

# Caracterización del Comportamiento a Cortante de Vigas de Hormigón de Muy Altas Prestaciones

## *Shear Behavior Characterization for High Performance Concrete Beams*

Antonio Martínez de la Concha<sup>a</sup>, Ana Carmona Arrebola<sup>b</sup>, José David Ríos Jiménez<sup>c</sup>, Héctor Cifuentes Bulté<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

<sup>b</sup> Gda. Ingeniería de las Tecnologías Industriales. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

<sup>c</sup> Dr. Ingeniero Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

<sup>d</sup> Dr. Ingeniero Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

### RESUMEN

Este estudio parte de la validación del modelo matemático Concrete Damage Plasticity de Abaqus a través de un ensayo experimental, para posteriormente caracterizar el comportamiento a cortante de vigas realizadas con hormigones de Ultra Altas Prestaciones Reforzados con Fibras.

En el estudio se analiza el comportamiento de hormigones sin adición de fibras, con adición de fibras de acero cortas, con adición de fibras de acero larga, o con una mezcla al 50 % de fibras de acero cortas y largas.

### ABSTRACT

This study is based on the validation of the Abaqus Concrete Damage Plasticity Model through an experimental test. Subsequently, the shear behavior of ultra-high-strength fibre-reinforced concrete beams is analyzed.

The subject of this study are several kind of mixes, without fibers, with short fibers, with long fibers and a 50 % mix of short and long fibers.

**PALABRAS CLAVE:** Cortante, fractura, fibras, vigas, Abaqus, Hormigón Ultra-Alta Resistencia.

**KEYWORDS:** Shear, fracture, fibre, beam, Abaqus, ultra-high-strength, fibre-reinforced concrete

## 1. Introducción

Es bien conocido el auge experimentado en los últimos años por los hormigones reforzados con fibras (FRC) [1,2], de sus siglas en inglés, tanto en el estudio de sus propiedades, como en sus aplicaciones.

Aunque no tanto en sus aplicaciones, el desarrollo también ha llegado a los hormigones de ultra altas prestaciones reforzados con fibras

(UHSFRC), con resistencias a compresión por encima de los 200 MPa [3,4] o resistencias a flexo tracción por encima de los 30 MPa [5].

Se hace necesario trasladar a la práctica habitual el conocimiento adquirido en base a todo el esfuerzo investigador desarrollado.

Con este objetivo, las normativas relativas a los hormigones se han ido adaptando para facilitar el uso de estos nuevos materiales.

Es el caso de la norma de hormigón estructural EHE-08 [6] que ya contiene un anejo 14 con recomendaciones para el uso de hormigones con fibras, o de las normas alemana [7] e italiana [8].

La propia asociación ACHE publicó en el año 2000 un manual de ayuda al diseño de estructuras de hormigón con fibras de acero [9].

En lo que respecta al comportamiento frente a cortante, algunas normas han asignado una parte de la capacidad resistente a las fibras, es el caso del código ACI-318 (2008) [10] o el Código Modelo 2010 [11], aunque con algunas inconsistencias, como refieren Amin y Foster [12].

Siguiendo las pautas marcadas en esta última referencia, en este artículo se estudian numéricamente los mecanismos resistentes a cortante de vigas diseñadas con hormigones de ultra altas prestaciones como los desarrollados en el laboratorio de estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

Para este fin se hace uso del software comercial Abaqus [13], y en especial de su modelo de daño plástico en hormigón “Concrete Damage Plasticity”.

## 2. Base metodológica.

El procedimiento seguido es análogo al desarrollado en el artículo ya referido de Amin y Foster [12], es decir, por un lado se parte de los resultados experimentales del ensayo de una viga real, que sirven de referencia para contrastar los resultados del modelo numérico realizado de la misma. Posteriormente, usando dicho modelo numérico, del mismo modo que Amin y Foster, se modelizan vigas similares con las características mecánicas de hormigones desarrollados en el laboratorio de estructuras, cuya referencia puede encontrarse en el artículo de Ríos et al [14].

Las diferencias más relevantes entre ambos estudios radican en que por una parte, en

aquel caso el software utilizado era ATENA [15], y ahora se emplea Abaqus [13]; y por otra parte en este artículo se extiende el estudio al comportamiento de otros hormigones.

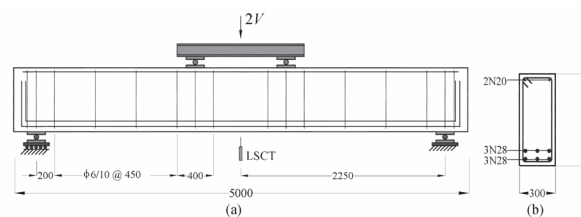


Figura 1. Esquema de la viga del ensayo.

### 2.1 Ensayo experimental

El ensayo experimental es el ya realizado por Amin y Foster.

En la Figura 1, tomada de esa referencia [12], se pueden observar las dimensiones de la viga ensayada.

En este trabajo tomaremos los datos de la viga denominada B25-10-450 por sus autores.

Las características del ensayo pueden consultarse en la bibliografía referenciada, aunque para comodidad del lector, recordamos que la nomenclatura indica que se trata de hormigones con  $25 \text{ kg/m}^3$  de fibras, armadura transversal formada por cercos de 10 mm de diámetro, y la separación de los cercos es de 450 mm.

### 2.2 Modelo de elementos finitos

El modelo de daño plástico en hormigón que implementa el software comercial Abaqus [13], que es el que se emplea en este estudio, reproduce el comportamiento inelástico del hormigón en base a una teoría de daño elástico isotrópico en combinación con tracción isotrópica y compresión plástica.

El modelo considera el ablandamiento en tracción cuando las deformaciones de tracción superan la correspondiente a la resistencia por tracción del hormigón. También

permite considerar el proceso de descarga a través de una variable de daño, que reduce la rigidez del material. Se pueden definir variables de daño tanto para los procesos de compresión como de tracción.

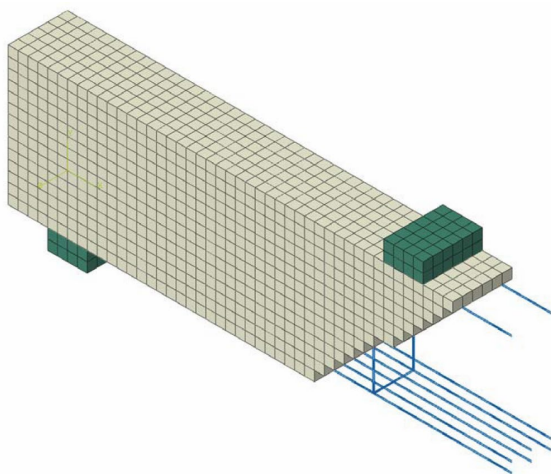


Figura 2. Imagen del modelo de elementos finitos.

El modelo en compresión emplea la función de plastificación de Lubliner [16] con las modificaciones propuestas por Lee y Fenves [17]. Para el flujo plástico se emplea la función hiperbólica de Drucker-Prager.

En la Figura 2 se muestra una imagen del modelo que se construye con elementos hexaédricos lineales de 8 nodos tipo C3D8I de la biblioteca de Abaqus, para simular el hormigón, y elementos lineales de dos nodos sólo con comportamiento axil, para las barras de armadura, T3D2 de la biblioteca de Abaqus.

La malla de elementos finitos tiene una dimensión característica de 50 mm, y se añaden sendas almohadillas de 300 x 200 mm, con las mismas características de rigidez del hormigón, pero sin comportamiento plástico, en las zonas de apoyo y aplicación de la carga, para eliminar el problema derivado en esas zonas de la aplicación de cargas concentradas.

El modelo sólo contempla la mitad de la viga, aplicando condiciones de simetría en la sección central. Por otra parte se impide el desplazamiento vertical y lateral del centro de la cara inferior del apoyo, y se analiza el modelo aplicando un desplazamiento creciente del nodo

central de la cara superior de la almohadilla de carga en sentido descendente.

Entre las diferentes partes del modelo se definen restricciones de desplazamiento tipo “Tie”, es decir, se compatibilizan los desplazamientos en todos los grados de libertad de los nodos de las caras en contacto.

Por otra parte se ha definido la condición de los elementos tipo barra de estar embebidos “embedded” en los elementos de hormigón, lo que compatibiliza los movimientos en los grados de libertad de traslación de los nodos de las barras, de forma interpolada, con los correspondientes a los elementos de hormigón en los que se hayan insertos.

Las características mecánicas de los diferentes materiales se particularizan para los diferentes modelos realizados, siendo comunes a todas ellas las correspondientes a la armadura longitudinal, que mantiene las propiedades del artículo referido.

### 3. Modelo comparativo

Se ha realizado un modelo de elementos finitos para verificar la herramienta numérica, con el ánimo de comparar los resultados con los datos experimentales y el modelo numérico de Amin y Foster.

Se trata de una réplica del modelo B25-10-450. En el artículo de referencia están las características completas de dicho modelos, de las que para el estudio que nos ocupa, además de las ya indicadas en el apartado 2.1, destacaremos como más relevantes, las que caracterizan su comportamiento en tracción.

$$f_t = \begin{cases} E_c \epsilon & \text{prefisuración} \\ 1.75 - 22.4\omega & \text{postfisuración } \omega < 0.04\text{mm} \\ 0.85 - 0.11\omega & \text{postfisuración } \omega \geq 0.04\text{mm} \end{cases}$$

En la Figura 3 se recogen de forma comparativa los resultados del ensayo experimental, los correspondientes al modelo de elementos finitos de sus autores con el software

ATENA, y los que obtenemos con el modelo “Concrete Damage Plasticity” en Abaqus.

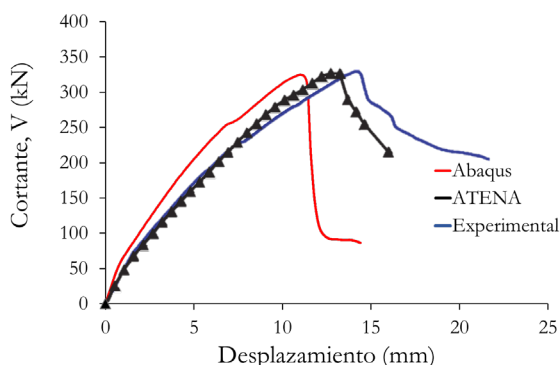


Figura 3. Resultado del análisis comparativo.

Se observa un resultado muy similar en cuanto a los valores de los cortantes que la viga es capaz de soportar en los tres modelos, con diferencias por debajo del 3% en ambos casos, y una mayor rigidez de los modelos de elementos finitos que el ensayo real, algo más constatable en el modelo de nuestro artículo.

En base a ese resultado, justificamos el estudio del comportamiento de los hormigones de ultra altas prestaciones reforzados con fibras que se desarrollan en el laboratorio de estructuras.

#### 4. Análisis realizados

Se estudia a continuación el comportamiento frente a cortante de cuatro hormigones de ultra altas prestaciones, de cuyas características se puede encontrar una información más detallada en el artículo de Ríos et al [14].

La única diferencia entre los cuatro hormigones es el tipo de fibras que contienen, siendo el resto de parámetros de su dosificación invariantes.

Se han empleado dos tipos de fibras diferentes en este estudio denominadas micro-fibras y macro-fibras. Las micro-fibras son rectas de 13 mm de longitud y 0.2 mm de diámetro, mientras que las macro-fibras, están conformadas en los extremos y cuentan con una longitud de 30 mm y 0.38 mm de diámetro.

Con estos dos tipos de fibras se han realizado cuatro tipos de mezcla que denominamos D0, DS, DL y DSL en las que únicamente se ha alterado la dosificación de cada tipo de fibra.

Mientras que la mezcla D0 no contiene ningún tipo de fibra, el resto de mezclas contienen 196 kg/m<sup>3</sup> de fibras en todos los casos, usando sólo micro-fibras en la mezcla DS, sólo macro-fibras en la mezcla DL, y un 50 % de cada tipo en la mezcla DSL.

En la tabla 1 se recogen las propiedades mecánicas de cada uno de los hormigones que se han confeccionado de este modo, cuyos ensayos han sido descritos en el artículo referenciado.

Tabla 1. Características mecánicas de los hormigones.

Propiedad	DO	DS	DL	DSL
$E_c$ (GPa)	44.5	43.4	49.2	47.8
$f_c$ (MPa)	131.4	154.6	150.2	153.7
$f_t$ (MPa)	4.5	11.7	9.1	10.4
$\sigma_1$ (MPa)	0.2046	2.9	3.1	3.6
$w_1$ (mm)	0.0119	1.7	1.4	3
$w_c$ (mm)	0.0694	6.2	12.1	9.9

Los valores de las variables de la tabla corresponden a los parámetros que se indican en la Figura 4 para la ley de ablandamiento del hormigón.

Para la definición del comportamiento plástico del hormigón en compresión, se usan las mismas leyes de comportamiento que las que

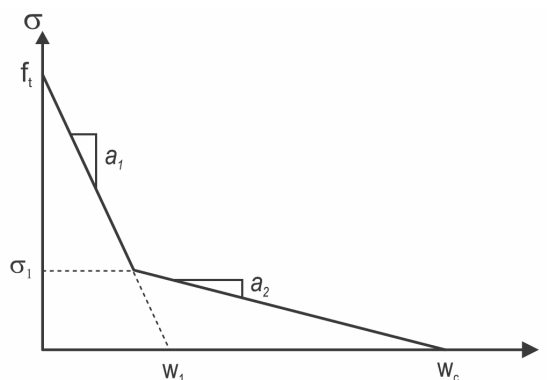


Figura 4. Ley de ablandamiento del hormigón.

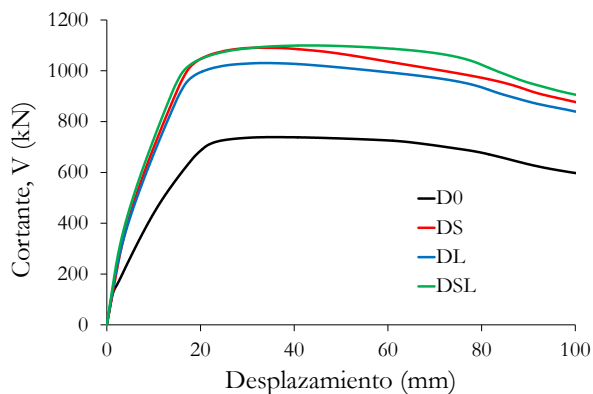


Figura 5. Resultados del análisis.

### Curvas Carga-Flecha

propone el trabajo de Amin y Foster [12], que a su vez son coincidentes con la formulación del código modelo [18] o al menos en la rama de carga con las que proponen Ruiz et al [19], siendo esta parte de la curva de comportamiento a compresión la más relevante en este estudio.

El análisis del comportamiento a cortante de las vigas realizadas con cada uno de estos hormigones se ha realizado mediante un modelo similar al utilizado en el análisis comparativo, es decir, se emplea la misma geometría, con la misma armadura, las mismas condiciones de apoyo y las mismas condiciones de carga, cambiando únicamente las características mecánicas que definen el comportamiento del material de las vigas, de acuerdo a los parámetros que se indican en la Tabla 1.

## 5. Resultados

Como resultado de los análisis realizados se han obtenido las curvas carga-flecha, para cada uno de los modelos, que se muestran de forma agrupada en la Figura 5.

La parte inicial de todas las curvas es muy parecida debido a que en el comportamiento previo a la fisuración el parámetro que gobierna el comportamiento es el módulo de Young y su valor es en todos los casos muy similar.

Sin embargo, la linealidad desaparece como consecuencia de la fisuración, en primer lugar en el hormigón sin fibras, como

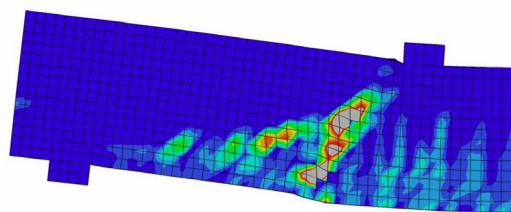


Figura 6. Diagrama de deformaciones plásticas.

corresponde a un menor valor de su resistencia a tracción, para un valor del cortante aplicado de unos 135 kN.

A partir de esa carga, la viga sigue admitiendo mayores cortantes, que van provocando un proceso de fisuración, y que en el modelo se refleja como un proceso de deformaciones plásticas, tal como se aprecia en la Figura 6.

En el caso de la viga sin fibras se alcanza un valor del cortante máximo de unos 740 kN, pasando a partir de ese punto a una rama descendente.

El comportamiento de las vigas de hormigones con fibras es un poco diferente, sobre todo desde el punto de vista cuantitativo, aunque parecido entre los tres tipos de mezclas con fibras.

Los cortantes máximos de cada modelo, así como el incremento porcentual respecto de dicho valor que produce la adición de fibras, se expresan en la Tabla 2.

Como puede apreciarse la adición de fibras aumenta considerablemente el cortante que la pieza es capaz de soportar, en este caso entre un 39.5 % y un 48.9 %.

Por otra parte también se aprecia que las micro-fibras producen un mayor incremento del

Tabla 2. Cortantes de agotamiento.

	DO	DS	DL	DSL
$V_u$ (kN)	738.87	1090.73	1030.51	1099.79
$\Delta$ (%)	-	47.62	39.47	48.85



cortante que las macro-fibras, 47.6 % respecto de 39.5 %. Sin embargo se observa un efecto curioso cuando comparamos el comportamiento del hormigón con micro-fibras, con el hormigón que mezcla ambos tipos, y es que aunque ambas mezclas tienen un comportamiento muy similar, el hormigón con micro-fibras desarrolla su mayor resistencia con menores deformaciones, mientras que el hormigón que mezcla ambos tipos, aunque presenta menor resistencia a pequeñas deformaciones, es capaz de seguir incrementando su resistencia, consiguiendo superar al hormigón con micro-fibras para mayores deformaciones, siendo al final la composición más resistente.

La explicación es que el hormigón con macro-fibras tiene la capacidad de desarrollar mayor resistencia, con mayores deformaciones, asociadas a la mayor adherencia de estas fibras, mientras que en el hormigón con micro fibras la menor adherencia provoca que se resistencia decaiga más rápidamente. Una combinación de ambos tipos de fibras consigue el efecto de desplazar el máximo de resistencia a tracción a mayores deformaciones, donde el acero de la armadura convencional colabora más en el mecanismo de tracción.

## 6. Conclusiones

Se ha desarrollado un modelo numérico que permite el análisis del comportamiento frente a cortante de vigas de hormigón de ultra altas prestaciones reforzados con fibras, sin incurrir en los costes de los ensayos de laboratorio, lo que sin duda es una ayuda en la investigación de su comportamiento, aunque no pretenda prescindir dichos modelos experimentales.

De los ensayos realizados se desprende una clara colaboración de las fibras en la resistencia a tracción, que puede llegar a incrementar su capacidad hasta un 48.9 % con las dosificaciones ensayadas.

También se observa que la mayor respuesta se obtiene con una mezcla al 50 % de micro-fibras y macro-fibras, aunque la mayor respuesta en pequeñas deformaciones la produce la mezcla de micro-fibras.

### *Agradecimientos*

Queremos agradecer la colaboración de Ana Carmona Arrebola, por su ayuda durante la elaboración de su Trabajo Fin de Grado [20] en la confección de modelos.

### *Referencias*

- [1] E. Poveda, G. Ruiz, H. Cifuentes, R.C. Yu, X. Zhang, Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC, *Int. J. Fatigue*. 101 (2017) 9–17. doi:10.1016/j.ijfatigue.2017.04.005.
- [2] C. Jiang, K. Fan, F. Wu, D. Chen, Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete, *Mater. Des.* 58 (2014) 187–193. doi:10.1016/j.matdes.2014.01.056.
- [3] K. Wille, A.E. Naaman, G.J. Parra-Montesinos, Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way, *ACI Mater. J.* 108 (2011). doi:10.14359/51664215.
- [4] B.A. Graybeal, Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete, *ACI Mater. J.* 104 (2007). doi:10.14359/18577.
- [5] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC), *Cem. Concr. Res.* 56 (2014) 29–39. doi:10.1016/j.cemconres.2013.11.002.
- [6] Comisionn Permanente del Hormigón, EHE-08: Instrucción de hormigón estructural, 2ª ed, Ministerio de Fomento, Madrid, 2009.
- [7] D. Beton, DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton, Fassung Oktober.

- (2001).
- [8] Consiglio Nazionale delle Ricerche, CNR-DT 204 Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato, (2008).
- [9] ACHE, Manual de Tecnología del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero, Com. 2, Grup. Trab. 2/2 Hormigón Con Fibras. 2 (2000).
- [10] A.C.I. Committee, I.O. for Standardization, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary, in: American Concrete Institute, 2008.
- [11] C. CEB-FIP, Model code 2010, Com. Euro-International Du Bet. (2010).
- [12] A. Amin, S.J. Foster, Numerical modelling of large scale steel fibre reinforced-reinforced concrete beams failing in shear, in: Proc. FRC 2014 Jt. ACI-Fib Int. Work. Fibre Reinf. Concr. from Des. to Struct. Appl. FRC 2014 Jt. ACI-Fib Int. Work. Fibre Reinf. Concr. from Des. to Struct. Appl. Montr. Canada, 2014: pp. 89–99.
- [13] Dassault Systèmes Simulia Corp., Abaqus, (2011).
- [14] J.D. Ríos, C. Leiva, M.P. Ariza, S. Seitzl, H. Cifuentes, Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography, Mater. Des. 165 (2019) 107582. doi:10.1016/j.matdes.2019.107582.
- [15] V. Cervenka, J. Cervenka, R. Pukl, ATENA—A tool for engineering analysis of fracture in concrete, Sadhana. 27 (2002) 485–492.
- [16] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller, E. Oñate, A plastic-damage model for concrete, Int. J. Solids Struct. 25 (1989) 299–326. doi:10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- [17] J. Lee, G.L. Fenves, Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures, J. Eng. Mech. 124 (1998) 892–900. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).
- [18] C.-F.M. Code, CEB-FIB Model Code 2010—Final draft, Thomas Thelford, Lausanne, Switz. (2010).
- [19] G. Ruiz, Á. de la Rosa, S. Wolf, E. Poveda, Model for the compressive stress–strain relationship of steel fiber-reinforced concrete for non-linear structural analysis, Hormigón y Acero. (2018). doi:10.1016/j.hya.2018.10.001.
- [20] A. Carmona Arrebola, A. Martínez de la Concha, Estudio comparativo del comportamiento a cortante de una viga de hormigón armado reforzada con fibras incluyendo su comportamiento plástico, ETSI, 2019.