

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS

EVALUATION OF THE IMPACT RESISTANCE OF FIBER REINFORCED CONCRETES ABSTRACT

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

¹ Becario doctoral CONICET, LEMIT-CIC, Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina

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

³ Investigadora Independiente CIC, LEMIT, Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina

RESUMEN

El uso de Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) presenta numerosas ventajas entre las que se destaca la mejora en la resistencia frente a impactos, así como otros tipos de cargas extremas. Si bien existe consenso en relación a los métodos de evaluación estática de la performance del HRF, no existe un método de ensayo de impacto de aceptación general para la caracterización del HRF. Al igual de lo que ocurre frente a sollicitaciones estáticas, en el caso de impacto resulta de interés valorar la contribución de las fibras luego de que el hormigón se ha fisurado. Considerando que en la actualidad se dispone de una gran variedad de fibras, el *fib* Model Code 2010 introdujo un sistema de clasificación en base a la resistencia residual en flexión (EN 14651); sin embargo, no hay referencias sobre la relación entre la capacidad residual medida en ensayos estáticos y la respuesta al impacto. Este trabajo muestra los avances de un programa de investigación que tiene por objetivos proponer un método de ensayo de impacto para evaluar el HRF, que valore tanto la resistencia a la primera fisura, como el comportamiento en estado fisurado. En primer lugar, se describe el método propuesto que es del tipo de impactos repetidos por caída de peso, luego se presentan algunos resultados sobre HRF de acero y finalmente se analiza la relación entre la capacidad residual medida en los ensayos de flexión normalizados y la resistencia al impacto. Los resultados permiten concluir que el método propuesto posee una gran sensibilidad para valorar la respuesta al impacto del HRF.

Palabras clave: HRF, impacto, fibras de acero, tenacidad.

ABSTRACT

The use of Fibre Reinforced Concrete (FRC) has several advantages as improvements in the impact resistance and other types of extreme loads. Although there is consensus regarding the methods of static evaluation of FRC performance, there is no agreement about an impact resistance method for

concrete characterization. It is interesting to evaluate the fibre contribution once the concrete has been cracked by impact loads. Considering the great variety of fibres available nowadays, the *fib* Model Code 2010 introduced a classification system based on flexural residual strengths (EN 14651); however, there are no references on the relationship between the residual capacity measured in static tests and the impact response. This article shows the progress of a research program whose objective is to propose an impact test method that can assess the first crack strength and, also, the post peak behaviour of FRC. In first place, the proposed method, that is a repeated drop-weight impact test, is described, then some results with steel FRC are shown and finally, the relationship between the residual capacity measured on standard flexural tests and the impact strength is analysed. The results allow to conclude that the proposed method has great sensitivity to assess the impact response of FRC.

Keywords: FRC, impact, steel fibres, toughness.

INTRODUCCIÓN

La mejora en la resistencia al impacto representa uno de los atributos importantes de los Hormigones Reforzados con Fibras (HRF) [1, 2]. Esto conduce a que el uso de fibras sea recomendable para la construcción de diversas estructuras que se encuentran potencialmente sometidas a este tipo de sollicitación, como pisos industriales, defensas de autopistas, cerramientos de seguridad y pilas de puentes, entre otros.

Aunque nadie duda que la incorporación de fibras sea provechosa frente al riesgo de impactos, no es sencillo valorar dichos beneficios y tampoco decidir qué tipo y/o dosis de fibras serán necesarios o recomendables adoptar. Se han propuesto diversos métodos para evaluar la resistencia al impacto del HRF, como el péndulo oscilante (tipo Charpy) [3-5], el impacto por caída libre de peso sobre esfera [1, 6], pero aún no existe uno de aceptación general. También se han informado experiencias empleando cargas explosivas [7-9] o diversos proyectiles [10, 11].

La idea de la propuesta del comité 544 de la ACI [1] es sencilla y, más allá de algunas modificaciones en el tiempo, básicamente valora la resistencia al impacto a partir del número de golpes requeridos para llevar a una probeta cilíndrica a la falla, pero este método presenta altos valores de dispersión [12, 13]. En las últimas décadas se han implementado otras técnicas, y una de gran

auge ha sido el llamado impacto por caída libre de peso sobre vigas simplemente apoyadas [14-17] de la cual existen muchas variantes, tanto en máquinas, dispositivos utilizados, características de las probetas y en la metodología misma. La revisión bibliográfica indica que la mayoría de las propuestas contemplan el uso de equipos electrónicos específicos de difícil acceso, lo cual representa una limitación, de lo que surge también la necesidad de definir un ensayo más económico y más sencillo. Por otra parte, y si bien se conoce que las fibras actúan principalmente luego de iniciadas las fisuras, la propagación de las fisuras bajo cargas sucesivas de impacto aparece como un área de vacancia.

En el presente trabajo se muestran los avances de un programa experimental que se inserta en una línea de investigación que se desarrolla en el LEMIT, y forma parte de una tesis doctoral, que tiene entre sus objetivos el de proponer un método de ensayo de impacto para HRF, que valore tanto la resistencia a la primera fisura, como la capacidad residual aportada por diferentes fibras en estado fisurado.

En este artículo en primer lugar, se describe el método propuesto que es del tipo de impactos repetidos por caída de peso, luego se presentan algunos resultados sobre HRF de acero, y finalmente se analiza la relación entre la capacidad

residual medida en los ensayos de flexión estática y la resistencia al impacto.

ENSAYO DE IMPACTO

Máquina de ensayo

En la Figura 1 se muestra la **máquina** de ensayo utilizada, adaptando un equipo originalmente usado en el estudio de probetas metálicas y en la evaluación de soldaduras [18, 19]. La máquina está constituida por dos rieles verticales de acero a través de los cuales se desplaza un **proyectil** denominado martillo o pesa, que es izado a través un sistema de poleas, de forma manual o haciendo uso de un motor eléctrico. Previamente al levantamiento se ubica un activador a la altura deseada, de modo que en el momento que el proyectil alcance la cota del activador, se libere la pesa y descienda para impactar la probeta.

Es necesario resaltar que tanto la masa, como la

forma del proyectil influyen notablemente en el efecto del impacto, también lo hace la geometría del impactor. El impactor es el extremo inferior del proyectil, que entra en contacto con la probeta. En la Figura 1.c se observa el proyectil adoptado en este estudio; se trata de un martillo de masa 5 kg y un impactor lineal de longitud 150 mm y sección semicircular. En estudios preliminares también se realizaron pruebas con martillos de 10, 20, 50 y 75 kg.

Las probetas se ubican sobre dos **apoyos** de acero idénticos (Figura 2). Cada uno de ellos posee un zuncho de fijación que sujeta la muestra y evita el levantamiento durante y posterior al impacto. En ambos apoyos la probeta reposa sobre piezas cilíndricas (debidamente lubricadas) que permiten la rotación de la muestra en el plano del impacto. Asimismo, dado que los apoyos reposan sobre un sistema de rieles, la luz entre ellos puede variar. De este modo, en la metodología propuesta se reproduce un sistema isostático, por lo cual uno

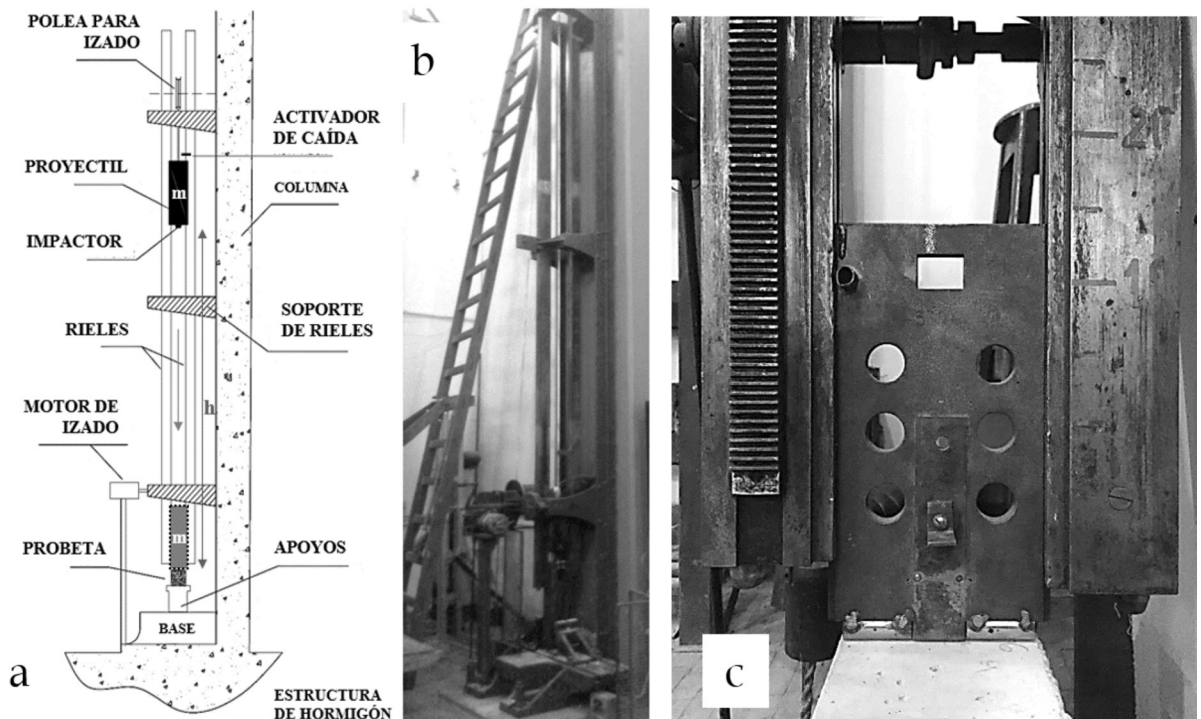


Figura 1. a) Esquema y b) fotografía de la máquina de ensayo c) Proyectil de masa 5 kg

de los apoyos se fija a la base, para simular una articulación fija a tierra, mientras que el otro se deja libre (y debidamente lubricado), de manera que es posible el desplazamiento horizontal y se logra una articulación móvil.

Probetas

Para realizar el ensayo de impacto se adoptaron probetas prismáticas de 150x150x300 mm, considerando que esta geometría permite utilizar los mismos moldes o incluso aprovechar las mitades resultantes del ensayo de caracterización en flexión de HRF según la norma EN14651 [20], con el cual se valora la performance y determina la clase resistente del HRF [21]. Además, esto representa una ventaja adicional ya que, si se desea explorar una posible relación entre la resistencia al impacto y la clase resistente en flexión, las probetas poseen la misma orientación y distribución de fibras, con lo que se minimiza el efecto de estas variables.

58 Como se observa en la Figura 2, las muestras se disponen simplemente apoyadas, y poseen una entalla en el centro de la cara traccionada, de 25 mm de profundidad que se realiza previamente mediante aserrado. La profundidad de entalla se adoptó luego de un estudio preliminar donde se analizaron, experimentalmente, probetas entalladas a diferentes profundidades, comprobando que, con

la profundidad escogida, los esfuerzos de corte no alteraban la forma de la falla, que seguía siendo de flexión localizada. En otro trabajo previo se estudió la variabilidad de resultados sobre 14 muestras de un mismo HRF concluyendo que ensayando un mínimo de 6 probetas el error resultaba menor al 15 % con una confianza del 90 %.

Microscopio digital

Para medir la abertura de la fisura durante el ensayo se utilizó un microscopio digital modelo *Dino-Lite Premier®* AM4113T, de 1.3 Megapíxeles, el cual provee una imagen aumentada de hasta 250x. Con dicha herramienta, en adición del software de obtención y manejo de imagen que el mismo incluye, es posible medir elementos con una precisión del orden 0,0001 mm (ver Figura 3).

Protocolo de ensayo

El método adoptado es del tipo de impactos repetidos por caída de un peso y representa una mejora del propuesto por Vivas y Zerbino [22, 23]. El ensayo consiste en dejar caer repetidas veces un proyectil de masa (m_H) sobre una probeta prismática. Luego de cada impacto se registra la abertura de la fisura (**COD**) a una distancia fija respecto del borde superior de la viga; las alturas de caída del proyectil (h_H) también se van incrementando, variando a lo largo del ensayo.

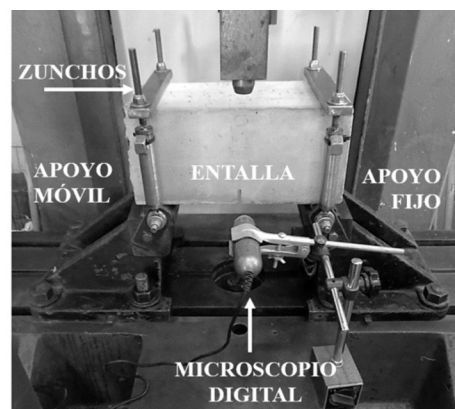
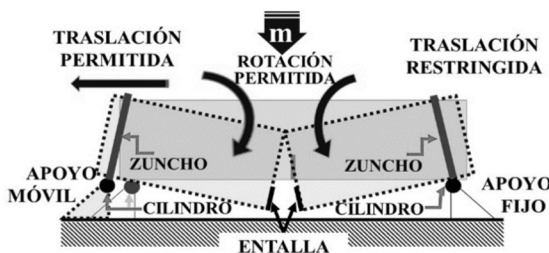


Figura 2. Configuración del ensayo

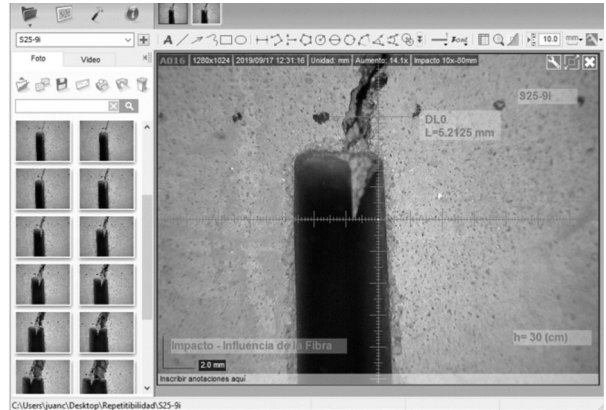
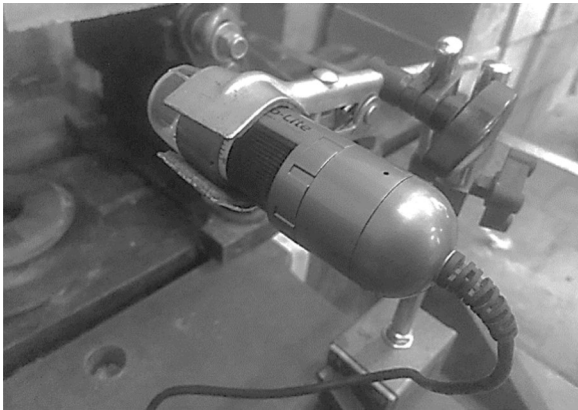


Figura 3. Microscopio digital y medición del ancho de fisura

Tabla 1. Configuración adoptada para los ensayos de impacto.

	m_H [kg]	h_0 [mm]	Δh_H [mm]	Números de golpes	Finaliza
Fase 1	5	100	50	1	Fisuración visible
Fase 2			100	3	COD = 3mm

La Tabla 1 muestra un protocolo de ensayo, el cual consta de dos fases: la primera tiene como objetivo determinar, en términos de energía acumulada, la resistencia a la fisuración de la muestra, y la segunda valorar la contribución de las fibras durante la propagación de la fisura. En este caso se emplea una masa de proyectil de 5 kg (m_H) y una altura inicial (h_0) de 100 mm. El patrón de carga de la **Fase 1** se aplica sobre la muestra sana, mientras el patrón de la **Fase 2** se aplica en estado fisurado. En ambas fases la altura de caída del proyectil va variando en forma creciente. En la Fase 1, la altura inicial (h_0) se va incrementando entre impactos consecutivos en una magnitud Δh_H igual a 50 mm, se suministra un golpe por cada nivel de altura y el proceso se lleva a cabo hasta la aparición de la fisura. Luego se prosigue con la Fase 2 donde, a diferencia de la anterior, se suministran tres impactos en cada nivel de altura y los incrementos en la misma son iguales a 100 mm. El ensayo finaliza cuando la COD es mayor o igual a 3 mm. El uso de alturas crecientes permite evaluar hormigones con grandes diferencias de resistencia sin que se disipe demasiada energía

para cargas bajas; la reiteración de cargas a igual altura en el estado fisurado tiene como finalidad evitar saltos bruscos de energía y de ese modo permitir que la fisura abra paulatinamente en cada nivel de energía aumentando la sensibilidad para percibir el efecto de cada tipo de fibra. Esto es muy útil especialmente en hormigones de muy baja tenacidad ante impactos (o incluso en hormigón simple) para registrar el crecimiento de COD luego de la aparición de la primera fisura.

En la Figura 4 se representa el patrón de cargas de un ensayo, previo y posterior a la fisuración. Las barras, referidas al eje de la izquierda, muestran la energía individual de cada impacto en ambas fases del ensayo, en blanco la fase previa a la fisuración y en negro la energía por cada impacto posterior a la fisura. Por su parte, las líneas, que están referidas al eje de la derecha, representan la energía acumulada en el momento de cada impacto, también para ambas fases, en línea de puntos la energía prefisuración y en línea continua la energía postfisuración. Cabe resaltar que, a modo ilustrativo, en dicha figura se consideró un

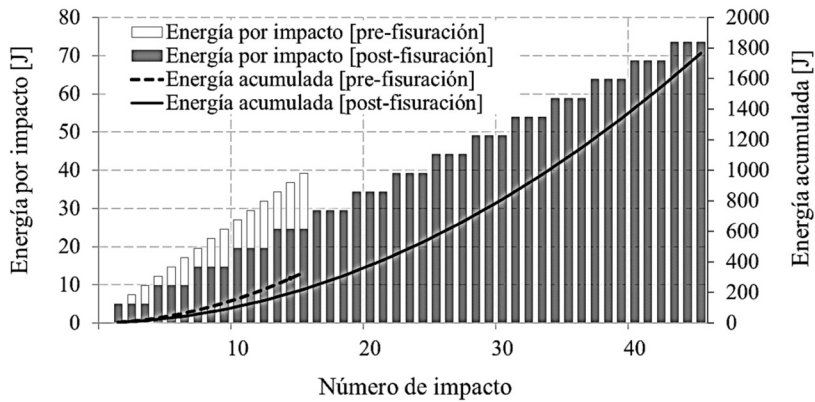


Figura 4. Patrón de cargas, previo y posterior a la fisuración.

ensayo en el cual la fisuración ocurrió en el impacto número 15, a una altura de caída de 800 mm (331 J) y, la falla en la Fase 2 ocurrió en el impacto número 3 de la altura $h_H = 1500$ mm (1766 J). Es obvio que, en otras pruebas, la fisuración y la falla podrían ocurrir en otros puntos, pero el historial de carga de cada en cada Fase sería idéntico.

altura (**h**), la profundidad de entalla (**e**) y la luz libre (**L**) de los prismas. Para ello se define un factor adimensional de geometría (Γ) que surge del cociente entre un factor γ^* correspondiente a la probeta con dimensiones estándares y un factor γ determinado con las dimensiones de cada probeta ensayada, siendo:

60 **Determinación de la energía de impacto y parámetros de análisis**

La determinación de la energía (**E**) de cada impacto se hace como el producto $m_H \cdot g \cdot h_H$ (donde **g**, representa la aceleración de la gravedad) y se corresponde con la energía potencial que posee el sistema antes de iniciar la caída. Aunque en una experiencia previa [23] se determinó que por la naturaleza de la máquina existen ligeras pérdidas de energía (por fricción y vibraciones, entre otros factores), en esta primera instancia se ha decidido despreciarlas considerando que por la naturaleza comparativa del estudio y del método en sí (con patrones de carga idénticos para todas las muestras), ello no resultaría en cambios sustanciales en las conclusiones.

Sin embargo, resulta importante considerar las ligeras variaciones en las dimensiones de las probetas y/o sus condiciones de apoyo. En este sentido se plantea un ajuste de las magnitudes de energía en función del tamaño de la base (**b**), la

$$\gamma = \frac{b(h - e)^2}{L}$$

De esta manera Γ se determina como

$$\Gamma = \frac{\gamma^*}{\gamma} = \frac{\frac{b^* (h^* - e^*)^2}{L^*}}{\frac{b(h - e)^2}{L}} = \frac{L b^* (h^* - e^*)^2}{L^* b (h - e)^2}$$

Adoptando $L^*=240$, $b^*=150$, $h^*=150$ y $e^*=25$ [mm], resulta:

$$\Gamma = 9766 \text{ mm}^2 \frac{L}{b (h - e)^2}$$

Entonces, el ajuste se realiza multiplicando Γ por los valores de energía obtenidos en el ensayo. De manera que la **E** de un impacto será:

$$E = \Gamma \cdot m_H \cdot g \cdot h_H$$

Este factor Γ es aplicado a probetas con pequeñas diferencias en sus dimensiones, próximamente se realizará la verificación del alcance del mismo en base a un estudio paramétrico de las variables geométricas involucradas (L , h , b , e).

La Figura 5 muestra esquemáticamente una curva típica del ensayo, Energía Acumulada vs COD, denominada “*curva de impacto*”. La Energía Acumulada es la suma de las magnitudes de energía de todos los impactos individuales recibidos por la muestra hasta un dado momento. En el mencionado esquema, se definen puntos característicos que posteriormente serán empleados en el análisis: E_C : energía acumulada al momento de la fisuración

COD_C : abertura de la fisura inicial

E_F : energía acumulada posterior a la fisuración

E_T : energía total ($E_T = E_C + E_F$)

V_F : velocidad de apertura de fisura, expresada en mm/J, y calculada como la inversa de la

pendiente de la cuerda entre las aberturas 0,5 y 2,5 mm, las energías respectivas para $COD = 0,5$ y 2,5 mm, se indican como $E_{0,5}$ y $E_{2,5}$.

EXPERIENCIAS

Se muestran a continuación algunos resultados con el fin de poner en evidencia la potencialidad del método para valorar la capacidad de diferentes HRF.

Materiales y mezclas

Se prepararon tres hormigones, uno de referencia sin fibras identificado como R y los dos restantes que incorporan 25 y 50 kg/m³ de fibras de acero, denominados S25 y S50 respectivamente. Las fibras empleadas son de acero con gancho en sus extremos (hooked-ended) de 50 mm de largo y 1 mm de diámetro.

Se empleó un mismo hormigón de base, elaborado con cemento portland tipo CP40, arena silícea natural y piedra partida granítica de tamaño máximo 19 mm; la relación agua/cemento fue 0,40. En todos ellos, para facilitar el manejo de la mezcla en estado fresco, se incorporó una pequeña dosis (menor al 1% del peso de cemento) de un superplastificante de base naftalénica, de forma tal que el asentamiento del hormigón fuese igual a 60 ± 10 mm.

Con cada hormigón, se moldearon prismas de 150x150x600 mm y cilindros de 100 x 200 mm. Todas las probetas fueron compactadas mediante una mesa vibratoria, se desmoldaron a las 24 horas, fueron curadas en cámara húmeda por 28 días, al 95% de humedad relativa y 23°C de temperatura, y posteriormente expuestas al aire en ambiente de laboratorio.

Caracterización mecánica de los hormigones

A los 60 días se realizaron ensayos de compresión y flexión, siguiendo las normas ASTM C-39 [24] y EN14651 [20] respectivamente. En la Figura 6

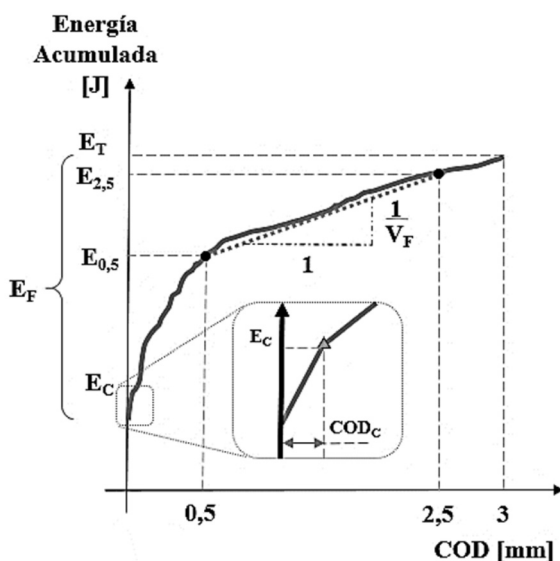


Figura 5. Esquema de curva típica del ensayo.

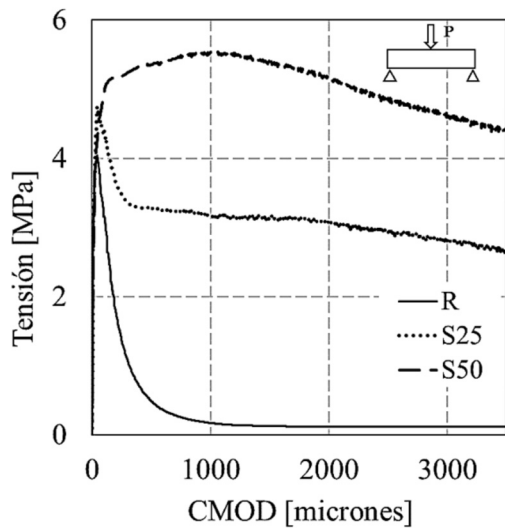


Figura 6. Curvas promedio tensión-apertura de fisura (CMOD) según EN14651.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los hormigones.

Identificación	R	S25	S50
Contenido de fibras [kg/m ³]	-	25	50
f'_{cm} [MPa]	46,2	45,2	46,8
f_L [MPa]	4,04	4,75	4,42
f_{R1} [MPa]	-	3,27	5,36
f_{R3} [MPa]	-	2,93	4,87

se muestran las curvas promedio tensión-apertura de fisura (CMOD) obtenidas para cada hormigón a partir del ensayo de seis prismas. En la Tabla 2 se presentan los valores medios de la resistencia a compresión (f'_{cm}) y los valores de la tensión de la primera fisura (f_L) y las resistencias residuales para aperturas de fisura de 0,5 y 2,5 mm (f_{R1} y f_{R3}).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Respuesta en impacto

En la Figura 7 se muestran las curvas de energía acumulada vs COD, obtenidas para las distintas

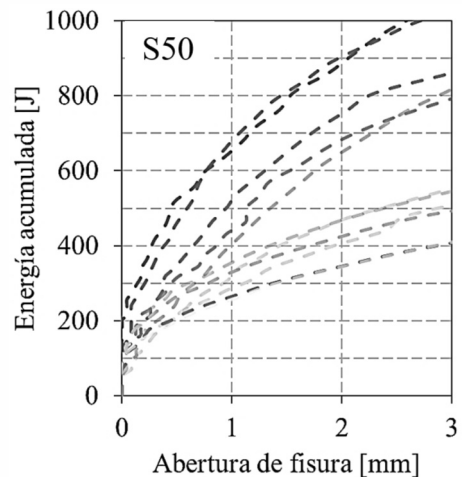
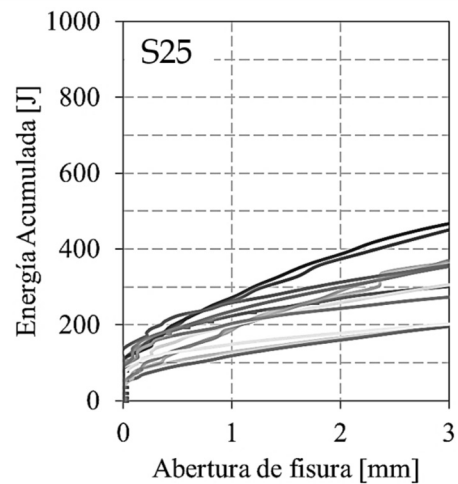
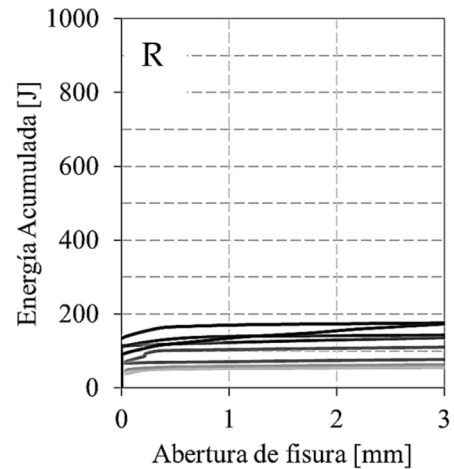


Figura 7. Curvas de impacto para el hormigón (R) referencial, (S25) HRF de 25 kg/m³ de fibras de acero y (S50) HRF de 50 kg/m³ de fibras de acero.

probetas de cada hormigón. Se observan respuestas bastante homogéneas y consistentes dentro de cada mezcla, notando que la dispersión crece con la dosis de fibras. Se aprecia una pendiente post fisuración más homogénea en S25 y R siendo esta última marcadamente menor que con las fibras y en especial para altos contenidos de fibras. La inversa de dicha pendiente representa la velocidad de crecimiento de la abertura de fisura, lo que será analizado más adelante.

En la Figura 8 se comparan una curva de impacto representativa de cada grupo. Es posible observar que el HRF no presentó incrementos en la energía de fisuración con respecto al hormigón de base. En relación al comportamiento postfisuración, como era previsible, el hormigón sin fibras no mostró

capacidad residual y rápidamente alcanzó la falla. Por el contrario, en el HRF aumentó la energía postfisuración y el incremento en la dosis de fibra mejoró a la capacidad resistente (en impacto), y a su vez redujo la velocidad de abertura de la fisura.

La Tabla 3 incluye los resultados de energía de fisuración, postfisuración y total, la apertura de fisura inicial y los cálculos de la velocidad de propagación de la fisura (entre 0,5 y 2,5 mm de apertura). Se verifica la capacidad de las fibras para controlar la fisuración, se reduce el ancho de la primera fisura y, principalmente, surge con claridad que las fibras reducen la velocidad de crecimiento del COD, tanto más cuanto mayor dosis se incorpore.

A modo de síntesis en la Figura 9 se representan los valores promedio y los máximos y mínimos,

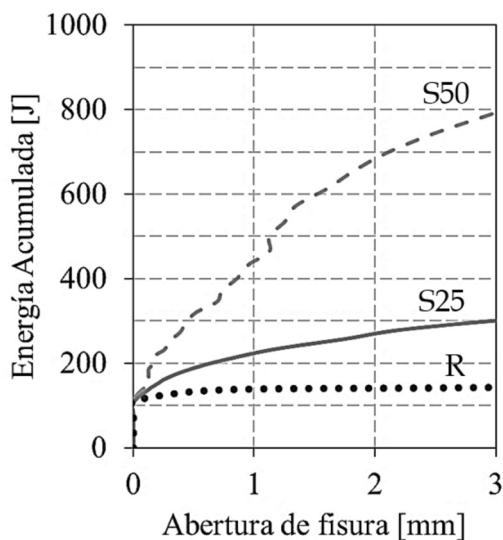


Figura 8. Curvas de impacto representativas por tipo de HRF.

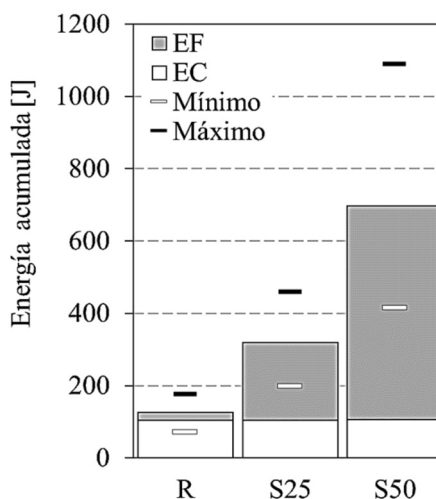


Figura 9. Valores promedio de energía.

Tabla 3. Respuesta en impacto de los hormigones.

	E_C	E_F	E_T	COD_C	V_C
	[J]			[μ m]	[mm/J]
R	104	21	125	833	0,234
S25	104	215	319	116	0,018
S50	105	592	697	59	0,007

que manifiestan la respuesta global de los hormigones. Se observa que, aunque la energía de fisuración fue aproximadamente igual en todos los casos, la energía total creció con la dosis de fibras. La resistencia de la matriz es una propiedad inherente del tipo de hormigón, la fibra de acero no la modifica sustancialmente, pero si controla el tamaño de la fisura inicial. Por otra parte, se observa que, al aumentar el volumen de fibras, la resistencia postfisuración no se incrementó linealmente. En este caso en que se duplicó el contenido de fibras la EF ascendió a más del doble (275%), sin embargo, es de resaltar que a mayores niveles de energía, se incrementó la dispersión. Esta dispersión se asocia a la ramificación de la fisura dependiente de la distribución espacial de las fibras dentro de la viga.

Vinculación entre respuesta estática e impacto

En la Figura 10 se comparan los resultados de los ensayos de impacto con los parámetros obtenidos en los ensayos estáticos de flexión, en particular las resistencias residuales f_{R1} y la f_{R3} , que representan la capacidad del material en estado límite de servicio y en estado límite último respectivamente. Es interesante destacar que tanto la energía fisuración (E_C) como la energía total (E_T) mejoraron con el incremento de las tensiones residuales, en particular, la mejoría es más marcada para la E_C . Se observa una clara tendencia de la velocidad V_F a disminuir con el aumento de la capacidad residual (obsérvese la escala logarítmica).

CONCLUSIONES

A partir de los estudios realizados se puede concluir que:

El método propuesto es capaz de evaluar el desempeño del hormigón frente a acciones de impacto; permite diferenciar la capacidad de diferentes HRF, y valorar el aporte de las fibras tanto en lo relativo a la fisuración inicial (Fase 1) como en lo referido al crecimiento y propagación de las fisuras ya existentes (hormigón en estado fisurado, Fase 2).

Los dispositivos empleados no son complejos y se puede realizar una caracterización frente al impacto del HRF empleando las mismas probetas que se utilizan para la caracterización y clasificación estática de la performance.

Las fibras mejoran la respuesta del hormigón frente a acciones de impacto, variando la capacidad según la dosis de fibras. Si bien se encontró una relación entre los parámetros estáticos y dinámicos, esta podría estar afectada por el tipo de fibra, aspecto que se encuentra en estudio en la actualidad. Las fibras de acero mostraron una alta efectividad y la mayor dispersión para altas dosis de fibras, se vincula con una mayor variabilidad en la distribución de las mismas a lo largo de la superficie de fractura.

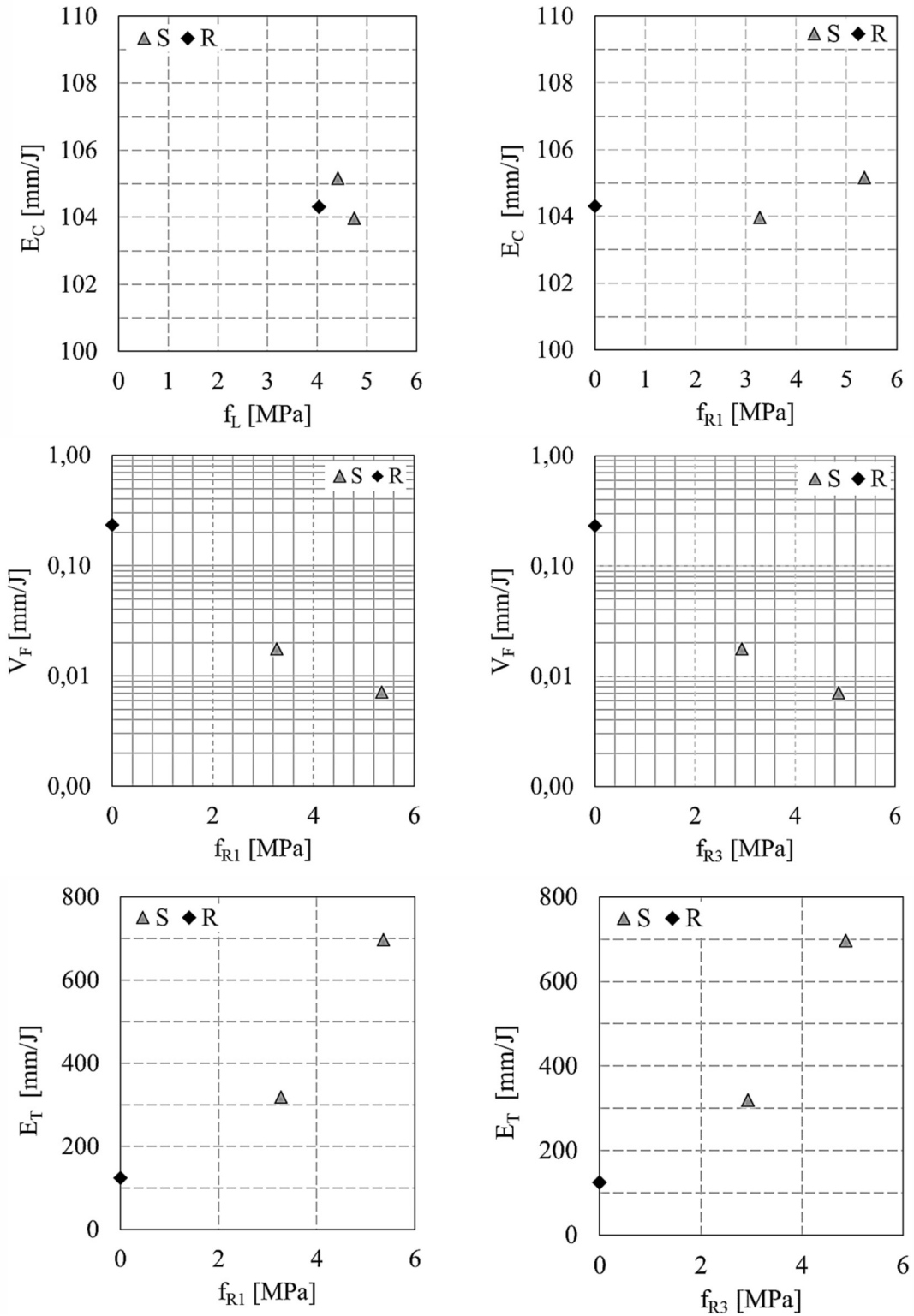


Figura 10. Comparación de parámetros del ensayo de impacto y ensayo de caracterización estático.

REFERENCIAS

- 1.- ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete 544.2R-89," 1999.
- 2.- ACI Committee 544, "Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber Reinforced Concrete. ACI 544.9R-17," 2017.
- 3.- A. P. Hibbert, "Impact Resistance of Fibre Concrete," University of Surrey, 1979.
- 4.- N. Banthia, S. Mindess, and J.-F. Trottier, "Impact Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 93, no. 5, pp. 472–479, 1996.
- 5.- J. Edgington, "Steel Fibre Reinforced Concrete. Volume A," University of Surrey, 1973.
- 6.- K. Ramesh, K. Arunachalam, and S. Rooban Chakravarthy, "Experimental Investigation on Impact Resistance of Flyash Concrete and Flyash Fiber Reinforced Concrete," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 3, no. 2, pp. 990–999, 2013.
- 7.- G. Giaccio et al., "Tenacidad y respuesta frente a cargas explosivas en hormigones de muy alta resistencia reforzados con fibras," en *VII Congreso Internacional - 21a Reunión Técnica De La AATH*, 2016, pp. 669–676.
- 8.- M. Drdlová, J. Buchar, J. Krátký, and R. Řídký, "Blast resistance characteristics of concrete with different types of fibre reinforcement," *Struct. Concr.*, vol. 16, no. 4, pp. 508–517, 2015.
- 9.- C. Wu, D. J. Oehlers, M. Rebstrost, J. Leach, and A. S. Whittaker, "Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs," *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 9, pp. 2060–2069, 2009.
- 10.- H. Wu, Q. Fang, X. W. Chen, Z. M. Gong, and J. Z. Liu, "Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510-1320 m/s," *Constr. Build. Mater.*, vol. 74, pp. 188–200, 2015.
- 11.- C. Pontiroli, B. Erzar, and E. Buzaud, "Concrete behaviour under ballistic impacts: Effects of materials parameters to penetration resistance and modeling with PRM model," *Comput. Model. Concr. Struct.* - Proc. EURO-C 2014, vol. 2, pp. 685–693, 2014.
- 12.- X. C. Zhu, H. Zhu, and H. R. Li, "Drop-weight impact test on U-shape concrete specimens with statistical and regression analyses," *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 9, pp. 5877–5890, 2015.
- 13.- A. Badr, A. F. Ashour, and A. K. Platten, "Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 11, pp. 1907–1920, 2006.
- 14.- N. P. Banthia, "Impact Resistance of Concrete," The University of British Columbia, 1987.
- 15.- X. X. Zhang, G. Ruiz, and R. C. Yu, "A new drop weight impact machine for studying the fracture behaviour of structural concrete," *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 98, no. April, pp. 251–259, 2008.

- 16.- M. Wu, C. Zhang, and Z. Chen, “Drop-weight tests of concrete beams prestressed with unbonded tendons and meso-scale simulation,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 93, pp. 166–183, 2016.
- 17.- D. Y. Yoo and N. Banthia, “Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 416–431, 2017.
- 18.- American Society for Testing and Materials, ASTM E208-17(2018) Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels, vol. 06. 2000, pp. 1–14.
- 19.- American Society for Testing and Materials, ASTM E436 – 03 Standard Test Method for Drop-Weight Tear Tests of Ferritic Steels, vol. 91. 1997, pp. 1–6.
- 20.- Technical Committee CEN/TC 229, “EN 14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) Méthode,” 2005.
- 21.- International Federation for Structural Concrete (*fib*), Model Code Volume 1. 2010.
- 22.- J. Vivas and R. L. Zerbino, “Estudio de la Resistencia al Impacto de Hormigones Reforzados con Fibras,” en *19º Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. CONAMET-SAM*, 2019, vol. 5, pp. 4–5.
- 23.- J. Vivas, “Ensayo para el estudio de la resistencia al impacto de hormigones con fibras,” en *Jornada de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Cemento y Hormigón*, 2019, pp. 5–8.
- 24.- American Society for Testing and Materials, ASTM C 39M:2003, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. 2003, pp. 1–5.