

EXPERIENCES ON MEF SIMULATION FOR LINEAR CONCRETE ELEMENTS WITH ATENA TOOL

Laserna Arcas, Santiago; Montero Martínez, Jesús; Alcázar Bascuñana, Elena;
Cervera Gascó, Jorge
ETSIAM-UCLM

Modelling of concrete is a very important advance for optimizing structural elements, since it allows to simulate the expected behaviour for elements which will be manufactured and determine the weakest points on the design with no needing of preliminary tests or small scale models. Due to the complex and heterogeneous characteristics of the concrete behaviour, research on the material models adapted to the real response of the concrete is getting more advanced. In this way, ATENA commercial software has been specially developed to perform nonlinear FEM analysis on concrete elements in an easy way. This communication summarizes experience using ATENA for analysing different lineal elements of structural concrete on the ETSIAM de Albacete. Thereby, different models of a)reinforced, b)pre-stressed, c)recycled concrete elements has been performed to compare the behaviour on real experimental tests with the modelling results. This comparative allows contrasting and calibrating ATENA for different concrete structural situations. Results of the models show a very good fit to the experimental results and also determine the most important values to calibrate the material models on each situation.

Keywords: modelling; finites elements; concrete; ATENA

EXPERIENCIAS EN SIMULACIÓN POR MEF DE ELEMENTOS LINEALES DE HORMIGÓN MEDIANTE LA HERRAMIENTA ATENA

El modelado de elementos de hormigón supone un avance muy importante para la optimización de elementos estructurales, ya que permiten reproducir el comportamiento esperado de un elemento que se desee fabricar y actuar sobre los puntos críticos del mismo sin necesidad de realizar ensayos previos o maquetas. Debido a las características complejas y heterogéneas del comportamiento del hormigón, el estudio de modelos de materiales que mejoran la adaptación al comportamiento real del mismo es cada vez más avanzado. Con ello, aparece la herramienta comercial ATENA, especialmente diseñada para el modelado no-lineal del hormigón por MEF destinada a reproducir la respuesta de distintos elementos de hormigón de forma sencilla. En esta comunicación se presentan las experiencias realizadas con la herramienta ATENA en la ETSIAM de Albacete, sobre diferentes elementos lineales de hormigón. De este modo se realizan análisis sobre elementos: a) armados, b) pretensados y c) con hormigón reciclado, siendo comparados con ensayos experimentales reales, permitiendo contrastar y calibrar la respuesta de la herramienta frente a estas situaciones diversas. El resultado de estas experiencias obtiene de ATENA una buena reproducción de la respuesta real de todas las situaciones, determinando los puntos críticos de calibración en función de la situación analizada.

Palabras clave: simulación; Elementos finitos; hormigón; ATENA

Correspondencia: Jesús Montero Martínez - jesus.montero@uclm.es

Agradecimientos: Al proyecto: "Valorización de áridos reciclados procedentes de residuos de la construcción y demolición y su utilización en la construcción de infraestructuras rurales" (PPII-2014-004-P), financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y el Fondo Social Europeo. Especial agradecimiento a las entidades colaboradoras: SYTECA S.L., y CEMENTOS PORTLAND VALDERRIVAS.

1. Introducción

El modelado mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) supone un avance fundamental para la ayuda en el diseño de elementos complejos, ya que permite el análisis de los diferentes diseños de un elemento previamente a su fabricación, obteniendo resultados de comportamiento muy próximos a los que tendrá el elemento real a construir. Con estas técnicas ampliamente difundidas en muchos sectores, se agilizan los procesos de diseño, optimización y producción de cualquier elemento, lo que permite disponer de un producto final en menor tiempo, con el correspondiente ahorro económico para el fabricante.

En el campo del hormigón estructural, las teorías clásicas de análisis junto con la experiencia, han sido suficientes durante mucho tiempo para dar solución a elementos constructivos sencillos. Sin embargo, con el desarrollo tecnológico y social han aparecido nuevos problemas constructivos sobre los cuales las teorías clásicas no encuentran una respuesta fiable, de manera que múltiples autores plantean la utilización del MEF para buscar una solución práctica. Así, la aplicación del método de los elementos finitos al modelado del comportamiento del hormigón armado ha sido, y sigue siendo, muy estudiado por múltiples autores. Una excelente revisión bibliográfica sobre la aplicación del MEF para el análisis lineal y no lineal de estructuras de hormigón armado fue realizada por la American Society of Civil Engineers (ASCE) (Nilson, 1972; Meyer & Okamura, 1985; Isenberg, 1991).

En la actualidad son múltiples las investigaciones que continúan en el análisis no lineal del hormigón (Karpenkoa et al, 2015; Mihai, Jefferson & Lyons, 2016), centrado los esfuerzos en resolver la respuesta de la fisuración en elementos de hormigón como vigas, soleras o muros provocados por esfuerzos de tracción. Así, se generan multitud de modelos específicos que avanza en el comportamiento de este material heterogéneo hasta conseguir una respuesta muy aproximada a la realidad en la actualidad.

La integración de todos los modelos supone un reto de cara a la aplicación práctica desde un punto de vista ingenieril, ya que vista la heterogeneidad de ellos, hace casi inabordable su conocimiento al completo. En la actualidad aparecen herramientas de cálculo en cuyo funcionamiento integran los principales modelos, y los esfuerzos pasan por constatar la funcionalidad de esta implementación comparando los análisis con experiencias reales. Una revisión sobre múltiples modelos de daño y su implementación en programas de simulación numérica por MEF se puede encontrar en Herrera (2011).

De este modo aparecen herramientas como ANSYS ©, ABAQUS © o SOLIDWORKS ©, que cuentan con elementos finitos y modelos constitutivos adaptados en mayor o menor medida a la reproducir el comportamiento del hormigón armado. Sin embargo, de forma general, los modelos de materiales en las herramientas de cálculo por elementos finitos implementan los modelos constitutivos de materiales con carácter genérico. Por tanto, para su utilización se debe dar valor a los diferentes parámetros que gobiernan las ecuaciones acorde a las propiedades del hormigón a modelar. Esto supone calibrar el modelo partiendo de cero en sus diferentes estados de comportamiento, de manera que en ocasiones es necesario configurar curvas complejas con cierta incertidumbre que dificultan la adaptación del material al resultado final, ya que no siempre se tiene el conocimiento para ello.

Ante la existencia de estas complicaciones para la definición de las propiedades características del hormigón adaptadas a modelos materiales genéricos, aparecen otras herramientas específicamente diseñadas para el modelado de elementos de hormigón. Tal es el caso de la herramienta comercial ATENA ©, desarrollada por Červenka Consulting (República Checa), y diseñada como un software de cálculo mediante el método de elementos finitos específico para el análisis no lineal del hormigón armado.

En ella existe la posibilidad de utilizar modelos constitutivos que permiten autocompletar los valores basándose en la resistencia a compresión deseada, y a partir del cual se cumplimentan el resto de valores establecidos en las características descritas en el Eurocódigo 2 (2004). Entre ellos destaca el modelo CC3DNonLinCementitious2, que reproduce el comportamiento del hormigón asumiendo un régimen de endurecimiento previo a que la tensión de compresión sea alcanzada (Červenka, Jendele & Červenka, 2014a). Así, la herramienta ATENA permite simular el comportamiento real de hormigón convencional y estructuras de hormigón armado de manera sencilla, incluyendo parámetros tan importantes como la fisuración del hormigón, el aplastamiento y el esfuerzo de las armaduras.

2. Objetivos

En este contexto el objetivo de esta comunicación es mostrar las diferentes experiencias realizadas con la herramienta ATENA en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes de Albacete (ETSIAM), sobre diferentes elementos estructurales de hormigón de carácter lineal. De este modo se realizan análisis sobre elementos: a) armados, b) pretensados y c) con hormigón reciclado; siendo comparados con ensayos experimentales reales, permitiendo contrastar y calibrar la respuesta de la herramienta frente a situaciones diversas.

3. Metodología y Casos de estudio

3.1 Descripción común de la herramienta y los modelos

Para analizar las diferentes casuísticas de elementos a flexión que en esta comunicación se presentan, se utiliza patrones de configuración globales que permiten el análisis de los diferentes elementos en todo su régimen de deformación hasta alcanzar la rotura. A continuación se enumeran las características fundamentales que configuran tanto los materiales, como las condiciones de contorno como la configuración del análisis:

MATERIALES:

- **HORMIGÓN.-** Como modelo constitutivo del material hormigón se utilizará el modelo CC3DNonLinCementitious2, un modelo constitutivo propio de la herramienta que reproduce el comportamiento no lineal del hormigón asumiendo un régimen de endurecimiento previo a que la tensión de compresión sea alcanzada, y que está basado en los mecanismos de fallo de Fractura Plástica (plastic-fracture) combinando modelos constitutivos para comportamiento de tracción (fracture) y compresión (plastic).
La configuración los parámetros del modelo, se realiza en función de las clases resistentes correspondientes en la experimentación, de entre las descritas en el Eurocódigo 2. Posteriormente se ajustan, los principales parámetros en el modelo: resistencia a compresión (f_c), resistencia a tracción (f_t), módulo de elasticidad secante (E_c), energía de fractura (G_f) y deformación hasta el pico máximo en compresión (ϵ_{cp}).
- **ARMADURA.** El modelo de refuerzo utilizado se realiza siguiendo la aproximación de armadura embebida y el modelo de adherencia descrito en Jendele y Cervenka (2006), y que integra la herramienta para su configuración. Así, este modelo se aplica a elementos línea que cruzan los elementos finitos de carácter volumétrico correspondientes al hormigón. Así, la definición del elemento para cada armadura se describe por los parámetros básicos de diámetro de barra (\varnothing), resistencia del acero (f_{yd}) y módulo de elasticidad (E), entre otros que definen su comportamiento, como es el tipo de barra (corrugada o cable) o las condiciones de adherencia de la misma.

- **ACERO EN ELEMENTOS AUXILIARES.** Donde los elementos de hormigón sufre acciones directas, en el análisis se instalan pequeños platos de carga que eviten la concentración de los esfuerzos sobre un nodo del elemento. Estos elementos sin interés analítico son modelados mediante un modelo material elástico-lineal con un módulo de elasticidad de 210.000 MPa.

CONFIGURACIÓN DEL ANÁLISIS

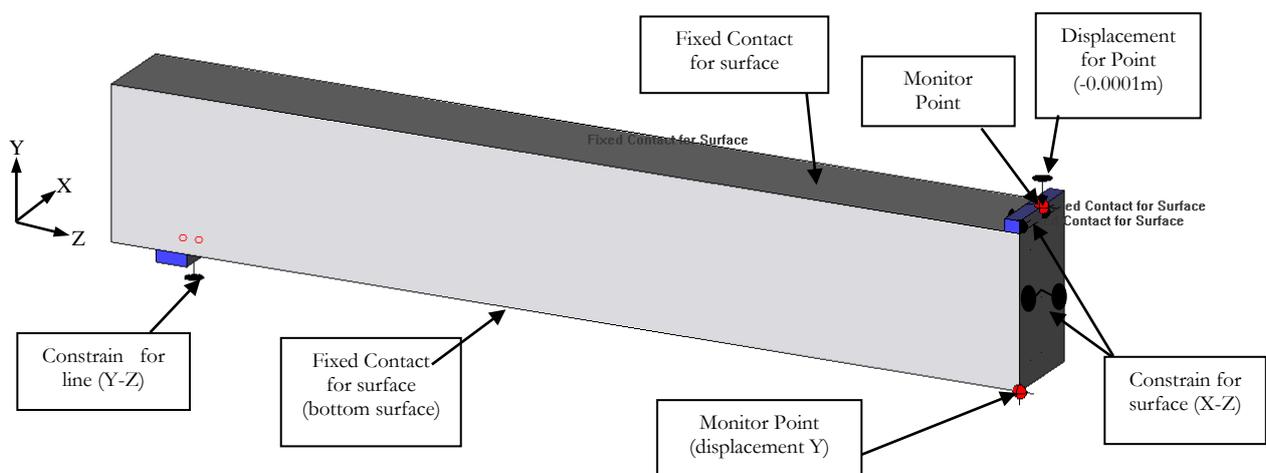
La simulación se configura de forma que el análisis obtenga el patrón completo de carga-desplazamiento que permite caracterizar el comportamiento de la viga para ser comparado con el obtenido en el análisis experimental. De este modo, la simulación no aplica un incremento de carga como tal, sino que se configura una evolución del análisis aplicando una deformación prescrita en los puntos donde se aplica la carga y que permite simular un ensayo con control de desplazamiento. De este modo, se consiguen los datos relativos a la evolución completa del comportamiento de las vigas, incluso tras alcanzar la plastificación de las armaduras o el ablandamiento del hormigón.

Esta situación de carga mediante desplazamientos predeterminados en lugar de por escalones de carga permite utilizar el método clásico de resolución de Newton-Raphson, y obtener la solución completa del comportamiento del elemento analizado, incluso tras alcanzar su resistencia máxima, ya que a partir de estos puntos no se incrementa la carga, pero la viga sigue teniendo determinada resistencia.

Para la obtención de los esfuerzos y desplazamientos, la herramienta ATENA permite utilizar elementos de información puntuales llamados Puntos de Monitoreo, que para cada paso de carga, recogen la información correspondiente a la información deseada. En esta ocasión, se utilizan dos puntos de monitoreo: la reacción en el punto de carga y la deformación en el centro de la viga.

Como condiciones de contorno se utilizan restricciones convencionales aplicadas en el análisis de elementos finitos. En este caso se aplica una restricción al desplazamiento en el apoyo, restricción de simetría en el centro de vano y condiciones de contacto entre los elementos auxiliares de acero y el volumen de hormigón. Todos los volúmenes que aquí se exponen son mallados mediante elementos hexahédricos. Por su parte, cada refuerzo se malla en un único elemento lineal. La configuración de todo el análisis puede verse en la figura 1.

Figura 1: Condiciones de análisis de una viga tipo en simetría



3.2. Vigas armadas

En el caso de vigas armadas la respuesta del modelo MEF se compara al resultado obtenido en resultados experimentales, en este caso en vigas de hormigón armado analizadas por Bosco y Debenardi (1993). El objetivo de estos análisis es utilizar estos resultados experimentales para evaluar si el modelo constitutivo propuesto es capaz de reproducir correctamente los diferentes modos de fallo que pueden producirse en vigas con diferentes cuantías de armados, es decir, si es capaz de reproducir correctamente la transición entre la rotura del refuerzo o el fallo por compresión del hormigón. El análisis de estas vigas armadas, así como de algunos elementos más a compresión puede encontrarse más detalladamente en Červenka, Červenka y Laserna (2014b).

En vigas con una baja cuantía de armado la resistencia así como la capacidad rotacional viene principalmente determinada por la capacidad resistente elástica de las armaduras y su elongación crítica hasta la ruptura. Mientras tanto, las vigas con alta cuantía de armado estas propiedades están controladas por la capacidad de la sección comprimida para absorber deformaciones en compresión sin un ablandamiento significativo del hormigón.

De este modo, se analizan dos vigas de diferentes tamaños: vigas pequeñas con unas dimensiones de 100x200x2000 mm y vigas mayores con dimensiones de 300x600x6000 mm. Para cada uno de estos tamaños de viga, se analizaron diferentes cuantías de armado que permitan analizar la mencionada transición en el modo de fallo. La tabla 1 muestra la configuración geométrica y características de los análisis realizados.

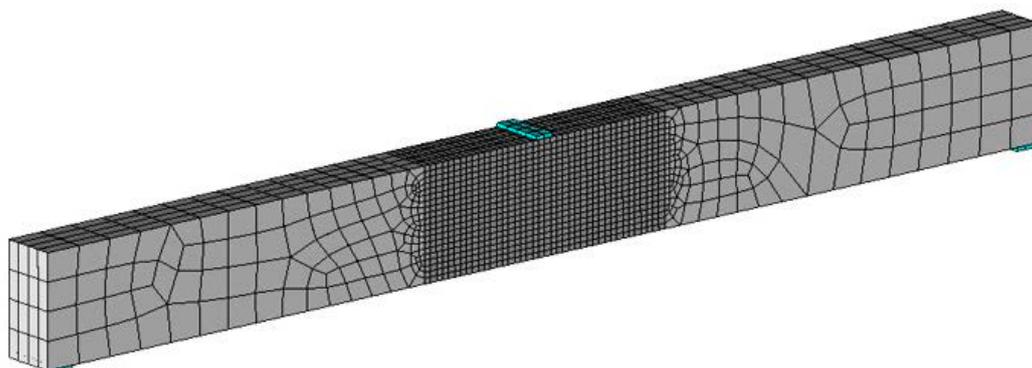
Tabla 1. Geometría de los especímenes de vigas analizadas (Bosco & Debenardi, 1993)

| Beam | H | B | L | c | c' | Tension reinforcement | Compression reinforcement | Stirrups diam/spacing |
|------|-----|-----|------|----|----|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| T-1 | 200 | 100 | 2000 | 24 | 22 | 1 Ø 12 | 1 Ø 8 | Ø 6 / 150 |
| T-2 | 200 | 100 | 2000 | 24 | 22 | 2 Ø 12 | 2 Ø 8 | Ø 6 / 150 |
| T-3 | 200 | 100 | 2000 | 24 | 22 | 3 Ø 12 | 2 Ø 8 | Ø 6 / 150 |
| T-8 | 600 | 300 | 6000 | 35 | 70 | 2 Ø 12 | 2 Ø 12 | Ø 6 / 150 |
| T-9 | 600 | 300 | 6000 | 35 | 70 | 4 Ø 12 | 2 Ø 12 | Ø 6 / 150 |
| T-10 | 600 | 300 | 6000 | 35 | 70 | 9 Ø 12 | 2 Ø 12 | Ø 6 / 150 |
| T-11 | 600 | 300 | 6000 | 35 | 70 | 18 Ø 12 | 2 Ø 12 | Ø 6 / 150 |

*all measures in mm.

De este modo, se configuró en ATENA un análisis por elementos finitos para simular un ensayo a flexión en tres puntos acorde a los modelos materiales, condicionantes de contorno y configuración de la simulación que se han descrito anteriormente. El modelado de cada viga se realiza mediante un mallado típico con elementos hexaedro, con un tamaño de elemento en la zona central de 30 mm para ambos tamaños de viga (figura 2)

Figura 2: Ejemplo de mallado realizado para las vigas T8, T9, T10 y T11



Los parámetros característicos del modelo material fueron los siguientes: Módulo de Elasticidad (22000 MPa); coeficiente de Poisson (0,2); resistencia a compresión (27,8 MPa), resistencia a tracción (2,2 MPa); deformación hasta pico en compresion (0,000933 mm/mm); Energía de Fractura (55,0 N/m); coef Beta (0,5) y parametro Wd (2,5 mm).

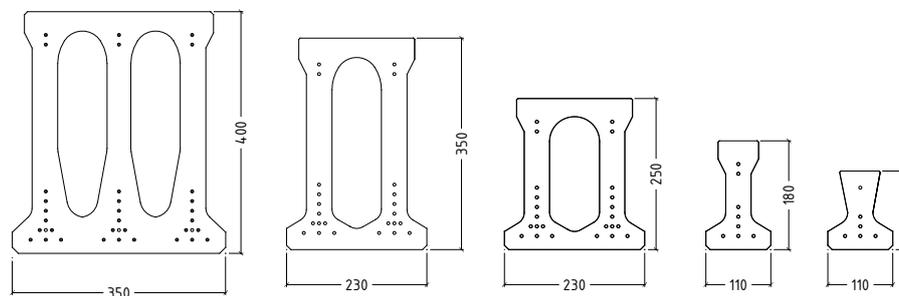
De forma particular para esta experimentación se utilizan dos tipos de análisis similares para estudiar el comportamiento de la herramienta frente a una configuración con simetría, que permite reducir a la mitad el número de elementos del modelo y potenciar la velocidad de cálculo, pero que puede perder sensibilidad en el análisis, sobre todo en la parte próxima al punto de rotura.

3.3. Vigas pretensadas

En el caso de vigas pretensadas, se utiliza la herramienta ATENA para estudiar la respuesta que presenta el programa para la simulación de elementos con armaduras pretensadas y poder calibrar la respuesta estructural que presenta el catálogo de elementos que pueda manejar una empresa cualquiera de prefabricados, con el objetivo de optimizar la caracterización resistente de dichos elementos frente a un cálculo resistente clásico, así como la de poder dar respuesta a nuevos elementos estructurales de mayor resistencia que cada vez son más demandados.

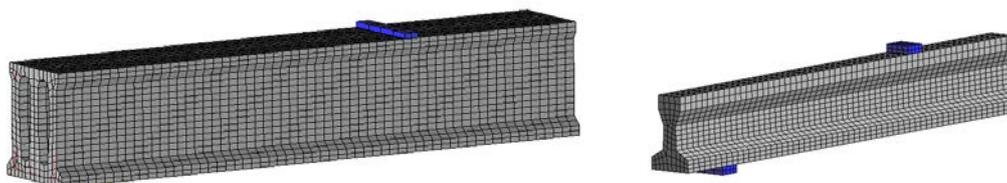
En este caso, se realizan análisis experimentales propios sobre piezas de diferentes secciones resistentes (viguetas simples y dobles), con diferentes cuantías de armado y de distintas longitudes (entre 1,80-5 metros). La figura 3 muestra la sección de alguna de las tipologías analizadas.

Figura 3: Secciones tipo utilizadas en el análisis experimental y la simulación



La configuración del análisis se realiza mediante ensayos de carga a cuatro puntos, con control de desplazamiento en los puntos de aplicación de la carga. Además, siguiendo lo descrito anteriormente, las vigas son analizadas con simetría en el centro de vano, por lo que únicamente se realiza el análisis sobre medio elemento. La figura 4 muestra los modelos realizados para dos de estos elementos.

Figura 4: Secciones tipo utilizadas en el análisis experimental y la simulación



Los materiales seleccionados para su modelo corresponden a las características definidas por el fabricante para el hormigón y acero a partir de los cuales se generan los parámetros que gobiernan el modelo constitutivo de cada material. Así, el Hormigón corresponde a una tipología C45-55 acorde a las propiedades resistentes del Eurocódigo 2, mientras que el acero corresponde a un acero tipo Y1860C. Los parámetros de resistencia a compresión del hormigón y a tracción del acero han sido ajustados a los obtenidos en los ensayos particulares de caracterización del material ($f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ y $f_{yk} = 1667 \text{ N/mm}^2$).

De forma específica para este análisis, se aborda el efecto del pretensado y la forma de incorporarlo al modelo en la simulación. De este modo, el pretensado es aplicado a través de una condición de contorno previa al inicio del estado de carga mediante una deformación prescrita correspondiente a un estado de tensión inicial de 1275 N/mm^2 . Para transformar este valor a la condición de deformación se ha considerado un módulo de elasticidad del acero de $E=210.000 \text{ N/mm}^2$. Como consideración particular a este procedimiento cabe destacar que se han considerado un nivel de pérdidas de pretensado acordes a lo estimado por el fabricante en su ficha técnica de manera que pueda ser comparado con el cálculo clásico realizado para dichos elementos, además de por el contraste experimental.

Para el contraste del análisis y la calibración de los modelos, de cada elemento simulado por elementos finitos se realizan diferentes ensayos experimentales a flexión que permiten determinar el comportamiento característico del elemento real. Estos ensayos son realizados en el Laboratorio de Construcción y Geotecnia de la E.T.S.I. Agrónomos de Albacete que dispone de un pórtico autoportante de 500 kN para ensayos a flexión de elementos lineales de hasta 5 metros de longitud. La configuración geométrica de estos ensayos se corresponde con la configuración de cada análisis. Así, la carga se aplica mediante control de desplazamiento. En estos ensayos se toman las lecturas correspondientes de carga y desplazamiento del punto central que permiten configurar el diagrama carga-desplazamiento hasta su rotura. Además, se lleva a cabo la caracterización de las fisuras obtenidas por video de alta resolución, y que posteriormente permite realizar el mapa de fisuración y poder compararlo con el análisis.

3.4. Vigas de hormigón reciclado

Una alternativa novedosa fue abordada utilizando esta herramienta de simulación por elementos finitos para estudiar la adaptación de los modelos al comportamiento a flexión de vigas armadas de hormigón reciclado. Las características especiales que confiere el hormigón reciclado al comportamiento a flexión de vigas armadas frente a su homólogo hormigón convencional pueden resumirse en una mayor deformación en la parte central de la viga para el mismo estado de carga, así como una menor carga de fisuración. Por su parte, la carga máxima a flexión de estos elementos con hormigón reciclado puede considerarse similar (Sato et al, 2007; Malešev, Radonjanin & Marinković, 2010).

De este modo, la adaptación a este comportamiento se aborda mediante la incorporación de diferentes modificaciones sobre el modelo material que permitan reproducir la respuesta estructural del modelo constitutivo a la esperada. Para ello, se utiliza la experimentación llevada a cabo por Sato et al (2007), quien realiza análisis a flexión en elementos viga tanto de hormigón convencional como de hormigón reciclado y los compara en diferentes ambientes de curado para ver las diferencias de evolución de la capacidad resistente de los mismos.

Aprovechando estos condicionantes experimentales, el análisis por elementos finitos se realiza sobre las vigas con cuantías D13 (2 refuerzos de $\varnothing 13 \text{ mm}$). Los hormigones analizados corresponden a un hormigón control (HC) y un hormigón reciclado (HR) con una

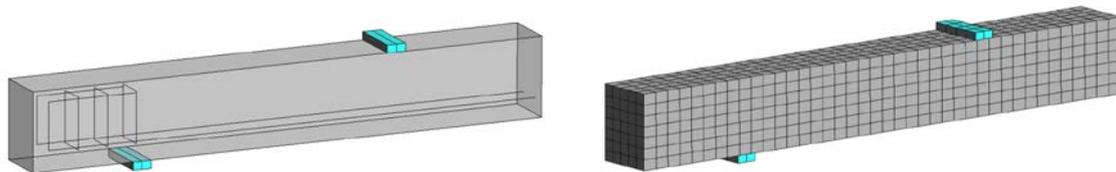
tasa de sustitución del 100%, diferenciado dos estados de fabricación según su ambiente de curado: condiciones de saturación (húmedo) y en condiciones de laboratorio (seco). En total se realizan 4 análisis correspondientes a los dos tipos de hormigones en sus dos ambientes de curado con las características que muestra la Tabla 2. Las características de las barras de refuerzo son $f_{yd} = 353 \text{ N/mm}^2$ y $E = 193,2 \text{ GPa}$.

Tabla 2. Características resistentes de los hormigones utilizados en Sato et al (2007)

| PARÁMETRO | HC húmedo | HC seco | HR húmedo | HR seco |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Resistencia a compresión f_c (MPa) | 30,6 | 32,5 | 23,5 | 23,5 |
| Resistencia a tracción f_t (MPa) | 2,9 | 3,0 | 2,3 | 2,0 |
| Modulo elástico inicial E_c | 22.000 | 22.000 | 16.500 | 16.500 |
| Coefficiente de Poisson ν | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Energía de fractura G_f (MN/m) | $4,5 \times 10^{-5}$ | $4,5 \times 10^{-5}$ | $4,5 \times 10^{-5}$ | $4,5 \times 10^{-5}$ |

En este caso, el análisis se realiza mediante el modelado de una semiviga de 150 mm x 200 mm x 1400 mm, mallado con elementos hexaedro que forman un total de 5 x 7 x 40 elementos (1400), donde sus tamaños quedan comprendidos entre los 28 y 35 mm, a lo que se aplica una restricción axilsimetrica en el punto central. La figura 5 muestra un diagrama con el sólido modelado y el posterior mallado generado con elementos hexaedro.

Figura 5: Modelo y mallado en ATENA para simular la viga experimentada por Sato et al (2007)



Puesto que la respuesta estructural obtenida en la experimentación para cada una de las parejas de vigas de hormigón reciclado y hormigón convencional es diferente en función del tipo de ambiente en el que se ha desarrollado el curado, y puesto que la diferencia es mínima en cuanto a las propiedades resistentes entre los dos ejemplares y de este modo el modelo material no es capaz de reproducir estas diferencias que muestra la experimentación, ha sido necesario ejercer una calibración adicional que permita conseguir la deformación extraordinaria que se observa en los elementos curados en ambiente seco.

Por ello, la consecución de estas diferencias en la simulación ha sido abordada mediante dos situaciones:

- Reducción del tamaño máximo de árido (D) que se configura al modelo material, hipótesis derivada de que el árido reciclado es una configuración de árido original y pasta de mortero adherida. Así se analizan los tamaños $D=25-15-10$ y 5 mm.

- Aplicación de una contracción volumétrica que simule la retracción por secado producida por el hormigón curado en ambiente seco. Para la calibración se ha introducido como condición de contorno inicial una deformación volumétrica de contracción en todas las direcciones del volumen con los siguientes valores (mm/mm): 0 (o sin retracción), -0,00025, -0,00038, -0,00050, -0,00065.

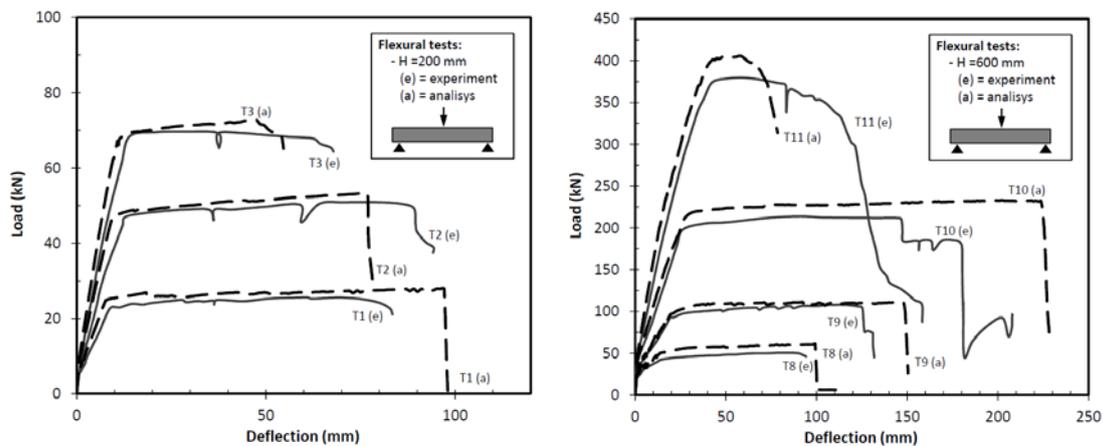
4. Resultados

Los principales resultados obtenidos hasta el momento en el análisis se muestran a continuación para cada una de las experiencias llevadas a cabo.

4.1. Vigas armadas

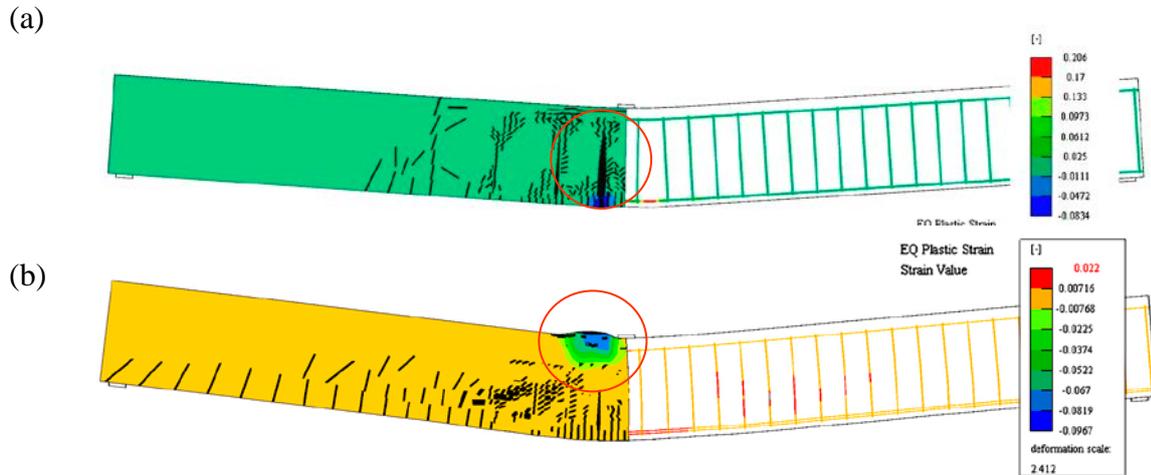
Los resultados de los análisis carga desplazamiento tanto del análisis como de la experimentación de Bosco y Debenardi (1993) se muestran en la figura 6. A la vista de los resultados puede concluirse que la respuesta de los modelos frente a las diferentes situaciones de armado y en distintas configuraciones geométricas tiene un ajuste bastante adecuado. Así, se observa como el modelo es capaz de reproducir la transición entre vigas con rotura por tracción de las armaduras y rotura por compresión del hormigón en ambas situaciones.

Figura 6: Comparativa análisis-experimentación de los diagramas carga-deformación para las vigas de H=200 mm (izq) y las de H=600 mm (dcha) (Bosco & Debenardi, 1993).



De este modo, el modelo de las vigas con menor cuantía de armado (T1, T2, T8, T9 y T10) da como resultado un fallo por rotura de las armaduras (figura 7(a)). Por su parte, en el caso de las vigas con alta cuantía de armado (T3 y T11), el análisis obtuvo una rotura por compresión en el hormigón próxima a los apoyos (figura 7(b)). Se puede concluir que la herramienta obtiene unos resultados bastante aproximados a la situación real en cuanto al modo de fallo de las vigas y al comportamiento de los elementos que lo configuran debido a la cuantía de armado. Respecto a la respuesta obtenida entre los modelos completos o los modelos analizados en simetría, no se han encontrado diferencias significativas en estos análisis.

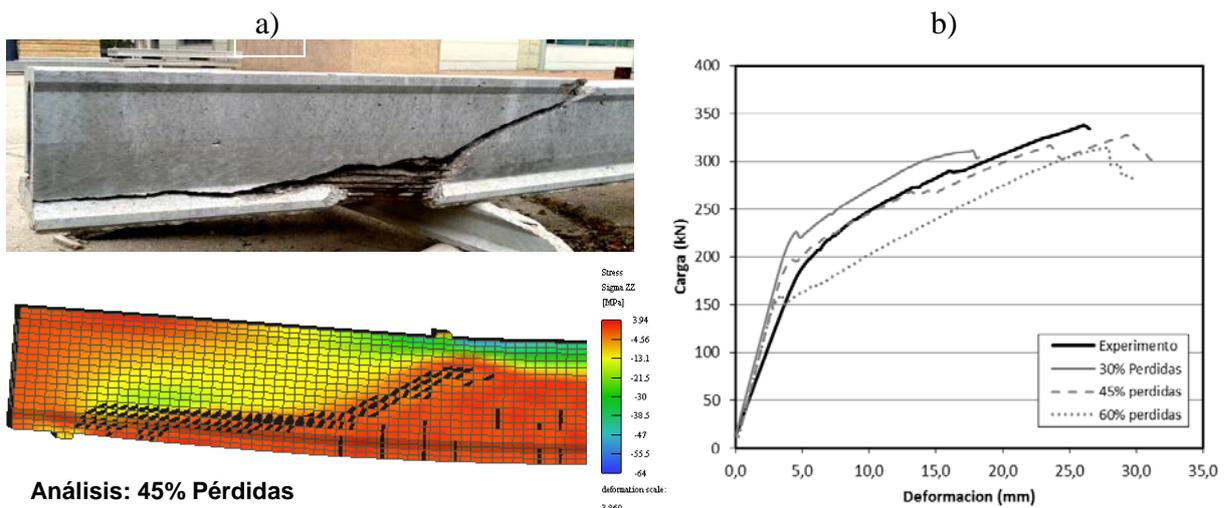
Figura 7: Representación de la rotura por simulación en vigas de baja cuantía de armado (a) y de alta cuantía (b) (Bosco & Debenardi, 1993).



4.2. Vigas de hormigón pretensado

El análisis de vigas de hormigón pretensado es una experimentación en curso en estos momentos por el equipo de investigación, de manera que el análisis para la calibración de los elementos se encuentra en fase de evolución. A pesar de ello los primeros resultados muestran datos muy significativos en cuanto a la adaptación de los análisis al resultado experimental. En la figura 8 se muestra la correspondencia entre el resultado experimental y el resultado de la simulación, donde claramente se observa cómo el progreso de la grieta que produce el fallo del elemento es claramente coincidente en ambos casos. Además, la similitud de los parámetros resistentes obtenidos en ambos casos permite considerar el resultado del modelo muy adecuado a la respuesta real de los diferentes elementos

Figura 8: Comparativa análisis-experimentación del proceso de rotura para la simulación con 45% de pérdidas de pretensado (a) y diagramas carga-deformación para diferente grado de pérdida aplicado al modelo para el mismo elemento (b)



A raíz de los primeros resultados obtenidos en esta comparativa, se concluye que uno de los parámetros más significativos que se debe controlar a la hora de realiza la simulación ha resultado ser la cuantía de pérdida de pretensado que se aplica al modelo. Así, la figura 8 (b) muestra un ejemplo de la influencia de la fuerza de pretensado sobre la simulación. Como se puede observar, conforme se aumenta las pérdidas en la fuerza de

pretensado, la respuesta en las vigas varía significativamente, de manera que el mejor modelo de simulación respecto a los resultados experimentales se han producido para un nivel de pérdidas de 45%, casi dos veces superior al estimado en el cálculo clásico, que se encontraba estimado entre un 20-25 %.

Estos resultados indican que hay que reflexionar sobre el nivel de pretensado real conseguido en los elementos analizados que se consigue tras la relajación de las armaduras una vez endurecido el hormigón, ya que si realmente las necesidades del modelo para ajustarse al ensayo experimental reflejan la realidad de los elementos, se abre la puerta a una revisión sobre la causa principal donde se produce este nivel tan acusado de pérdida. Así, se focaliza una nueva serie experimental sobre elementos similares a los ensayados sobre los siguientes apartados:

- Pérdida de pretensado excesiva en el momento de fabricación, posiblemente causada por:
 - Tiempo de espera al fraguado del hormigón demasiado corto.
 - Existencia de elementos que reduzcan la adherencia del acero con el hormigón.
- Pérdida de pretensado producida por una evolución muy acusada con el tiempo de vida del elemento

A pesar de ello, y a falta de establecer una calibración más aproximada en cuanto a las pérdidas de pretensado a aplicar en cada caso, el modelo puede ser considerado como muy adecuado para establecer los niveles resistentes de los elementos prefabricados en el marco de una industria real.

4.3. Vigas de hormigón reciclado

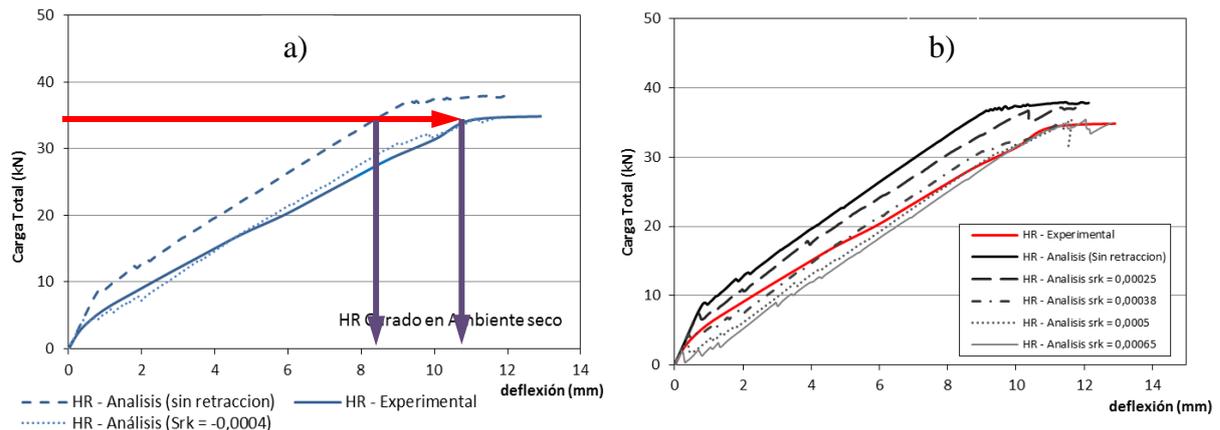
Respecto a los resultados aplicados a los modelos de vigas en hormigón reciclado, como resultado más destacable puede decirse que, cuando se aplican los modelos a la simulación de elementos armados de hormigón reciclado, resulta imprescindible introducir el efecto de retracción producido en el curado del elemento al modelo en ATENA. En la figura 9 (a) se muestran los resultados para una de estas vigas de Hormigón Reciclado con curado en ambiente seco y como el análisis (viga de trazo discontinuo) correspondiente al modelo sin retracción no se ajusta bien al obtenido en el análisis.

Sin embargo, cuando se introduce una contracción volumétrica correspondiente a un efecto de retracción, la respuesta de la simulación es influenciada tanto por un descenso de la carga de fisuración, como por un aumento de la deformación para un mismo estado de carga. Así, la aplicación de un efecto de contracción volumétrica de -0.0004 mm/mm permite una respuesta del análisis a lo largo de toda la curva Carga-Deformación que se aproxima perfectamente a la obtenida en la experimentación para esa viga por Sato et al (2007). Complementariamente, la figura 9 (b) muestra la influencia de diferentes contracciones volumétricas que simulan los correspondientes estados de retracción sobre la respuesta carga deformación. Como se puede observar, conforme la retracción aplicada sobre el elemento es mayor, el modelo reproduce un descenso proporcional de la carga de fisuración así como un aumento de la deformación hasta incluso conseguir una respuesta mucho más dúctil que el obtenido por el elemento en la experimentación.

Además, los diferentes análisis realizados muestran como no únicamente cuando se realiza un curado en ambiente más seco de los elementos reciclados se observa este comportamiento, sino que aunque el elemento se encuentre curado en condiciones de alta humedad, es necesario introducir cierto nivel de retracción (aunque menor al de curado en seco) para adecuar la respuesta del modelo a la situación experimental. Este aspecto no

ocurre en la simulación del hormigón convencional, donde la respuesta obtenida con los datos resistentes experimentales del elemento viga curado en húmedo (o sin retracción) reproduce perfectamente el resultado obtenido. Por lo tanto, como principal conclusión a estos análisis puede destacarse que, para reproducir la respuesta del hormigón reciclado, sea cual sea su ambiente de curado es recomendable introducir un estado previo a la carga de contracción volumétrica que simule la mayor retracción del hormigón reciclado frente al hormigón convencional.

Figura 9: Resultados de la simulación de vigas de hormigón reciclado, curados en ambiente seco (a) y húmedo (b)



La calibración de estos modelos han sido llevados a cabo comparado la simulación con los resultados expuestos en Sato et al (2007), de manera que no se dispone de toda la información suficiente para poder realizar un ajuste generalizado del modelo y poder establecer criterios de recomendación que puedan ser utilizados por un tercer analista. Por tanto, el siguiente paso plantea la realización de una serie de ensayos experimentales con vigas de hormigón reciclado que utiliza: diferentes cuantías de reciclaje (0, 50 y 100%), diferentes cuantías de armado (débilmente armada y muy armada), dos ambientes de curado (seco y húmedo) y dos resistencias del hormigón fabricado (HA-25 y HA-45); con el objetivo de ampliar la casuística del análisis a las posibles situaciones existentes con este material y realizar una guía para los analistas que deseen realizar simulaciones de elementos a flexión con hormigón reciclado.

5. Conclusiones

Las principales conclusiones que se desprenden de la comparativa de estos análisis respecto a diferentes situaciones experimentales son las siguientes:

- Los resultados obtenidos por los modelos en la simulación de las diferentes vigas analizadas a flexión se adaptan de forma muy adecuada a los resultados experimentales disponibles con los que se comparan. Así, es posible utilizar la herramienta ATENA para la simulación de este tipo de elementos con un gran grado de ajuste a la realidad tanto en elementos de hormigón armado, de hormigón pretensado, así como de hormigón reciclado armado.
- En el caso de vigas armadas de hormigón convencional, la respuesta del modelo se ha adaptado perfectamente a los diferentes modos de rotura (tracción de las armaduras o compresión del hormigón) que se producen en vigas con diferentes cuantías de armado y para diferentes tamaños de elemento.

- En el caso de vigas pretensadas, la respuesta del modelo a los ensayos experimentales ha sido calibrada con un alto grado de ajuste. Sin embargo, ha sido necesario aplicar un porcentaje de pérdidas de pretensado superior al estimado por cálculo, por lo que se plantea una experimentación adicional enfocada a establecer la causa y los valores reales de estas pérdidas y poder establecer conclusiones genéricas de ajuste de la simulación
- Respeto al análisis de elementos armados de hormigón reciclado, el modelo constitutivo no es capaz por sí mismo de reproducir la menor carga de fisuración y la mayor deformación para el mismo estado de carga, respecto a su homólogo hormigón convencional. Sin embargo, este factor puede ser compensado con muy buenos resultados, aplicando una restricción al volumen de hormigón que simule la significativa contracción volumétrica que sufre el hormigón reciclado en su proceso de fraguado.

Referencias

- Bosco C. & Debenardi, P. G. (1993). Influence of some basic parameters on the plastic rotation of reinforced elements. Ductility requirements for structural Concrete - Reinforcement. *Comite Eurointernational du Breton. CEB bulletin 218*. pp25-44.
- Červenka, V., Jendele, L. & Červenka, J. (2014a). ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Červenka Consulting s.r.o. 2014 http://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf.
- Červenka, V, Červenka, J. & Laserna, S. (2014b). On finite element modelling of compressive failure in brittle materials. *Computational Modelling on Concrete Structures*. Euro-C 2014. pp 273-281. Ed Bićanić et al. Taylor y Francais Gropu, London. ISBN: 978-1-138-00145-9.
- Eurocódigo 2: Design of Concrete Structures. (2004). – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (EN 1992-1-1); European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium.
- Herrera, L.A. (2011). Modelación Numérica del Concreto Simple con Elementos Finitos Usando un Modelo Constitutivo de Daño. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Bogotá, D.C, Universidad Nacional de Colombia.
- Isenberg, J. (1991). Finite element analysis of reinforced concrete structures II, *Committee on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures*, American Society of Civil Engineers.
- Jendele, L. & Cervenka, J. 2006. Modelling Bar Reinforcement with Finite Bond, *Computers and Structures*, 84, 1780-1791.
- Karpenkoa, N., Karpenkob S., Petrovc A., Voroninc, Z & Evseevac A. (2015) Incremental approach to the nonlinear analysis of reinforcement concrete with cracks at plane stress state. *Procedia Engineering* 111 (2015) 386 – 389.
- Malešev, M., Radonjanin, V. & Marinković, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. *Sustainability*, 2, 1204-1225.
- Meyer, C. & Okamura, H. (1985). Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures. *Proceedings of the US-Japan Joint Seminar on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete*, Tokyo, Japan.
- Mihai, I., Jefferson A, & Lyons, P. (2016). A plastic-damage constitutive model for the finite element analysis of fibre reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics* 159 (2016) 35–62.
- Nilson, A.H. (1972). Internal Measurement of Bond Slip. *Journal of ACI*, Vol. 69, Title No. 7, pp. 439-441.
- Sato, R., Maruyama, I., Sogabe, T. & Sogo, M. (2007). Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams. *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 5, (1), 43-61.