

## Ensayo de impactos crecientes para hormigones reforzados con fibras

J. C. Vivas<sup>a\*</sup>

<sup>a\*</sup>Becario doctoral, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina. Laboratorio Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. CP 1900, La Plata, Argentina. [juancarlos.vivas@ext.ing.unlp.edu.ar](mailto:juancarlos.vivas@ext.ing.unlp.edu.ar)

Recibido: 30 de abril de 2021

Aceptado: 23 de junio de 2021

### RESUMEN

La resistencia al impacto es una característica sobresaliente de los Hormigones Reforzados con Fibras (HRF) y a pesar de la gran cantidad de métodos propuestos para valorar esta propiedad, ninguno es de amplia implementación. Uno de los ensayos más difundidos es el propuesto por el Comité 544 del ACI, prueba que ha resaltado por su rapidez y simpleza, pero su alta dispersión en los resultados la han hecho poco confiable. Por ello, en el proyecto que se lleva a cabo en el LEMIT y la FI-UNLP, cuyo objeto es evaluar el desempeño en impacto de distintas clases de HRF, se ha diseñado un nuevo método denominado de Impactos Crecientes que, es sencillo, económico y permite evaluar el comportamiento del compuesto en base a la energía que provoca la fisuración y el aporte de los distintos tipos y contenidos de fibras en estado fisurado. Este trabajo describe el método de ensayo y se comparan sus resultados con los obtenidos con el método del ACI-544, para un hormigón reforzado con 30 kg/m<sup>3</sup> de fibra de acero. Los parámetros del método de Impactos Crecientes presentaron una significativa disminución de la variabilidad respecto a los del ACI (de hasta 42%) y con magnitudes aceptables (<30%) para este tipo de material.

**PALABRAS CLAVE:** hormigón reforzado con fibras, ensayo de impacto, impactos crecientes, ensayo ACI 544, fibras de acero

### ABSTRACT

Impact resistance is an outstanding characteristic of Fibre Reinforced Concrete (FRC) while there are many proposed methods to assess this property, none has been widely implemented. The most widespread test is the one proposed by the ACI Committee 544. This test is well-known for quickness and simplicity, but due to the high dispersion of the results it has become unreliable. For this reason, in the project carried out at LEMIT and FI-UNLP, with the aim to evaluate the impact performance of different classes of FRC a new method, called of Increasing Impacts, has been designed. This method is simple, economical, and allows to evaluate the compound behaviour based on the energy that causes cracking and the contribution in cracked state of different types and contents of fibres. In this paper the test method is described, and the results from the ACI-544 method and the Increasing Impacts method are compared for a reinforced concrete with 30 kg/m<sup>3</sup> of steel fibre. The parameters of the Increasing Impacts method presented a significant decrease in the variability compared to the ACI Method (up to 40%), and acceptable magnitudes (<30%) for this material type.

**KEYWORDS:** fibre reinforced concrete, impact test, increasing impacts, ACI 544 test, steel fibres

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Vivas, J. C. (2021). Ensayo de impactos crecientes para hormigones reforzados con fibras. *Revista Hormigón*, 60, 45–56.

## 1. Introducción

La incorporación de fibras en el hormigón mejora la resistencia al impacto del material. Para valorar esta propiedad se han implementado diversos tipos de ensayos, como el péndulo de Charpy, ensayos con deformación constante, pruebas de impacto balístico, la barra de Split-Hopkinson, pruebas con explosivos y los ensayos de caída gravitatoria (simple o repetida) de un proyectil [1]. Este último es el de mayor implementación, pero a pesar de sus muchas variantes, ninguna es de aplicación generalizada, cada propuesta cuenta con ciertas limitaciones. Sin embargo, uno de los ensayos más difundidos de este tipo es el propuesto por el Comité 544 del *American Concrete Institute* (ACI) [1], que es una prueba muy simple en que se aplican impactos repetidos con un pisón Proctor [2] sobre una esfera de acero apoyada sobre la muestra (disco cilíndrico de 150 de diámetro y 63,5 mm de espesor). El número de impactos registrados hasta la primera fisura de la muestra y el necesario para llevarla a la falla, que es cuando los trozos de las muestras tocan en tres puntos a la base, permite comparar cualitativamente el desempeño del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) y comparar la resistencia al impacto de diferentes espesores de material.

El problema del citado ensayo del ACI es la alta variabilidad de sus resultados, presentando valores de coeficientes de variación (CV) entre 50 y 60% [3], lo cual ha sido demostrado por varios investigadores y admitido por el mismo Comité 544 [1,4]. Para encontrar un valor medio confiable de la resistencia al impacto implementando este método, sería necesaria la realización de un gran número de pruebas, incluso varias decenas, lo que en la práctica es inviable. Por tal motivo, en los últimos años, muchos investigadores han centrado sus estudios en modificar el ensayo del Comité ACI-544 y otros han tratado de lograr pruebas de igual simpleza, pero de menor variación.

Bard [5] propuso una modificación del método ACI-544, que consiste en realizar entallas

triangulares de 25 mm de lado y diametralmente opuestas sobre probetas cilíndricas de igual diámetro (150 mm) pero con 50 mm de espesor. También sustituyó la esfera por un dispositivo que distribuye la carga linealmente en la región entre las entallas y definió el fin de la prueba cuando ocurriese la separación completa de las mitades de la muestra. Sus modificaciones redujeron los CV aproximadamente de 60% a un 40% en la resistencia a la primera fisura, y de 50% a 35% en la resistencia última al impacto.

Zhu et al. [3], diseñaron un método alternativo, cambiando la forma de la probeta de cilíndricas a tipo U, también sustituyeron el pisón Proctor por un dispositivo propio que permite emplear proyectiles de diferentes masas y definieron una nueva altura de caída en 400 mm. La utilización de una probeta de diferente geometría, fue para poder definir con precisión los momentos de fisuración y falla, y así evitar uno de los grandes problemas del ensayo del ACI-544 que es la ambigüedad para establecer dichos puntos. En esta propuesta la probeta se dispone en forma invertida sobre un soporte de acero y se proporcionan impactos repetidos idénticos. Se registra el número de impactos dados hasta la aparición de la fisura en la cresta de la U y los dados hasta lograr la separación en dos partes de la muestra. En este trabajo se probaron 4 masas diferentes (de 875, 800, 675 y 500 g) y se registraron CV entre 17 y 30%.

Más recientemente, Abid et al. [6] presentaron dos nuevas propuestas de modificaciones al método del ACI-544. Propusieron modificar la base de acero por una cama de arena fina, también entallar la cara superior del espécimen en línea recta sobre un diámetro o en forma de cruz sobre dos diámetros perpendiculares. En estos casos también sustituyeron la esfera de acero por dispositivos tipo cuchillas dispuestos sobre la entalla. Sus resultados muestran que el uso de la entalla lineal en combinación del lecho de arena redujo la dispersión de los resultados en un 60% y el número de ensayos requeridos para un error máximo del 10% con

90% de confianza se redujo de 55 a menos de 10, respecto al método del ACI.

Los problemas del método ACI-544 que ya han sido abordados, obteniendo mejores resultados que la prueba original son: (1) la fisuración con orientación aleatoria, ocasionada por la no existencia de entallas y por proporcionar la carga de manera puntual, (2) el apoyo inestable entre la base de acero y la probeta, y (3) la definición ambigua del momento de la fisuración y el fin de la prueba.

Sin embargo, restan otros aspectos relevantes que deben resolverse, como dificultades en torno al tamaño del espécimen, ya que las dimensiones de las muestras implementadas actualmente son reducidas, por lo que no representan el comportamiento de toda la masa del hormigón, limitan el tamaño máximo del agregado de los HRF que podrían evaluarse y perjudican la orientación de las fibras. Otro problema sin resolver tiene que ver con la magnitud de carga aportada en cada impacto, hay investigaciones [7] que demuestran que en ensayos de impactos repetidos a igual magnitud de energía podría pasar que ciertos hormigones no alcancen la falla o se alcance para un número muy alto de impactos, por ello frecuentemente no existe una justificación a la energía de impacto seleccionada y varios autores [3] luego de sus experiencias recomiendan ajustar la masa y altura de caída del proyectil para que el ensayo tenga duraciones más prácticas. Finalmente, y no menos importante, tanto el método del ACI-544 como las modificaciones propuestas siguen siendo ensayos cualitativos en que se comparan cierto número de impactos, pero no se han definido ni medido parámetros cuantitativos con aplicaciones prácticas.

Por ello, y considerando lo anterior, el autor ha diseñado un nuevo método de ensayo, que a continuación se denominará de Impactos Crecientes, en el que se emplea la misma máquina de los *Drop-Weight Test* sobre metales [8,9] y en que se evalúan probetas prismáticas (150 x 150 x 300 mm), simplemente apoyadas y entalladas al centro de la cara traccionada, siguiendo un patrón de impactos con incrementos graduales de

energía. De dicho ensayo ya se ha hecho un estudio estadístico para determinar el número mínimo de ensayos requeridos, se ha estudiado la influencia de cada una de las variables de la prueba [10] y se lo ha implementado para evaluar el efecto en la resistencia al impacto de distintos tipos y dosis de fibras [11,12].

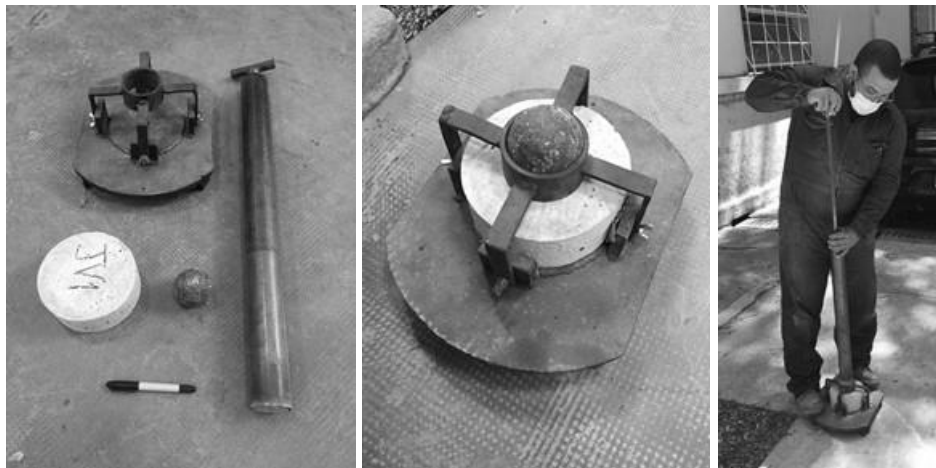
En el presente trabajo se presenta una comparación de los resultados obtenidos con el método propuesto versus el originalmente propuesto por el Comité ACI-544, para ello se evalúa un HRF de acero con una dosis típica de fibras usada en distintas aplicaciones de ingeniería.

## 2. Metodología de ensayo

### 2.1. Ensayo de impacto ACI-544

Para esta prueba se emplean los elementos mostrados en la Fig. 1 (izquierda): un martillo de compactación manual de Proctor [2] (4,54 kg de masa y 457 mm de altura de caída), una esfera de acero de alta resistencia (63,5 mm de diámetro) y la base de acero para posicionar tanto la esfera como la probeta. La probeta debe ser un cilindro de hormigón de 150 mm de diámetro y 63 mm de altura que se moldea de acuerdo con los procedimientos recomendados para los cilindros de compresión [13] pero en una única capa, también puede ser obtenida a partir del aserrado de cilindros de mayor altura.

La disposición de los elementos de ensayo se observa en la Fig. 1 (centro). Antes de colocar la muestra, la base debe apoyarse sobre una superficie rígida, preferiblemente de hormigón y lubricarse con vaselina o grasa. Luego se coloca la probeta centrada entre las 4 lengüetas (si es el caso, la cara de moldeo debe posicionarse hacia arriba) y sobre esta se dispone la esfera de acero, dentro del soporte destinado para ello, en la que a su vez se apoya con firmeza el martillo de compactación manual, como se ve en la Fig. 1 (derecha).



**Figura 1.** Izquierda: Configuración del ensayo de impacto ACI 544 [1]. Centro: Probeta y dispositivos, disposición de la probeta. Derecha: Ejecución de la prueba.

Antes de iniciar el ensayo, se deben colocar separadores de elastómero (o similar) entre la probeta y las lengüetas para restringir el movimiento horizontal de la misma, acto seguido, se proporcionan sucesivamente impactos, levantando completamente el martillo y dejándolo caer libremente sobre la esfera. Una vez aparecida la primera fisura, se registra el número de impactos proporcionados ( $N_1$ ) y se retiran las piezas de elastómero. Luego se siguen proporcionando impactos, de la misma forma, hasta que la muestra toca tres de las cuatro lengüetas que tiene la base. También se registra el número de impactos de esta etapa ( $N_2$ ). Para el ensayo se puede utilizar un sistema automático con contador.

“El número de impactos que produjo la fisuración y la falla, sirven como una estimación cualitativa de la energía absorbida

por la muestra y se pueden utilizar para demostrar las mejoras del hormigón al incorporar fibras o comparar relativamente el desempeño de diferentes HRF. El método también se puede adaptar para comparar la resistencia al impacto de diferentes espesores de material” [1].

## 2.2. Ensayo de Impactos Crecientes

En este ensayo se emplea la máquina mostrada en la Fig. 2 (izquierda). Es una máquina usada en los ensayos de desgarramiento (ASTM E436) [8] y para la determinación de la temperatura de transición dúctil-frágil sobre aceros ferríticos (ASTM E208) [9]; la misma posee principalmente dos partes: el sistema de desplazamiento del proyectil, compuesto por un par de rieles que guían verticalmente el movimiento y permiten



**Figura 2.** Izquierda: Configuración de ensayo de impactos crecientes, máquina de ensayo LEMIT. Centro: Proyectil de masa 5 kg. Derecha: Disposición de la probeta.

la variación de la altura de caída (Fig. 2, centro); y el sistema de soporte que, mediante los zunchos de fijación, un apoyo fijo y otro móvil, hace posible disponer las probetas simplemente apoyadas como se muestra en la Fig. 2 (derecha).

Aunque en esta máquina es posible usar proyectiles de distintas masas ( $m$ ), se ha establecido implementar uno de 5 kg, cuyo extremo inferior ha sido modificado para lograr un impacto lineal y uniforme en todo el ancho del espécimen. La probeta es un prisma de 150 x 150 x 300 mm con una entalla ( $e$ ) aserrada en el centro de la cara traccionada a una profundidad de 25 mm, y que se apoya con una luz libre entre los soportes de 240 mm. Con estas dimensiones es posible preparar las probetas a partir de los mismos moldes de las vigas de los ensayos de flexión estática ASTM1609 [14] y EN14651 [15], incluso podrían usarse las mitades resultantes luego de ejecutar este último.

Al igual que el método del ACI, descrito en la sección anterior, este ensayo es del tipo de impactos repetidos, pero aplicados de forma creciente en dos Fases. En la Fase 1 el primer impacto se da desde una altura de caída ( $h$ ) de 100 mm y los posteriores se aplican incrementando la altura ( $\Delta h$ ) en 50 mm entre cada uno; esta etapa finaliza al aparecer la fisura. Luego inicia la Fase 2, en la cual, a diferencia de la anterior, se aplican tres impactos desde cada nivel de altura; siendo la altura inicial igual a 100 mm, y el incremento entre sucesivos niveles de altura  $\Delta h$  es 100 mm. Esta Fase finaliza cuando la abertura de fisura, medida como se explicará más adelante, es mayor a 3 mm. Todas las alturas son medidas respecto a la cara superior de la probeta.

En toda la prueba, luego de cada impacto, se mide la abertura de la fisura (COD) a 120 mm por debajo de la cara superior de la probeta. Lo cual puede hacerse con cualquier herramienta o dispositivo que soporte las

vibraciones y fuerzas del impacto y que, además, proporcione una exactitud de al menos la centésima de un milímetro. En el caso de este trabajo se empleó un microscopio digital (Dino-lite Premier AM4113T) posicionado con una base magnética suficientemente alejado de la probeta (ver Fig. 2, derecha), con una separación de 80 mm respecto a la superficie lateral del prisma y un aumento entre 10x y 20x posible medir la COD con una precisión de hasta 0,0001 mm.

La gráfica resultante de este ensayo se denomina "Curva de Impacto" y se construye representando en el eje de las abscisas la COD medida luego de cada caída y en el eje de las ordenadas la energía acumulada ( $E^*$ ) en dichos instantes. La energía de cada impacto se calcula multiplicando  $m.g.h$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad, y la  $E^*$  se corresponde con la sumatoria de las energías de los impactos proporcionados antes de un punto específico del ensayo. Así, los parámetros resultantes de este ensayo, empleados para el análisis, son los siguientes: de la Fase 1 se obtiene la Energía de Fisuración ( $E_C$ ), que es la energía acumulada hasta la aparición de la primera fisura y la abertura de dicha fisura inicial (COD<sub>C</sub>). De la Fase 2 surgen la  $E_P$ , que es la energía acumulada posterior a la fisura y hasta el fin de la prueba, la  $V_C$  o la tasa de fisuración, calculada según (1), donde  $E_{0,5}$  y  $E_{2,5}$  son respectivamente las energías acumuladas a las COD de 0,5 y 2,5 mm. El parámetro global del ensayo es la energía total ( $E_T$ ), que se obtiene de la suma de  $E_C + E_P$ .

$$V_C = \frac{2000}{E_{0,5} - E_{2,5}} \text{ (}\mu\text{m/J)} \quad (1)$$

Más detalles de la máquina y otros dispositivos empleados en el ensayo se pueden observar en los trabajos previamente citados [11,12].

### 3. Ejemplo de aplicación

#### 3.1. Proporciones y propiedades del HRF

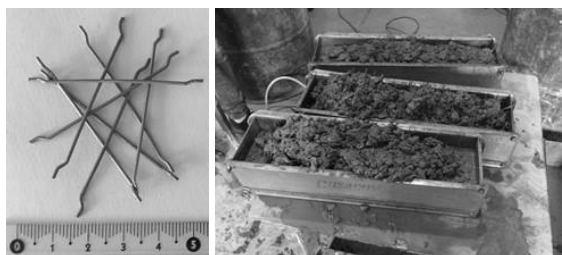
Se preparó un HRF con  $655 \text{ kg/m}^3$  de arena silíceo natural fina,  $199 \text{ kg/m}^3$  de arena de trituración,  $995 \text{ kg/m}^3$  de piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo,  $350 \text{ kg/m}^3$  de cemento tipo CPF40 [16] (relación agua/cemento de 0,45), una pequeña dosis (0,9% en peso de cemento) de un aditivo reductor de agua de medio rango y  $30 \text{ kg/m}^3$  de fibras de acero de bajo carbono con ganchos en sus extremidades de 50 mm de longitud, 1 mm de diámetro y resistencia a tracción del filamento mayor a 1100 MPa (ver Fig. 3).

El HRF presentó un asentamiento de 100 mm y con este se moldearon 6 prismas de  $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}$ , 14 cilindros de  $150 \times 65 \text{ mm}$  y 4 cilindros de  $100 \times 200 \text{ mm}$ , que fueron compactados en mesa vibradora, desmoldados a las 24 horas y curados en cámara húmeda durante 1 año por razones operativas.

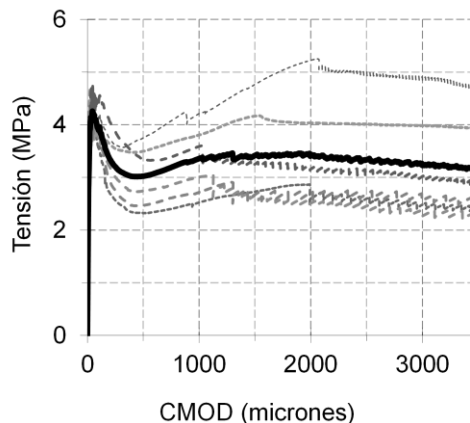
Antes de los ensayos, las muestras permanecieron en ambiente de laboratorio por dos semanas, para evitar cambios en el contenido de humedad.

Previo a las pruebas de impacto se ejecutaron los ensayos de caracterización estática en flexión, siguiendo los lineamientos de la norma EN14651 [15], y de compresión uniaxial, conforme a la norma IRAM 1546 [17].

La resistencia media a la compresión del HRF fue igual a 37 MPa (C.V. 5%). La Fig. 4 muestra las curvas tensión – abertura en la



**Figura 3.** Fibra empleada (izquierda) y vista del hormigón fresco en los moldes (derecha).



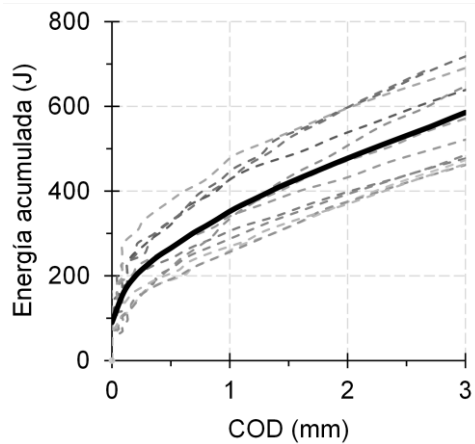
**Figura 4.** Curvas individuales y media tensión – abertura en la boca de fisura (CMOD) obtenidas a partir de ensayos de flexión según EN 14651.

boca de fisura (CMOD) obtenidas a partir de ensayos de flexión. Las líneas segmentadas corresponden a los ensayos individuales y la continua a la curva media. Se obtuvieron como resultados una tensión de primera fisura ( $f_L$ ) igual a 4,26 MPa (C.V. 7%) y tensiones residuales  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  (calculadas para CMOD de 500 y 2500  $\mu\text{m}$ ) iguales a 3,02 (C.V. 18%) y 3,34 (C.V. 28%) MPa respectivamente. Nótese que se han indicado los Coeficientes de Variación (C.V.) y que los valores se mantuvieron por debajo del 30 % como es usual en este tipo de materiales. Según el *fib Model Code 2010* [18] el HRF preparado se puede clasificar como 3d, y es un material con un ligero endurecimiento postfisuración.

#### 3.2. Resultados de los ensayos de impacto

##### 3.2.1 Ensayo de impactos crecientes

Se realizaron doce ensayos de Impactos Crecientes, empleando las mitades de los prismas que resultaron de las pruebas de flexión estática. En la Fig. 5, en líneas segmentadas, se muestran las curvas de impacto de cada prueba y la curva media se grafica en línea continua. En general, se observa que previo a la fisuración (Fase 1), debido a la acumulación de energía se genera una línea vertical coincidente con el eje de las abscisas, cuya longitud se corresponde con la energía de fisuración  $E_C$ . Luego del agrietamiento (Fase 2) sucede la ramificación de la curva, cuya sinuosidad y pendiente



**Figura 5.** Curvas del ensayo de Impactos Crecientes.

resultan relevantes para el análisis. En este caso, todas las curvas ramificaron de forma cóncava, con un importante endurecimiento en pequeñas aberturas de fisura y un comportamiento proporcional (lineal) a partir de 1 mm. La acumulación de energía inicial se debe al puente de adherencia entre las fibras y la matriz, potenciado por la acción de

los ganchos en los extremos y la posterior linealización al deslizamiento de las hebras. En otras investigaciones [11] se ha demostrado que la forma y pendiente de la curva de impacto, depende del tipo y dosis de la fibra.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los parámetros del ensayo de Impactos Crecientes, obtenidos de todas las pruebas realizadas. Los subíndices i y d etiquetan las mitades izquierda y derecha del prisma original ensayado en flexión. Se agruparon los parámetros de la Fase 1, Fase 2 y parámetros globales. Se agregaron unos parámetros adimensionales  $N_C$  y  $N_P$ , que son el número de impactos dados hasta la fisuración y posterior a la misma. Para todos los parámetros se determinaron los valores medios, la desviación estándar (S.D.) y el coeficiente de variación (C.V.).

La energía total rondó los 600 J, de los que aproximadamente un 20% se otorgó antes de la fisuración y el otro 80% posterior a la misma. Esto ratifica la importancia de las

**Tabla 1.** Resultados del ensayo de Impactos Crecientes.

Probeta	Fase 1			Fase 2			Global	
	$N_C$	$E_C$ (J)	$COD_C$ ( $\mu m$ )	$N_P$	$E_P$ (J)	$V_C$ ( $\mu m/J$ )	$N_T$	$E_T$ (J)
1i	8	112	43	20	391	10,20	28	503
1d	9	137	44	25	595	5,96	34	732
2i	8	112	43	22	468	7,92	30	580
2d	9	137	43	23	508	7,46	32	646
3i	7	89	80	25	595	5,58	32	684
3d	6	69	87	21	427	9,10	27	496
4i	10	165	87	25	595	6,10	35	760
4d	11	196	86	23	508	7,52	34	704
5i	6	69	44	21	427	8,47	27	496
5d	6	69	6	21	427	8,79	27	496
6i	8	112	43	21	427	9,39	29	539
6d	7	89	43	21	427	9,41	28	516
Promedio	8	113	54	22	483	7,99	30	596
S.D.	2	40	25	2	76	1,51	3	103
C.V. (%)	20	36	47	8	16	19	10	17

fibras en el desempeño del material postfisuración. En general, la abertura inicial de la fisura fue ligeramente mayor a 50  $\mu\text{m}$ , esto es un 17‰ de la abertura de falla y la  $V_C$  medida fue prácticamente igual a 8  $\mu\text{m}/\text{J}$ , al comparar con HRF evaluados en otras experiencias [11] inferior a la medida en un hormigón reforzado con 25  $\text{kg}/\text{m}^3$  de la misma fibra de acero (que presentó una  $V_C = 18 \mu\text{m}/\text{J}$ ) y superior a uno reforzado con 50  $\text{kg}/\text{m}^3$  ( $V_C = 7 \mu\text{m}/\text{J}$ ). Aunque la caracterización de los HRF no se basa en su contenido de fibra sino en su capacidad residual en flexión, que en cierta forma no es solo una medida del desempeño de la fibra sino del compuesto en sí (hormigón de base en interacción con las fibras), la anterior comparación evidencia la sensibilidad del parámetro  $V_C$  a la dosis y el tipo de fibra.

Obsérvese que los parámetros de la Fase 1 (prefisuración) presentaron mayor variabilidad que los de la Fase 2 (post agrietamiento) y que los parámetros energéticos  $E_C$  y  $E_P$  exhibieron mayores C.V. que sus respectivos parámetros adimensionales  $N_C$  y  $N_P$ . La mayor variabilidad la presentó la apertura de primera fisura ( $\text{COD}_C$ ), casi un 50%, mientras que la menor variabilidad la tuvo la energía postfisuración ( $E_P$ ) con 16%. El parámetro global de la prueba  $E_T$  presentó una variabilidad del 17%, valor inferior a lo registrado en el ensayo de flexión estática de este hormigón y de HRF en general, y que además es similar a lo exhibido por mezclas similares estudiadas en otros trabajos [11], principalmente en un trabajo en que se determinó estadísticamente el número mínimo de ensayos requeridos para la prueba, y en que se concluyó que con seis ensayos se podría determinar la media de este parámetro con un error menor al 15% y un 90% de confiabilidad. Nótese que entre dos mitades de una misma probeta pueden aparecer en ocasiones comportamientos diferenciales, aunque en general resultan similares. Esto sugiere una distribución uniforme de las fibras en toda la masa de hormigón y resalta la necesidad de un correcto mezclado, llenado y compactación, conforme a lo establecido en la normativa EN14651.

### 3.2.2 Ensayo de Impacto ACI-544

Como se dijo en la descripción del método, en el ensayo del ACI-544 se registran el número de impactos hasta la aparición de la primera fisura, luego, la cantidad posterior a la misma hasta la falla. En este trabajo dichos valores se han denominado  $N_1$  y  $N_2$ , y a la suma de ambos, que representa el total de impactos, se denominó  $N_{1+2}$ .

En la Tabla 2 se resumen los valores de  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_{1+2}$  de las catorce probetas ensayadas, así como sus respectivos valores de Energía ( $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_{1+2}$ ), determinados conforme a (2) para poder comparar con el método de Impactos Crecientes. Al igual que en el ensayo de Impactos Crecientes, para cada parámetro también se determinó el promedio, la desviación estándar (S.D.) y el coeficiente de variación (C.V.).

$$E_i = N_i \cdot m \cdot g \cdot h \quad (2)$$

El subíndice  $i$  representa la etapa del ensayo (1, 2 ó 1+2)

Obsérvese que la energía total en el ensayo ACI-544 ( $E_{1+2}$ ) alcanzó valores medios de 3000 J, de los cuales, aproximadamente el 35% (1060 J) se corresponden con los otorgados a la probeta antes de la fisuración, mientras que el otro 65% (1940 J) lo recibieron las muestras en estado fisurado. Por tratarse de un ensayo a alturas fijas, los valores de C.V. resultaron idénticos para cada par de parámetros  $N_i$  y  $E_i$ , sin embargo, en la etapa previa a la fisuración se obtuvo mayor variabilidad (62%) que en la posterior a la fisura (23%).

A manera ilustrativa, en la Figura 6 se muestra el modo de falla de las muestras ensayadas conforme al método del comité ACI-544. Se respetó la posición de los especímenes en ambas imágenes. Se nota que el patrón de falla no es uniforme, algunas probetas se dividieron en 2 partes, otras en 3 y otras aún en más partes. Visualmente también se verifica gran variabilidad de los anchos de fisura y no se observó una orientación preferencial de las fibras.



**Tabla 2.** Resultados ensayo ACI-544.

Probeta	Prefisuración		Postfisuración		Global	
	N <sub>1</sub>	E <sub>1</sub> (J)	N <sub>2</sub>	E <sub>2</sub> (J)	N <sub>1+2</sub>	E <sub>1+2</sub> (J)
JV1	112	2280	97	1974	209	4254
JV2	43	875	132	2687	175	3562
JV3	61	1242	72	1465	133	2707
JV4	21	427	113	2300	134	2727
JV5	38	773	74	1506	112	2280
JV6	63	1282	98	1995	161	3277
JV7	113	2300	99	2015	212	4315
JV8	52	1058	66	1343	118	2402
JV9	82	1669	105	2137	187	3806
JV10	58	1181	90	1832	148	3012
JV11	30	611	127	2585	157	3196
JV12	19	387	80	1628	99	2015
JV13	16	326	65	1323	81	1649
JV14	22	448	117	2381	139	2829
Promedio	52	1061	95	1941	148	3002
S.D.	32	655	22	448	39	796
C.V. (%)	62	62	23	23	27	27



**Figura 6.** Modo de falla de las muestras ensayadas conforme al método del comité ACI-544.

#### 4. Discusión

El ensayo del ACI-544 es una prueba reconocida por su rapidez y sencillez, sin embargo, la alta variabilidad de sus resultados lo han hecho cuestionable. El método de Impactos Crecientes es un ensayo que además de permitir evaluar HRF con

distintos tipos y dosis de fibras, emplea una probeta de geometría típica, de fácil manejo y que admite un amplio rango de tamaños máximo de agregados. Este es un ensayo de fácil instrumentación y que arroja parámetros para evaluar al compuesto antes y después de la fisuración. En la Tabla 3 se ha hecho una comparación de ambos métodos, considerando los siguientes aspectos: configuración de la caída, tipo de solicitación, geometría y preparación de la probeta, instrumentación y parámetros para el análisis. Aunque los métodos poseen algunas características similares, ambos son de impactos repetidos, las masas de los proyectiles son similares ( $\approx 5$  kg) y ambas pruebas constan de dos Fases (pre y postfisuración); es notorio que el número de diferencias es superior y esto justifica los resultados diferenciales observados en la Sección 3.2 y que serán comentados a continuación.

**Tabla 3.** Comparación de los métodos ACI-544 y de Impactos Crecientes.

	ACI-544	Impactos Crecientes
Tipo de impactos	Repetidos	Repetidos
Altura de caída	Fija (457 mm)	Creciente (100 – 4000(*) mm)
Masa del proyectil	4,54 kg	5,18 kg
Tipo de carga	Puntual	Lineal y uniforme
Solicitud predominante	Compresión localizada	Flexión
Geometría de probeta	Cilindro	Prisma
Entalladura	No	Si (25 mm)
Condición de apoyo	Uniformemente apoyado	Simplemente apoyado
Instrumentación electrónica	No instrumentado	No instrumentado
Parámetros prefisuración	$N_1$	$E_C, COD_C$
Parámetros postfisuración	$N_2$	$E_P, V_C$
Parámetros globales	$N_{1+2}$	$E_T$

(\*) Depende de la máquina de ensayo

La  $E_{1+2}$ , parámetro global de la prueba del ACI-544, alcanzó valores promedios cinco veces mayores que la  $E_T$  del ensayo de Impactos Crecientes, y la distribución por Fases de dicha energía también presentó proporciones diferentes para cada método. En el ensayo ACI-544 del total de energía ( $E_{1+2}$ ) el 35% se otorgó a la probeta antes de la fisuración y el 65% posterior a la misma, mientras que en el ensayo de Impactos Crecientes en la Fase 1 solo se otorgó un 20% de la  $E_T$  y el restante (80%) fue proporcionado en la Fase 2 (postfisuración). Estas diferencias evidencian uno de los principales problemas de los ensayos a alturas fijas (como el método del ACI), y es que, cuando la energía del impacto no es suficientemente grande en magnitud, se requiere impartir una mayor cantidad de

impactos, porque la mayor parte de la energía es disipada en vibraciones, rebote, etc., y no se disipa en la probeta. Incluso, se han encontrado casos en que la energía del impacto fue tan baja que la fisuración sucedió en una cantidad excesiva de golpes, o no fue alcanzada [7].

En ambos métodos, la tendencia de la variabilidad de los resultados fue análoga, resultó mayor en la etapa prefisuración (o Fase 1) que posterior a la fisura (o Fase 2), y la variación global estuvo ligeramente por debajo de esta última. Sin embargo, las magnitudes de los C.V. en el ensayo de Impactos Crecientes, fueron mucho menores que en el método del ACI-544 y en la Tabla 4 se presenta una comparación de dichas variabilidades. Nótese que en la variable energética más crítica (la  $E_C \equiv E_1$ ), el C.V. fue

**Tabla 4.** Variabilidad de los métodos del ACI-544 y de Impactos Crecientes.

		Prefisuración		Postfisuración		Global	
		$N_C \equiv N_1$	$E_C \equiv E_1$	$N_P \equiv N_2$	$E_P \equiv E_2$	$N_T \equiv N_{1+2}$	$E_T \equiv E_{1+2}$
C.V. (%)	Impactos Crecientes <sup>(a)</sup>	20	36	8	16	10	17
	ACI-544 <sup>(b)</sup>	62	62	23	23	27	27
<sup>(a)</sup> / <sub>(b)</sub>		0,32	0,58	0,35	0,70	0,37	0,63

casi un 50% menor en el ensayo de Impactos Crecientes, mientras que en la etapa postfisuración ( $E_P \equiv E_2$ ) y en la variable global ( $E_T \equiv E_{1+2}$ ) las reducciones en este mismo ensayo fueron de 30 y 37% respectivamente. Es de resaltar que, las variabilidades de algunos parámetros del ensayo de Impactos Crecientes ( $E_P$  y  $E_T$ ) fueron inferiores a los presentados en las pruebas de caracterización en flexión estática.

De este modo, el método de Impactos Crecientes se perfila como una muy buena alternativa para evaluar el desempeño de distintos HRF frente a impactos. Hasta la fecha, el mismo se ha aplicado sobre hormigones con distintos tipos y contenidos de fibras [11], sobre HRF de distintas clases resistentes [12] y sobre hormigones con el mismo contenido de fibra pero con distinto nivel de resistencia a la compresión (incluyendo hormigones de alta resistencia). En todos los casos el ensayo fue hábil y sensible para observar los efectos de dichas variables sobre el desempeño en impacto del compuesto.

## 5. Conclusiones

Se ha diseñado un nuevo método de ensayo de impacto para hormigones, denominado de Impactos Crecientes, que permite valorar, de forma rápida, económica y sencilla, la resistencia al impacto de los HRF, tanto antes como posterior a la fisuración. Y como parte de la validación del ensayo, se le ha comparado con la prueba de este tipo más difundida, que es la prueba propuesta por el Comité 544 del ACI. Para ello se evaluó con ambos ensayos un mismo hormigón, reforzado con  $30 \text{ kg/m}^3$  de fibras de acero, y se han contrastado los resultados obtenidos. Las principales conclusiones se describen a continuación:

- Los resultados de los métodos ACI-544 e Impactos Crecientes no son directamente comparables entre sí, debido a diferencias en los niveles de energía acumulada de cada prueba.

- El ensayo del comité ACI-544 requiere mayores niveles de energía para fisurar la muestra y llevar el espécimen a la falla, respecto al ensayo de Impactos Crecientes.

- En ambos métodos, la variabilidad de los parámetros prefisuración es mayor que los postfisuración, mientras que la variabilidad del parámetro global es ligeramente inferior a este último.

- El método de Impactos Crecientes presenta una menor variabilidad de resultados de todos los parámetros de impacto respecto al método del ACI-544. Alcanzando valores aceptables para este tipo de material (<30%) e incluso menores a los presentados en la prueba de caracterización estática en flexión.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo del LEMIT-CIC y de la UIDIC de la Facultad de ingeniería UNLP para el desarrollo de la campaña experimental, así como la financiación de los proyectos CONICET PIP112-20150100861 y UNLP 11/1244.

## Referencias

- [1] American Concrete Institute Committee 544. (1999). *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete* 544.2R-89.
- [2] American Society for Testing and Materials. (2003). *ASTM D 1557-00 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using*.
- [3] Zhu X. C., Zhu, H., y Li H. R. (2015). Drop-weight impact test on U-shape concrete specimens with statistical and regression analyses. *Materials*, 8, 5877–5890. <https://doi.org/10.3390/ma8095281>
- [4] American Concrete Institute Committee 544. (2017). *Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber Reinforced Concrete*. ACI 544.9R-17.
- [5] Bard, A., y Ashour, A. F. (2005). Modified ACI drop-weight impact test for concrete. *ACI Mater. J.*, 102, 249–255.

- [6] Abid, S. R., Abdul Hussein, M. L., Ali, S. H., y Kazem, A. F. (2020). Suggested modified testing techniques to the ACI 544-R repeated drop-weight impact test. *Constr. Build. Mater.*, 244, 118–321. <https://doi.org/gmrt>
- [7] Vivas, J. C., y Zerbino, R. L. (2019). Estudio de la resistencia al impacto de hormigones reforzados con fibras, *19° Congr. Int. Metal. y Mater. CONAMET-SAM*, (pp. 140–141).
- [8] American Society for Testing and Materials (1997). *ASTM E436 – 03 Standard Test Method for Drop-Weight Tear Tests of Ferritic Steels*.
- [9] American Society for Testing and Materials (2000). *ASTM E208-17 Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels*.
- [10] Vivas, J. C., Isla, F., Torrijos, M. C., Giaccio, G., Luccioni, B., y Zerbino, R. (2021). Drop-Weight Impact Test for Fibre Reinforced Concrete: Analysis of Test Configuration, enviado a: RILEM-Fib XI Int. Symp. Fibre Reinf. Concr.
- [11] Vivas, J. C., Zerbino, R., Torrijos, M. C., y Giaccio, G. (2020). Effect of the fibre type on concrete impact resistance, *Constr. Build. Mater.*, 264, 120–200. <https://doi.org/gmth>
- [12] Vivas, J. C., Zerbino, R., Torrijos, M. C., y Giaccio, G. M. (2020). Impact response of different classes of fibre reinforced concretes, En P. Serna, A. Llano-Torres, J. R. Martí-Vargas, y J. Navarro-Gregori (Eds.) *RILEM-Fib X Int. Symp. Fibre Reinf. Concr.* Springer.
- [13] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1982). *NORMA IRAM 1524. Preparación y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral*.
- [14] American Society for Testing and Materials, (2005). *ASTM C 1609/C 1609M-05 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*
- [15] Technical Committee CEN/TC 229 (2005). *EN 14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) Method*.
- [16] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (2000). *NORMA IRAM 50000 - Cemento para uso general*.
- [17] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1992). *NORMA IRAM 1546. Hormigón de cemento portland, Método de ensayo a compresión*.
- [18] International Federation for Structural Concrete (fib) (2012). *Model Code Volume 1*.