

Refuerzo de estructuras de hormigón sometidas a impacto mediante una capa de UHPFRC

UHPFRC strengthening of concrete structures subjected to impact

Gonzalo SANZ-DIEZ DE ULZURRUN^a, Carlos ZANUY SÁNCHEZ^b

^a Dr. Ingeniero de Caminos, C y P, Universidad Politécnica de Madrid, Profesor Permanente Laboral. g.ulzurrun@upm.es

^b Dr. Ingeniero de Caminos, C y P, Universidad Politécnica de Madrid, Catedrático. carlos.zanuy@upm.es

RESUMEN

En los últimos años, la investigación sobre los hormigones de ultra-altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC) ha sido muy abundante y está teniendo como consecuencia una mejor “acotación” de sus posibles aplicaciones prácticas. Una de ellas es el refuerzo de estructuras de hormigón que puedan estar sometidas a acciones impulsivas, en las que se requiere una gran capacidad de absorción de energía no conseguible con el hormigón armado convencional. Se han sometido vigas reforzadas a ensayos de impacto y se ha comprobado que la capa de UHPFRC proporciona a las vigas un mecanismo resistente tipo membrana, que interesantemente presenta una gran sensibilidad a la velocidad de deformación.

ABSTRACT

In recent years, many research studies on ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) have been published. Consequently, there is a better understanding of the possible practical applications of this material. One of them is the retrofit of concrete structures that might be subjected to impulsive actions. This approach can provide structures with a high-energy absorption capacity, which is not achievable with conventional reinforced concrete. Impact tests have been performed on retrofitted beams. The results suggest that the UHPFRC layer provides a membrane-type resistance mechanism, which interestingly shows a high sensitivity to strain rate.

PALABRAS CLAVE: impacto, ensayos de caída libre, hormigón estructural, UHPFRC

KEYWORDS: impact, drop-weight impact testing, structural concrete, UHPFRC

1. Introducción

La investigación sobre hormigones de altas y ultra-altas prestaciones ha alcanzado en los últimos años una madurez tal que en la actualidad no se discute sobre su utilidad práctica, sino que el debate se centra en torno al uso más eficaz que se puede hacer de él, para, teniendo en cuenta su todavía elevado coste, aprovechar sus excepcionales propiedades mecánicas y durabilidad. Ello lleva a que los

hormigones de ultra-altas prestaciones reforzadas con fibras (UHPFRC por sus siglas en inglés) encuentren un interesante campo de aplicación en conjunción con otros materiales, como el refuerzo de estructuras de hormigón convencional sometidas a acciones impulsivas (impactos o explosiones).

Las estructuras de hormigón convencional presentan una alta sensibilidad a fallar con poca

capacidad de absorción de energía por cortante (vigas) o punzonamiento (losas) frente a cargas de impacto, aunque la estructura pueda desarrollar ductilidad ante cargas estáticas [1,2]. En la Figura 1 se muestra el resultado de un ensayo de impacto en una viga de hormigón armado (HA), realizado por los autores en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) [3]. La fragilidad del modo de fallo se puede observar por las amplias fisuras por cortante que llevan al colapso, acompañadas por el desprendimiento del recubrimiento de hormigón, la destrucción de la cabeza comprimida donde impacta el proyectil, etc. A ello hay que sumar que muchos bloques de hormigón que se desprenden pueden caer sobre los bienes o personas que puedan existir bajo la estructura. En cuanto al fallo por cortante, éste difiere del habitualmente obtenido bajo cargas estáticas [4,5], ya que está formado por dos mecanismos [6]: uno local, temprano y muy impulsivo, formado por dos fisuras principales con una inclinación de 45° alrededor de la sección central en la que impacta el proyectil, y otro global, posterior al anterior, con fisuras diagonales más tendidas, que se extienden desde el punto de carga hasta los apoyos.



Figura 1. Imagen de un ensayo de impacto de una viga de hormigón armado en la UPM.

Por su naturaleza, el UHPFRC dispone de una gran capacidad de deformación tras alcanzarse la resistencia a tracción de la matriz, con etapas sucesivas de 1) endurecimiento con micro-fisuración uniforme, y 2) ablandamiento tras la localización de macro-fisuras. Esta capacidad de absorción de energía, que se ha mostrado experimentalmente que se mantiene a alta velocidad de deformación [7], se puede

aprovechar para reforzar estructuras de hormigón sometidas a impactos, como galerías de protección frente a caídas de rocas, mediante la aplicación de una delgada capa de refuerzo de UHPFRC en la cara inferior. Además, la capa de UHPFRC puede ayudar a retener bloques de hormigón que tiendan a desprenderse. También tiene un gran potencial la aplicación a elementos estructurales como barreras de retención lateral de viaductos, pilas de puentes o embarcaderos portuarios, y algunos autores están explorando su aplicabilidad a cargas explosivas [8,9].

El Grupo de Ingeniería Estructural de la UPM tiene una importante experiencia en el estudio del comportamiento frente a impacto de estructuras de hormigón y en los últimos años ha dedicado esfuerzos a analizar la mejora de la capacidad resistente de vigas de hormigón armado mediante la aplicación de una delgada capa de UHPFRC a tracción. En el presente artículo se muestran los resultados más importantes de un estudio experimental en el que se han ensayado frente a impacto vigas con ese sistema de refuerzo y se analiza la sensibilidad a acciones dinámicas de los mecanismos resistentes.

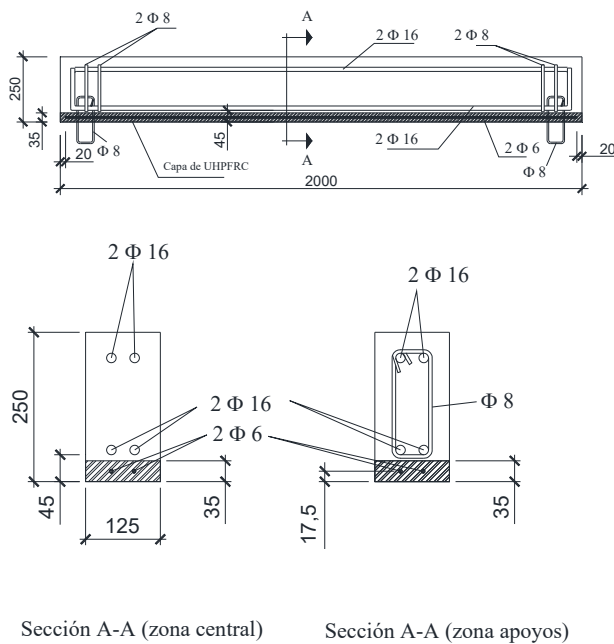
2. Metodología experimental

2.1. Configuración de los ensayos

La campaña experimental ha incluido la realización de ensayos de impacto sobre vigas prismáticas de HA, de 2,0 m de longitud y sección rectangular de 0,125 m de ancho y 0,25 m de canto, que incluyen una delgada capa de UHPFRC de 25 mm en la cara inferior (Figura 2).

El proyecto de investigación ha incluido un amplio número de variables en el estudio [10-12], incluyendo las propiedades y dimensiones de la capa de refuerzo, presencia o no de armadura de cortante en la viga, la presencia o no de armadura embebida en la capa de refuerzo, o la introducción o no de armadura

pasante entre los dos hormigones. En el presente artículo se presta atención a la solución más eficaz en términos de resistencia frente a impacto, consistente una delgada capa de UHPFRC fabricada a partir de un premix de CRC [10] con fibras metálicas cortas y con una cuantía mínima de armadura embebida ($2\Phi 6$). En el apartado 2.2 se dan más detalles de los materiales y el proceso de fabricación.



Sección A-A (zona central) Sección A-A (zona apoyos)

Figura 2. Vigas ensayadas en la campaña experimental (dimensiones en mm).

Los ensayos se han configurado con un esquema de flexión en tres puntos, con una distancia entre apoyos de 1,6 m, aplicando la carga en la sección central (Figura 3). Los ensayos de impacto han consistido en el lanzamiento por caída libre de un proyectil o masa de 200 kg, desde una altura de 1,75 m, sobre la cara superior de la sección central (3,4 kJ). Se ha utilizado la torre de caída instrumentada del grupo de Ingeniería Estructural de la UPM [3], que tiene células de carga dinámicas para la medida dinámica (40 kHz) de las reacciones en los apoyos y la fuerza de contacto entre el proyectil y la viga. Además, se colocó un acelerómetro en la sección central de la viga, y se utilizó una cámara de video de alta velocidad (FASTCAM NOVA S9 de Photron) para la obtención de la deformada

mediante correlación digital de imagen (DIC) a una velocidad de grabación de 5.000 fps (en posteriores trabajos el Grupo ha grabado a 22.500 fps, [13,14]). La grabación a alta velocidad permite obtener las fuerzas de inercia a partir de la derivación del campo de desplazamientos capturado. Gracias a las fuerzas de inercia obtenidas con DIC, y a las reacciones y fuerza de impacto grabadas con las células de carga, se pueden obtener las leyes de esfuerzos cortantes y momentos flectores en tiempo real y analizar los mecanismos de fallo por interacción de esfuerzos en cualquier sección [13,14].

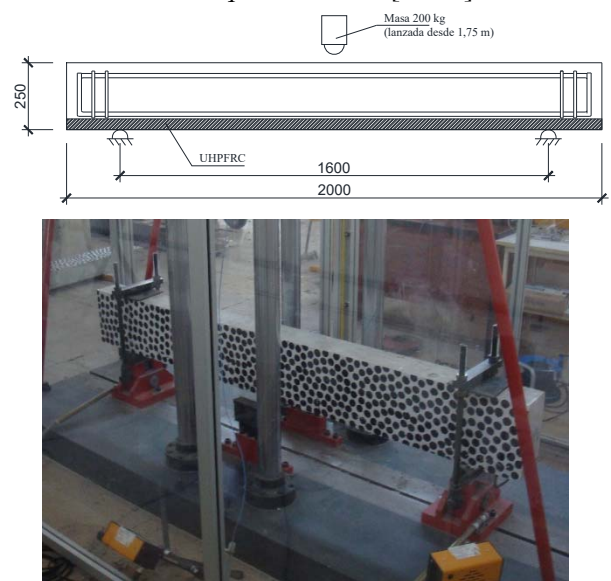


Figura 3. Configuración geométrica de las piezas ensayadas a impacto (dimensiones en mm) y fotografía de una viga dentro de la torre de caída.

Además de los ensayos de impacto, se ensayaron bajo carga estática vigas con las mismas configuraciones de las vigas ensayadas a impacto, para así tener una referencia estática con la que comparar la respuesta dinámica. Los ensayos estáticos se hicieron con el mismo esquema de flexión en tres puntos con la aplicación de una carga en la sección central con un gato hidráulico con control de desplazamiento.

2.2. Materiales empleados y fabricación

Las vigas prismáticas ensayadas han sido de hormigón armado convencional reforzadas con una capa de UHPFRC en la cara inferior. El

hormigón convencional fue del tipo HA-30/F/12/IIb, formado por 350 kg/m³ de cemento tipo CEM I/42,5 R, una relación agua/cemento de 0,5 y áridos silíceos de 12 mm de tamaño máximo. Dio una resistencia media a compresión en cilindros de 33,1 MPa a los 28 días. El acero de armar fue B500SD.

Para el UHPFRC, se empleó un premix de CRC, al que se le añadió el agua y las fibras. Se hicieron tres mezclas de UHPFRC, con cuantías volumétricas de fibras del 2, 3 y 4%. Las fibras fueron de acero, rectas, sin anclajes, de 12,5 mm de longitud y 0,3 mm de diámetro. La resistencia a compresión a la edad de ensayo fue de 142,7 (2%), 144,4 (3%) y 156,4 MPa (4%), y la resistencia a flexotracción de 4,3 (2%), 8,5 (3%) y 8,2 MPa (4%), respectivamente. Las propiedades completas de tracción pueden consultarse en [11]; la mezcla con 2% de fibras no desarrolló endurecimiento en tracción, mientras que las otras sí. Por cada tipo de UHPFRC, se realizaron dos ensayos de impacto y uno estático.

La fabricación de las vigas se hizo secuencialmente. Primero se vertió el hormigón convencional sobre los moldes que ya tenían la armadura pasiva colocada, dejando los 35 mm superiores sin hormigonar, es decir, las vigas se hormigonaron del revés. Tras dos meses, se hizo un tratamiento superficial al hormigón mediante abujardado, se limpió para evitar que quedaran partículas y se humedeció para verter encima el UHPFRC, que era autocompactable. Hay que tener en cuenta que en estructuras existentes, en las que no se pueden colocar las vigas del revés para verter el UHPFRC, otros métodos de instalación pueden ser necesarios. Una descripción más amplia de la fabricación está en [11,12].

3. Análisis de resultados

3.1. Resultados experimentales

Las vigas ensayadas eran críticas a cortante, ya que esta es la configuración más grave que puede intentar resolverse con el refuerzo con una capa de UHPFRC. El comportamiento de referencia bajo carga estática se representa en la Figura 4 por medio de los diagramas fuerza aplicada-flecha en centro de vano. Se ensayó una viga de HA sin ningún tipo de refuerzo de UHPFRC, de manera que la Figura 4 permite observar la aportación de la capa de refuerzo. Aunque la mejora en cuanto a la fuerza máxima resistida no fue significativa (aunque aumentó un 15% con el refuerzo de UHPFRC con 4% de fibras), las principales ganancias fueron en términos de (1) ductilidad post-pico, con un gran incremento de la capacidad de deformación tras la formación de una fisura de cortante (despreciable con la viga sin refuerzo), con una capacidad de carga residual sostenida del 50% de la carga máxima; (2) importante aumento de rigidez pre-pico. Todas las vigas fallaron por cortante con un esquema análogo al de la Figura 5. Hay que tener en cuenta que, de cara al comportamiento frente a impacto, lo que se pretende es aumentar la capacidad de absorción de energía, en línea con la mejora (1) indicada anteriormente.

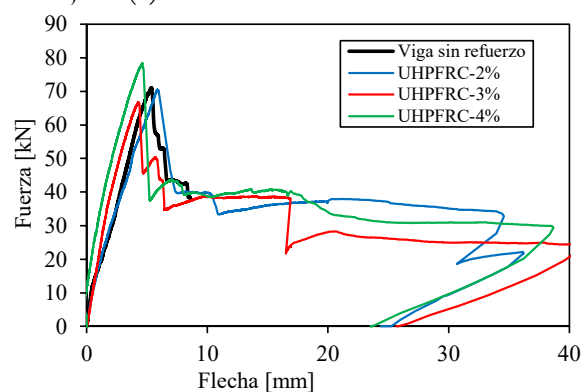


Figura 4. Diagramas fuerza-flecha de los ensayos estáticos de las vigas reforzadas en comparación con la viga sin refuerzo.



Figura 5. Fotografía de rotura estática (viga con refuerzo de UHPFRC-3%).

Los ensayos de impacto han permitido confirmar la importante contribución de la capa de UHPFRC a la respuesta global. A pesar de que las vigas son críticas a cortante, la capa de UHPFRC fue capaz de proporcionar un mecanismo resistente tipo membrana que retuvo la extensión de la fisuración de la capa de hormigón convencional, así como el desprendimiento de bloques (Figura 6).

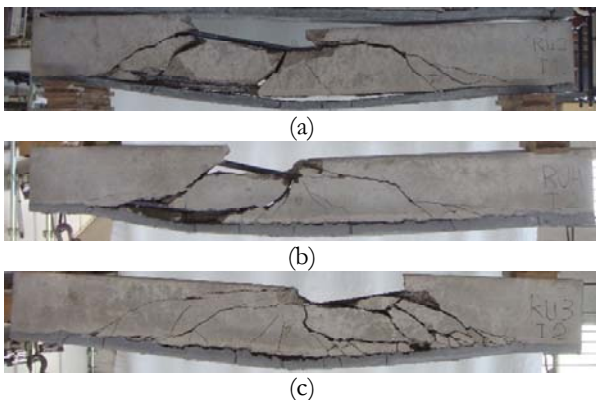


Figura 6. Estado de una viga de cada serie tras los ensayos de impacto (a) UHPFRC-2%; (b) UHPFRC-3%; (c) UHPFRC-4%.

La mejora cualitativa se ha podido evaluar gracias a las medidas tomadas a cabo con las células de carga dinámicas, el acelerómetro y la técnica del DIC. Por un lado, mediante los sensores se ha obtenido la evolución en el tiempo de las reacciones y la fuerza de impacto. Tal y como se muestra en la Figura 7 (izquierda), las reacciones experimentaron un primer pico muy impulsivo. El valor máximo de la reacción total es usualmente utilizado para definir la resistencia máxima [15-16], ya que el uso de la fuerza máxima de impacto está influenciado por las fuerzas de inercia. A la etapa anterior le siguió una segunda etapa menos impulsiva, con un pico de menor tamaño. La primera etapa se corresponde con la formación de fisuras

inclinadas unos 45° en el centro de vano, y es resultado de la respuesta local de la viga frente al impacto. La segunda etapa se corresponde con la respuesta global de la viga, que es una combinación de mecanismos resistentes por flexión-cortante, dando lugar a fisuras diagonales más largas, que van desde el centro a los apoyos. La extensión de la segunda etapa es un indicador de la capacidad de absorción de energía de la viga en régimen dinámico [13].

A partir de las medidas dinámicas, se pueden elaborar diagramas fuerza (reacción total)-flecha en el centro de vano en los ensayos de impacto, tal y como se muestra en la Figura 7 (izquierda). A partir de esos gráficos, se pueden obtener la resistencia máxima, la flecha máxima, y la flecha residual tras el ensayo. También se puede medir la energía absorbida como el área de la gráfica fuerza-flecha. La energía total se puede descomponer en la energía de cada una de las dos etapas indicadas en el párrafo anterior, indicadas mediante E1 y E2 en la Figura 7 (derecha).

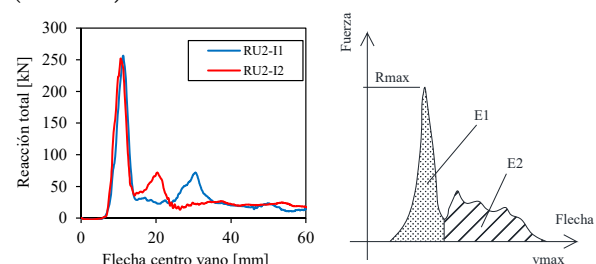


Figura 7. Medida de reacciones en los ensayos de impacto (izquierda) e idealización del diagrama fuerza-flecha (derecha).

La resistencia máxima, en términos de reacción total máxima, se representa en la Figura 8. La flecha máxima y la flecha residual tras los ensayos se representan en la Figura 9. En ambas gráficas se han comparado los resultados de las vigas objeto de este artículo con los de vigas análogas en las que la capa de UHPFRC no tenía armadura embebida. Los gráficos confirman que la introducción de esa pequeña cuantía de armadura proporciona robustez, al evitar que la capa de refuerzo se parta, lo cual ocurrió en algunos de los ensayos sin armadura embebida [11].

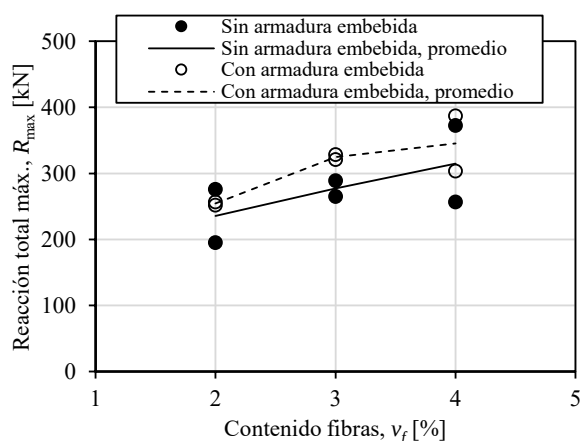


Figura 8. Reacción total máxima en los ensayos de impacto.

En la Figura 8 se muestra claramente que la resistencia en régimen de impacto mejoró con la cuantía de las fibras de la capa de UHPFRC, siendo de hasta un 40% superior la serie con un 4% de fibras en la capa de refuerzo que en la de un 2% de fibras.

Con respecto a la flecha máxima, la Figura 9 indica que se redujo drásticamente para volúmenes de fibras superiores al 2%, lo cual coincide con la disponibilidad de fase de endurecimiento en el comportamiento a tracción del UHPFRC, que se consiguió con 3 y 4% de fibras. El resultado tiene sentido, ya que la fase de endurecimiento es la que más capacidad de deformación aporta al sistema.

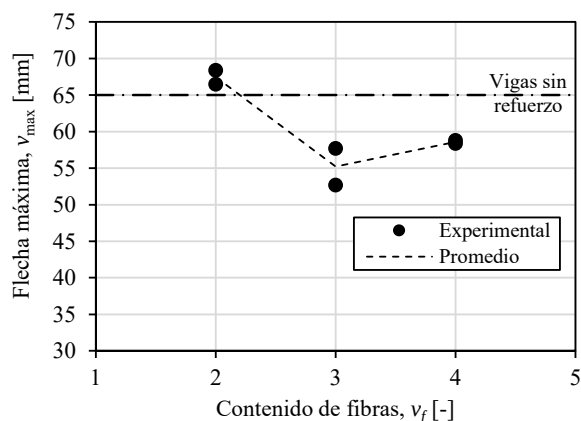


Figura 9. Flecha bajo carga máxima y residual en los ensayos de impacto.

En cuanto a la energía absorbida por las vigas en los ensayos de impacto (Figura 10), la energía de la primera fase (E_1) fue muy similar para todas las vigas, lo cual tiene sentido porque en la primera fase el comportamiento local del

contacto entre el proyectil y la viga es el que gobierna la respuesta, y éste es el mismo para todas las vigas ensayadas. La diferencia se obtuvo en la segunda fase (E_2), siendo la viga con una capa de refuerzo con el 4% de fibras la que más energía fue capaz de absorber.

3.2. Análisis de esfuerzos

El uso de la técnica de DIC con cámaras de alta velocidad de grabación ha permitido obtener la evolución del campo de desplazamientos durante los ensayos de impacto. A partir de los desplazamientos, se obtuvieron las fuerzas de inercia y, por integración de todas las acciones, las leyes de esfuerzos en régimen dinámico. La metodología está descrita en [12-14].

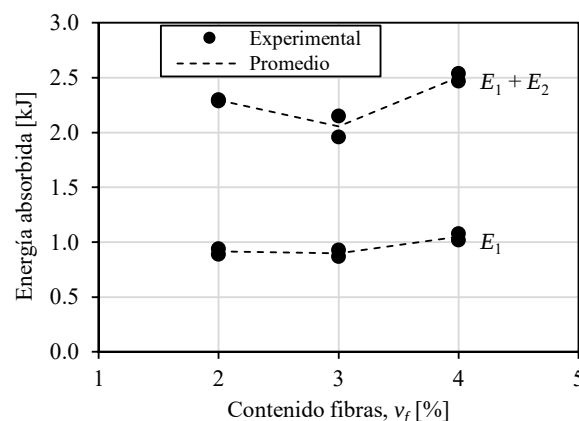


Figura 10. Energía absorbida en los ensayos de impacto.

La evolución de los esfuerzos permite analizar la interacción flexión-cortante en cualquier sección, de una forma más simple y visual que la mayoría de los modelos numéricos que tratan de predecir el tipo de fallo de vigas de HA frente a impacto [17]. En la Figura 11 se muestran los resultados para la sección situada a una distancia igual a la mitad del canto desde la sección central de uno de los ensayos de impacto con una capa de refuerzo con el 4% de fibras. La evolución de la interacción de esfuerzos M/V muestra claramente las dos etapas del ensayo de impacto de las que se ha hablado en párrafos anteriores. En la Fase 1, el comportamiento es muy local e impulsivo, y el análisis de la Figura 11 muestra que la relación de esfuerzos es

aproximadamente $M/V \approx 0,21$ m. Tal relación puede entenderse como el vano de cortante equivalente desarrollado en la Fase 1 del ensayo. El valor de $M/V \approx 0,21$ m equivale a una luz entre apoyos de 0,42 m, lo cual demuestra que el comportamiento de la viga en esa fase es muy local, dando lugar a esfuerzos de cortante muy elevados, responsables de la formación de fisuras locales con una inclinación de 45° . Este resultado es coherente con el criterio de Cotsovos sobre la luz efectiva frente a impacto [18].

Tras la Fase 1, los esfuerzos vuelven a anularse casi por completo y después empieza la Fase 2, mucho más global. La existencia de esta segunda fase es posible gracias a la capacidad aportada por la capa de UHPFRC, ya que sin ella, se puede alcanzar el colapso estructural en la fase anterior. Como se puede observar en la Figura 11, la relación M/V en la Fase 2 sigue aproximadamente el mismo valor que en un ensayo estático con flexión en tres puntos. Sin embargo, los esfuerzos alcanzados son mucho mayores que los obtenidos en el ensayo estático realizado con una viga de la misma configuración (valor señalado con un punto en la Figura 11), lo cual demuestra la sensibilidad a la velocidad de deformación de los mecanismos resistentes. En el caso del ensayo analizado en la Figura 11, la relación entre los esfuerzos máximos alcanzados en el ensayo de impacto y los obtenidos en el ensayo estático es de 5,3.

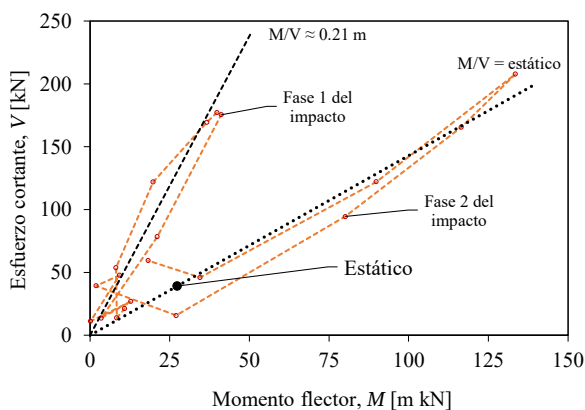


Figura 11. Interacción de esfuerzos en la sección situada a la mitad del canto de la sección central.

El valor anterior, que puede ser entendido como un factor de incremento dinámico (DIF, por sus

siglas en inglés) de la capacidad resistente en régimen dinámico, indica que la capacidad resistente aportada por la capa de refuerzo de UHPFRC presenta una sensibilidad a la velocidad de deformación muy favorable para ser aprovechada en estructuras sometidas a cargas de impacto.

3.3. Factores de incremento dinámico

En la Figura 12 se obtienen los valores del DIF para los esfuerzos máximos alcanzados en la sección situada a la mitad del canto de la sección central de las vigas ensayadas. Se puede observar que los valores son similares para todas las vigas, con un valor medio de alrededor de 6,0. Tiene sentido que los valores sean muy parecidos, ya que la velocidad de deformación movilizada ha sido muy similar en todos los ensayos, al estar todos sometidos al mismo impacto (combinación de masa lanzada y altura desde la que se lanza). La combinación entre los valores del DIF de los esfuerzos y la energía absorbida por las vigas (Figura 10) muestra que el sistema de refuerzo proporcionado por la capa de UHPFRC con armadura embebida es muy eficaz frente a cargas impulsivas.

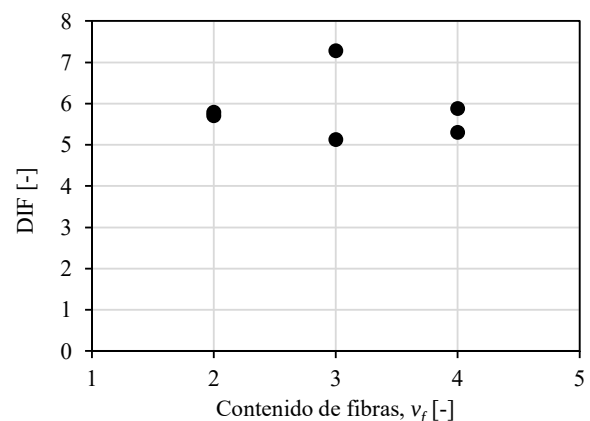


Figura 12. Factores de incremento dinámico de los esfuerzos en la sección situada a la mitad del canto de la sección central.

4. Conclusiones

En la presente contribución, se han analizado los resultados de ensayos de impacto realizados

sobre vigas de HA críticas a cortante reforzadas con una delgada capa de UHPFRC adherida a la cara inferior. Las conclusiones alcanzadas en el estudio han sido las siguientes:

1. El refuerzo mediante una delgada capa de UHPFRC con armaduras embebidas proporciona un comportamiento robusto frente a impacto a vigas de HA, con un modo de fallo que activa el trabajo como membrana de la capa de refuerzo, capaz de retener el colapso de la parte de hormigón convencional.
2. La presencia de armaduras embebidas evita la rotura de la capa de UHPFRC, favoreciendo la retención de la fisuración del hormigón convencional y evitando la caída de bloques desprendidos.
3. La fase de endurecimiento del UHPFRC, conseguida con volúmenes de fibras del 3 y el 4%, proporciona una capacidad de absorción de energía superior a la conseguida con mezclas sin capacidad de endurecimiento.
4. El análisis mediante DIC y cámara de alta velocidad de grabación ha permitido comprobar que los mecanismos de fallo de vigas reforzadas con UHPFRC, desarrollados en las dos fases en las que se divide la respuesta frente a impacto, tienen una favorable sensibilidad a la velocidad de deformación. Los esfuerzos obtenidos en los ensayos de impacto son, en promedio, de hasta 6 veces los esfuerzos resistentes obtenidos en los ensayos estáticos.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación de la Agencia Estatal de Investigación a través del proyecto BIA2016-74960-R AEI/FEDER, UE. El CRC y las fibras fueron amablemente proporcionados por Hi-Con A/S (Dinamarca).

Referencias

- [1] K.H. Kishi, H. Mikami, K.G. Matsuoka, T. Ando, Impact behavior of shear-failure type RC beams without shear rebar, *Int. J. of Impact Eng.* 27 (2002) 955-968.
- [2] S. Saatci, F.J. Vecchio, Effects of shear resisting mechanisms on impact behavior of RC beams, *ACI Struct. J.* 106 (2009) 78-86.
- [3] G.S.D. Ulzurrun, Capacidad resistente de elementos lineales de HA reforzado con fibras bajo cargas de impacto, U.P.M. (2019).
- [4] E. Bentz, F. Vecchio, M. Collins, Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of RC elements, *ACI Struct. J.* 103 (2006) 614-624
- [5] A. Muttoni, M. Fernández Ruiz, Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width, *ACI Struct. J.* 105 (2008) 163-172.
- [6] W.J. Yi, D.B. Zhao, S.K. Kunnath, Simplified approach for assessing shear resistance of RC beams under impact loads, *ACI Struct. J.* 113 (2016) 747-756.
- [7] E. Cadoni, D. Forni, Experimental analysis of the UHPFRCs behavior under tension at high stress rate, *Eur Phys J Spec Top.* 225 (2016) 253-264.
- [8] C. Li, H. Aoude, Behaviour of UHPFRC-retrofitted RC beams with varying strengthening configurations under single and repeated blast loading *Cem Concrete Comp*, 142 (2023) 105180.
- [9] C. Li, H. Aoude, Effect of retrofit type on the blast performance and failure mode of HSC beams retrofitted with UHPFRC *Eng Fail Anal*, 152 (2023) 107446.
- [10] C. Zanuy, G.S.D. Ulzurrun, Impact Resisting Mechanisms of Shear-Critical RC Beams Strengthened with High-Performance FRC, *Appl. Sci.* 10(9) (2020) 3154.
- [11] C. Zanuy, A. García-Sainz, Evaluation of Impact-Critical RC Beams Strengthened with

a Bottom Layer of HPFRCC, Struct. Eng. Int. 33(1) (2023) 41-51.

- [12] C. Zanuy, G.S.D. Ulzurrún, M. Curbach, Experimental determination of sectional forces in impact tests: Application to composite RC-HPFRCC beams, Eng. Struct. 256 (2022) 114004.
- [13] G.S.D. Ulzurrún, C. Zanuy, Time-Variation of Shear Forces Affecting the Impact Resistance of RC Beams, Hormigón y Acero. 75 (2024) 302-303.
- [14] G.S.D. Ulzurrún, C. Zanuy, Dynamic shear force-bending moment interaction diagrams in RC beams under impact, Eng. Struct. 308 (2024) 118021.
- [15] N. Banthia, C. Yan, K. Sakai, Impact resistance of fiber reinforced concrete at sub-normal temperatures, Cem Concrete Comp. 20(5) (1998) 393-404.
- [16] X.X. Zhang, G. Ruiz, R.C. Yu, M. Tarifa, Fracture behaviour of high-strength concrete at wide range of loading rates, Int. J. Impact Eng. 36 (2009), 1204-1209.
- [17] P.C. Jia, H. Wu, Q. Fang, An improved 2DOF model for dynamic behaviors of RC members under lateral low-velocity impact, Int. J. Impact Eng. 173 (2023), 104460.
- [18] D.M. Cotsovos, A simplified approach for assessing the load-carrying capacity of RC beams under concentrated load applied at high rates. Int. J. Impact Eng. 37 (2010) 907-917.