

INFLUENCIA DEL TIPO DE FIBRA EN LA RESISTENCIA AL IMPACTO DE HRF

Juan C. Vivas¹, María C. Torrijos², Graciela Giaccio³, Raúl Zerbino²

¹ Becario doctoral CONICET. Facultad de Ingeniería UNLP-LEMIT, La Plata, Argentina
juancarlos.vivas@ext.ing.unlp.edu.ar.

² Investigador CONICET. Facultad de Ingeniería UNLP-LEMIT, La Plata, Argentina.

³ Investigador CIC-LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina.

RESUMEN

Es conocido que las fibras confieren tenacidad al hormigón y particularmente mejoran el comportamiento frente a impactos y otros tipos de acciones dinámicas. La contribución de un dado tipo y dosis de fibras a la capacidad estructural del hormigón se valora en base a la performance del compuesto, el Hormigón Reforzado con Fibras (HRF), en términos de su resistencia residual generalmente determinada en ensayos normalizados de flexión. Considerando que muchas estructuras que incorporan HRF se encuentran sometidas a impactos, es de interés valorar la influencia del tipo de fibra sobre la respuesta al impacto del HRF y explorar la vinculación entre los parámetros estáticos y dinámicos, así como los factores que los afectan. En este trabajo se evalúa la respuesta de HRF frente a impactos repetidos. Se analizan tres HRF de vidrio, acero y polipropileno con niveles similares de resistencia residual f_{R1} en flexión y de resistencia a compresión. Los resultados muestran que, a pesar de tener los HRF una resistencia residual similar para pequeñas aperturas de fisuras, la respuesta en estado fisurado frente a impactos puede variar significativamente conforme el tipo de fibra.

Palabras claves Hormigón reforzado con fibras, impacto, drop-weight, tenacidad.

INTRODUCCIÓN

La incorporación de fibras en el hormigón aporta mejoras en la tenacidad del material tanto en condiciones de carga estática como dinámicas [1], lo cual posiciona al HRF como una alternativa de interés para diversos problemas en ingeniería. En los últimos años se han realizado importantes avances en este material que incluyen no solo el desarrollo de nuevas fibras sino criterios de valoración de la respuesta del HRF, métodos de cálculo y normas y recomendaciones para HRF que abren la puerta a nuevas aplicaciones [2].

Entre dichos avances, se destaca la incorporación de apartados específicos sobre HRF en el *fib* Model Code 2010 [3] que incluyen criterios de diseño estructural. Una singularidad de la filosofía de este documento, es que la performance del compuesto se valora en base a los parámetros que ponen en evidencia su capacidad postfisuración (resistencia residual) determinados en el ensayo de flexión realizado según la norma EN14651 [4]. En base a dichas resistencias residuales se establecen Clases de HRF y se realiza el cálculo, independientemente de la dosis y tipo de fibras empleadas.

Se han llevado a cabo diversos estudios sobre la respuesta del HRF frente a cargas dinámicas, si bien no hay duda que el uso de fibras es provechoso frente a impactos, aún

no hay consenso respecto al método de valoración más apropiado. Esta vacancia se debe, en principio, a las complejidades del fenómeno del choque. Se han propuesto métodos como el de péndulo oscilante [5] o impacto por caída libre de peso sobre esfera [6], este último es sencillo y valora la resistencia al impacto en base al número de golpes que soporta una rodaja cilíndrica de HRF, pero presenta alta dispersión [7]. Más recientemente se han realizado mejoras y variantes tanto en máquinas, dispositivos, tipo de probetas y metodología incluyendo impacto por caída libre sobre vigas simplemente apoyadas [8, 9]. Varias propuestas contemplan el uso de equipos electrónicos específicos de difícil acceso, lo cual representa una limitación. Sin embargo, y a pesar que se conoce bien que las fibras actúan principalmente una vez iniciadas las fisuras, el estudio del efecto de impactos repetidos en estado fisurado aparece como un área de vacancia.

En el LEMIT-CIC se está desarrollando un método de impacto simple, rápido y sin instrumentación compleja, que permite evaluar HRF con distintos niveles resistentes y valora tanto la respuesta a la fisuración como la contribución de las fibras en estado fisurado [10,11].

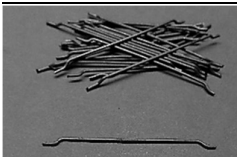
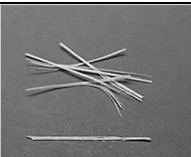
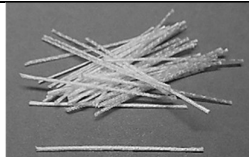
Considerando que existe una gran variedad de fibras de distintos materiales disponibles en el mercado, mediante las cuales y ajustando la dosis, se podrían obtener parámetros postpico comparables bajo esfuerzos de flexión, este trabajo tiene por objetivo evaluar la influencia del tipo de fibras sobre la respuesta al impacto. Para ello se elaboraron HRF con un nivel similar de resistencia a compresión y de resistencia residual f_{R1} en flexión incorporando macrofibras de acero, de vidrio y poliméricas, al analizar los resultados se explora la vinculación entre parámetros estáticos y dinámicos.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Materiales y mezclas

Se elaboraron un hormigón simple de referencia (R) y tres HRF sobre el mismo hormigón de base al que se le incorporaron 25 kg/m³ de fibras acero, 10 kg/m³ de fibras poliméricas o 12 kg/m³ de fibras de vidrio, identificados como A, P y V respectivamente. La Tabla 1 presenta las características de las fibras utilizadas. Se emplearon como materiales cemento CP40, arena silíceo natural y piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo, y un aditivo superfluidificante para lograr una consistencia adecuada. La relación agua/cemento fue 0,40.

Tabla 1: Características de las fibras.

	acero	vidrio	polímero
Fibras de			
Forma	ganchos en extremos	plana	ondulada
Longitud (mm)	50	36	58
Diámetro (mm)	1,00	0,54	0,67
Resistencia a tracción (MPa)	> 1100	> 1700	> 640
Módulo de elasticidad (GPa)	210	72	6,8

Con cada hormigón se repitieron dos pastones moldeando un total de seis prismas de 150x150x600 mm y seis cilindros de 100x200 mm. Las muestras se compactaron por

vibración externa, se curaron en cámara húmeda durante 28 días y luego permanecieron en ambiente de laboratorio. En primer lugar, se realizaron ensayos de caracterización en flexión y compresión, conforme a las normas EN14651 [4] e IRAM 1546 [12] y luego los ensayos de impacto conforme se describe en el siguiente apartado.

Ensayo de impacto

Se realizó un ensayo de impactos repetidos por caída de un peso [10,11]. En estudios preliminares se analizaron variables del ensayo, como la geometría y disposición de las probetas, el patrón de aplicación de las cargas, el método de medición del tamaño de fisura, la variabilidad de los resultados y el número mínimo de muestras requeridas, así como diferentes parámetros de caracterización de la resistencia al impacto.

El ensayo emplea prismas de 150x150x300 mm, con la ventaja que pueden ser aprovechadas las mitades resultantes de los ensayos de flexión estática EN 14651 [4]. A los prismas se les realiza una entalladura de 25 mm de profundidad en el centro de la cara traccionada, con dicha profundidad se ha verificado que no se producen fallas por corte. El uso de prismas con igual sección que en las pruebas de flexión evita diferencias en la orientación de las fibras debidas a la geometría del molde.

El procedimiento de ensayo consiste en caídas repetidas de un proyectil de 5 kg de masa (m), 150 mm de ancho y un extremo inferior de sección semicircular (el que entra en contacto con la muestra) sobre la probeta y midiendo la apertura de la fisura (COD) luego de cada golpe. La Figura 1 muestra la máquina usada y un esquema de la ubicación de la probeta y la configuración del ensayo. La máquina posee dos rieles verticales que guían el proyectil desde que es liberado a la altura previamente establecida hasta impactar sobre el centro de la cara superior de la probeta. La muestra reposa sobre cilindros de acero que permiten el giro en el plano de impacto y, al mismo tiempo, se sujeta a los apoyos mediante barras que evitan el levantamiento durante y después de cada impacto. Uno de los apoyos se fija a la base, mientras que el otro puede desplazarse en dirección horizontal. Esta configuración garantiza que las muestras se encuentren simplemente apoyadas y que sea la probeta el elemento en que se consuma la mayor parte de la energía proporcionada en cada impacto. La medición del ancho de fisura se realiza sobre la cara frontal, sobre una línea marcada 120 mm por debajo de la cara superior, mediante un microscopio digital (Dino-Lite Premier AM4113T de 1.3 megapíxeles) el cual, con el software proporcionado, permite medir con una precisión de 0,0001 mm.

El ensayo consta de dos fases. En la Fase 1, a fin de determinar la resistencia a la fisuración de la matriz, se proporcionan impactos sucesivos con alturas crecientes sobre la muestra sin fisurar. La altura inicial (h_0) adoptada fue 100 mm y el incremento entre cada impacto (Δh_0) 50 mm; solo se aplica un golpe por cada nivel de altura y el proceso finaliza cuando se detecta una fisura visible (COD $\approx 20 \mu\text{m}$). En la Fase 2, con el objetivo de evaluar la contribución de las fibras en estado fisurado, se adopta nuevamente $h_0 = 100$ mm, pero los incrementos Δh_0 son de 100 mm; en este caso se aplican tres impactos en cada nivel de altura. El ensayo finaliza cuando COD es mayor a 3 mm.

El aumento gradual de la altura de caída permite evaluar hormigones con diferentes niveles de resistencia y la aplicación de tres impactos desde igual altura durante la Fase 2 (estado fisurado) evita saltos repentinos de energía permitiendo así un crecimiento gradual de la fisura y mayor sensibilidad para percibir el efecto de cada tipo de fibra. Esto es útil especialmente en hormigones de baja resistencia (o incluso en hormigón simple) ya que de lo contrario no es posible medir el crecimiento de la COD.

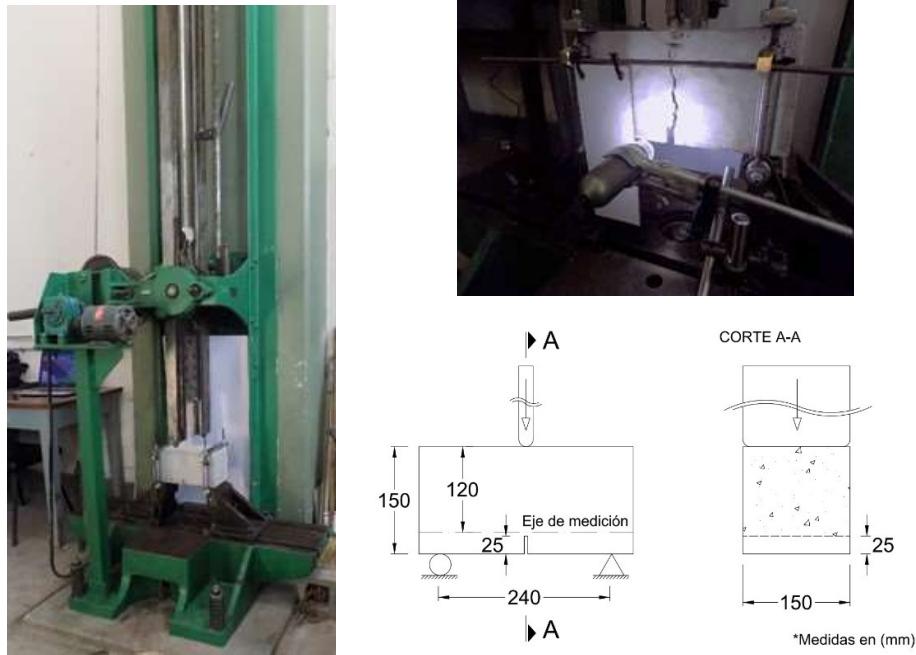


Figura 1: Ensayos de impacto.

La energía de cada impacto se calcula como $m \cdot g \cdot h$ (siendo g la aceleración de la gravedad) y se corresponde a la energía potencial introducida en el sistema antes de comenzar la caída. La energía acumulada es la suma de la energía de todos los impactos recibidos por la probeta hasta un dado momento. Como resultados de ensayo se determinan la energía de primera fisura (E_C) y la respectiva apertura inicial de la fisura (COD_C) en la Fase 1, mientras que en la Fase 2 se calculan la energía postfisuración (E_P), que es la energía acumulada desde la aparición de la fisura hasta el final de ensayo ($COD > 3$ mm) y la velocidad de crecimiento de la COD (V_C) calculada entre aperturas de fisura iguales a 0,5 y 2,5 mm ($V_C = 2 \text{ mm} / (E_{COD0,5 \text{ mm}} - E_{COD2,5 \text{ mm}})$), expresada en $\mu\text{m}/\text{J}$). Un parámetro que engloba ambas fases es la energía total (E_T), calculada como $E_C + E_P$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan los valores medios de resistencia a la compresión (f_c), límite de proporcionalidad (f_L) y las resistencias residuales f_{R1} y f_{R3} , correspondientes a CMOD de 0,5 y 2,5 mm respectivamente, obtenidos en los ensayos de flexión estática. Se observa que los hormigones poseen un mismo nivel de resistencia a compresión lo que era esperado dado que el hormigón de base es similar y las fibras no influyen significativamente en este parámetro.

Tabla 2: Resultados de los ensayos estáticos y de impacto.

Hormigón	Caracterización estática						Ensayo de impacto				
	f_c	f_L	f_{R1}	f_{R3}	f_{R3}/f_{R1}	Clase de HRF	E_C	E_P	E_T	COD_C	V_C
	(MPa)						(J)			(μm)	($\mu\text{m}/\text{J}$)
R	44,2	4,04	-	-	-	-	103	22	125	751	191
A	44,5	4,75	3,27	2,93	0,90	3c	104	202	306	105	19
P	46,3	4,21	2,67	3,67	1,38	2,5e	103	1164	1267	126	2
V	46,6	4,83	2,88	1,67	0,58	3a	138	231	369	131	17

Respecto a la respuesta a flexión estática, la Figura 2 muestra las curvas promedio tensión - apertura de fisura (CMOD). En la misma, y en la Tabla 2, se observa que todos los hormigones poseen similar límite de proporcionalidad (f_L) que se corresponde con la tensión de fisuración de la matriz. En cuanto a la capacidad residual, mientras que conforme lo buscado, la tensión f_{R1} fue similar en todos los HRF, algo mayor en el HRF A, en la tensión f_{R3} se encontraron notables diferencias, siendo mayor en el HRF P, seguido por el A y finalmente el V. En la Tabla 2 también se indica la relación f_{R3}/f_{R1} , al clasificar estos HRF conforme al *fib* Model Code [3] el HRF A es Clase c (presentó un postpico tipo meseta) el HRF V es Clase a (tipo ablandamiento) y el HRF P Clase e (endurecimiento).

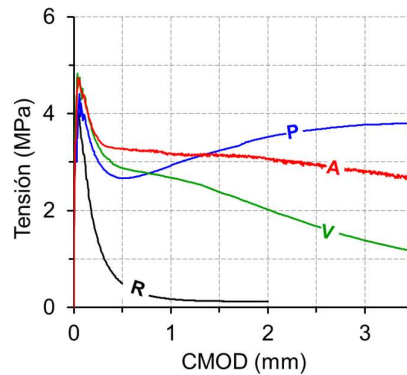


Figura 2: Curvas tensión - apertura de fisura en ensayos de flexión (EN14651).

Para las pruebas de impacto se indican en la Tabla 2 los valores medios de las energías de fisuración y postfisuración (E_C , E_P), la energía total (E_T), la apertura inicial de fisura (COD_C) y la velocidad de crecimiento del COD (V_C). Al representar la energía acumulada - ancho de fisura (COD) se obtienen las denominadas *curvas de impacto*. En la Figura 3 se muestran las curvas de individuales de cada hormigón; para facilidad la comparación se emplea igual escala en el eje vertical. La forma de las curvas es consistente en cada hormigón y la variabilidad entre las mismas fue aceptable en todos los hormigones, siendo mayor en el caso del HRF P.

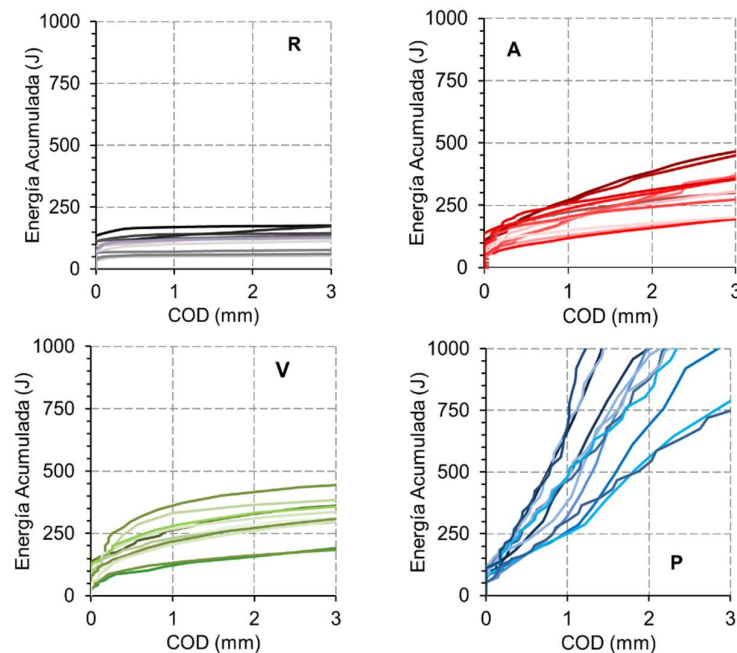


Figura 3: Curvas de impacto individuales obtenidas para los hormigones R, A, V y P.

La Figura 4 izquierda muestra una curva de impacto representativa de cada hormigón, donde cada símbolo se corresponde a un impacto. Puede observarse el efecto de las fibras en el crecimiento de la fisura, una pendiente más alta implica una velocidad de crecimiento de COD (V_C) más baja. Como era de esperarse el hormigón R muestra una falla súbita luego de la primera fisura. En el HRF A la fisura crece rápido a aberturas pequeñas y luego presenta un crecimiento continuo y progresivo. En el HRF V la fisura inicial crece más lentamente que en el anterior, pero luego el crecimiento es continuo y progresivo y con pendiente similar al HRF A. Un comportamiento particular se presenta en el HRF P, mientras para COD menores a 1 mm la forma de la curva de impacto es similar a la de los otros HRF, entre 1 y 2 mm muestra gran capacidad de absorción de energía, para finalmente, volver a crecer V_C una vez que el COD excede los 2 mm.

En la Figura 4 derecha se representa la evolución de la tenacidad estática (calculada como el área debajo de la curva de carga-CMOD de los ensayos de flexión). Como se esperaba, los valores de tenacidad estática son más bajos que los medidos en las pruebas de impacto; esto se debe a que las cargas de impacto se aplican durante un tiempo muy corto y parte de la energía puede ser disipada por otros mecanismos como vibraciones o fricción entre otros, además es bien sabido que la propagación de fisuras es un fenómeno dependiente del tiempo. Aunque, en términos generales, los incrementos en la tenacidad son cualitativamente consistentes entre las pruebas estáticas y las de impacto, se puede ver que, para grandes anchos de fisura el HRF P se comporta mejor frente a impactos de lo que podría haberse predicho en base a las pruebas estáticas. Además, puede notarse que, aunque en el caso estático la disipación de energía del HRF A es equivalente a la del HRF P y superior a la del HRF V, en el caso dinámico este orden se invierte. Aunque esta situación podría variar entre fibras hechas de un mismo tipo de material (acero, polímero, vidrio) ya que para cada uno de ellos existen diversos tipos de fibras, estos resultados demuestran que pueden aparecer comportamientos diferenciales frente a acciones dinámicas, lo que resalta la necesidad de desarrollar pruebas específicas para evaluar la resistencia al impacto.

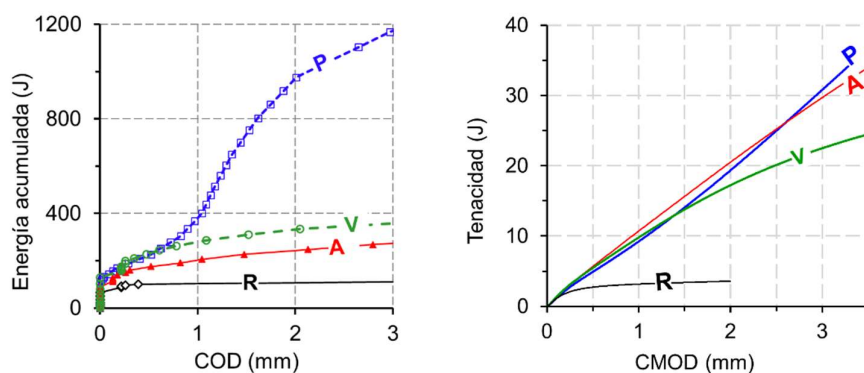


Figura 4: Izquierda: Curvas de impacto representativas de cada uno de los hormigones. Derecha: Variación de la tenacidad con el CMOD en los ensayos de flexión estándar.

En la Figura 5 se comparan los resultados de E_C , E_P y V_C indicando valores medios, máximos y mínimos. En general, la E_C es similar en todos los hormigones, lo que sugiere que esta propiedad podría estar principalmente ligada a la resistencia de la matriz. Cabe recordar que tampoco se verificaron mayores diferencias en el valor de la tensión de fisuración en flexión (ver f_L Tabla 2) entre estos hormigones. Sin embargo, se nota que la E_C es ligeramente mayor en el HRF V, lo que significa que el ensayo tiene sensibilidad y que este tipo de fibra podría mejorar la resistencia a la fisuración. El ancho de la primera fisura COD_C de los HRF fue del orden de $120 \mu\text{m}$ notablemente menor a la del hormigón R (Tabla 2). Parece difícil poder obtener mayores precisiones de este último parámetro.

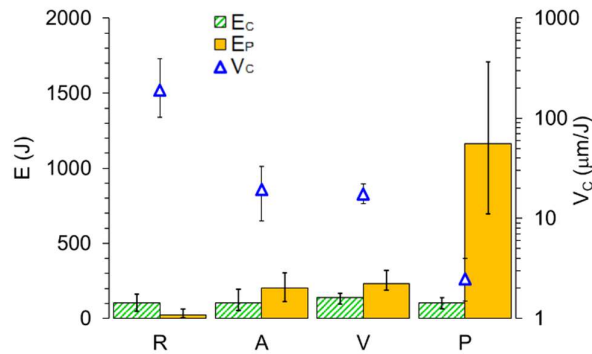


Figura 5: Energías de fisuración (E_C) y postfisuración (E_P) y velocidad de crecimiento de fisura (V_C) de los hormigones R, A, V y P.

En cuanto a la respuesta en estado fisurado, los HRF A y V presentaron similar E_P ($\approx 215\text{J}$) lo que implica que el comportamiento ante impactos no necesariamente se corresponde con el estático (obsérvese los valores f_{R3}), por lo cual, si la aplicación lo amerita, es recomendable evaluar la respuesta al impacto de cada HRF, aunque se conozcan sus características estáticas. Como otro ejemplo, el HRF P exhibió un particular comportamiento postfisuración en impacto, su E_P promedio estuvo en torno a 1164J , y, si bien el f_{R3} de este HRF era importante en magnitud, su mejoría en impacto no fue proporcional, sino mucho mayor. Por su parte, la velocidad de crecimiento de fisuras (V_C) del HRF V fue similar a la del HRF A y ambas fueron mucho mayores que la del HRF P. Frente a esfuerzos estáticos A y V presentaron respuestas distintas, pero en impacto su velocidad de crecimiento fue similar. Finalmente, al observar la respuesta global de los hormigones comparando las E_T , una vez más A y V resultan comparables mientras que el HRF P fue notablemente mayor. Otra alternativa a considerar para diferenciar respuestas al impacto puede obtenerse a partir de la proporción E_C - E_P con respecto a la E_T ; en el caso de A y V la misma es del orden del 33-67% mientras que para P fue 8-92%. Si bien la E_T se presenta como un parámetro adecuado para valorar la respuesta en impacto de los HRF, podría acompañarse con esta relación, que pone en evidencia la contribución particular del material en estado fisurado.

CONCLUSIONES

Mediante un ensayo de impactos repetidos se evaluaron un hormigón simple y tres HRF de distinto material (acero, vidrio y polímero). Dichos HRF, diseñados para alcanzar similares valores de tensión residual f_{R1} , presentaron comportamientos diferenciales a grandes aberturas y por lo tanto distinta calificación según el *fib* Model Code [3].

El objetivo buscado fue evaluar la influencia del tipo de fibra en la respuesta al impacto, caracterizada en términos de las energías acumuladas de fisuración (E_C), postfisuración (E_P) y total (E_T), de la apertura de fisura inicial (COD_C) y la velocidad de crecimiento del COD (V_C). Las principales conclusiones se resumen a continuación.

- Así como ocurre bajo cargas estáticas, la influencia de las fibras ante solicitaciones de impacto se manifiesta particularmente en estado fisurado.
- La energía de fisuración no depende significativamente del tipo de fibra, aunque su incorporación redujo drásticamente la apertura de fisura inicial.
- La forma de las curvas de impacto fue consistente en cada hormigón mostrando una variabilidad aceptable, que fue algo mayor en el caso del HRF P.

- La respuesta frente a impactos en estado fisurado puede modificarse en gran medida conforme el tipo de fibra entre HRF con niveles de resistencia estática similar. Las fibras poliméricas fueron particularmente eficientes a grandes aperturas de fisura.
- La respuesta en impacto de los HRF A y V en términos de energía postfisuración, fue similar aun cuando su capacidad residual en flexión fue diferente, lo que sugiere que la respuesta estática y dinámica de un hormigón no necesariamente se corresponden.
- Los valores de tenacidad estática fueron menores que los medidos en las pruebas de impacto y aun cuando el ordenamiento entre los HRF fue consistente, se verificó que pueden aparecer respuestas diferentes ante acciones dinámicas, lo que resalta, una vez más, la necesidad de pruebas específicas para evaluar la resistencia al impacto.
- La energía total aparece como un parámetro adecuado para valorar la respuesta global en impacto de los HRF, y podría acompañarse con los valores porcentuales E_C-E_P para distinguir la contribución particular en estado fisurado.

Estas conclusiones son válidas para los HRF estudiados dado que existen muchas fibras diferentes aun dentro de cada tipo de material (acero, vidrio polímero); se necesitan más estudios para que las mismas puedan ser generalizadas. Entre las investigaciones en marcha se están estudiando el efecto del nivel de resistencia del hormigón, la respuesta de diversas fibras dentro del mismo tipo de material, la influencia de las variables geométricas de la probeta y la comparación entre los resultados del método de ensayo tradicional de impacto del ACI544 y el ensayo aquí propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de los Ing. Francisco Hours y Pablo Bossio en la ejecución de los trabajos experimentales, así como al LEMIT-CIC, a la financiación de los proyectos CONICET PIP112-201501-00861 y UNLP 11/I244.

REFERENCIAS

- [1] Barr B, Bouamrata A, Baghli A, "Impact strength of FRC materials", Eng. Fract. Mech. 35, (1990) 333–342.
- [2] Zerbino R, "Hormigón reforzado con fibras." Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, ISBN 978-987-47035-1-4, Buenos Aires, (2020), 344 p.
- [3] International Federation for Structural Concrete (fib), 'Model Code Volume 1', (2012).
- [4] Technical Committee CEN/TC 229, EN 14651:2005 Test Method for Metallic Fibered Concrete - Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual) (2005).
- [5] Banthia N, Mindess S, Trottier JF, "Impact Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete," ACI Mater J 93 (5), (1996), 472–479.
- [6] ACI 544.2R-89, "Measurement of properties of fiber reinforced concrete" (1999).
- [7] Badr A, Ashour AF, Platten AK, "Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete" Int. J. Impact Eng. 32 (11), (2006), 1907–1920.
- [8] ACI 544.9R-17, "Report on measuring mechanical properties of hardened fiber reinforced concrete" (2017).
- [9] Yoo DY, Banthia N, "Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast" Constr. Build. Mater 149, (2017), 416–431.
- [10] Vivas J, Zerbino R, "Estudio de la resistencia al impacto de hormigones reforzados con fibras", 19° Cong. Int. Metal. y Mater. CONAMET-SAM, Valdivia, Chile, (2019).
- [11] Vivas JC, Zerbino R, Torrijos MC, Giaccio G, "Evaluación de la resistencia al impacto de hormigones reforzados con fibras", Ciencia y Tecnología de los Materiales, LEMIT 9, (2019), 53-66.
- [12] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, NORMA IRAM 1546. Hormigón de Cemento Portland, Método de ensayo a compresión, Argentina, (1992).