

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS BAJO CARGAS DE IMPACTO

Domingo Sfer¹, Diego F. Grande¹, Sergio E. Gutierrez¹, Facundo A. Isla Calderon¹

¹ Instituto de Estructuras – Facet - U.N.T., S.M. de Tucumán, dsfer@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

La utilización de hormigones reforzado con fibras representa una alternativa de gran interés para la reparación y refuerzo de estructuras de hormigón. La adición de fibras de acero al hormigón brinda en particular un importante aporte a su capacidad de absorción de energía frente a la acción de cargas dinámicas. Este tipo de refuerzo ha despertado gran interés para el caso de estructuras expuestas a explosiones o impactos. Actualmente no existe un análisis experimental específico para evaluar y caracterizar el comportamiento frente a estas sollicitaciones. Investigadores del Instituto de Estructuras de la UNT están desarrollando estudios numéricos y experimentales de elementos estructurales de hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) bajo cargas dinámicas. En el presente trabajo se expone el análisis experimental de vigas de HRFA bajo cargas de impacto. Se ha utilizado un equipamiento experimental especial que permite obtener hasta un millón de registros por segundo y que resulta adecuado en el proceso de los datos de acelerómetros y celdas de carga usados para la caracterización el comportamiento de estos elementos estructurales bajo la acción de cargas de impacto. Se presentan los resultados obtenidos y se discuten las conclusiones más importantes.

Palabras claves: hormigón, fibras de acero, cargas dinámicas, análisis experimental.

INTRODUCCIÓN

La reparación estructural, en muchos casos, requiere el uso de hormigones especiales, con mejores propiedades que las del hormigón convencional, tal es el caso de hormigones de mayor resistencia combinada con un incremento de su ductilidad. Esto se logra gracias al uso de cementos especiales, aditivos específicos y la adición de fibras de acero que permite además mejorar sensiblemente su capacidad de soportar cargas dinámicas, y es por ello que la caracterización dinámica es relevante. Sin embargo, en la actualidad no se ha definido un ensayo determinado para este fin.

El Hormigón de Ultra-Altas Prestaciones (HUAP) surge como alternativa válida para el desarrollo de estructuras capaces de soportar cargas extremas provenientes de accidentes (explosiones, fuego) y desastres naturales (terremotos, inundaciones, huracanes). Su resistencia y durabilidad hacen de este material el más indicado para construcciones especiales o bien para ser usado como refuerzo o reparación [1].

En estado fresco este material posee las propiedades de un hormigón autocompactante, si se le agregan fibras de acero se convierte en un material compuesto de gran ductilidad. En estado endurecido se combina su gran resistencia con una buena capacidad de disipación de energía. Pese a estas excelentes cualidades, su uso en nuestro medio es limitado, lo

cual se debe en gran medida a la falta de antecedentes en el desarrollo de este compuesto con materiales locales.

En este trabajo se propone la utilización de un hormigón de ultra altas prestaciones como refuerzo de vigas. La propuesta contempla el desarrollo de vigas de hormigón de alta resistencia de tamaño (5x10x40 cm). Se prevé reforzar algunos especímenes con una capa de hormigón de ultra altas prestaciones siguiendo las dosificaciones dadas en trabajos anteriores del grupo de investigación [2]. Luego se ha programado la realización de ensayos de caracterización mecánica típicos a fin de apreciar el comportamiento de las vigas con y sin refuerzo. Por otro lado, continuando la línea de investigación que se viene desarrollando en el Programa de Investigación CIUNT/E545 EVALUACION, REHABILITACION Y REFUERZO DE CONSTRUCCIONES [3] se prevé desarrollar un ensayo simple de impacto sobre las vigas y evaluar sus conclusiones con respecto a los comportamientos observados.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

La disposición general del ensayo sigue los lineamientos del "Weight Drop Test" [4]. Este consiste en un sistema de apoyos donde se disponen los especímenes y un sistema de elevación y lanzamiento del proyectil. En primer lugar, los apoyos están conformados por dos pilares de hormigón que se amarran a la losa reactiva del laboratorio a través de varillas roscadas. En la parte superior cada pilar dispone de un cabezal metálico sobre el cual se coloca el apoyo propiamente dicho formado por un prisma y un cilindro de acero, donde se apoya el espécimen. Estos están fijados al cabezal a través de bridas formadas por perfiles ángulos y varillas roscadas a fin de evitar el libre movimiento durante el ensayo. [Figuras 1 y 2].

El peso que se deja caer y que provoca el impacto tiene un sistema de elevación formado por cables de acero y una polea, además cuenta con un electro imán que cumple la función de sostener el proyectil para luego liberarlo automáticamente en el momento del ensayo. Se colocan también otros cables de acero como medida de seguridad que controlan la trayectoria del proyectil después del impacto.

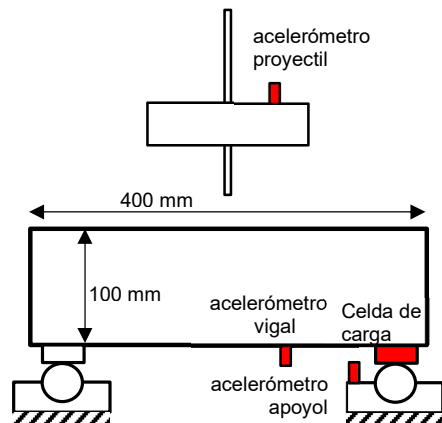


Figura 1: Instrumentación.



Figura 1: Sistema de Apoyos.

Para instrumentar este ensayo se dispone de 3 acelerómetros, se coloca un acelerómetro en el proyectil, otro en el tercio de la luz de la viga y un tercero en el apoyo de la viga. Adicionalmente también se coloca una celda de carga en un apoyo para medir la reacción en él mismo. En la Figura 1 se observa la disposición de cada instrumento. Los 3 acelerómetros son de un rango de 500 g marca PCB piezotronics modelo 352C03, mientras

que la celda de carga dinámica tiene una capacidad de 88.9 KN marca PCB piezotronics, modelo 482C05. Estos dispositivos tienen su propio acondicionador de señal también marca PCB piezotronics. Este ensayo cuenta con la particularidad de realizarse con una placa de adquisición capaz de registrar la información de los acelerómetros y celda con una frecuencia de 1.000.000 de datos por segundo, lo cual permite captar perfectamente el impacto. Se observa que en este caso el impacto tiene una duración de 2 milisegundos. Esta placa de adquisición es marca Measurement Computing, modelo USB-1616HS.

Luego de unas pruebas preliminares se define la altura de caída del proyectil en 10 cm para todos los ensayos, utilizando siempre el mismo proyectil. Este consiste en una varilla roscada, cuyo extremo es el que impacta. Esta varilla lleva una pesa de acero fijada con un sistema de tuercas, de esta forma alcanza un peso total de 17,55kg. Dado el sistema de apoyos descrito y teniendo en cuenta que la luz libre de las vigas es de 35cm, se determina efectuar el impacto justo en el centro de la luz del espécimen.



Figura 2. Ensayo de Impacto



Figura 4. Sistema de sujeción del proyectil.

MARCHA DEL ENSAYO

Se ensayaron 9 vigas de (5x10x40 cm), en primer lugar 3 vigas de hormigón sin refuerzo, luego 3 vigas con una capa inferior de 5 cm de refuerzo de hormigón de ultra alta resistencia con una adición de fibras de acero de 60 kg/m³ y finalmente otras 3 vigas con una capa inferior de 5 cm de refuerzo de hormigón de ultra alta resistencia y una adición de fibras de acero de 120 kg/m³.



Figura 5: Viga sin refuerzo colapsada.

Las primeras vigas alcanzan la rotura luego de un único impacto del proyectil en el centro de la luz (Figura 5). Las vigas del segundo grupo colapsan luego de dos impactos del proyectil. Se ejecuta el primer impacto y se aprecia una fisura que alcanza la mitad de la altura de la viga, en las cercanías de la zona de impacto, luego esta fisura se propaga por completo con el segundo impacto, llegando a la rotura del espécimen (Figura 6).



Figura 6: Viga con refuerzo de 60 kg/m^3 en el primer y segundo impacto.

Por último, las vigas que poseen un refuerzo inferior de hormigón de alta resistencia con una adición de 120 kg/m^3 de fibras de acero requieren más de tres impactos para colapsar. El primero de dichos especímenes logró soportar cinco impactos del proyectil antes de llegar a la rotura, mientras que los dos restantes colapsaron en el cuarto impacto. En todos los casos, luego del primer impacto no se aprecian fisuras visibles en las caras externas de las vigas. Luego del segundo impacto comienzan a apreciarse múltiples fisuras de pequeña magnitud, de las cuales una sola será la que progrese y se alcance la rotura por la acción de los siguientes impactos (Figura 7).

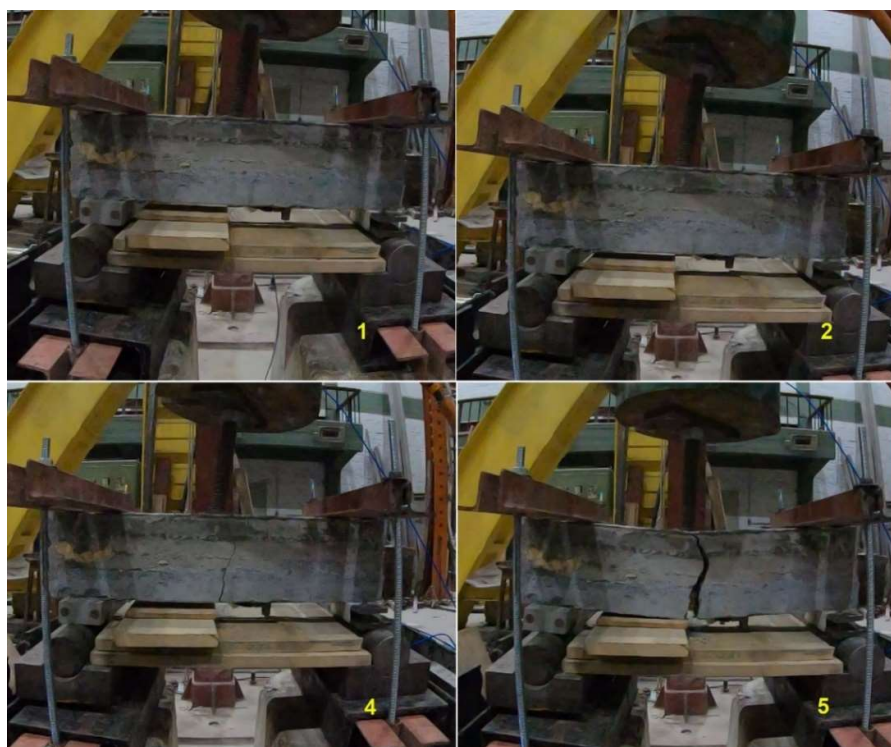


Figura 7. Viga con refuerzo de 120 kg/m^3 en el primer, segundo, cuarto y quinto impacto.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan los gráficos de los registros de la celda de carga y del acelerómetro ubicado en el tercio de la luz de la viga. Estos instrumentos permiten describir de la mejor manera posible el ensayo de impacto.

En la Figura 8, se muestran los registros de la celda de carga situada en el apoyo y del acelerómetro ubicado al tercio de la luz de la viga en función del tiempo. En primer término, se observa un desfase de 0,15 mseg entre los instantes en que cada instrumento registra valores distintos a cero. Este desfase se debe al tiempo de transmisión de la onda generada desde impacto hasta alcanzar cada instrumento. Básicamente, como la celda de carga se encuentra ubicada en el apoyo, esta empieza a registrar valores distintos a cero con posterioridad al acelerómetro en cuestión. También puede apreciarse el instante en que la viga ensayada alcanza la rotura. Esta apreciación se visualiza en el gráfico del acelerómetro después de aproximadamente 0,30 mseg desde el primer registro distinto a cero cuando los datos se manifiestan oscilantes con amplitudes errantes. Este fenómeno indicaría la rotura de la viga, pues a partir de ese momento el acelerómetro registra sólo vibraciones remanentes en el sistema. Se observa que el desfase que se presenta entre los picos de los registros de cada instrumento es mayor aún que el desfase inicial, esto puede explicarse teniendo en cuenta a que se trata de variables de naturaleza diferente “aceleración” y “fuerza de reacción”.

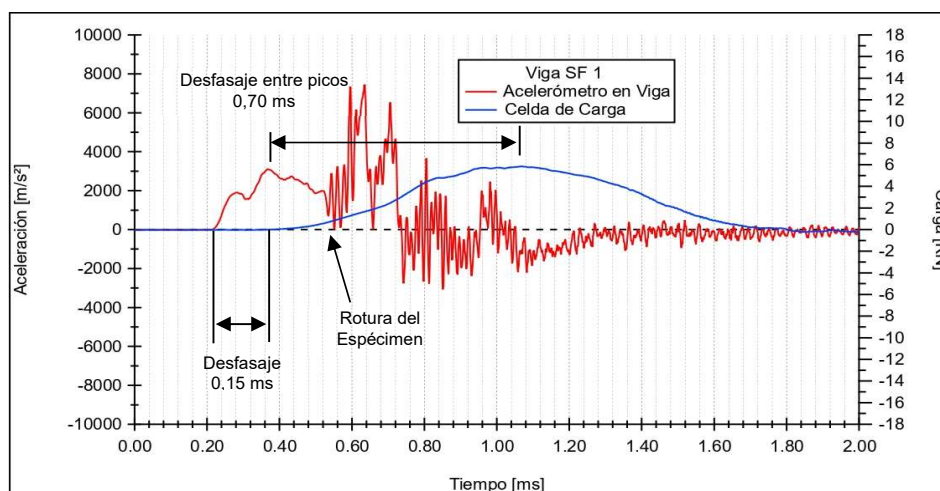


Figura 8: Impacto en Viga sin Refuerzo. Acel. en Viga y Celda de Carga vs Tiempo.

Para el caso de las vigas con refuerzo inferior de hormigón de ultra altas prestaciones con 60 kg/m^3 de fibras de acero se realizaron dos impactos hasta alcanzar la rotura. En la Figura 9 se presentan los valores que registran la celda de carga situada en el apoyo y el acelerómetro ubicado al tercio de la luz de la viga en función del tiempo durante el primer impacto. A partir de los registros del acelerómetro, se aprecia que el inicio de la fisuración se alcanza una vez transcurridos 0,40 mseg desde el primer registro, es decir que, comparando con las vigas sin refuerzo, en este caso tarda un 30 % más en llegar a dicha propagación. Esta diferencia puede justificarse a través de la presencia de las fibras que cosen las microfisuras que se van generando. De esta forma, se crea un efecto de fisuración múltiple, lo que redundará en una mejora en el comportamiento material y permite que la viga resista un poco más de tiempo hasta que alguna fisura se propague y crezca en mayor medida que las restantes.

Los valores de fuerza de reacción registrados por la celda de carga son mayores comparados con los de la viga original, y si el valor de la reacción es proporcional a la

resistencia dinámica, esto indica claramente un aumento de la resistencia respecto a las vigas sin refuerzo, por lo tanto se infiere un buen comportamiento del HUAP como refuerzo.

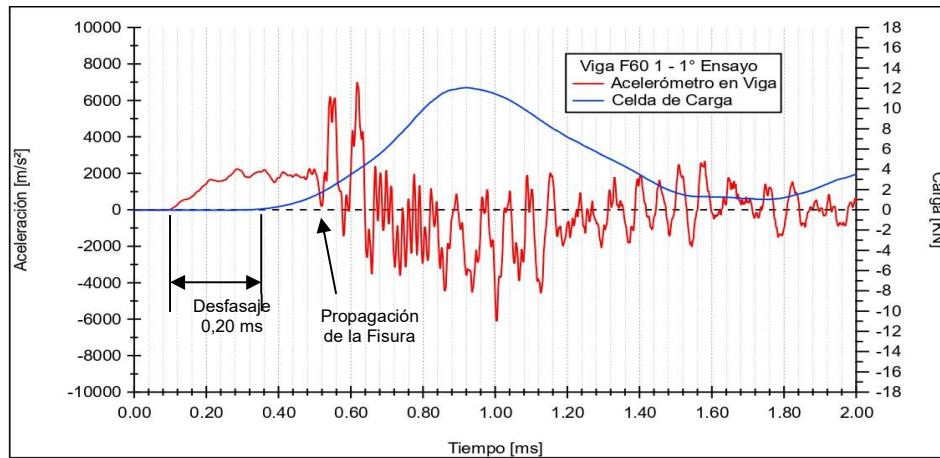


Figura 9: 1º Impacto Viga con Ref. (60 kg/m³). Acel. en Viga y Celda de Carga vs Tiempo

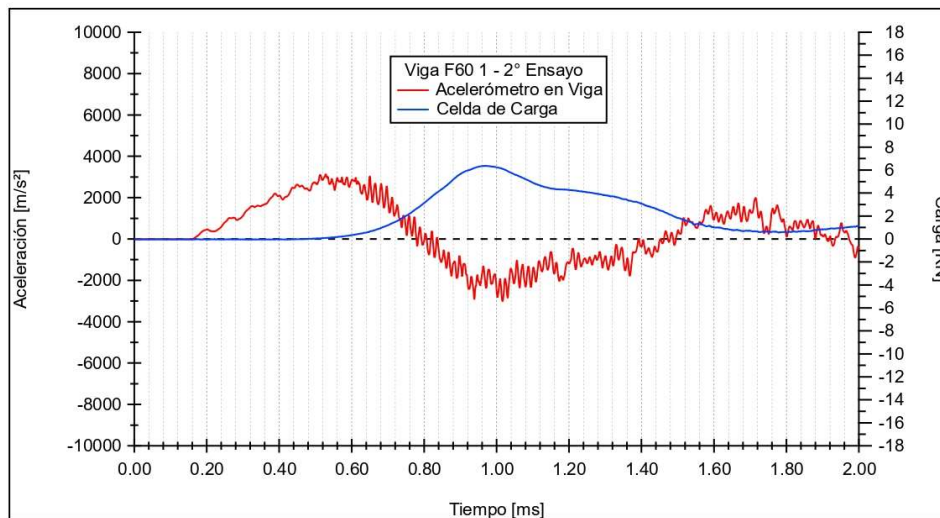


Figura 10: 2º Impacto Viga con Ref. (60 kg/m³). Acel. en Viga y Celda de Carga vs Tiempo.

En la Figura 10 puede observarse un gráfico donde se consideran los registros correspondientes al segundo impacto en la viga con refuerzo de hormigón de ultra altas prestaciones con 60 kg/m³ de fibras de acero. Es evidente que los valores registrados por la celda de carga son menores que los del primer ensayo, pues la viga ya se encuentra fisurada. No obstante, aún es posible observar el instante en el que la fisura se propaga por completo y se alcanza la rotura, esto corresponde al punto en el que los registros del acelerómetro empiezan a mostrar mayor cantidad de vibraciones.

Por último, tenemos el caso de las vigas con refuerzo de hormigón de ultra altas prestaciones con 120 kg/m³ de fibras de acero. En uno de estos especímenes se realizaron cinco impactos hasta llegar a la rotura. Dada la cantidad de impactos efectuados hasta la rotura, se evidencia aún más el beneficio que se genera por la acción de las fibras de acero que cosen las microfisuras.

El gráfico de la Figura 11 muestra los registros en la viga para el primer impacto realizado. Luego del 1º impacto no se aprecian fisuras a simple vista en las caras externas del

especímen. Sin embargo, los registros del acelerómetro muestran una curva definida, pero con la presencia de oscilaciones de alta frecuencia que estarían indicando microfisuraciones en el interior del hormigón.

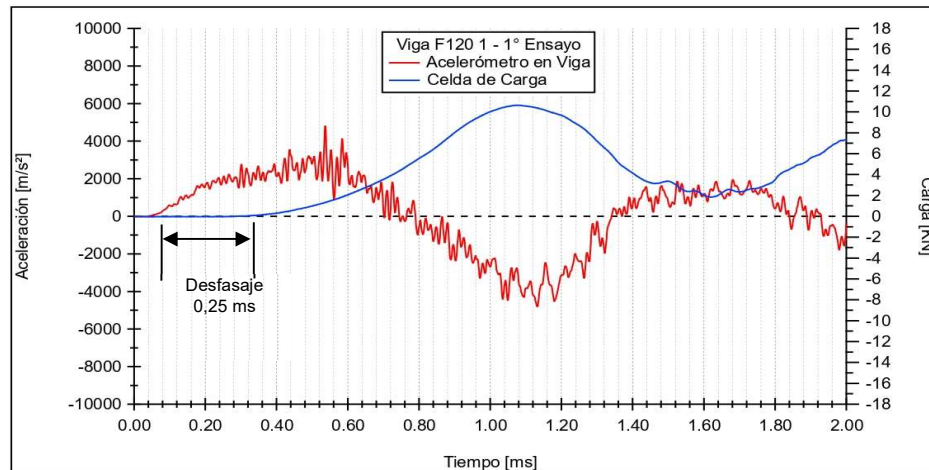


Figura 11: 1º Impacto Viga con Ref.(120 kg/m³). Acel. en Viga y Celda de Carga vs Tiempo.

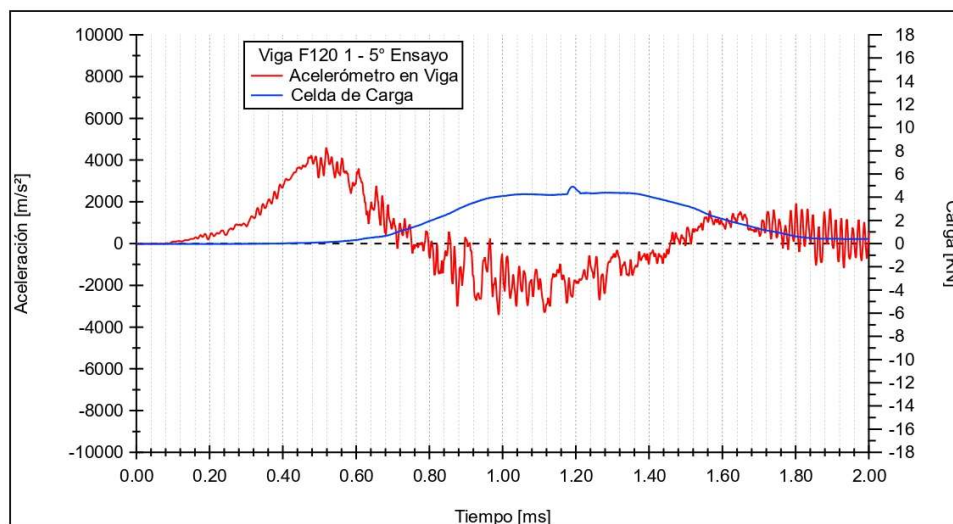


Figura 12. 5º Impacto Viga con Ref.(120 kg/m³). Acel. en Viga y Celda de Carga vs Tiempo.

En la Figura 12 se muestra el gráfico que corresponde al quinto impacto que se ejecutó hasta alcanzar la rotura. En él se aprecia que las oscilaciones de alta frecuencia que muestra la curva del acelerómetro en la viga posee mayor magnitud, lo que se relaciona directamente con la magnitud de las fisuras que se van generando en la viga. Además, la celda de carga muestra un menor valor máximo en la fuerza de reacción del apoyo, revelando un debilitamiento por la fisuración debido a los impactos anteriores. Durante el ensayo; luego del tercer impacto ya se apreció la propagación controlada de una de las fisuras a la mitad de la luz de la viga, que es la responsable de la rotura del espécimen.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado con esta primera serie de vigas muestra que con el equipamiento disponible es posible realizar un análisis experimental bajo cargas dinámicas. Con los sensores y dispositivos dispuestos en los especímenes se pudieron captar y registrar los efectos del impacto en las vigas construidas para este estudio.

A partir de las observaciones efectuadas se evidencia que, posteriormente al impacto, se registran oscilaciones de alta frecuencia en los acelerómetros ubicados en el tercio de la luz. Esto indicaría la existencia de fisuraciones y la amplitud de estas oscilaciones sería proporcional a la fisuración, amplitudes pequeñas implicarían microfisuración no perceptible a simple vista, mientras que amplitudes mayores corresponderían a una fisuración apreciable.

En todos los ensayos pudo apreciarse un desfase entre los primeros pulsos que registran cada uno de los instrumentos. Este desfase se debe al tiempo de transmisión de la onda hasta alcanzar la posición de cada instrumento. Las vigas sin refuerzo presentan un desfase entre el acelerómetro que se ubica al tercio de la luz y la celda de carga de 0,15 mseg, mientras que las vigas con el refuerzo de 60 kg/m³ de fibras muestran 0,20 mseg. Aquellas que con refuerzo de 120 kg/m³ presentan un desfase de 0,25 mseg. Se concluye que la velocidad a la que se transmite la onda depende del contenido de fibras, disminuyendo a medida que la dosificación aumenta.

La reacción en el apoyo, medida a través de la celda de carga, toma valores mayores para las vigas que tienen refuerzo de hormigón con fibras. Esto se debe a que dichos especímenes resisten de manera íntegra la sollicitación sin grandes fisuras. Además, en el caso de las vigas sin refuerzo la velocidad de fisuración es mayor a la velocidad con la que la onda se transmite al apoyo, por lo que no se desarrolla la totalidad del esfuerzo en el apoyo. Los resultados indican un incremento en la reacción del 50 % aproximadamente, entre las vigas sin refuerzo y aquellas con refuerzo de hormigón de ultra altas prestaciones con 60 kg/m³ de fibras. Esto permite concluir que existe un aporte de resistencia por parte del hormigón de ultra altas prestaciones (con fibras de acero), indicando que es totalmente apto para ser utilizado como refuerzo o reparación en vigas sometidas a cargas de impacto.

La reacción pareciera ser un buen parámetro indicador del daño de la viga, pues se aprecia una importante disminución de la misma en el caso de las vigas fisuradas.

Es evidente que el tamaño de la probeta condiciona la masa de impacto y la altura de caída, de manera que en futuras investigaciones se debería considerar cuál es su influencia.

REFERENCIAS

- [1] Zerbino R, Giaccio G, Torrijos MC, "Hormigones de Ultra Alta Resistencia Reforzados con Fibras". VII Congreso Internacional – 21^o Reunión Técnica de la AATH, (2016).
- [2] Fiengo Pérez F, Sfer D, Isla F, Gutiérrez SE, "Caracterización de Hormigones de Ultra Altas Prestaciones". Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán, JORNADAS AIE (2016).
- [3] Cristian Erick León, "Caracterización Dinámica de Hormigones de Altas Prestaciones". Proyecto Final de Carrera de Ing. Civil, Universidad Nacional de Tucumán, (2018).
- [4] Banthia N, "Impact resistance of concrete", Doctoral Thesis, University of British Columbia, (1987).