocupa, necesitamos poder introducir los parámetros que rigen el comportamiento del hormigón, tanto a tracción como a compresión. En la siguiente imagen se muestran los puntos clave de la curva tensión-deformación característica del hormigón.

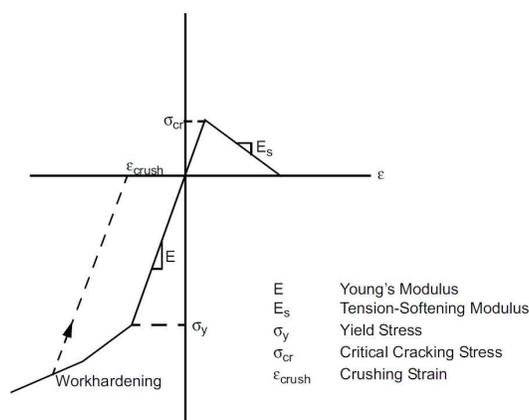


Figura 1. Ley de Comportamiento Teórica del Hormigón

Mediante la opción ISOTROPIC se va a definir la parte elástica de la curva, mediante la introducción del Módulo de Young (E) y del Coeficiente de Poisson (ν).

Con la opción PLASTICITY se va a poder definir el Límite Elástico (σ_y) del hormigón a compresión y por lo tanto simular la parte plástica de la curva.

Mediante la opción CRACK DATA se permite simular el comportamiento a tracción del hormigón, es decir, el comportamiento ante fisuración. El inicio de la misma se determina imponiendo un valor de Tensión Crítica (σ_{cr}), de tal forma que para tensiones de tracción superiores a este valor, la fisuración comenzará a producirse. A partir del momento en que se inicia la degradación, la viga pierde toda capacidad de seguir soportando carga de tracción, a no ser que se incluya el valor del Módulo de Relajación (E_s). Mediante la inclusión de este módulo se puede simular el comportamiento de servicio del hormigón, es decir, la capacidad de poder seguir soportando carga de tracción una vez que la viga ha sido degradada.

- **Opción INSERT:** esta opción permite compatibilizar los desplazamientos de los elementos de las armaduras con los desplazamientos de los elementos que modelan el hormigón. Mediante un "insert" se puede definir un conjunto de elementos "matriz" que alojarán un conjunto de elementos "embebidos" en la matriz, de tal forma que se genera una atadura entre los nodos de ambos grupos de elementos.

3. CAMPAÑA DE ENSAYOS

Se han realizado los ensayos sometiendo a la viga a distintos niveles de degradación o fisuración por aplicación de carga, mediante un gato hidráulico, obteniendo una zona central con un estado de flexión pura. Teniendo en cuenta las cargas máximas con las que

se sobrepasan los diferentes estados de comportamiento: noval (10,4 kN), elástico (48,9 kN) y de servicio (77,6 kN), se han establecido los límites de carga que se aplicarán en cada fase de fisuración. Estas cargas máximas son: 0 kN, 8 kN, 20 kN, 40 kN, 60 kN, 80 kN, 120 kN.



Figura 2. Viga ensayada en el Laboratorio de Estructuras de la E.T.S.I.I.M

Los ensayos estáticos se han considerado de dos tipos:

- Ensayos primarios: aquellos en los que se sobrepasa la máxima carga aplicada hasta ese momento. Es decir, aquellos en los que se aumenta la fisuración.
- Ensayos secundarios: aquellos en los que no se supera la máxima carga aplicada hasta ese instante.

Los ensayos estáticos son ensayos de flexión a cuatro puntos, tal y como se muestra en el esquema de la figura.

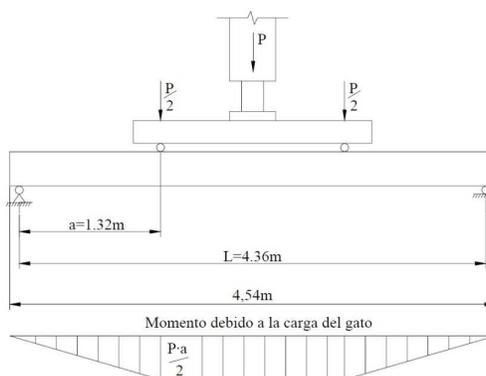


Figura 3. Esquema de la viga ensayada

Los ensayos modales se han efectuado con diferentes condiciones de contorno y masas colocadas sobre la viga.

Los ensayos que se han realizado han sido efectuados sobre una viga de hormigón armado a la que se ha llamado V16 por ser la armadura inferior de diámetro 16 mm.

La viga ensayada tiene una longitud de 4,54 m con una sección rectangular de 0,22 m de ancho por 0,32 m de canto. La disposición de las armaduras es la que se muestra a continuación.

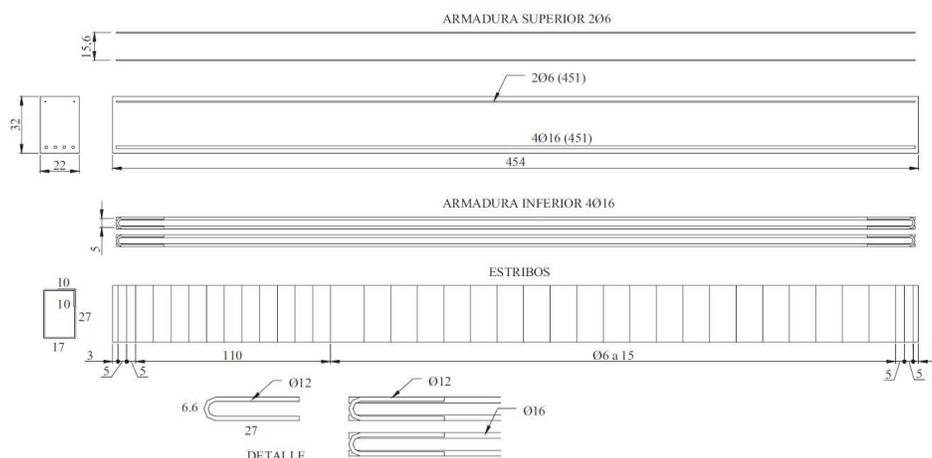


Figura 4. Plano de la Viga V16 y disposición de las armaduras

Los ensayos estáticos consisten en la aplicación sobre la viga de ciclos de cargas sucesivamente crecientes de manera que se obtengan los diferentes estados de comportamiento de la viga: noval (hasta 8kN), elástico (hasta 40 kN) y de servicio. La carga es aplicada mediante un gato hidráulico sobre una viga metálica que se ha denominado “elemento de aplicación de la carga”. Este elemento se apoya en dos rótulas, una móvil y otra fija, situadas en la cara superior de la viga. A su vez, la viga también se encuentra apoyada de la misma forma sobre un pórtico metálico.

Las medidas que se toman corresponden a las siguientes variables:

- Fuerza aplicada.
- Deformación de la viga (flechas en varios puntos).
- Deformaciones locales y globales del hormigón.
- Deformaciones en el acero de las armaduras interiores de la viga.
- Fisuras producidas en la viga.

4. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El modelo de elementos finitos de la viga de hormigón armado que se ha realizado en este estudio es un modelo en tensión plana.

Los elementos que simulan el hormigón son elementos planos cuadriláteros de 4 nodos para tensión plana, a los que se les ha asignado un espesor equivalente al ancho de la viga como propiedad.

Los elementos que simulan las armaduras de acero son elementos tipo barra (1-D) de dos nodos, a los que se les ha asignado una propiedad equivalente a la sección de las barras inferiores y superiores en cada caso.

La malla del modelo tiene un tamaño global de elemento de 3 cm con el que se abarca correctamente el recubrimiento de hormigón de la viga.



Figura 5. Malla utilizada en el modelo MEF de la viga

En cuanto a los materiales, la ley de comportamiento del hormigón quedará definida por la parte elástica lineal (Módulo de Young $E=2,9309 \cdot 10^{10}$ Pa y Módulo de Poisson $\nu=0,25$), la parte de comportamiento plástico a compresión (Límite Elástico $\sigma_y=13,2$ MPa) y el

comportamiento ante fisuración (Tensión Crítica de Fisuración $\sigma_{cr}=1.8$ MPa y Módulo de Relajación $E_s=8 \cdot 10^7$ Pa).

Hay que destacar que, dado que los parámetros que controlan el comportamiento ante fisuración no son evidentes, se ha realizado un estudio previo variando los valores de la Tensión Crítica y el Módulo de Relajación para ver cuál es su influencia en varios aspectos del modelo, tales como las frecuencias tras degradación, la carga de fisuración y la convergencia del método numérico, y posteriormente pasar al ajuste de los mismos.

Las conclusiones de este estudio han dado como resultado que el valor de la Tensión Crítica de Fisuración afecta en gran medida al valor de las frecuencias tras la degradación y al valor de la carga de fisuración. Por otro lado, el Módulo de Relajación, al aumentar, dificulta en gran medida la convergencia del método numérico. Esto es debido a que si la pendiente de caída de tensión es muy grande (E_s muy grande), para pequeñas variaciones de la deformación, la tensión disminuye bruscamente, provocando la no convergencia del problema. Este fenómeno pudo observarse para valores del módulo superiores a 10^9 Pa.

Para simular de forma correcta los ensayos de flexión a cuatro puntos que se han llevado a cabo sobre la viga, se han definido unas condiciones de contorno en el modelo, coherentes con las de la estructura real. La viga consta de dos apoyos flexibles en sendos extremos. El apoyo derecho permite el desplazamiento horizontal mientras que en el izquierdo éste está impedido. La rigidez en dirección vertical de ambos apoyos no es infinita, sino que se trata de apoyos flexibles. Para su modelización se han introducido sendos elementos tipo muelle para los que se ha ajustado el valor de rigidez vertical (k_y). Para su ajuste se ha realizado un pequeño estudio paramétrico, teniendo como parámetro de referencia los valores de las frecuencias de los dos primeros modos de vibración de la viga ensayada. El valor de rigidez ajustada de los apoyos del modelo es de $k_y = 5.8 \cdot 10^7$ N/m.

En cuanto a las cargas sobre el modelo, se han incluido 2 fuerzas puntuales con valor $P/2$, siendo P la carga total introducida en el gato hidráulico y una carga distribuida que simula el peso propio de la viga (7739 N/m²).

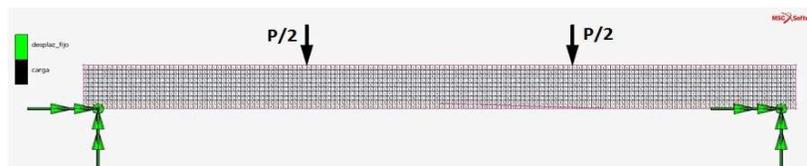


Figura 6. Disposición de las cargas y condiciones de contorno en el modelo MEF

5. SIMULACIONES Y PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Se han realizado las simulaciones de los ensayos hasta las fases de carga máxima de: 8 kN (Fase Noval), 20 kN (Fase Elástica) y 40 kN (Fase Elástica). Para la simulación tanto de los ensayos modales como de los ensayos estáticos se han definido, para cada fase, tres casos de carga: un análisis modal previo a la carga estática, un análisis estático no lineal con carga incremental y un análisis modal posterior al caso estático.

En la siguiente figura se esquematiza el procedimiento de análisis llevado a cabo.



Figura 7. Esquema del procedimiento de análisis definido en el modelo MEF

Como se puede observar en la figura anterior, se lleva a cabo un proceso de carga incremental con un número de incrementos fijo (250 incrementos por cada ciclo carga-descarga). El mismo procedimiento se sigue para los casos de carga máxima de 8 kN y 20 kN.

El interés en simular de esta forma los ensayos, es debido a que, por un lado se podrán ver claramente las diferencias en los resultados entre los ensayos primarios y secundarios y además, se podrá comprobar la pérdida de rigidez de la estructura cuando se degrada. Éste fenómeno se observará en la disminución de las frecuencias de los modos normales en el análisis modal posterior a los casos de carga estáticos.

Éste último fenómeno es una de las mayores potencias del procedimiento de cálculo implementado. Si el análisis estático se realiza bajo la condición de grandes deformaciones y posteriormente a él se realiza un análisis modal, éste último utilizará una nueva matriz de rigidez que tendrá en cuenta las deformaciones remanentes de fisuración que quedan sobre la viga degradada. De esta forma, puede observarse perfectamente la caída de rigidez de la estructura tras su fisuración.

6. RESULTADOS

En cuanto a los resultados estáticos, en los ensayos se han obtenido valores para: microdeformaciones en las armaduras de tracción, en las armaduras de compresión y en el hormigón; flechas en diferentes puntos de la viga; curvatura de la viga y separación entre grietas.

Uno de los aspectos más importantes del modelo que debe validarse con los resultados de los ensayos, es la diferencia existente entre los ensayos primarios y secundarios. A continuación se muestran dos gráficas correspondientes a la fase de carga máxima de 20 kN que representan los valores de las microdeformaciones en la armadura de compresión en un ciclo de carga-descarga, para los ensayos primario y secundario.

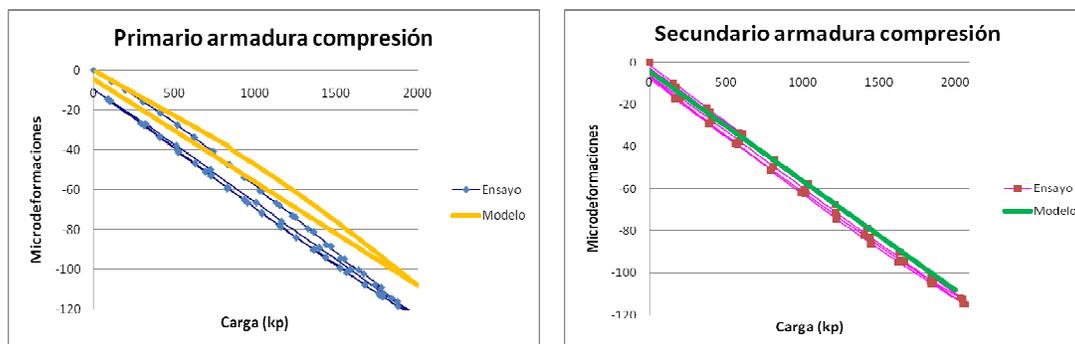


Figura 9. Microdeformaciones en la armadura de compresión. Comparación ensayo-modelo

En el primario, es la primera vez que se alcanza un nivel máximo de carga, luego es esperable un comportamiento no lineal del ciclo de carga, ya que la viga está fisurándose por primera vez. Sin embargo, cuando vuelve a cargarse de nuevo sin superar ese nivel de carga máximo (secundario), no se produce degradación, por lo que es esperable un comportamiento lineal. Ambos fenómenos puede observarse que se están dándose tanto en los ensayos como en el modelo.

Otro de los aspectos más sorprendentes que ha podido observarse es la separación entre fisuras. En los ensayos, aparecieron fisuras con una separación media entre ellas de 16 cm, mientras que en las simulaciones ha podido observarse que los puntos de máxima deformación de fisuración (que representan las zonas fisuradas) se dan cada 15-18 cm, como puede observarse en la siguiente figura.

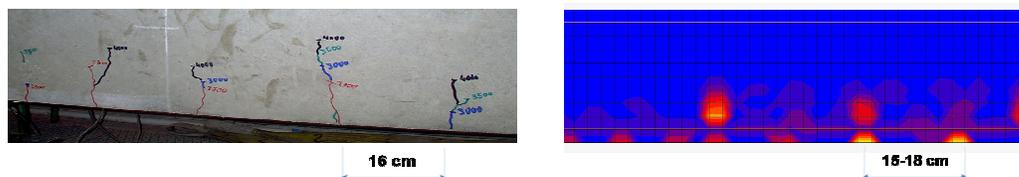


Figura 10. Separación entre fisuras. Ensayo - Modelo

En cuanto a los ensayos dinámicos, se realizaron ensayos modales bajo diferentes condiciones de contorno y, en este proyecto, se han realizado análisis modales con la viga libre-libre sin carga y análisis modales con la viga bi-apoyada bajo diferentes estados de carga.

A continuación se muestra la comparación entre los resultados de los ensayos modales y los resultados del modelo. Como se puede observar para el caso de la viga libre-libre y bi-apoyada sin carga, el error cometido es menor al 1 %, por lo tanto, la rigidez global de la viga está correctamente ajustada en el modelo.

Modo	Frecuencia Modelo (Hz)	Frecuencia Ensayos (Hz)	Error (%)
1	57.82	57.26	- 0.98
2	154.47	154.12	- 0.23

Tabla 1. Frecuencias modal viga libre-libre

Modo	Frecuencia Modelo (Hz)	Frecuencia Ensayos (Hz)	Error (%)
1	25.80	25.86	0.23
2	79.60	79.74	0.18

Tabla 2. Frecuencias modal viga bi-apoyada sin carga

A continuación, pueden observarse las frecuencias obtenidas en los ensayos y el modelo tras producirse la fisuración. Puede comprobarse perfectamente cómo disminuyen respecto al caso del modal apoyado sin carga, es decir, se comprueba que la viga está perdiendo rigidez al degradarse.

Modal apoyado 20 kN			
Modo	Frecuencia Modelo (Hz)	Frecuencia Ensayos (Hz)	Diferencia (%)
1	23.30	24.59	5.25
2	72.44	77.03	5.96

Tabla 3. Frecuencias modal viga bi-apoyada tras nivel de fisuración a 20 kN

Modal apoyado 40 kN			
Modo	Frecuencia Modelo (Hz)	Frecuencia Ensayos (Hz)	Diferencia (%)
1	19.95	23.56	15.32
2	63.37	72.99	13.18

Tabla 4. Frecuencias modal viga bi-apoyada tras nivel de fisuración a 40 kN

Se comprueba también, que la diferencia respecto a ensayos de las frecuencias, es mayor en los casos en los que se produce fisuración. Esto es debido a un fenómeno de recuperación de grieta producido durante la fase de descarga en los ensayos, que no se da en la misma medida en la simulación.

7. CRECIMIENTO DE GRIETA: VCCT

Se ha realizado un inicio de estudio en detalle del crecimiento de una fisura en la viga de hormigón utilizando la técnica VCCT (Virtual Crack Closure Technique). Para ello se ha elaborado un modelo auxiliar con una carga central, para asegurar que la única zona susceptible de fisurarse es la sección media.

La conclusión principal de este estudio ha sido que la grieta simulada evoluciona hasta la situación de la fibra neutra, es decir, donde las tensiones cambian de tracción a compresión, tal y como se muestra en la figura siguiente.

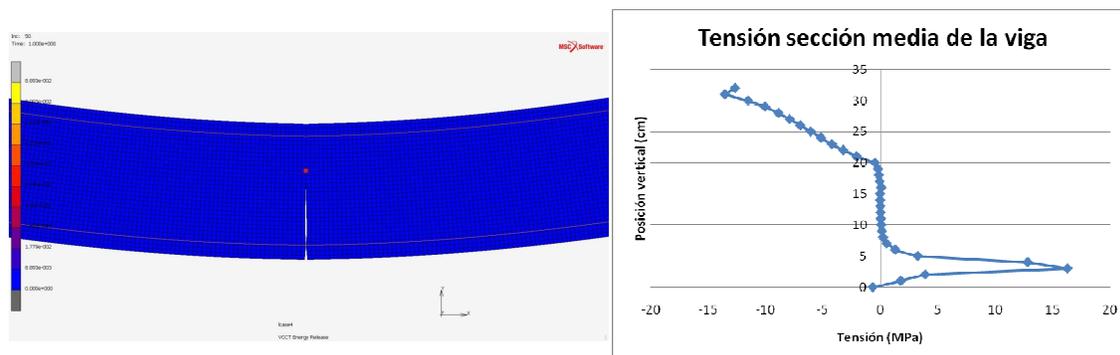


Figura 11. Resultado del estudio de crecimiento de grieta con VCCT

8. CONCLUSIONES

La conclusión principal de este proyecto es que se ha elaborado un modelo válido con el que estudiar el comportamiento estático y dinámico del hormigón armado ante diferentes niveles de fisuración. Para ello:

- Se ha realizado un ajuste del comportamiento estático de la viga, comprobando las diferencias entre los ensayos primario y secundario, así como la separación entre fisuras.
- Se ha ajustado la rigidez dinámica de la viga sin degradar.
- Se ha comprobado la disminución de rigidez de la estructura tras el fenómeno de la fisuración.
- Se ha desarrollado un procedimiento de cálculo válido para ser utilizado en el estudio de fisuración de otras estructuras de hormigón armado.
- Se ha iniciado un estudio en detalle del crecimiento de una fisura en el hormigón, obteniendo resultados lógicos en cuanto a la evolución de la misma.

9. REFERENCIAS

- [1] BUYUKOZTURK, Oral. *Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures*, Computers & Structures, Vol. 7, pp. 149-156. (1977)
- [2] LU Xiao; LU XinZheng; ZHANG WanKai; YE LiePing. *Collapse simulation of a super high-rise building subjected to extremely strong earthquakes*, Science China Technological Sciences. (2010)
- [3] DE LA RICA LLAMAS, Adriano. *Estudios dinámicos y estáticos de una viga de hormigón armado. Influencia de la fisuración*, Proyecto Fin de Carrera, Dpto. Estructuras y Construcciones Industriales, ETSII, Madrid (2003)
- [4] SÁNCHEZ TORRE, Eduardo. *Degradación de estructuras de hormigón armado. Medida de parámetros de daño*, Proyecto Fin de Carrera, Dpto. Estructuras y Construcciones Industriales, ETSII, Madrid (2005)
- [5] RINCÓN SANTOS, Antonio. *Análisis estructural mediante un programa de elementos finitos. Validación del método didáctico*, Proyecto Fin de Carrera, Dpto. Estructuras y Construcciones Industriales, ETSII, Madrid (2006)