

## INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS TIPO "DROP-WEIGHT IMPACT TEST" MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

### INTERPRETATION OF DROP - WEIGHT IMPACT TESTS RESULTS WITH NUMERICAL SIMULATION

Fabián Fiengo Pérez, Bibiana Luccioni<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Estructuras "Arturo M. Guzmán", FACET, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina, [ffiengoperez@facet.unt.edu.ar](mailto:ffiengoperez@facet.unt.edu.ar), [bluccioni@herrera.unt.edu.ar](mailto:bluccioni@herrera.unt.edu.ar), <http://www.facet.unt.edu.ar/iest/>

<sup>b</sup>CONICET, Godoy Cruz 2290, C1425FQB CABA, Argentina, <http://www.conicet.gov.ar/>

**Palabras clave:** impacto, *drop – weight impact test*, hormigón reforzado con fibras.

**Resumen.** Se pueden usar distintos tipos de ensayo para estudiar el comportamiento del hormigón bajo cargas de impacto. Los ensayos de tipo *drop-weight impact test* tienen la ventaja de no requerir un equipamiento complejo, sin embargo, es difícil extraer información sobre el comportamiento del material bajo cargas dinámicas a partir de estos ensayos. En este trabajo se presentan los resultados de la simulación numérica de ensayos tipo *drop-weight impact test* en vigas de hormigón de alta resistencia reforzadas con distintos contenidos de fibras de acero y su comparación con resultados experimentales. Utilizando el modelo numérico se analiza el comportamiento dinámico de las vigas. En particular, se estudian la relación entre las fuerzas de impacto y las reacciones de apoyo, su relación con la resistencia estática, las fuerzas de inercia, la distribución de deflexiones y aceleraciones a lo largo de la viga, la velocidad de deformación y la capacidad de absorción de energía. Dicho estudio permite analizar críticamente las metodologías simplificadas normalmente utilizadas para estudiar experimentalmente el problema de impacto y brindar resultados útiles, no sólo para el diseño de ensayos tipo *drop – weight impact test* sino también para analizar e interpretar los resultados de dichos ensayos.

**Keywords:** Impact, drop-weight impact test, fiber reinforced concrete.

**Abstract.** Different types of tests can be used to study the behavior of concrete under impact loads. Drop-weight impact tests have the advantage of not requiring complex equipment, however, it is difficult to extract information on the behavior of the material under dynamic loads from these tests. The results of the numerical simulation of drop-weight impact tests on high-strength concrete beams reinforced with different contents of steel fibers and their comparison with experimental results are presented in this paper. Using the numerical model, the dynamic behavior of the beams is analyzed. In particular, the relationship between impact forces and support reactions, their relationship with static resistance, inertial forces, distribution of deflections and accelerations along the beam, strain rate and energy absorption capacity are studied. This study is useful to critically analyze the simplified methodologies normally used to experimentally study the impact problem and provides useful results, not only for the design of drop-weight impact tests but also for the analysis and interpretation of the results of these tests.

## 1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha aumentado el interés por el uso de hormigones de alta resistencia reforzados con fibras (HARRF) en estructuras sometidas a explosiones e impacto debido a su durabilidad y capacidad de absorción de energía. Sin embargo, hasta ahora, el conocimiento sobre el comportamiento de estos materiales bajo cargas de impacto es limitado y no es suficiente para el diseño de elementos estructurales. A pesar de las numerosas investigaciones llevadas a cabo, no se ha definido aún un ensayo adecuado para caracterizar el comportamiento de estos materiales bajo altas velocidades de deformación. El uso de diferentes equipos y protocolos de ensayo hace que los resultados de los distintos investigadores no sean comparables entre sí (Yoo y Banthia 2017).

El ensayo tipo caída libre (*Drop - Weight Impact test*) es bastante versátil pero sus resultados no son fáciles de interpretar directamente. Entre los trabajos experimentales que usan este tipo de ensayo para caracterizar el comportamiento de hormigones reforzados con fibras se deben mencionar los trabajos del grupo de Banthia (Yoo y Banthia, 2017, 2019) que estudiaron en detalle la influencia de las fuerzas de inercia en la respuesta, los efectos de la velocidad de deformación y la forma de cuantificar la energía de fractura en el caso dinámico.

En relación a la simulación numérica, se debe observar que no existen modelos constitutivos adecuados para la simulación del comportamiento del hormigón reforzado con fibras implementados en hidrocódigos que son los programas más adecuados para simular problemas físicos que involucran cargas de muy alta velocidad y no linealidades, como los de impacto o explosiones. La mayoría de las investigaciones disponibles utilizan modelos que fueron originalmente desarrollados para hormigón simple. Li y Zhang (2011) modelaron el *Drop - Weight Impact Test* de vigas de hormigón reforzado con fibras y dieron criterios útiles para la calibración del modelo constitutivo. Lin (2018) presentó una metodología para incluir las fibras en el modelo de hormigón. Yang et al. (2018) presentaron contribuciones significativas en relación al efecto de la velocidad de deformación en este tipo de materiales y su simulación numérica. Yang et al (2019) propusieron un modelo constitutivo para HARRF basado en una modificación de un modelo de hormigón simple ya existente implementado en un hidrocódigo.

Este trabajo está enfocado en el comportamiento dinámico de vigas de HARRF en el *Drop - Weight Impact Test*. La simulación numérica, previamente validada con los resultados experimentales disponibles, permite analizar las simplificaciones que normalmente se usan para interpretar los resultados de este ensayo.

## 2 SIMULACIÓN NUMÉRICA

### 2.1 Descripción de los ensayos simulados

Se ensayaron prismas de 430 mm x 75 mm x 105 mm de hormigón de alta resistencia (HAR) y HARRF reforzado con 40 kg/m<sup>3</sup> y 80 kg/m<sup>3</sup> bajo cargas de impacto. Las fibras de acero tenían ganchos en sus extremos (Tabla 1), 30 mm de longitud, 0.38 mm de diámetro y una resistencia a tracción mayor a 2300 MPa. Las características mecánicas de los hormigones se muestran en la Tabla 1. Los prismas se montaron con una luz libre de 320 mm. El proyectil consistió en una chapa de acero de 16 mm de espesor, 304 mm de longitud y 5.182 kg de masa con una punta semicilíndrica (Fig. 1a). Las alturas de caída se variaron entre 33 mm y 4000 mm. En la Fig. 1b se muestra una fotografía del ensayo. Se midieron aceleraciones en la cara inferior de la viga, cerca de la sección central, con un acelerómetro (PCB, modelo 353 B03) y fuerzas de impacto con una celda de carga (PCB, modelo 203). Debido a limitaciones en el rango del equipo, las aceleraciones sólo se registraron hasta una altura de caída de 100 mm y las fuerzas de impacto hasta 429 mm. Ambos equipos se conectaron a placas de adquisición de datos. La tasa de

adquisición de datos fue de 50 kHz.

Material	Cont. Nominal fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	Resist. compres. [MPa]	Mod. Elast. [MPa]	$f_L$ [MPa]	$f_{max}$ [MPa]	$f_{R1}$ [MPa]	$f_{R3}$ [MPa]
HAR	0	116.2	43.1	7.6	7.6	---	---
HARRF-40	40	100.6	44.5	7.6	11.1	7.3	9.6
HARRF-80	80	100.7	42.1	8.4	15.9	13.1	14.5

Tabla 1. Propiedades del hormigón.

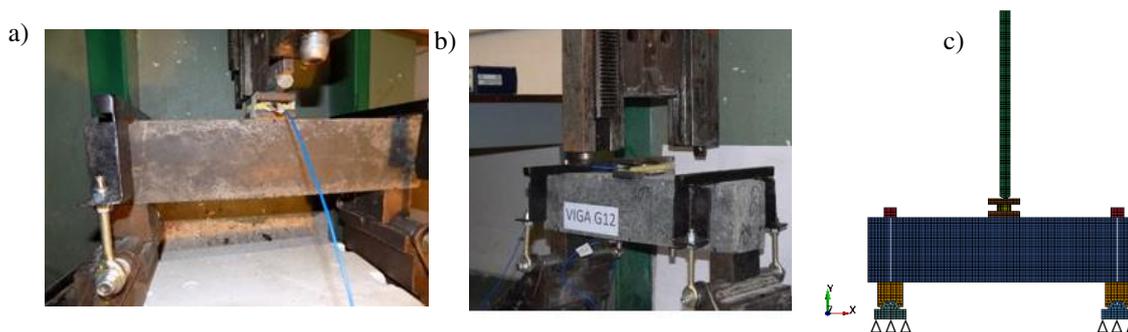


Figura 1: *Drop - weight impact test*. a) Detalle proyectil y placa de carga, b) Ensayo, c) Malla de elementos finitos.

## 2.2 Modelo numérico

El modelo de elementos finitos utilizado para simular el ensayo realizado mediante el programa LS-DYNA (Livermore 2018) y se muestra en la Figura 1c. Todos los elementos, a excepción de los tensores de los apoyos, se modelaron mediante elementos prismáticos de 8 nodos y 8 puntos de integración con integración selectiva para impedir el bloqueo volumétrico. Se realizó un estudio de convergencia para determinar el tamaño de los elementos que resultó de 3mm para el proyectil y la celda de carga y de 5 mm para las vigas. Para los tensores se utilizaron elementos de barra de 25 mm<sup>2</sup> de sección.

La celda de carga es un dispositivo piezoeléctrico conectado a sensores eléctricos y protegido mediante una carcasa metálica. Como simplificación, se la modeló como un cilindro sólido con la altura real y un módulo de elasticidad equivalente de  $1.58 \times 10^5$  MPa para obtener la rigidez real ( $K=4$  kN/ $\mu$ m). La placa de metal debajo de la celda de carga estaba pegada a la viga por lo que los nodos correspondientes eran comunes a la viga. El resto de los contactos fue modelado incluyendo fricción estática. Se utilizaron coeficientes de fricción estática de 0.74 entre elementos metálicos y de 0.6 entre elementos metálicos y hormigón (Grogoriev et al. 1996). Se consideró además fricción dinámica con coeficiente 0.57 (Grogoriev et al. 1996) en los contactos entre proyectil, placas de acero y celda de carga y placa, donde también se consideró amortiguamiento con un coeficiente de amortiguamiento viscoso igual al 10% del amortiguamiento crítico (Livermore 2018).

Para evitar modos espurios correspondientes a energía de deformación nula; se utilizó la técnica de estabilización de *hourglass Belytschko-Bindeman* (Belytschko y Bindeman 1993; Livermore 2018).

Se incluyó amortiguamiento de Rayleigh en el modelo de las vigas. A partir del decremento logarítmico de los registros de aceleración experimental, se estimó una fracción promedio de 5% del amortiguamiento crítico. Los coeficientes de amortiguamiento se calcularon en base las frecuencias del cuarto y quinto modo de vibración que presentaban amplitudes significativas en

los espectros de Fourier de los registros experimentales de aceleración. Se calcularon analíticamente las frecuencias correspondientes teniendo en cuenta las deformaciones por corte y la inercia rotacional (Chopra 2011). Los coeficientes de amortiguamiento para masa y rigidez resultaron  $a_0 = 4.29 \text{ ms}^{-1}$  y  $a_1 = 5.67 \cdot 10^{-4} \text{ ms}$  respectivamente.

### 2.3 Modelos materiales

Los elementos metálicos se modelaron con un material lineal elástico (módulo de elasticidad  $2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ , coeficiente de Poisson 0.3 y densidad  $7900 \text{ kg/m}^3$ ).

Para modelar el HAR y el HARRF se utilizó el modelo K&C (Malvar et al. 1997) que tiene implementado el programa LS-Dyna (Livermore 2018). Se trata de un modelo elastoplástico originalmente desarrollado para hormigón que utiliza tres superficies (superficie de fluencia inicial, de falla y residual) que dependen de tres invariantes de tensión. Permite diferenciar la parte volumétrica de la parte desviadora de la respuesta e incluye la dependencia de la velocidad de deformación.

Para poder usar este modelo para HARRF, los parámetros del mismo deben ser adecuadamente calibrados. El procedimiento utilizado para determinar los coeficientes de la superficie de falla fue descrito en un trabajo anterior (Fiengo y Luccioni 2018).

Como no se disponía de ensayos de tracción directa, para definir las funciones de endurecimiento en tracción se utilizaron los resultados de los ensayos de flexión estática de los distintos materiales. Se simuló el comportamiento de las vigas en flexión estática y en los ensayos de compresión y se ajustaron los parámetros del modelo para lograr reproducir los resultados experimentales (Fiengo 2020).

## 3 COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 2 se compara la variación de las fuerzas de impacto en el tiempo obtenida numéricamente con las experimentales para los tres materiales ensayados. Los resultados corresponden a una altura de caída  $H=132 \text{ mm}$  para la cual se detectó la primera fisura en los ensayos, aunque es posible que se haya producido antes. Los resultados numéricos, muestran valores de deformación plástica no nula en la parte central inferior de la viga a partir de una altura de caída de  $100 \text{ mm}$ . Se observa que los resultados numéricos reproducen adecuadamente la variación de la fuerza de impacto en el tiempo registrada experimentalmente pero las curvas experimentales presentan ciertas oscilaciones que no aparecen en los resultados numéricos. Pudo verificarse numéricamente que estas oscilaciones espurias pueden deberse a que el canto del proyectil no es perfectamente paralelo a la chapa contra la que impacta, de manera que no hace contacto a lo largo de todo el ancho de la misma al mismo tiempo. Esto produce que la chapa sufra cierto movimiento oscilatorio de rotación dando lugar a los picos espurios observados. Comparando los registros experimentales para impactos repetidos se puede observar que los mismos son muy similares entre sí para las velocidades de impacto que no producen fisuración y luego difieren muy levemente.

En la Figura 3 se muestran los registros de aceleración en el tiempo obtenidos en los ensayos y simulados numéricamente para una altura de caída del proyectil  $H=100 \text{ mm}$ . Las aceleraciones en el sentido de la fuerza de gravedad (hacia abajo) son positivas. Para las vigas de HARRF, la forma de la envolvente y el amortiguamiento de los registros de las aceleraciones numéricas son similares a los de los registros experimentales. Las diferencias entre registros numéricos y experimentales son más importantes en el caso del hormigón simple que es más frágil. Las diferencias observadas pueden atribuirse a que los resultados experimentales incluyen vibraciones de los apoyos y, a su vez, los resultados numéricos de aceleración son muy sensibles a pequeñas variaciones en el modelo y suelen contener picos espurios (Fiengo et

al. 2019). En los espectros de Fourier de las aceleraciones (ver Figura 3d a modo de ejemplo) se pudieron identificar frecuencias cercanas a las del 1°, 3° y 5° modo flexional y otras frecuencias que podrían asociarse a vibraciones de los apoyos y modos torsionales por imperfecciones en los ensayos.

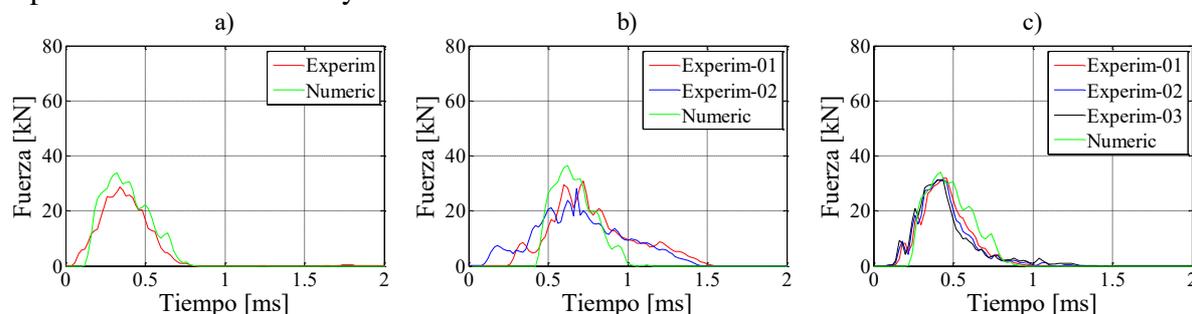


Figura 2: Fuerzas de impacto vs tiempo ( $H = 132$  mm). a) HAR b) HARRF-40 c) HARRF-80.

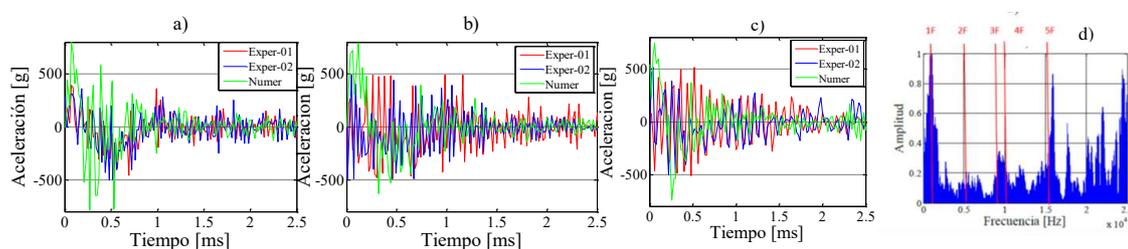


Figura 3: Aceleraciones ( $H = 100$  mm). a) HAR, b) HARRF-40, c) HARRF-80, d) Espectro HAR

## 4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación, se utiliza el modelo numérico para analizar críticamente las metodologías simplificadas propuestas para estudiar experimentalmente el problema de impacto y brindar resultados útiles, no sólo para el diseño de este tipo de ensayos de impacto, sino también para analizar e interpretar sus resultados que combinan el comportamiento material con el comportamiento estructural.

### 4.1 Distribución de desplazamientos y aceleraciones

Muchos de los trabajos existentes en la bibliografía hacen suposiciones respecto de la distribución de los desplazamientos y aceleraciones a lo largo de la viga sometida a impacto, para poder estimar las fuerzas de inercia. Por ejemplo, afirman que para vigas de hormigón simple podría considerarse una distribución lineal de las aceleraciones a lo largo de la viga mientras que para vigas de hormigón reforzado con fibras esta distribución puede considerarse como parabólica (Banthia, 1987). En general, se simplifica el problema considerándolo como un problema de un grado de libertad asociado al primer modo y en los ensayos sólo se miden desplazamientos y/o aceleraciones en uno o dos puntos, por lo que resulta necesario hacer este tipo de hipótesis. Es por ello que resulta interesante obtener la distribución de los desplazamientos y aceleraciones a lo largo de la viga mediante el modelo numérico para verificar hasta qué punto esas hipótesis son válidas. En la Figura 4 se muestra la distribución de desplazamientos a lo largo de las vigas para un instante cercano al pico de la carga ( $t = 0.2$  ms) para una altura de caída de  $H = 100$  mm (límite elástico). Los desplazamientos fueron obtenidos numéricamente ya que no se contaba con registros experimentales. Se observa que la distribución de los desplazamientos a lo largo de la viga es aproximadamente lineal hacia los apoyos, pero no en la zona central de la viga. Para otros instantes de tiempo se obtienen

resultados similares.

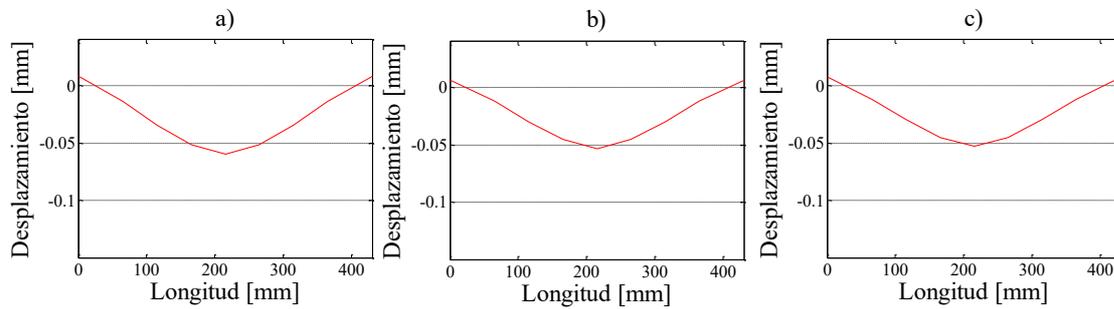


Figura 4: Desplazamiento a lo largo de las vigas de las vigas para un instante de tiempo correspondiente al pico de la fuerza de impacto. a) HAR b) HAR-40 c) HAR-80.

En la [Figura 5](#) se muestran las aceleraciones de las vigas para el mismo instante de tiempo y  $H=100$  mm. Las diferencias entre las aceleraciones de las distintas vigas son marcadas porque probablemente los picos de carga están ligeramente desplazados en el tiempo. La distribución de las aceleraciones no sigue la forma del primer modo de vibración, sino que localiza en el centro, para esta velocidad de impacto en el que material se comporta de manera elástica. Probablemente, para una viga fracturada en el centro, la hipótesis de [Banthia \(1987\)](#) se aproxime más a la realidad.

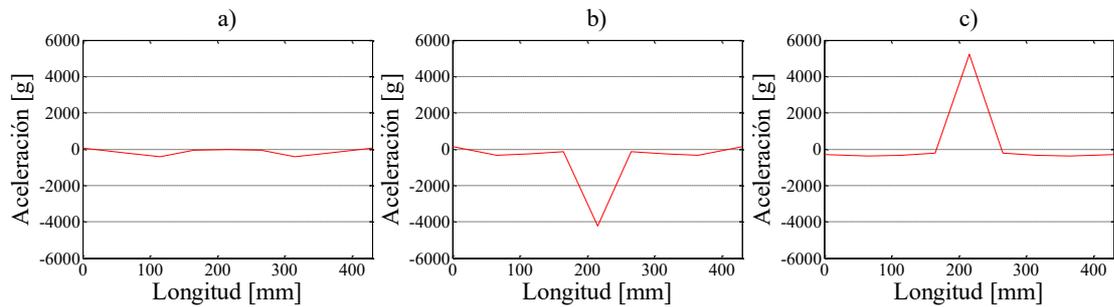


Figura 5: Aceleraciones a lo largo de las vigas de las vigas para un instante de tiempo correspondiente al pico de la fuerza de impacto. a) HAR b) HAR-40 c) HAR-80.

## 4.2 Reacciones y fuerzas de flexión efectiva

Como el problema analizado es un problema dinámico, la fuerza de impacto resulta distinta a la suma de las reacciones ya que en el equilibrio intervienen las fuerzas de inercia. Justamente son las reacciones y no las fuerzas de impacto las que generalmente se utilizan para caracterizar el comportamiento material porque tienen descontadas las fuerzas de inercia. A continuación, se analizan los distintos términos que intervienen en el equilibrio dinámico y a la vez se compara la solución numérica con las expresiones aproximadas utilizadas en la mayoría de los trabajos de impacto para extraer conclusiones sobre el comportamiento material a partir de los resultados de este tipo de ensayos.

En la [Figura 6](#) se comparan las fuerzas de impacto con la fuerza de inercia equivalente que [Banthia \(Banthia, 1987\)](#) sugiere calcular mediante la [Ec.\(1\)](#), en base a la hipótesis de distribución lineal de aceleraciones:

$$P_i(t) = \rho A \ddot{u}_0(t) \left( \frac{L}{3} + \frac{8}{3} \frac{l^3}{L^2} \right) \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del hormigón de la viga,  $A$  es el área de su sección transversal,  $\ddot{u}_0(t)$  la aceleración vertical de la viga medida en el centro de su cara inferior,  $L$  su luz de cálculo y  $l$  la longitud de los voladizos de la viga. El signo positivo de las fuerzas de inercia indica que las mismas están dirigidas hacia arriba (sentido opuesto a la carga). Apenas se produce el impacto del proyectil sobre la viga, las fuerzas de inercia tienen signo negativo, o sea que tienen el mismo sentido que la fuerza de impacto debido a que la aceleración es negativa (hacia arriba). Esta zona corresponde al tiempo en que la viga no se deforma por flexión. Las aceleraciones corresponden a las deformaciones verticales de la viga por el impacto como si fuera una barra impactada y por ello son pequeñas. Posteriormente, los signos de las fuerzas de inercia alternan entre positivos y negativos,

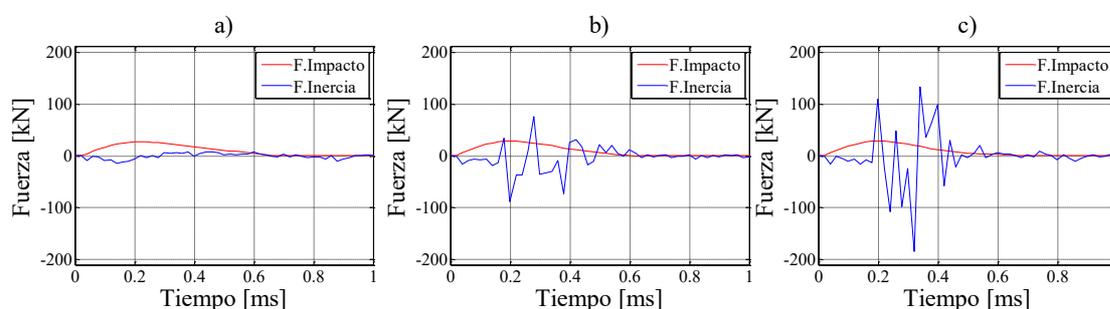


Figura 6: Comparación entre fuerzas de impacto y fuerzas de inercia ( $H = 100$  mm). a) HAR, b) HARRF-40, c) HARRF-80.

En la [Figura 7](#) se compara la suma de las reacciones con la fuerza e flexión efectiva que resulta de descontar la fuerza de inercia equivalente a la fuerza de impacto. Salvo en el caso de la viga de HAR en la que las fuerzas de inercia son muy pequeñas, en el resto de los casos la fuerza de flexión efectiva tiene una forma oscilante (debida a la variación en el tiempo de la aceleración y las fuerzas de inercia efectivas) muy distinta a las reacciones en los apoyos. Sin embargo, se observa que la suma de las reacciones de apoyo representa una forma suavizada de la fuerza de flexión efectiva, por lo cual, es factible y resulta conveniente utilizarlas para caracterizar el comportamiento material. Como se observa en la [Figura 8](#), las reacciones están retrasadas respecto de las fuerzas de impacto debido al tiempo que tarda la onda en llegar desde el lugar del impacto a los apoyos

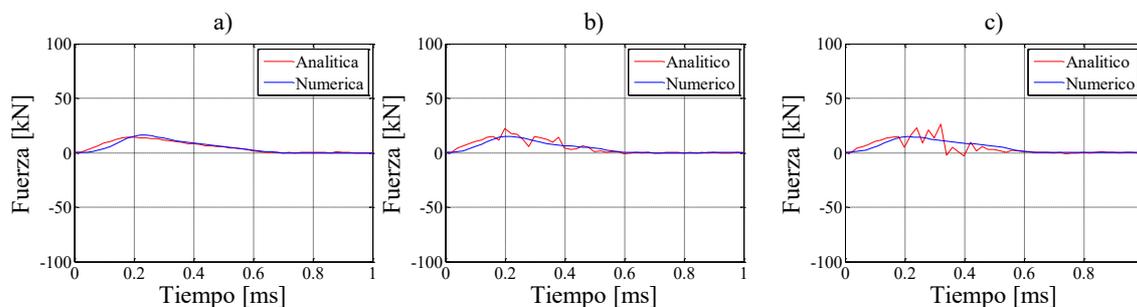


Figura 7: Comparación entre fuerzas de flexión efectiva y suma de reacciones ( $H = 100$  mm). a) HAR, b) HARRF-40, c) HARRF-80.

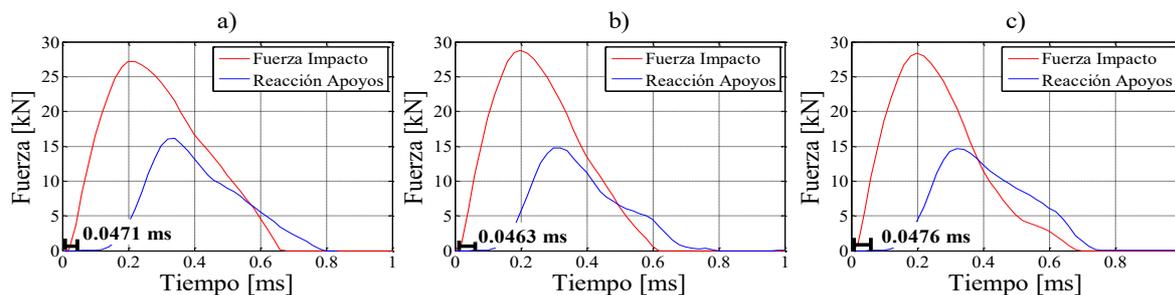


Figura 8: Comparación entre fuerzas de impacto y suma de reacciones (H = 100 mm). a) HAR, b) HARRF-40, c) HARRF-80.

### 4.3 Velocidad de deformación

Uno de los objetivos fundamentales de los ensayos de impacto es evaluar cómo cambian las propiedades del material con la velocidad de deformación, sin embargo, no resulta simple obtener este tipo de conclusiones del ensayo en estudio debido a que la velocidad de deformación no es constante en el tiempo ni en toda la viga. Teniendo en cuenta que en los ensayos tipo *Drop - Weight Impact Test* la sección central de la viga se encuentra sometida a flexión y que la mayor deformación se produce en el borde traccionado, Mobasher (2011) sugiere el uso de la Ec.(2) para caracterizar la velocidad de deformación de los ensayos:

$$\dot{\epsilon} = \frac{6h}{L^2} \dot{\delta} \tag{2}$$

Donde  $h$  es la altura y  $\dot{\delta}$  es la velocidad vertical del centro de la viga o velocidad de la deflexión central. En la Figura 9 se compara la velocidad de deformación  $\dot{\epsilon}$  obtenida mediante la simulación numérica en la parte inferior de la sección central de la viga con la calculada utilizando la Ec. (2) considerando que  $\dot{\delta}$  es la velocidad de deflexión de la viga y directamente la velocidad de impacto del proyectil. En este último caso se obtiene un valor constante que podría usarse como valor referencia.

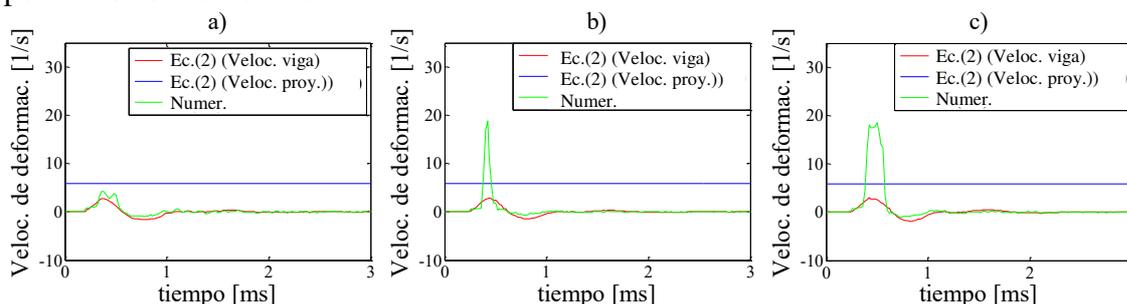


Figura 9: Velocidades de deformación (H = 100 mm). a) HAR b) HARRF-40 c) HARRF-80.

### 4.4 Variación de la resistencia y la energía de deformación con la velocidad

Teniendo en cuenta que la suma de las reacciones representa de alguna forma aproximada la carga de flexión efectiva o resistencia, en la Figura 10a se presenta la variación de la suma de las reacciones sobre la resistencia estática en función de la velocidad de deformación. Este gráfico ilustra el aumento de resistencia con la velocidad de deformación aun cuando las vigas estén muy dañadas.

Una forma de medir la energía absorbida por las vigas durante el impacto es a través de las curvas de variación de las reacciones en función de la deflexión del centro de la viga. En el caso de que las vigas se rompan, la curva cae a cero y el área bajo la curva representa la energía por unidad de área que absorben las vigas para romperse por efecto de la carga de impacto (Método 1). En la Figura 10b se compara la energía así calculada con el trabajo por unidad de área realizado por las tensiones de tracción en la parte inferior de la viga sobre el desplazamiento relativo entre los lados de la fisura (Método 2). Se observa que los valores de incremento dinámico de la energía obtenidos con ambos métodos no son coincidentes. Para velocidades mayores que las graficadas, los incrementos dinámicos obtenidos con Método 1 son mayores que los que normalmente se encuentran en otros trabajos y mayores a los que se obtienen con las tensiones (Método 2): Esto puede deberse al confinamiento provisto por los apoyos que hace que el mecanismo con el cual resisten las vigas no sea de flexión pura.

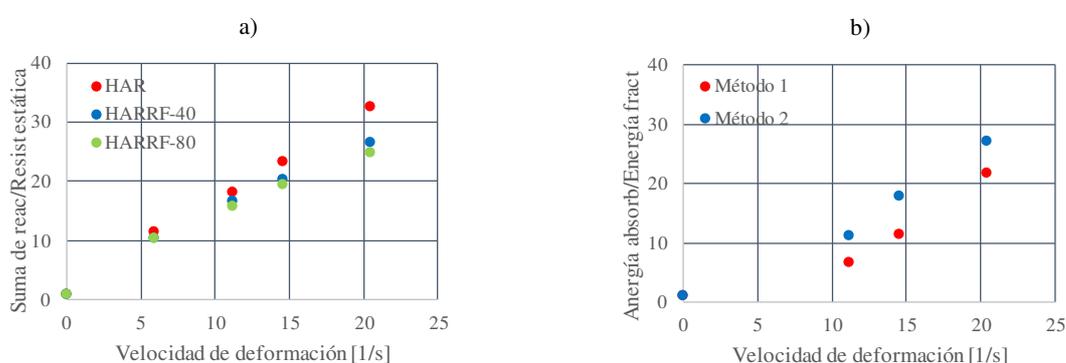


Figura 10: Efecto de la velocidad de deformación en: a) Resistencia b) Capacidad de absorción de energía (HAR)

## 5 CONCLUSIONES

El modelo numérico ajusta razonablemente los resultados experimentales en lo que hace a las fuerzas de impacto y los desplazamientos, pero presenta mayores diferencias en el caso de las aceleraciones.

Para las velocidades de impacto consideradas, aparentemente, la fuerza de impacto aumenta indefinidamente con la velocidad de impacto, pero este efecto no puede atribuirse sólo al efecto del aumento de la resistencia del material por la velocidad de deformación. El equilibrio dinámico incluye la de fuerza de impacto, la fuerza de inercia (que es una fuerza distribuida que sigue el perfil de las aceleraciones) y las reacciones. Las expresiones analíticas para determinar las magnitudes tanto de las fuerzas de inercia como de las reacciones en los apoyos, asumiendo una distribución lineal de las aceleraciones a lo largo de la viga, no representan exactamente lo que ocurre en las vigas. Esto se debe, por una parte, a que la distribución de las aceleraciones a lo largo de la viga no sigue una forma similar a la del primer modo. Por otra parte, se producen en la cara inferior de la viga, justo debajo de donde el proyectil impacta la misma, picos de aceleraciones muy altos que influyen notoriamente en los resultados. Si no se cuenta con registros experimentales de las reacciones y sí con registros de aceleraciones se puede trabajar con estas expresiones, pero se requiere suavizar los resultados.

Tanto los picos de las reacciones en los apoyos como la energía absorbida siguen aumentando con la velocidad de carga aún cuando las vigas se parten en dos, esto puede atribuirse al confinamiento provisto por los apoyos y no a un efecto material por lo que es importante diseñar adecuadamente las dimensiones y apoyos de las vigas si se quieren extraer

conclusiones sobre el efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento material. La Ec.(2) subestima el valor de la velocidad de deformación máxima en el centro de la viga pero puede ser usada para obtener un valor de referencia.

Aunque por razones de espacio no se han podido incluir todos los gráficos, tanto los resultados experimentales como numéricos muestran que para alturas de caída superiores a la de la primera fisura, la fuerza de impacto máxima crece levemente con el contenido de fibras. A medida que aumenta el contenido de fibras, las vigas preservan su integridad hasta alturas de caída mayores, exhibiendo mayor resistencia y capacidad de disipación de energía.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET, a la ANPCyT (PICT 2017 1313) y a la SCAIT UNT (PIUNT 26/623) por el apoyo económico brindado.

## REFERENCIAS

- Banthia, N. P., *Impact resistance of concrete*. PhD Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, 1987.
- Belytschko, T. and Bindeman L.P., Assumed strain stabilization of the eight node hexahedral element. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 105(2):225-60, 1993.
- Chopra, A. *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Pearson, 2001.
- Fiengo Pérez, F., Isla, F. and Luccioni, B., Aplicación del modelo Karagozian y Case a la simulación del comportamiento dinámico del hormigón de ultra altas prestaciones reforzado con fibras, *Mecánica Computacional*, 36:1393-1402, 2018.
- Fiengo Pérez, F., Vivas, J.C., Sfer, D. and Luccioni, B., Análisis de vigas de hormigón de alta resistencia reforzadas con fibras sometidas a impacto, *Mecánica Computacional Vol XXXVII:725-734*, 2019.
- Fiengo Pérez, F., *Hormigón de alta resistencia reforzado con fibras bajo cargas de impacto*, Tesis de Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, 2020.
- Grogoriev, I.S., Meilikhov, E.Z. and Radzig, A. A. *Handbook of Physical Quantities*, CRC press, 1996.
- Li, J. and Zhang, Y.X., Evaluation of constitutive models of hybrid-fibre engineered cementitious composites under dynamic loadings, *Construction and Building Materials*, 30: 149–160, 2012.
- Lin, X., Numerical simulation of blast responses of ultra-high performance fibre reinforced concrete panels with strain-rate effect. *Construc & Building Materials*, 176: 371–382, 2018.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC), *LS-DYNA Theory Manual*, Livermore, California 2018.
- Malvar, L.J., Crawford, J.E., Wesevich, J.W. and Simons, D., A plasticity concrete material model for DYNA3D, *International Journal of Impact Engineering*, 19(9–10): 847-873, 1997.
- Mobasher, B., *Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites*, CRC Press, 2011.
- Yang, L., Lin, X. and Gravina, R.J., Evaluation of dynamic increase factor models for steel fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 190:632–644, 2018.
- Yang, L., Lin, X. and Gravina, R.J. A new constitutive model for steel fibre reinforced concrete subjected to dynamic loads, *Composite Structures*, 221:110849, 2019.
- Yoo, D.Y. and Banthia, N., Size-dependent impact resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 142: 363–375, 2017.
- Yoo, D.Y. and Banthia, N., Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review, *Cement and Concrete Composites* 104: 103389, 2019.