

Análisis experimental mediante fotogrametría del comportamiento de fisuras de cortante en vigas esbeltas de hormigón armado reforzado con fibras macro sintéticas

F. Ortiz Navas ⁽¹⁾, J. Navarro-Gregori ⁽¹⁾ y P. Serna ⁽¹⁾

⁽¹⁾ ICITECH Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Valencia, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6411>

RESUMEN

El presente trabajo estudia mediante técnicas de fotogrametría el comportamiento de fisuras inclinadas de cortante en una serie de cuatro vigas de hormigón armado (HA) y hormigón reforzado con fibras de polipropileno (HRFP) con y sin refuerzo transversal. Se presta especial atención a la evaluación de los desplazamientos y deslizamientos de las caras de fisuras. Los resultados obtenidos son comparados con resultados medidos durante el transcurso del ensayo por instrumentos (SDLs). Se observa que con el uso de fibras sintéticas dosificadas en 10 kg/m^3 , se reduce significativamente la abertura de la fisura diagonal principal en el orden de un tercio. Adicionalmente se observa una no linealidad de relación abertura – deslizamiento a lo largo de la fisura diagonal principal. Finalmente se proporcionan relaciones de abertura – deslizamientos que pueden ser empleados en ensayos Push – off.

PALABRAS CLAVE: Hormigón con fibras sintéticas, fisura tensión diagonal, procesamiento de imágenes, fotogrametría.

1. INTRODUCCIÓN

A pesar que el comportamiento a cortante en elementos de hormigón ha sido estudiado desde hace más de un siglo, este comportamiento, por su complejidad, físicamente no ha podido ser explicado en su totalidad, debido a que depende de varios factores como: el vano de corte, diámetro y cantidad de refuerzo transversal, condiciones de adherencia del refuerzo, efecto pasador de la armadura longitudinal, engranamiento de áridos, entre otros. Adicionalmente, estos factores pueden verse influenciados cuando se emplean nuevos tipos de hormigones como los hormigones reforzados con fibras sintéticas, que han tenido una fuerte evolución en la última década, y que pueden ser usadas hoy en día en aplicaciones estructurales. Sin embargo, existen algunas interrogantes como ¿En qué magnitud se ven afectados estos factores?

Mediante experimentación a nivel de elemento, es bien conocido que el uso de macro fibras de acero en una dosificación adecuada, mejora la capacidad a cortante de un elemento

debido a que estas cosen la fisura proporcionando sustancialmente mayor resistencia post fisuración, a la vez que ductilidad al elementos. Respecto al uso de macro fibras sintéticas, en la actualidad son limitadas las investigaciones relacionadas al comportamiento a cortante. Altoubat et al [1] ensayó 27 vigas a escala real (cortas y esbeltas) y sin refuerzo transversal, y en las que se incluyen fibra sintética con alto módulo de elasticidad en diferentes fracciones de volumen (0.5, 0.75 y 1%) . Los resultados mostraron que la adición de fibras sintéticas mejoró significativamente hasta en un 30% la resistencia a corte, comparadas con vigas control, así como también modificó el comportamiento de fisuración y modo de fallo. Guray et al[2] estudió la influencia de las fibras de polipropileno en el comportamiento a cortante sobre 11 vigas sin refuerzo transversal al variar el vano a cortante de 2,5 a 4,5 y la fracción en volumen de fibras. Sus ensayos demostraron que la resistencia y la ductilidad habían mejorado mediante la adición de fibras sintéticas y, en ciertos casos y dependiendo del vano a cortante y la fracción de volumen de las fibras también se modificó el modo de fallo. Otros ensayos [3][4] también han determinado que el uso de fibras de polipropileno aumenta la resistencia al corte, ductilidad y su uso como refuerzo a cortante en elementos estructurales.

El engranamiento de áridos, uno de los mecanismos de transferencia en elementos de hormigón sin refuerzo a cortante, fue claramente explicado en el Comité 426 de la ASCE-ACI [5]. El mecanismo actúa debido a que una cara de la fisura se desplaza en el sentido contrario del otro, oponiéndose al movimiento los áridos sobresalientes, creándose una fricción entre estos capaz de mantener la habilidad de transmitir esfuerzos de corte. Con el uso del hormigón reforzado con fibras, este mecanismo es diferente si se compara con hormigón tradicional. Echegaray et al [6] en base a ensayos Push-off con probetas prefisuradas, (aberturas de $\omega = 0$ y $\omega = 1$) determinó la influencia de las fibras de acero en el engranamiento de áridos y macro rugosidad, y por ende en la resistencia a cortante.

El presente trabajo, tiene como objetivo determinar a partir de imágenes obtenidas durante el ensayo de una serie de vigas, la evolución de las fisuras diagonales principales de cortante aplicando técnicas fotogramétricas. Se pone especial atención a la relación abertura y deslizamientos de caras que sufren las fisuras durante el transcurso del ensayo, con el fin de poder trasladar esta información a ensayos de probetas Push-off.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La campaña experimental en su totalidad consta de 24 vigas que son divididas en 3 grupos: el primer grupo de 8 vigas fue fabricado con hormigón sin adición de fibra, el segundo grupo de 8 vigas incorpora fibra de polipropileno a una razón de 10 kg/m^3 y el tercer grupo de 8 vigas que incorporan fibras de acero a razón de 30 kg/m^3 . La geometría de las vigas son inspiradas en aquellas ensayadas por Bresler et al[7] en 1963 (cuatro series de tres vigas) en las que se investigó el comportamiento crítico a cortante. Estas vigas, que cubren un amplio rango de refuerzo transversal y vano de corte, han sido consideradas por la comunidad de investigadores del comportamiento a cortante, como una serie de vigas clásicas, y han servido para la calibración y análisis de modelos numéricos [8]. De las 12 vigas fabricadas por Bresler et al [7], han sido excluida las vigas pertenecientes a la “Serie 3”, debido a que su fallo fue a flexión.

Para la fabricación de aquellas vigas de HRFP, se empleó tres tipos de agregado fino, dos tipos de agregado grueso, cemento portland (CEM I 42.5N), agua, súper plastificante y fibras de polipropileno de 48mm de longitud y 0.85mm de diámetro, dosificadas en 10 kg/m³. La relación agua cemento en todas las amasadas fue de 0.5. Para obtener la trabajabilidad deseada, se empleó súper plastificante en una proporción de 1% y 1.5% en porcentaje de peso de cemento. La resistencia característica a la compresión de diseño tanto para el HA como para el HRFP fue de 35 MPa.

En el presente artículo se presentan únicamente los resultados obtenidos durante el ensayo de 4 vigas, que corresponden a la serie A1 de HR y HRFP (ver **Tabla 1** y **Figura 1**). El detalle y resultados de la campaña experimental completa se presenta en el artículo “Experimental reexamination of classic shear-critical concrete beams tests including fibers” [9].

Tabla 1. Geometría y armado de viga

Viga	<i>b</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	Vano (mm)	<i>a/d</i>	Armadura Inf.	Armadura Sup.	Estribos	Fibras (kg/m ³)
OA1	305	552	472.5	5060	3660	3.87	3Φ20+3Φ25	2Φ12+1Φ10	-	-
A1	305	552	472.5	5060	3660	3.87	3Φ20+3Φ25	2Φ12+1Φ10	Φ8@330mm	-
OAP1	305	552	472.9	5060	3660	3.87	3Φ20+3Φ25	2Φ12+1Φ10	-	10
AP1	305	552	475.0	5060	3660	3.85	3Φ20+3Φ25	2Φ12+1Φ10	Φ8@330mm	10

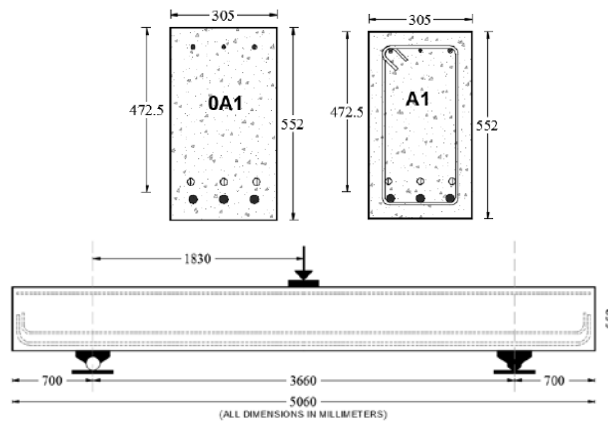


Figura 1. Sección transversal y geometría de vigas

2.1. Configuración del ensayo

Las vigas fueron ensayadas a 3 puntos. La configuración e instrumentación del ensayo se presenta en la **Figura 2**. La carga fue aplicada con control de desplazamiento en el centro del vano de la viga mediante un actuador hidráulico de 1000 kN a una velocidad de 0.30±0.10 mm/min. Para la medición de desplazamiento, se utilizaron 9 captadores (SDL) ubicados según se muestra en la **Figura 2**. Para la medición de deflexiones, se ubicó uno de

los captadores (SDL1) en el centro del vano, mientras que otros dos fueron colocados sobre los apoyos para capturar y corregir movimientos verticales no deseados. Dos dispositivos horizontales, se ubicaron en el centro de vano para medir compresiones y tracciones en la sección. Adicionalmente se han colocado dos dispositivos inclinados a 45 grados a una distancia igual al canto útil de la viga para registrar la fisuración inclinada producida por esfuerzos cortantes. Finalmente dos captadores fueron colocados en la parte superior de la mitad del vano de corte.

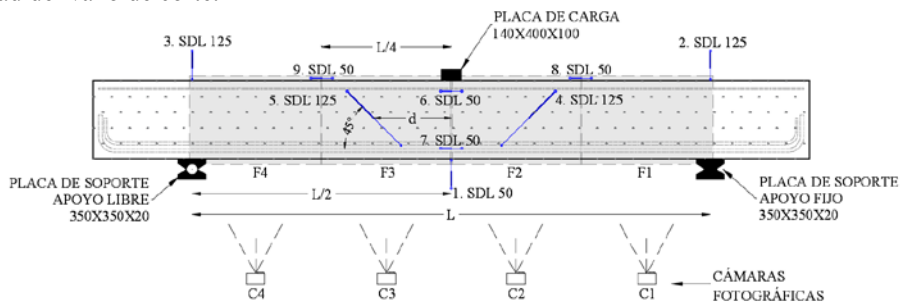


Figura 2. Configuración e instrumentación de ensayo de vigas a tres puntos

Para poder realizar mediciones después del ensayo, se han empleado cuatro cámaras fotográficas de alta resolución (C1 a C4, ver **Figura 2**), las cuales toman una fotografía cada 10 segundos de ensayo. Cada fotografía abarca un cuarto del vano de la viga con una resolución de 3456x5184 píxeles. Para facilitar el procesamiento y medición en las imágenes, se ha pintado sobre la cara fotografiada de la viga un patrón de puntos redondos de 6mm de diámetro separados entre sí 10 cm. Todas las fotografías han sido tomadas conservando las mismas condiciones de luz y distancia focal. Cada cámara se encontró separada del elemento a 800 mm de distancia. Los resultados de las mediciones se presentan en el apartado 3 del presente documento.

2.2. Resultados del ensayo.

Los resultados experimentales en términos de carga última (P_u), deflexión en el centro del vano (δ_u), modo de fallo (MDF), y máxima abertura de fisura a corte (w_s) y a flexión (w_f), se resumen en la **Tabla 2**. Las vigas presentan dos modos de fallo: Tensión diagonal (D-T) en aquellas sin refuerzo transversal y cortante compresión (V-C), en vigas con refuerzo trasversal.

Es importante mencionar que todos los resultados han sido obtenidos en la carga última (carga máxima) y no se ha considerado el peso propio del elemento.

Tabla 2. Resultados de ensayo de vigas a tres puntos.

Viga	MDF	P_u (kN)	V_u (kN)	V_u (MPa)	δ_u (mm)	w_s (mm)	w_f (mm)
OA1	D-T	312.11	156.06	0.93	5.74	0.30	0.25
A1	V-C	472.71	236.35	1.40	16.31	4.00	0.25
OAP1	D-T	446.68	223.34	1.33	15.81	6.00	0.25
AP1	V-C	695.30	347.65	2.06	29.78	2.50	1.00

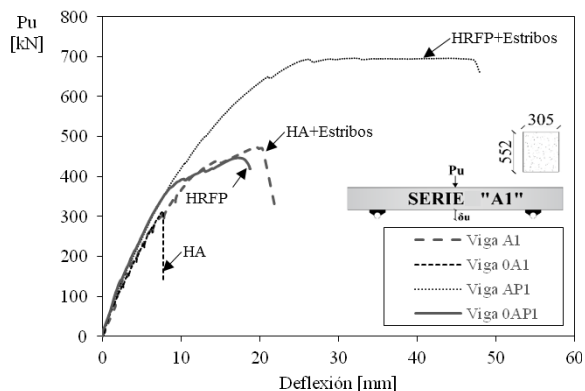


Figura 3. Respuesta carga flecha. a) Serie A1

Las fisuras verticales a flexión son las primeras en aparecer, en la serie A1 a los 73 kN (valores promedio), ubicándose generalmente cercana a la posición de los estribos, y cada 150-170 mm en aquellas vigas sin refuerzo transversal. La abertura máxima de estas fisuras se encuentra en el orden de 0.25 a 1.00mm.

La distribución de las fisuras de cortante en las cuatro vigas, aparecen con un patrón similar, naciendo en su mayoría de una fisura a flexión que ha alcanzado la mitad de altura de la sección de la viga. Las fisuras de cortante crecen en general con un ángulo de inclinación de 41 grados hacia el punto de aplicación de la carga. A medida que aumenta la carga, las fisuras de cortante reducen el ángulo de inclinación, se unen con otras fisuras, aparece la fisura diagonal principal y se re direccionan hacia los apoyos. Es importante mencionar que en la viga de HRFP sin estribos (0AP1) se observa ligeramente mayor distribución de fisuras con respecto a su similar sin fibras (0A1). La fisura diagonal principal en las vigas de HR aparece aproximadamente al 41% de la carga pico, mientras que en aquellas vigas de HRFP, nace como una fisura nueva entre dos fisuras inclinadas aproximadamente al 70% de la carga pico, tendiendo como referencia que la primera fisura a cortante aparece en promedio al 24% de la carga pico.

Si comparamos el patrón de fisuración de las vigas sin estribos, un instante antes que falle la viga 0A1, 312 kN, (ver Figura 4) se observa que la fisura diagonal principal, en el caso de la viga 0AP1, aún no ha ingresado a la zona superior de compresión, mientras que en 0A1, la fisura ingresa y debilita abruptamente la zona comprimida, neutralizando este mecanismo resistente a cortante y produciéndose el fallo instantáneo.



Figura 4. Comparación estado de carga vigas 0A1 y 0AP1

3. ANÁLISIS FOTOGRAMÉTRICO

En el presente apartado, se muestra la aplicación de técnicas fotogramétricas para determinar el comportamiento del hormigón, específicamente el comportamiento de la fisura principal desde su aparición hasta la rotura del elemento.

Durante el ensayo se dificulta realizar mediciones a nivel de fisura mediante instrumentación tradicional, ya que si bien, conocemos el sector del elemento donde se generan los mayores esfuerzos, resulta imposible determinar el lugar exacto donde aparecerán estas. La técnica de medición por fotogrametría, resulta de gran ayuda para evaluar deformaciones y desplazamientos de un elemento, así como el estudio de patrones y evolución de fisuras.

Las imágenes son capturadas empleando las mismas condiciones de luz y distancia focal utilizando un lente de 18mm, y posteriormente guardadas en formato digital RAW de alta resolución. El procedimiento inicia una vez procesada la secuencia de imágenes. Para este propósito, se empleó un software propio desarrollado en el ICITECH. La distorsión de las imágenes ha sido corregida mediante el uso de software especializado con las propiedades del lente empleado. Los puntos de seguimiento son los puntos pintados sobre una cara de la viga. Aunque no se ha realizado un estudio pormenorizado de la precisión de las mediciones, se puede estimar, acorde al tamaño de píxeles que tiene la fotografía y al área que esta abarca, que la precisión obtenida en promedio es de 0.19mm / pixel. En el apartado 3.2 de este documento, con el fin de validar las mediciones obtenidas por fotogrametría, se muestra una comparación de estas con mediciones realizadas mediante instrumentación tradicional.

3.1. Resultados fotogrametría.

Para medir el deslizamiento y abertura de la fisura diagonal principal, se han seleccionado puntos de seguimiento cercanos a la fisura, como se muestra en la **Figura 5** que corresponde a las fotografías F1 y F2 de la viga 0AP1. En esta se puede observar en color rojo la trayectoria de cada punto durante el ensayo. Las líneas magentas, muestran los lugares en donde se realizó las mediciones de abertura de fisura y que corresponden a los puntos 1-2, 5-6 y 9-10. Las líneas amarillas muestra el lugar en donde se realizó la medición de deslizamiento de la fisura. Las respuesta de la medición de abertura y deslizamiento de fisura, en cada estado de carga, así como también la relación entre estas se presentan en la **Figura 6** para elementos sin estribos y **Figura 7** para elementos con estribos.

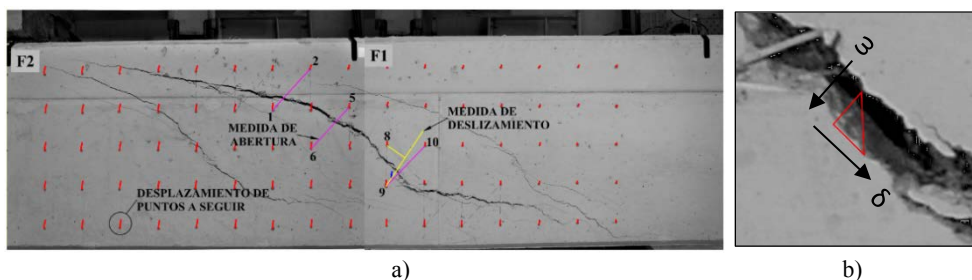


Figura 5. a) Medición entre puntos de seguimiento en fotografías posición F1 y F2 de viga 0AP1, b) Abertura y deslizamiento a carga máxima de fisura diagonal principal viga 0AP1

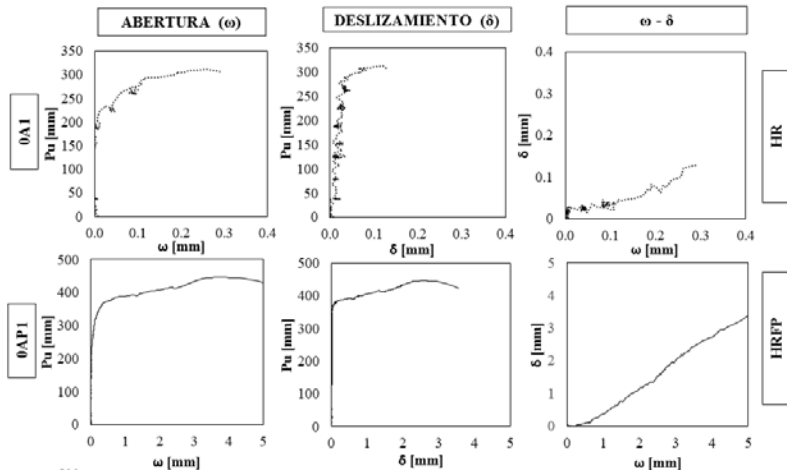


Figura 6. Respuesta Carga - Abertura, Carga - Deslizamiento y Abertura - Deslizamiento, de vigas sin refuerzo transversal

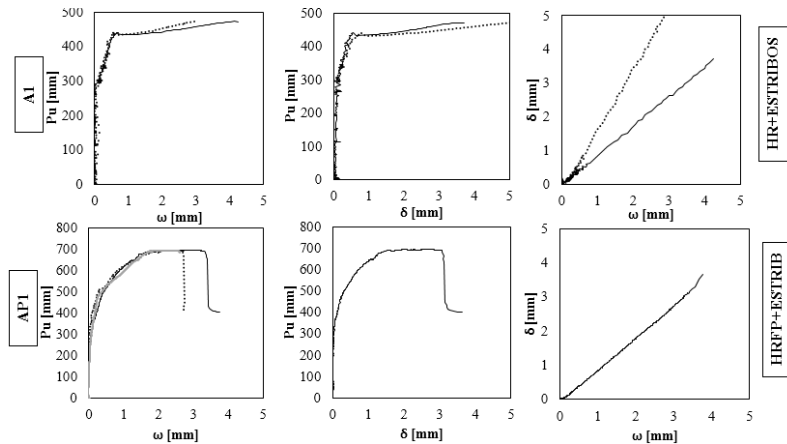


Figura 7. Respuesta Carga - Abertura, Carga - Deslizamiento y Abertura - Deslizamiento, de vigas con refuerzo transversal

3.2. Comparación Fotogrametría vs Instrumentación

Con el fin de comprobar las mediciones realizadas a través de fotografías, se realiza una comprobación con medidas obtenidas mediante instrumentación convencional. En la **Figura 8**, se muestra en línea punteada la respuesta Carga – Desplazamiento del captador SDL 5 y 6 (captadores inclinados, ver **Figura 2**), y en línea continua las mediciones obtenidas mediante fotogrametría. Se observan que los dos procesos de medición arrojan una similitud significativa al describir el comportamiento del elemento.

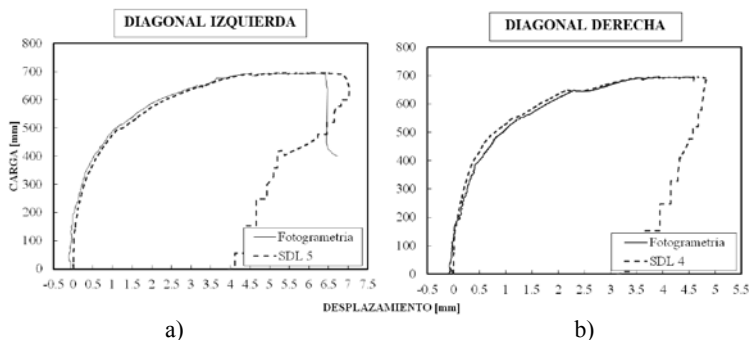


Figura 8. Respuesta Carga - Desplazamiento medida mediante fotogrametría en
a) Lado Izquierdo y b) Lado derecho

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La ductilidad que presentan las vigas de HRFP frente a las vigas de HR puede ser observado tanto a nivel de elemento (ver **Figura 3**) como a nivel de fisura diagonal principal (ver **Figura 6**). Si comparamos a nivel de fisura principal las vigas 0A1 (HR) y 0AP1 (HRFP), podemos ver que, en la primera, al llegar a la carga máxima (P_u), la viga falla de una manera abrupta y frágil, comportamiento asociado a D-T, mientras en la viga de HRFP, al alcanzar P_u , la fisura sigue abriéndose y deslizándose hasta su colapso, proporcionando las fibras un cierto nivel de ductilidad entre P_u y el colapso. Este comportamiento a nivel de fisura principal menos frágil y más predecible, podría clasificarse como una tensión diagonal controlada (C-D-T).

Es importante mencionar que la relación abertura y deslizamiento dentro de la viga, dependerá del lugar de medición, inclinación de la fisura y posición de esta.

Si bien no existe una relación clara de abertura vs. deslizamiento, se pueden decir que esta relación depende de la ubicación de la medición, inclinación de la fisura y posición de esta en la viga. En general si la medición se realiza en aquellos lugares donde la fisura diagonal principal es menos inclinada, existirá menos abertura y mayor deslizamiento.

Así también el grosor y deslizamiento de una determinada fisura, dependerá en gran medida del comportamiento de las fisuras cercanas. Estas variaciones tienen como consecuencia que a lo largo de la fisura, existirán zonas donde el mecanismo resistente de engranamiento de árido aporte más a la resistencia global a cortante del elemento, y en otros lugares sea menor o nula. Esta no linealidad a nivel de fisura añade complejidad al estudio, y modelización del cortante, principalmente cuando el elemento carece de refuerzo transversal, y el engranamiento de áridos es uno de los mecanismos de resistencia más importante.

La **Figura 9** muestra una comparación grafica del comportamiento de la fisura diagonal principal del HR y el HRFP con y sin refuerzo transversal. Se observa que con el uso de macro fibras sintéticas, se reduce en aproximadamente un tercio el grosor de la fisura, debido al efecto puente que las fibras proporcionan, retrasando de esta manera la propagación de la misma (ver **Figura 4**).

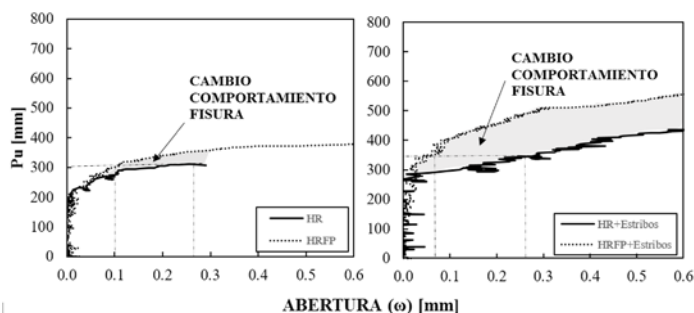


Figura 9. Comparación abertura fisuras HR vs. HRFP con y sin refuerzo transversal.

En la **Figura 10** se representan todas las mediciones realizadas sobre la fisura principal en todos los niveles de refuerzo transversal (fibras y estribos) para las series A1, y se muestra una línea de tendencia de relación entre deslizamiento y abertura. Se observa que en aquellas vigas que no poseen ningún tipo de refuerzo transversal (HR), la abertura y deslizamiento no sobrepasa los 0.3 a 0.4mm y poseen una proporción abertura-deslizamiento de 1/0.5, mientras que en el resto de vigas, con diferentes niveles de refuerzo transversal las aberturas y deslizamientos pueden alcanzar entre 2.5-6mm con proporciones entre si de 1/0.75.

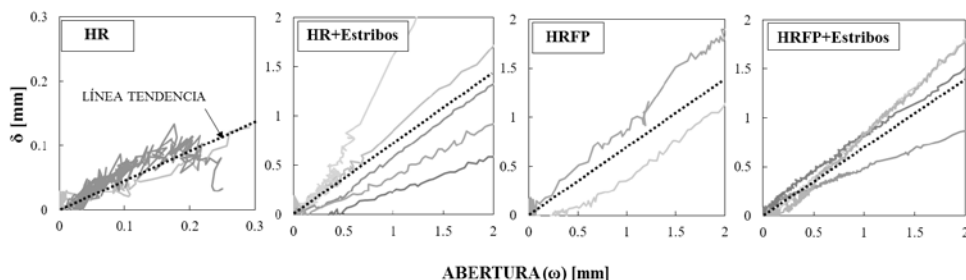


Figura 10. Tendencia Deslizamiento vs. Abertura.

Finalmente, con referencia a la comparación de mediciones entre la fotogrametría y la instrumentación empleada (SDLs), en promedio la diferencia que existe entre ambas se encuentra en el orden de 0.2mm. En estados de carga bajos la diferencia que existe entre los dos procesos de medición es de 0.05mm. Gran parte de este error se debe a la conexión fotografía – estado de carga, ya que cada fotografía es tomada cada 10 segundos, es decir 1 lectura cada 10 segundos, mientras que la lectura por instrumentación de carga y desplazamientos se almacena a razón de 100 lecturas cada 10 segundos. Esta considerable diferencia resulta en que cada fotografía puede ser asociada con 100 lecturas por instrumentación, y cuando existen grandes variaciones en el comportamiento del elemento, parte de estas variaciones no serán leídas mediante fotografías.

4.- CONCLUSIONES

Después de la campaña experimental y análisis de sus resultados, las principales conclusiones del presente estudio son entre otras:

- a) El uso de fibras macro sintéticas en vigas mejoran significativamente el comportamiento a cortante incrementando la carga última y proporcionando mayor ductilidad tanto a nivel elemento como fisura. Este comportamiento a nivel de fisura principal menos frágil y más predecible, podría clasificarse como una tensión diagonal controlada (C-D-T).
- b) Durante el análisis fotogramétrico, se observa una no linealidad geométrica de relación abertura – deslizamiento a lo largo de una fisura. Estas variaciones tienen como consecuencia la existencia de zonas donde el engranamiento de árido aporte más a la resistencia global a cortante del elemento, y en otros lugares sea menor o nula.
- c) Con el uso de macro fibras sintéticas dosificadas a 10kg/m^3 en vigas, reduce en aproximadamente un tercio la abertura de fisuras, retrasando la propagación de la misma, manteniendo intacto durante más tiempo la zona superior comprimida.
- d) Las aberturas y deslizamientos vigas de HR tienen aberturas y deslizamientos en el orden de hasta 0.4mm con relaciones promedio entre si 1/0.5, mientras que en HRFP pueden llegar hasta los 6mm con relaciones abertura – deslizamiento de 1/0.75.

REFERENCIAS

- [1] S. Altoubat, A. Yazdanbakhsh, K.A. Rieder, Shear behavior of macro-synthetic fiber-reinforced concrete beams without stirrups, *ACI Mater. J.* 106 (2009) 381–389.
- [2] G. Arslan, M. Ozturk, R. Secer, O. Keskin, Shear behaviour of polypropylene fibre-reinforced-concrete beams without stirrups, (2016).
- [3] A. Conforti, F. Minelli, A. Tinini, G.A. Plizzari, Influence of polypropylene fibre reinforcement and width-to-effective depth ratio in wide-shallow beams, *Eng. Struct.* 88 (2015) 12–21. doi:10.1016/j.engstruct.2015.01.037.
- [4] D.R. Sahoo, K. Maran, A. Kumar, Effect of steel and synthetic fibers on shear strength of RC beams without shear stirrups, *Constr. Build. Mater.* 83 (2015) 150–158. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.010.
- [5] A.-A.C. 426, The Shear Strength of Reinforced Concrete Members, *J. Proc.* 70 (n.d.). doi:10.14359/11224.
- [6] J. Echegaray-Oviedo, J. Navarro-Gregori, E. Cuenca, P. Serna, Upgrading the push-off test to study the mechanisms of shear transfer in FRC elements, *Proc. 8th Int. Conf. Fract. Mech. Concr. Struct. Fram.* 2013. (2013) 1012–1021.
- [7] B. Bresler, A.C. Scordelis, Shear strength of reinforced concrete beams, *J. Am. Concr. Inst.* 60 (1963) 51–72.
- [8] F.J. Vecchio, W. Shim, Experimental and Analytical Reexamination of Classic Concrete Beam Tests, *J. Struct. Eng.* 130 (2004) 460–469. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(460).
- [9] J.N. Gregori, F. Ortiz Navas, G.E. Leiva Herdoncia, P. Serna, Cuenca E., Experimental reexamination of classic shear-critical concrete beams tests including fibers, in: *Proc. 9th RILEM Int. Symp. Fibre-Reinforced Concr.*, Vancouver, 2016.