

# INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN EN EL MODO DE ROTURA DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO DE ALTA RESISTENCIA

G. Morales-Alonso, D.A. Cendón, F. Gálvez, V. Sánchez-Gálvez

Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad Politécnica de Madrid.  
Centro de Investigación en Seguridad y Durabilidad de Estructuras y Materiales, CISDEM. UPM.  
E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos  
c/ Profesor Aranguren s/n, 28040, Madrid  
Tel. 91-336-5240. Fax. 91-336-6680

## RESUMEN

Gran parte de los edificios e infraestructuras que son susceptibles de ser objeto de un atentado terrorista están sustentados por una estructura portante de hormigón armado. El comportamiento de estructuras de hormigón armado está bien caracterizado ante solicitaciones estáticas, por el contrario, existen todavía incertidumbres sobre el comportamiento ante cargas impulsivas como la que provoca una explosión. Por este motivo en este trabajo se estudia un mismo esquema estructural ante dos solicitaciones de distinta velocidad de deformación, con el objeto de comprobar su influencia en el modo de fallo de la estructura. Se parte de una campaña experimental desarrollada por la Agencia de Defensa de Suecia sobre vigas de hormigón armado de alta resistencia, a partir de la cual se desarrollan estudios analíticos y simulaciones numéricas. Se comprueba que ante carga impulsiva las vigas tienen una resistencia mayor que ante carga estática, si bien con cuantías altas de armado pueden presentarse modos de fallo frágiles, lo que debe ser tenido en cuenta en el diseño de estructuras de hormigón armado para que sean seguras ante explosiones.

## ABSTRACT

Most buildings and infrastructures which are likely to be subjected to terrorist attacks are borne by a reinforced concrete (RC) structure. Behaviour of RC structures under static conditions is well known, whereas there is still much uncertainty regarding their behaviour under impulsive loading such as the one induced by a explosion. For this reason, in this paper RC beams are studied under loadings that cause different strain rates on them, aiming to check the influence of strain rate on their failure mode. The experimental tests carried out by the Swedish Defence Agency on high strength RC beams are taken as starting point for the research. From these tests, analytical and numerical studies are performed. It has been found that the bearing capacity of the beams is greater under impulsive loading than under static conditions. However, high reinforcement ratios may lead to brittle failure modes under impulsive loading, which should be taken into account when broaching the design of RC structures able to withstand explosions.

**PALABRAS CLAVE:** Hormigón armado, cargas impulsivas, simulación numérica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los ataques terroristas de los últimos años contra edificios situados en zonas urbanas ponen de manifiesto la importancia de tener en cuenta estos eventos accidentales en la fase de diseño de la estructura, que en muchas ocasiones es de hormigón armado, al ser éste un diseño barato y fácil de construir.

Sin embargo, el comportamiento de estructuras de hormigón armado ante carga impulsiva no está plenamente estudiado. En general se puede decir que carga impulsiva es aquella cuyo tiempo de aplicación sobre la estructura es muy pequeño en relación a sus

modos propios de vibración. Como se aprecia en la figura 1, las solicitaciones debidas a una explosión son de 7 a 8 órdenes de magnitud más rápidas que las cargas estáticas y de 5 a 6 órdenes que las cargas dinámicas originadas en un sismo.

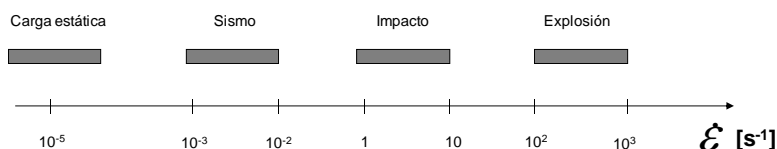


Figura 1. Clasificación de solicitaciones en función de su velocidad de deformación, según Bischoff [1].

Tradicionalmente, el estudio de estructuras ante carga impulsiva se ha acometido siguiendo alguna de las siguientes técnicas:

- Realización de ensayos a escala real.
- Desarrollo de modelos constitutivos válidos para la realización de simulaciones numéricas.

La primera estrategia tiene el inconveniente de que el desarrollo de investigación civil mediante ensayos con explosiones a escala real presenta dificultades por la falta de permisos para la manipulación de explosivos, así como el acceso a campos de prueba adecuados [2].

Por el contrario, la segunda técnica requiere suponer que los resultados obtenidos para el comportamiento material en una muestra aislada son aplicables a la simulación de la respuesta de una estructura. De esta manera, las simulaciones se vuelven completamente dependientes del modelo constitutivo introducido, lo cual puede llevar a la obtención de resultados erróneos, incluso con desviaciones en el modelo de material relativamente pequeñas [3].

En el presente artículo se profundiza en el estudio del cambio de comportamiento estructural de elementos de hormigón armado ante dos sollicitaciones de velocidad de aplicación muy diferente.

## 2. EJEMPLO: PLACA DE HORMIGÓN SOMETIDA A UNA EXPLOSIÓN

En este apartado se detalla el comportamiento de una placa cuadrada de hormigón apoyada sobre sus cuatro esquinas y sometida a una carga uniformemente distribuida sobre toda su superficie, como se muestra en la figura 2.

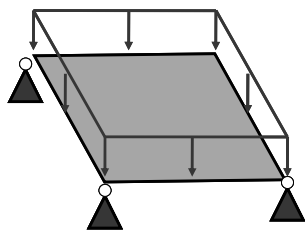


Figura 2. Esquema de una placa sometida a carga distribuida.

Cuando se aplica la carga estáticamente, es decir, aumentando lentamente desde el estado sin carga, se produce en la placa una distribución de esfuerzos que provoca que el punto más cargado sea el del centro de la misma. Esto es debido a que, de acuerdo con la Resistencia de Materiales, en una placa sometida a flexión el máximo esfuerzo se produce en el centro de vano de cada lado de la placa. Por lo tanto, se generarían fisuras paralelas a los lados de la placa, que se cortarían en el centro de la misma formando una cruz. Este patrón de fisuración se identifica con un modo de fallo de flexión.

Sin embargo, la misma placa sometida a carga uniformemente distribuida pero con una velocidad de aplicación mucho mayor puede presentar fisuras de cortante, es decir, fisuras circulares centradas en los apoyos de la placa. Este cambio del modo de rotura es conocido y ha sido comprobado experimentalmente [2], [4-6]. Este cambio en el modo de rotura es puramente estructural y se produce incluso aunque el comportamiento del material no sea dependiente de la velocidad de deformación.

Para ilustrar este extremo se han desarrollado simulaciones numéricas en LS-DYNA sobre una placa de hormigón en masa sometida a una carga uniformemente distribuida sobre su superficie. Como modelo constitutivo para el hormigón se ha utilizado el Brittle Damage Model [7], modelo de daño anisótropo de fisura distribuida, que tiene un fallo por tensión principal máxima y un comportamiento a compresión elástico y sin rotura.

Los casos de carga estudiados se muestran en la figura 3. En ambos casos se aplica la misma cantidad de movimiento (área encerrada bajo la curva de carga) sobre la placa, pero en un intervalo de tiempo diferente: 0.66 ms para el caso de aplicación rápida y 5.8 ms para la aplicación lenta. La carga más lenta, si bien es todavía demasiado rápida comparada con un caso de carga estática habitual, permite que la placa alcance el equilibrio, de ahí que el comportamiento en comparación con un caso estático sea equivalente.

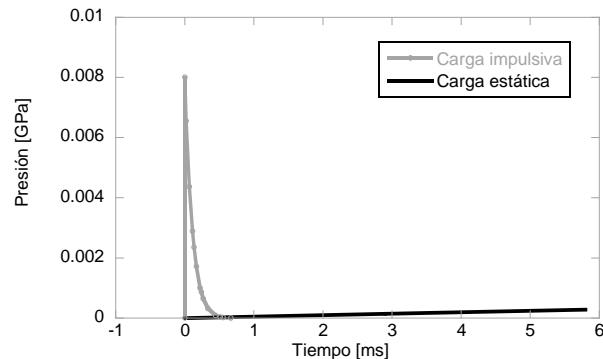


Figura 3. Casos de carga estudiados.

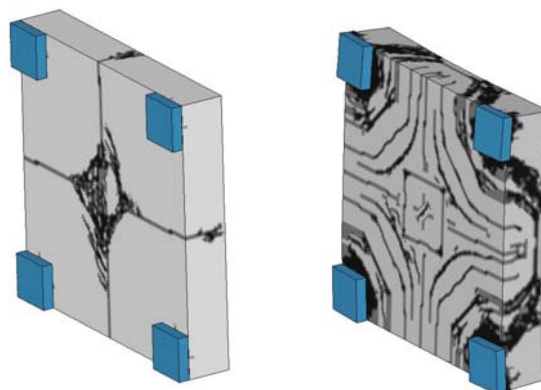


Figura 4. Patrón de fisuración ante la carga más lenta (izquierda) y más rápida (derecha).

Los resultados de las simulaciones muestran que ante carga estática el modo de fallo simulado es de flexión, mientras que ante carga impulsiva es de cortante. Dado que las propiedades del modelo constitutivo seleccionado no varían con la velocidad de deformación, los resultados obtenidos demuestran que existe un cambio de comportamiento estructural asociado a la velocidad de deformación.

El dimensionamiento de una estructura se lleva a cabo verificando la resistencia de las secciones más solicitadas ante un caso de carga determinado. Pero como se ha visto, un cambio en la velocidad de deformación puede hacer que una misma sollicitación presente modos de fallo distintos de los esperados, lo que dificulta el dimensionamiento de la estructura ante carga impulsiva por los métodos habituales.

### 3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL DEL CASO DE ESTUDIO

Para estudiar el efecto de la velocidad de deformación en vigas de hormigón armado, se ha elegido la campaña experimental realizada por la Agencia de Defensa de Suecia entre los años 1997 y 2000 [8-10].

Los ensayos constaron de dos fases. En la primera, se aplicó una carga uniformemente distribuida mediante una máquina hidráulica sobre una viga biapoyada, llevándola hasta rotura y obteniendo así la carga y deflexión de la viga ante carga estática. En la segunda fase se utilizó un tubo de choque para ensayar la viga ante una explosión. En esta segunda fase se ajustaron las cantidades de explosivo de manera tal que las reacciones en los apoyos fuesen las mismas que se habían medido en carga estática en el momento de rotura de la viga.

En el presente artículo se estudian tan sólo dos de las vigas ensayadas, ambas tanto en régimen dinámico, como en régimen estático, cuyas características se recogen en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones, cuantías de armado y propiedades de los materiales componentes de las vigas.

	B100-S1(12) B100-D3(12)	B100-S1(16) B100-D3(16)
Luz entre apoyos [mm]	1500	1500
Canto [mm]	160	160
Espesor [mm]	300	300
Recubrimiento [mm]	25	25
Armado	4 $\phi$ 12	5 $\phi$ 16
Resistencia a compresión, $f_{ck}$ [MPa]	101	101
Resistencia a tracción, $f_{ctk}$ [MPa]	5.80*	5.80*
Módulo elástico, $E_c$ [MPa]	44700	44700
*NOTA: Este valor ha sido obtenido de las prescripciones de la EHE-08		

En la nomenclatura utilizada para los ensayos, S hace referencia al carácter estático del mismo ("Static")

mientras que D lo hace al carácter dinámico ("Dynamic").

Según los autores de los ensayos, en los ensayos estáticos de las dos vigas en estudio el modo de fallo es de flexión, definido por la aparición de fisuras verticales en centro de vano, plastificación de las armaduras inferiores y fallo del hormigón por aplastamiento en la cabeza de compresión. En los ensayos impulsivos, sin embargo, existen dos tipos de modo de fallo. En la viga de mayor cuantía se produce un fallo por cortante, caracterizado por la aparición de fisuras en diagonal desde los apoyos, mientras que la de menor cuantía presenta fallo por flexión.

En cuanto a la ductilidad, ésta es mayor en la viga de menor cuantía, tanto en ensayos estáticos como en dinámicos. Por el contrario, la viga de mayor cuantía presenta un comportamiento más rígido y frágil.

La suma de reacciones registrada en los apoyos de las vigas en ambas fases de ensayos muestra que el agotamiento ante sollicitación impulsiva requiere una mayor carga que ante carga estática, lo que indica que la capacidad portante de las vigas (al menos en apariencia) es mayor ante carga impulsiva, como se aprecia en las figuras 5 y 6.

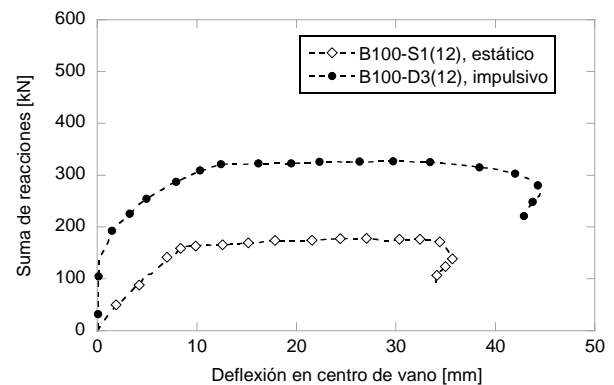


Figura 5. Gráficas carga – desplazamiento en los ensayos estático e impulsivo de la viga B100(12).

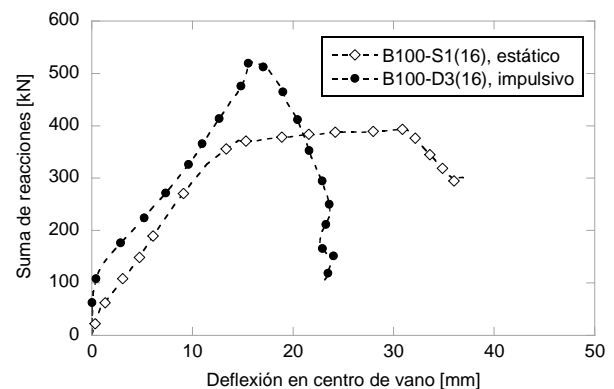


Figura 6. Gráficas carga – desplazamiento en los ensayos estático e impulsivo de la viga B100(16).

#### 4. ESTUDIO ANALÍTICO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Con el objeto de arrojar luz sobre el origen de la diferencia de modo de rotura de las dos vigas en estudio ante carga impulsiva, se ha realizado un estudio analítico y simulaciones numéricas de ambas vigas. El estudio analítico se ha realizado utilizando las prescripciones de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 y se presenta en esta sección. El estudio numérico se detallará en el próximo apartado.

La citada Instrucción utiliza hipótesis simplificadoras que permiten el cálculo de estructuras de hormigón armado de alta resistencia de hasta 100 MPa de resistencia característica ante cargas estáticas o dinámicas. Las cargas impulsivas como la de los ensayos aquí descritos quedan fuera del ámbito de la Instrucción, por lo que el estudio analítico se refiere únicamente a los ensayos estáticos.

Se calcula el Estado Límite Último de flexión simple utilizando para ello los diagramas definidos en el Art. 39.5 de la Instrucción. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 2, apreciándose una buena concordancia con los resultados de los ensayos estáticos.

Tabla 2. Comparación de resultados analíticos y de los ensayos estáticos.

	Momento último [kN · m]
B100-S1(12), ensayo	31
B100-S1(12), analítico EHE-08	28
B100-S1(16), ensayo	70
B100-S1(16), analítico EHE-08	62

De acuerdo con el diagrama de dominios de deformación del Art. 42.1.3, la viga B100-S1(12) alcanza el criterio de rotura de la sección por el dominio 2, cuando la fibra de la sección que contiene la armadura alcanza una deformación del 10‰.

Por el contrario, la viga B100-S1(16), cuya cuantía de armado es mayor, alcanza el criterio de rotura de la sección por el dominio 3, en el que la armadura ha alcanzado su límite de deformación del 10‰, y la sección deformada “pivota” hasta alcanzar el límite de deformación del hormigón comprimido del 2.6‰. Esto quiere decir que en esta sección se alcanza simultáneamente la rotura por el acero y por el hormigón.

Este análisis, aunque elemental, puede explicar el diferente comportamiento de estas vigas ante carga impulsiva, ya que como se ha mencionado, la viga de mayor cuantía presentó un fallo por cortante ante dicha sollicitación. De esta manera, un mejor aprovechamiento de la sección resistente ante cálculo estático puede ocasionar un fallo por cortante ante una sollicitación impulsiva. Por el contrario, una menor cuantía de

armado puede servir como “reserva de resistencia” ante un cambio en el tipo de sollicitación.

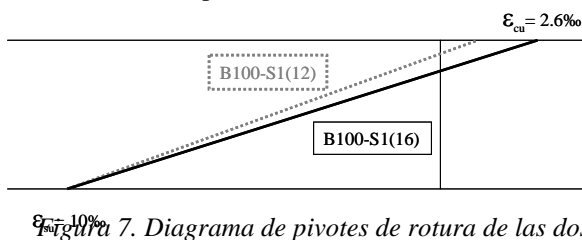


Figura 7. Diagrama de pivotes de rotura de las dos secciones en estudio.

Se han calculado también los momentos últimos y de fisuración de ambas vigas, así como las flechas instantáneas esperadas para esos dos estados de carga y para una carga equivalente al 60% de la carga última, de acuerdo con las prescripciones del Art. 50.2.2. Los resultados obtenidos se comparan con los experimentales en las figuras 8 y 9, obteniéndose una buena correlación.

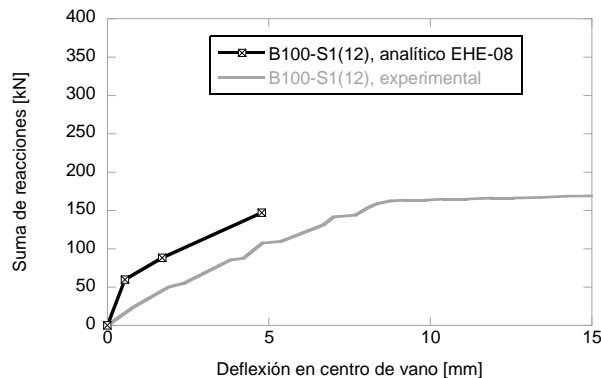


Figura 8. Comparativa de gráficas carga – desplazamiento del estudio analítico y el ensayo estático de la viga B100(12).

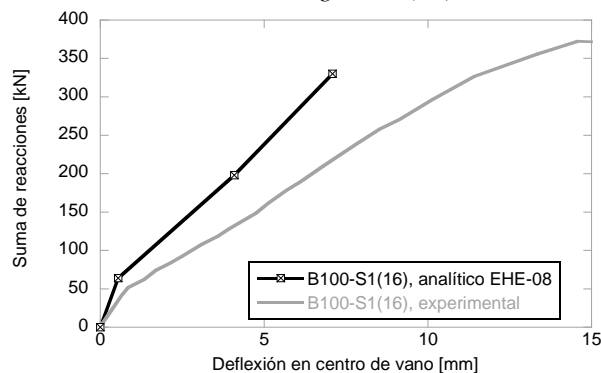


Figura 9. Comparativa de gráficas carga – desplazamiento del estudio analítico y el ensayo estático de la viga B100(16).

#### 5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Se han realizado simulaciones numéricas de las vigas objeto de estudio ante carga estática y ante carga impulsiva usando el programa numérico comercial LS-DYNA, que realiza cálculos basados en el método de los elementos finitos con integración explícita en el

tiempo. Una presentación detallada de los modelos numéricos desarrollados puede encontrarse en [10].

El modelo constitutivo utilizado para el hormigón es el Winfrith Concrete Model [11], que utiliza una ecuación de estado para relacionar la presión hidrostática con la deformación volumétrica, mientras que las tensiones desviadoras se incrementan elásticamente hasta la superficie de plastificación definida por Ottosen [12].

En cuanto al acero de armar, ha sido modelado mediante un material elástico – perfectamente plástico, y la adherencia entre hormigón y acero se simula de manera explícita a través de unos muelles plásticos que conectan ambos materiales.

Los resultados de las simulaciones numéricas presentan una gran similitud con los obtenidos de la campaña experimental, especialmente en lo referente a los cambios en la ductilidad de las vigas y a su capacidad portante ante ambos regímenes de carga.

Sin embargo, se observan en las simulaciones ciertas desviaciones con respecto a los resultados experimentales:

En el ensayo estático existe buena concordancia en cuanto a la carga máxima obtenida, ya que las simulaciones obtienen valores en torno a un 10% inferiores que los medidos experimentalmente.

Sin embargo, se aprecia que mientras que en la campaña experimental se produjo un endurecimiento por deformación, en las simulaciones lo que se observa es un ablandamiento, asociado a un fallo de adherencia que es especialmente notable en la viga B100-S1(16).

Este fallo de adherencia se achaca a la discretización simplificada del contacto entre barras y hormigón. Cada elemento barra está en contacto con tan sólo cuatro elementos de hormigón, que son insuficientes para representar el fuerte gradiente de tensiones que se produce en la intercara. Otra explicación posible, no excluyente de la anterior, es que el modelo de hormigón utilizado, se muestra excesivamente frágil ante las acciones de esfuerzo cortante introducidas por las armaduras.

Por otra parte, en las simulaciones de los ensayos impulsivos se registran unas oscilaciones en la carga durante los primeros instantes del ensayo, en un tiempo inferior a 1 ms, que corresponden a la propagación de ondas elásticas en el material, que son difícilmente detectables en un ensayo real.

Salvando las citadas oscilaciones, se encuentra que existe una buena concordancia en cuanto a la carga máxima obtenida, así como en lo referente a la ductilidad de la respuesta estructural de las vigas.

En concreto, las simulaciones desarrolladas para ambas vigas reproducen el comportamiento observado experimentalmente, en el que la viga de menor cuantía presenta un comportamiento dúctil asociado a un modo de fallo de flexión, mientras que la de mayor cuantía falla por cortante con menor deformación última.

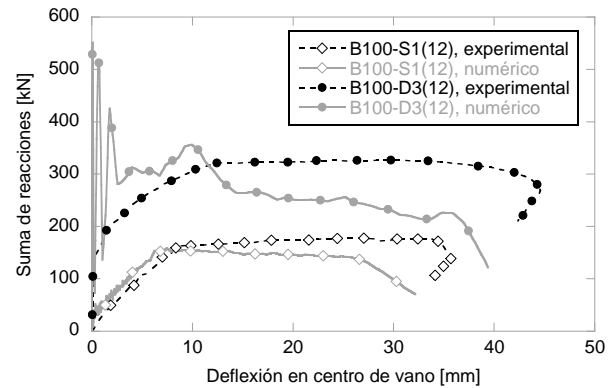


Figura 10. Comparativa de gráficas carga – desplazamiento de las simulaciones numéricas y los resultados experimentales de la viga B100(12).

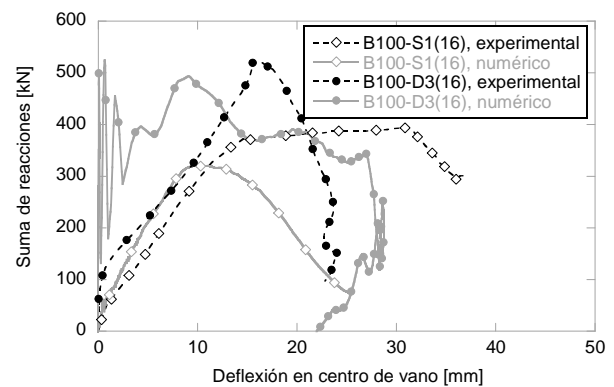


Figura 11. Comparativa de gráficas carga – desplazamiento de las simulaciones numéricas y los resultados experimentales de la viga B100(16).

Las simulaciones numéricas desarrolladas demuestran que, para las geometrías estudiadas, una viga que en régimen estático presente una rotura por el acero con el hormigón trabajando a un nivel tensional moderado puede presentar ante carga impulsiva una respuesta estructural más dúctil que una viga que rompa por el acero con el hormigón sometido a un nivel tensional alto.

## 6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

En el presente artículo se han realizado estudios analíticos y simulaciones numéricas sobre una campaña experimental llevada a cabo por la Agencia de Defensa de Suecia.

Del análisis de los resultados se comprueba que las vigas que ante carga estática presentan un modo de fallo por flexión, pueden fallar por cortante ante carga impulsiva cuando las cuantías de armado son altas, si

bien para cuantías bajas sigue predominando el de flexión.

La primera conclusión fundamental es que el cambio de modo de rotura, así como el comportamiento general de elementos estructurales de hormigón armado sometidos a explosiones dista mucho de ser intuitivo. De esta forma, la protección y el refuerzo frente a cargas altamente dinámicas de este tipo de estructuras mediante las herramientas tradicionales basadas en la Resistencia de Materiales puede llevar a resultados erróneos.

En este sentido, en el caso de las vigas analizadas aquí, se aprecia un cambio en la ductilidad de las vigas (asociado al cambio de modo de rotura), pasando las vigas de tener un modo de fallo dúctil con cuantías de armado pequeñas a fallo frágil con cuantías más altas.

En relación a las simulaciones numéricas, se ha comprobado el buen ajuste de las mismas con respecto a los resultados experimentales, tanto en lo referente a carga máxima, como a deformación última de las vigas. También han permitido verificar que el cambio de modo de rotura ante ambos regímenes de sollicitación puede ser reproducido numéricamente, descartando así que se trate de un error de la campaña experimental. De esta forma, este tipo de simulaciones es una herramienta eficaz para abordar el comportamiento estructural de elementos sometidos a acción impulsiva.

También se ha comprobado la buena concordancia existente entre los cálculos analíticos proporcionados por la norma EHE-08 y los resultados experimentales ante carga estática, en cuanto a carga máxima y deformaciones antes de la rotura. Si bien la excesiva simplicidad de estos métodos no permite conocer el comportamiento estructural en la rama post-fallo, sí dan mucha información sobre el modo de fallo ante carga impulsiva.

Concretamente, la viga con la cuantía más baja, B100-D3(12), presenta, ante carga impulsiva, una rotura más dúctil que la viga con cuantía más alta, lo que se achaca a que su modo de rotura teórico ante carga estática es por fallo del acero (dominio 2 de la EHE-08).

En líneas generales se puede afirmar que una adecuada respuesta estructural ante explosiones requiere una cuidadosa selección de la cuantía de armado, siendo una buena práctica acudir a cuantías que garanticen el fallo por rotura del acero y no del hormigón, por lo que se deben evitar en lo posible cuantías altas de armado.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de esta investigación a la Fundación Agustín de Bethancourt y a los Ministerios de Fomento (programa P16/08) y de Ciencia e Innovación (programa CONSOLIDER - INGENIO).

#### REFERENCIAS

- [1] Bischoff, P. H., and Perry, S. H., *Compressive behavior of concrete at high strain rates*, Mater. Struct. 24(6), 425–450, 1991.
- [2] Morales-Alonso, G., Cendón, D.A., Gálvez F., Erice B. and Sánchez-Gálvez V. *Blast response analysis of reinforced concrete slabs. Experimental procedure and numerical simulation*, Journal of Applied Mechanics, vol 78, 2011.
- [3] Cullis, I. G., Schofield, J., and Whitby, A., *Assessment of Blast Loading Effects - Types of Explosion and Loading Effects*, Int. J. Pressure Vessels Piping 87, 493–503, 2010.
- [4] Comité Euro-International du Béton, *Bulletin d'Information 187. Concrete structures under impact and impulsive loading*, Dubrovnik, Croatia, 1988.
- [5] Razaqpur, A. G., Tolba, A., and Contestabile, E., *Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates*, Composites, Part B 38, 535–546, 2007.
- [6] Toutlemonde, F., Rossi, P., Boulay, C., Gourraud, C., and Guedon, D., *Dynamic behaviour of concrete: tests of slabs with a shock tube*, Mater. Struct. 28, 293–298, 1995.
- [7] Govindjee, S., Kay, G. J., and Simó, J. C., *Anisotropic modelling and numerical simulation of brittle damage in concrete*, Int. J. Numer. Methods Eng., 38, 3611–3633, 1995.
- [8] Magnusson, J., Hallgren, M., and Ansell, A., *Airblast-loaded, high-strength concrete beams. Part I: Experimental investigation*, Magazine of Concrete Research, vol. 62, No. 2, p. 127-136, 2010.
- [9] Magnusson, J., Ansell, A., and Hansson, H., *Airblast-loaded, high-strength concrete beams. Part II: Numerical non-linear analysis*, Magazine of Concrete Research, vol. 62, No. 4, p. 235-242, 2010.
- [10] Morales-Alonso, G., Cendón, D.A., and Sánchez-Gálvez, V., *Simulación numérica de elementos estructurales de hormigón armado de alta resistencia sometidos a explosiones*, Hormigón y Acero, vol. 62, nº 262, p. 65-78.
- [11] Broadhouse, B.J., Attwood, G.J., *Finite element analysis of the impact response of reinforced concrete structures using Dyna3D*, Proc. 12<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-12), 1993.
- [12] Ottosen, N.S., *Nonlinear finite element analysis of concrete structures*, Report: Riso-R-411. Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory, 1980.