



HORMIGONES DE ULTRA ALTA RESISTENCIA REFORZADOS CON FIBRAS

Raúl Zerbino¹, Graciela Giaccio², María Celeste Torrijos¹
LEMIT-CIC, 52 e/121 y 122, (1900) La Plata, Argentina. e-mail: ggiaccio@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: Hormigón de Ultra Alta Resistencia, microfibras de acero, tenacidad.

RESUMEN

Los materiales de ultra alta resistencia con cemento portland revisten interés para el refuerzo y reparación de construcciones de hormigón; el uso para la extensión de la vida en servicio de estructuras de hormigón armado o en estructuras expuestas cotidiana o potencialmente a acciones extremas como sismos y explosiones se destacan como aplicaciones. Estos materiales poseen resistencia a compresión superior a 150 MPa e incorporan microfibras de acero que incrementan la resistencia y generan un cuadro de fisuración múltiple. Este trabajo trata sobre los criterios de diseño y propiedades de este tipo de mezclas y se muestran resultados que evidencian el efecto de la incorporación de microfibras en la respuesta mecánica de losas y placas de 20 mm de espesor.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de materiales de altas prestaciones para el refuerzo y rehabilitación de estructuras existentes o para la construcción de nueva infraestructura representa una temática de gran interés. En varios países, incluida Argentina, la reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado se ha tornado una urgencia; muchos edificios y puentes no han sido diseñados para soportar sismos, en ocasiones hay cambios de destinos, aumentos en los niveles de cargas o riesgos que las estructuras sean expuestas a cargas extremas como explosiones o impacto accidental o intencional. Sin dudas hay edificios que debieran ser reforzados para soportar tales acciones. Para ello las estructuras deben tener una capacidad de deformación adecuada que les permita disipar gran cantidad de energía antes de la rotura en algunos puntos e impida el colapso catastrófico ante cargas extremas. Para ello los materiales usados en la construcción o refuerzo deben poseer no sólo elevada resistencia sino también ductilidad, resistencia al descascaramiento o la erosión, posibilidad de desarrollar múltiples fisuras y capacidad para mantener integridad.

Entre las soluciones propuestas aparece con ventajas el uso de capas delgadas de Hormigón de Ultra Alta Resistencia Reforzado con Fibras (HUARRF). Como el material es similar al de los elementos estructurales, esta reparación puede formar parte integral

¹ Investigador CONICET. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina.

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

de la estructura con escaso efecto intrusivo; y es menos propensa a fallar si se compara con la combinación de materiales con diferentes propiedades termo-mecánicas.

Existen muchos antecedentes locales en el desarrollo y caracterización de Hormigones de Alta Resistencia y varios reglamentos en el mundo incluyen criterios para el diseño de estructuras con mezclas con resistencias a compresión entre 60 y 100 MPa. Cuando se habla de Muy Alta Resistencia se hace referencia a resistencias a compresión por encima de 100 MPa y se menciona Ultra Alta Resistencia cuando el material posee resistencias por encima de 150 MPa. Pero estos últimos no sólo poseen tal resistencia a compresión y elevada resistencia a tracción sino también un comportamiento muy dúctil. Dicha ductilidad se consigue incorporando microfibras en cantidades mayores a las habituales, por lo que se suelen llamar Hormigones de Ultra Alta Resistencia Reforzados con Fibras (HUARRF) aunque para ser más precisos, se trata de compuestos a base de cemento portland de ultra alta resistencia, ya que no incorporan agregados gruesos.

Numerosos trabajos recientes dan cuenta del interés en el uso de HUARRF (1-8). Además de su excelente performance frente a acciones extremas, el impacto del tema se debe a que las obras de infraestructura constituyen un porcentaje significativo de los bienes de una nación, la extensión de la vida en servicio es prioritaria en ingeniería civil y las reparaciones y el mantenimiento representan muchas veces costos comparables a la construcción de nuevas obras. El uso de HUARRF no se limita al refuerzo de estructuras sino que también es un material ideal para rehabilitar estructuras de hormigón armado con problemas de durabilidad o para ser combinado con hormigón armado convencional para construir nuevas obras donde se deba asegurar una muy extensa vida en servicio.

La obtención de dichas características mecánicas de alta prestación implica no sólo una exhaustiva selección de los materiales componentes, sino el logro de condiciones de trabajabilidad adecuadas. Este trabajo trata sobre la obtención y propiedades de los HUARRF; luego de presentar antecedentes, se incluyen resultados que muestran los efectos del uso de diferentes materiales y de la incorporación de microfibras. La respuesta mecánica de elementos delgados demuestra la potencialidad de los HUARRF.

ANTECEDENTES

Cuando se elaboran hormigones con muy elevada resistencia a compresión (alta y ultra alta resistencia), la resistencia a tracción también crece, pero en menor medida, y como resultado el material muestra una respuesta mucho más frágil. La incorporación de fibras es entonces una solución ideal ya que mejora la ductilidad, la capacidad de absorción de energía y las propiedades dinámicas del hormigón. En efecto, hacia fines del siglo pasado se comienzan a incorporar fibras en los hormigones de alta resistencia para minimizar su mayor fragilidad relativa. Pero el HUARRF se caracteriza además por presentar un período de endurecimiento mayor y una extensa fisuración múltiple bajo cargas de tracción; por esas razones, el HUARRF es particularmente eficiente para refuerzo de elementos estructurales frente al sismo y otras acciones extremas como explosiones o impactos o para la construcción de estructuras de protección.

La Figura 1 esquematiza la respuesta de diferentes materiales a base de cemento portland, un hormigón convencional (HC), el mismo material cuando se le incorporan fibras (HRF), un hormigón de alta resistencia (HAR), el mismo HAR con fibras (HARRF) y un HUARRF. El HRF tradicional puede presentar un ligero incremento en la resistencia a primera fisura pero luego la fractura se localiza en una fisura principal y la respuesta muestra un progresivo y continuo descenso de la capacidad residual (ablandamiento). En HARRF puede existir más de una fisura pero también la fractura se localiza en gran medida, en cambio en HUARRF se desarrolla una fisuración múltiple muy extendida donde crece la capacidad portante (endurecimiento) hasta alcanzar, a mucha mayor

deformación, un punto en el cual se concentra la fractura en una fisura principal y a partir de entonces se desarrolla el proceso de ablandamiento.

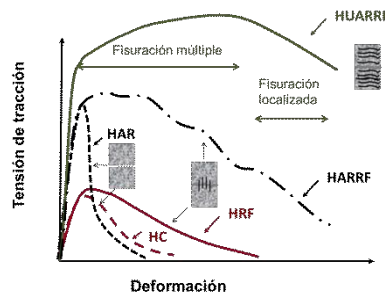


Figura 1. Respuesta en tracción de hormigón convencional (HC), hormigón con fibras (HRF), hormigón de alta resistencia (HAR), HAR con fibras (HARRF) y hormigones de ultra alta resistencia reforzados con fibras (HUARRF).

Los HUARRF han sido empleados en Japón, Francia, EEUU y Alemania entre otros países. Internacionalmente también se los denomina High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC) o, si su resistencia a compresión es superior a 150 MPa, Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes (UHPRFC). Ha sido comercializado bajo nombres como Ductal®, BSI®, BCV® o CEMTEC®. Entre sus aplicaciones aparecen reparaciones en general, donde puede competir con el acero y otros materiales, desarrollo de premoldeados especiales, refuerzos de edificios y puentes que no habían sido diseñados originalmente para soportar acciones sísmicas, refuerzos por cambios de destinos o incrementos en los niveles de cargas (muy frecuente en puentes) y para sobrellevar acciones extremas como explosiones, accidentes o ataques terroristas.

La Tabla 1 hace referencia a los materiales y proporciones empleados en HUARRF donde se suelen incorporar altos contenidos de ligante (cementos, microsílíce), otros finos (habitualmente harina de cuarzo) y arenas finas. Se usan hiperfluidificantes para reducir la relación agua/ligante al orden de 0,20 y microfibras de acero para controlar el inicio de las fisuras y provocar un significativo incremento de resistencia. El curado a alta temperatura (90°C) es frecuentemente aplicado para incrementar la resistencia.

Yang et al. (9) estudiaron alternativas para reducir el precio de UHPRFC y poder emplearlo para construcción in situ sin limitar su uso a prefabricados, considerando el uso de vidrio reciclado y arenas naturales como materiales alternativos. Encontraron que las partículas de agregado angulares reducen la capacidad de flujo y alcanzaron resistencias a compresión de 160 MPa para muestras curadas a 90°C y 20% menores en las muestras curadas a 20°C. Hassan (10) encontró que la incorporación de 2 % de fibras en volumen duplica la resistencia a tracción; si bien el efecto es menor en compresión pasa de unos 120 MPa a más de 140 MPa, verificando substanciales mejoras en ductilidad. Maca (11) también observó las ventajas de incorporar microfibras en la ductilidad y en la respuesta frente al impacto de proyectiles para mezclas con resistencias a compresión entre 132 a 152 MPa. Yu et al. (12) reemplazaron cemento por adiciones minerales con el fin de reducir el impacto ambiental, considerando el uso de cenizas volantes, escoria granulada de alto horno y polvo de piedra caliza. Incorporando 2,5 % de fibras en volumen informan resistencias a compresión del orden de 150 MPa.

Tabla 1. Proporciones y propiedades de productos comerciales de HUARRF (kg/m³).

Material	Cemento	Microsílíce	Cuarzo molido	Arena	Fibras	a/mc	f _c (MPa)
Ductal	746	242	224	1066	161	0,19	198
BSI	1114	169	-	1072	234	0,18	199
CEMTEC	1050	275	-	730	470	0,18	168

Thoma et al. (13) al estudiar el efecto del contenido de fibras sobre la respuesta estática y dinámica a diferentes velocidades, para mezclas con resistencias a compresión entre 150 y 208 MPa, confirman la aptitud del material para diseñar estructuras de protección frente a acciones extremas. Los mecanismos de arrancamiento de las fibras resultan relevantes al momento de incrementar la ductilidad y la mayor capacidad de absorción de energía redundan en un menor daño frente a estas acciones comparado con HAR, HC o HRF convencional. Sobre mezclas con resistencias a compresión mayores a 150 MPa y ductilidad mayor al 3 % se analizaron velocidades de deformación entre 10^{-4} /s y 10/s en tracción directa observando aumentos en la resistencia de primera fisura y en la resistencia última, pero sólo ligeros incrementos en la tenacidad (< 20 %) con respecto a las sollicitaciones estáticas, lo que se atribuye a que disminuye la capacidad de deformación en tracción al reducirse el ancho de fisuras (14). El HRF es muy sensible a la velocidad de deformación.

El tipo de fibra de acero también incide en la respuesta a alta velocidad (15); si bien siempre se observó fisuración múltiple, con fibras lisas más largas se alcanzó mayor resistencia a alta velocidad, mientras que las fibras conformadas que fueron muy eficientes ante cargas estáticas, se rompieron a alta velocidad. Comparando la respuesta en flexión de combinaciones híbridas de fibras con largos entre 13 y 30 mm (16) en mezclas con resistencias a compresión de 180 MPa, los mejores resultados se obtuvieron con fibras de 19 mm. Un estudio que cubre un amplio rango de velocidades de deformación, concluye que por debajo de 50/s la respuesta es similar a la estática, pero a mayores velocidades decrecen la resistencia de primer pico y la ductilidad (17). Mechtcherine et al (18) también verificaron incrementos en la capacidad de absorción de energía y en la ductilidad frente a cargas de alta velocidad por incorporación de fibras al comparar con HC, HAR o HUARRF sin fibras. El tamaño y geometría de las probetas no afectan significativamente la respuesta en tracción del HUARRF pero pueden modificar la capacidad de deformación, absorción de energía y el cuadro de fisuras (19). La resistencia al impacto y la energía de fractura dependen de la velocidad de carga, en especial a altas velocidades, lo que se atribuye a la mayor sensibilidad al arrancamiento de las fibras con la velocidad de deformación (20).

Finalmente, el uso combinado de HC y HUARRF en vigas genera beneficios en la resistencia a flexión, adherencia en la interfaz, resistencia al corte y ductilidad y control del ancho de fisuras (21, 22), también hay ventajas en otros elementos estructurales como el refuerzo transversal en columnas con un efecto sinérgico entre los refuerzos transversales y las fibras (23); a todo esto suma el uso de HUARRF para incrementar la performance de elementos expuestos a ambientes muy agresivos (24).

EXPERIENCIAS

Obtención y efecto de los materiales componentes

El HUARRF surge de combinar tres tecnologías: los hormigones autocompactantes, los reforzados con fibras y los de alta resistencia. Elaborarlo requiere materias primas exclusivas (fibras de alto límite elástico, agregados con tamaño máximo reducido, aditivos de tercera generación), maquinaria y procesos no convencionales de fabricación, (alta energía, curado al vapor) y elevados niveles de control. Es sabido que para obtener hormigones de alta resistencia se necesitan aditivos reductores de agua de alto rango, muy baja razón agua/ligante, y adecuados cemento, adiciones minerales y agregados. Para lograr niveles de ultra-alta resistencia, se requieren adiciones minerales activas de muy alta calidad, eliminar el agregado grueso y reemplazar arena natural por otros finos (como cuarzo molido) y, finalmente, incorporar microfibras de acero para controlar el inicio de fisuras a nivel de la pasta de cemento.

Además de optimizar materiales y proporciones para minimizar vacíos, es menester reducir los contenidos de cemento para atender cuestiones como la trabajabilidad, la contracción autógena y térmica y el cuidado del ambiente. Dado el alto contenido de ligante que suele superar 1000 kg/m^3 , lograr una adecuada trabajabilidad suele ser un aspecto crítico. Las mezclas son muy cohesivas y si bien pueden ser autocompactantes, a veces presentan excesiva viscosidad y pérdidas de fluidez en el tiempo. Asimismo, para mejorar las propiedades mecánicas se incorporan microfibras que controlan el inicio y crecimiento de las fisuras a nivel de la pasta, generando una fisuración múltiple y mayor ductilidad en el material; pero las microfibras pueden modificar la capacidad de fluir. Otro aspecto de suma importancia es lograr la adecuada dispersión de partículas durante el mezclado, en este sentido la incorporación de microfibras resulta beneficiosa.

Este apartado muestra el efecto de los materiales componentes y sus proporciones, el modo en que pueden lograrse niveles de ultra alta resistencia, y la contribución de las microfibras en las propiedades mecánicas. Cabe indicar que en tal proceso el ajuste de la secuencia y energía de mezclado es fundamental.

En la Tabla 2.a se presentan mezclas con arena silícea natural y muestra cómo crece la resistencia a compresión (f'_c , sobre cubo equivalente de 40 mm) al incorporar microsílíce, aunque en este caso sólo se usó en el orden del 10 % en peso de cemento.

En las mezclas C se incorporó polvo de cuarzo como inerte y se redujo la relación agua/ligante; al reemplazar arena natural por cuarzo mejoró la trabajabilidad en particular con cuarzo de 1mm (Tabla 2.b). Las mezclas D se realizaron con mayor fluidez midiendo el diámetro de extendido; además se estudió el efecto de curar durante 72 horas en agua a 90°C , a fin de favorecer la ganancia de resistencia. Los altos contenidos de ligante permitieron incrementar la dosis de aditivo sin segregación ni demoras en el fraguado, no obstante las mezclas fueron muy cohesivas lo que puede provocar defectos de compactación o retención de aire. D1 y D2 alcanzaron extendidos del orden de 200 mm y resistencias superiores a 144 MPa. En D3 y D4 se analizó la posibilidad de aumentar aún más la dosis de aditivo y el contenido de microsílíce y reducir el contenido de cemento incorporando polvo de cuarzo de 0,045 mm; se obtuvieron extendidos similares pero mejoró la trabajabilidad y compactabilidad, en especial en D4, donde la resistencia alcanzó 169 MPa. A partir de los ajustes realizados en las proporciones y su comportamiento en estado fresco y endurecido, se tomó como base la mezcla D4 para comparar distintos superfluidificantes y analizar el efecto de incorporar 2 % en volumen de microfibras de acero, que es una dosis típica para este tipo de hormigones (Tabla 2.c).

En las Tablas 2.b y 2.c se observa el efecto del curado a alta temperatura sobre la resistencia y un incremento muy importante por incorporación de microfibras alcanzando resistencias a compresión del orden 200 MPa. Cabe comentar que con el aditivo c se encontraron demoras en el fraguado y ganancia de resistencia en las primeras edades.

Tabla 2.a Mezclas con arena silícea natural.

Material (kg/m^3)	A1	A2	B1	B2
a / c+microsílíce	0,20	0,18	0,20	0,17
CPN A (kg/m^3)	1220	1105	-	-
CPN B (kg/m^3)	-	-	1220	1180
Microsílíce (kg/m^3)	-	111	-	107
Arena silícea natural (kg/m^3)	940	940	940	910
Superfluidificante (kg/m^3)	11	16	11	12
f'_c 7 días (MPa)	nm	83,7	87,8	84,1

f_c 90 días (MPa)	109	119	141	152
---------------------	-----	-----	-----	-----

Tabla 2.b Mezclas que incorporan cuarzo molido como inerte.

Material (kg/m ³)	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4
a / c+microsilíce	0,16		0,14		0,16		0,20	0,16	
CPN A	1140		1165		1125		785	810	
Microsilíce	114		116		113		196	202	
Polvo cuarzo 0,045 mm	-	-	-	-	-	-	-	235	240
Polvo cuarzo 1 mm	240	-	965	495	-	475	950	860	890
Polvo cuarzo 3 mm	725	725	-	495	495	475	-	-	-
Arena silíce natural fina	-	241	-	-	495	-	-	-	-
Superfluidificante	17	179	17	26	26	28	32	52	60
Extendido (mm)	nm	nm	nm	nm	nm	215	198	210	210
f_c 7 días	96,8	101	104	100	104	97,0	103	83,6	79,9
f_c 7 días (curado 90°C)	nm	nm	nm	nm	nm	144	152	144	169

Tabla 2.c Mezclas con microfibras.

Material (kg/m ³)	E1	E1f	E2	E2f	E3	E3f	E4	E4f
a / c+microsilíce	0,16						0,16	
CPN A	808						800	
Microsilíce	202						200	
Polvo cuarzo 0.045 mm	240						240	
Polvo cuarzo 1 mm	885						880	
Superfluidificante tipo/dosis	a/62		b/62		c/62		c/74	
Microfibras (~2% en v)	-	150	-	150	-	150	-	150
Extendido (mm)	242	245	200	217	175	200	195	195
f_f 7 días	11,8	29,2	15,0	25,1	7,7	26,1	5,3	23,2
f_f 7 días (curado 90°C)	30,5	36,9	31,4	38,9	16,3	39,0	19,9	33,8
f_c 7 días	75,0	113	85,6	98,4	81,1	114	72,5	92,8
f_c 7 días (curado 90°C)	122	222	110	198	114	219	104	187
f_f : resistencia a flexión con carga centrada, probeta de 40x40x160 mm, luz de ensayo 100mm.								

Propiedades mecánicas HUARRF

En base a los resultados previos las proporciones de la mezcla base fueron: agua 167 kg/m³, CPN 800 kg/m³, microsilíce 160 kg/m³, polvo de cuarzo (0,045 mm) 240 kg/m³, cuarzo (1 mm) 960 kg/m³ y superfluidificante 46 kg/m³. Se realizaron tres mezclas una de referencia sin fibras, y otras dos incorporando 50 o 125 kg/m³ de microfibras de acero, las que se identifican como R-0, M-50 y M-125 respectivamente y que alcanzaron diámetros de extendido iguales a 230, 255 y 230 mm. Con cada mezcla se fabricaron pequeñas losas cuadradas de 200 mm de lado y 20 mm de espesor y placas de 300 mm de longitud x 75 mm de ancho e igual espesor (Figura 2). Todas las muestras fueron curadas durante 72 horas a 90°C Las losas se ensayaron con carga central, apoyadas en todo su perímetro, registrando la flecha en el centro de la cara inferior mediante un LVDT fijo al apoyo. Las placas (20 mm de altura) se ensayaron a flexión con cargas en cuatro puntos sobre una luz entre apoyos igual a 270 mm; nuevamente se registró la flecha con un LVDT. La mezcla M-125 alcanzó una resistencia a compresión de 190 MPa.

La Figuras 2 y 3 muestran las respuestas mecánicas durante los ensayos de las losas y las placas respectivamente, así como el cuadro de fisuración y aspecto de las probetas luego del ensayo. Se pueden apreciar, además de los niveles de resistencia, la

gran ductilidad y capacidad de absorción de energía que confieren las microfibras al HUARRF. Las numerosas fisuras, los altos niveles de carga después de la primera fisura y la significativa deformación sin pérdida de integridad del material resultan notorias. Como era de esperar tanto las losas como en las placas sin fibras (R-0) presentaron una rotura sumamente frágil donde los fragmentos de las piezas se separan por completo.

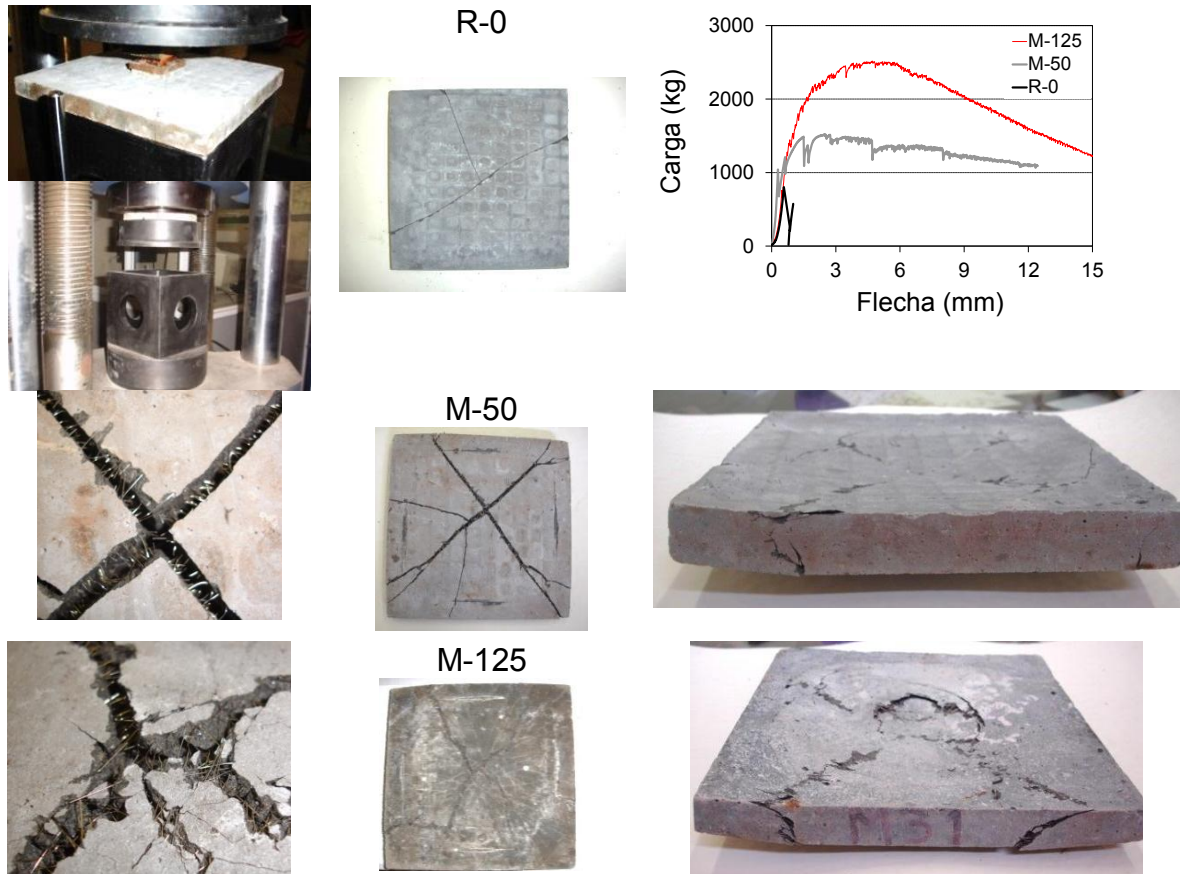


Figura 2. Ensayos sobre losas.

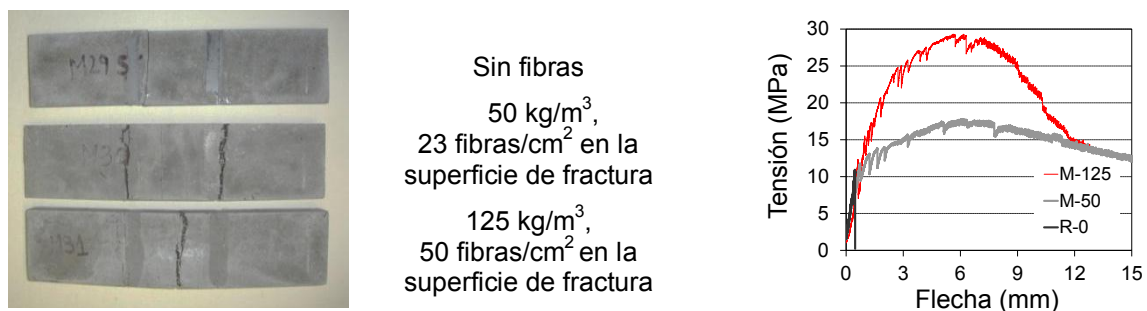


Figura 3. Ensayos de placas. Izquierda: vista de la cara inferior luego del ensayo, donde se aprecian las fisuras en la cara traccionada. Derecha: curvas tensión – flecha.

CONCLUSION

El HUARRF posee gran potencialidad para refuerzo, rehabilitación o construcción de estructuras expuestas a cargas extremas. Con resistencias a compresión mayores a 150 MPa, las microfibras dan lugar a mayores ganancias en resistencia a compresión, una respuesta postpico en tracción con fisuración múltiple y gran ductilidad que generan una notable performance frente a sollicitaciones extremas o ambientes muy agresivos.

REFERENCIAS

- (1) Corinaldesi V, Moriconi G, "Mechanical and thermal evaluation of ultra high performance fiber reinforced concretes for engineering applications" *Cons Build Mat* 26, 2012 pp.289–294
- (2) Caverzan A, Cadoni E, di Prisco M, "Tensile behaviour of high performance fibre-reinforced cementitious composites at high strain rates", *Int. J. of Impact Eng* 45, 2012 pp.28-38.
- (3) Coughlin AM, Musselman ES, Schokker AJ, Linzell DG, "Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges", *International Journal of Impact Engineering* 37, 2010, pp. 521–529.
- (4) Millard SG, Molyneaux TCK., Barnett SJ, Gao X. "Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading" *Int J of Impact Eng* 37, 2010, pp. 405–413.
- (5) Habel K, Gauvreau P. "Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete to impact and static loading". *Cement Concrete Comp* 30, 2008, pp. 938–946.
- (6) Kang S-T, Kim J-K. "The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites" *Cem Conc Res* 41, 2011 pp 1001-1014
- (7) Yi N-H, Kim J-H, Han T-S, Cho Y-G, Lee JH. "Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete". *Const Build Mat* 28 (2012) 694–707
- (8) Kang, S-T, Kim J-K. "Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution". *Const Build Mat* 28, 2012, pp. 57–65.
- (9) Yang SL. SG. Millard, M.N. Soutsos, S.J. Barnett, T.T. Le. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), *Const Buil Mat* 23 (6), 2009, pp. 2291-2298.
- (10) Hassan AMT, Jones SW. Mahmud GH. "Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)" *Const Build Mat* 37, 2012, pp. 874–882
- (11) Máca, P., Sovják, R., Konvalinka, P. "Mix design of UHPFRC and its response to projectile impact", *Int. J. of Impact Eng* 63 (1), 2014, pp 158-163
- (12) Yu, R, Spiesz, P., Brouwers, HJH. "Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses", *Cem Conc Com*, 2015.
- (13) Thoma K. Stolz A. Millo, O. "Performance and suitability of ultra-high-performance concrete under a broad range of dynamic loadings" In *Adv Prot Struc Res*, Hao H; Li Z-X: Ed. Balkema: CRC Press, 2012, pp.65-96.
- (14) Ranade, R. Li, VC. Heard, WF "Tensile rate effects in high strength-high ductility concrete" *Cement and Concrete Research* 68 (2015) 94–104.
- (15) Tran, NT, Tran, TK, Kim, DJ "High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension", *Cem Concr Res* 69, 2015, pp. 72–87.
- (16) Yoo, D-Y, Kang S-T, Yoon Y-S "Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC". *Const Build Mat* 64, 2014, pp. 67–81.
- (17) Cadoni, Ezio, Meda, Alberto, Plizzari, Giovanni A. 2009 et al "Tensile behaviour of FRC under high strain-rate" *Mat and Struct* 42, 2009, pp.1283–1294.
- (18) Mechtcherine V, MillonO, Butler M, Thoma K "Mechanical behaviour of strain hardening cement-based composites under impact loading" *Cem Concr Comp* 33, 2011, pp. 1–11.
- (19) Nguyen, DL, Ryu GS, Koh KT, Kim DJ. "Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete" *Composites: Part B* 58, 2014, pp.279–292
- (20) Zhang XX, Abd Elazim AM., Ruiz G, Yu RC. "Fracture behaviour of steel fibre-reinforced concrete at a wide range of loading rates" *Int J Impact Eng* 71, 2014, pp 89-96.
- (21) Hussein L, Amleh L, "Structural behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete-normal strength concrete or high strength concrete composite members", *Const Build Mat* 93, 2015, pp. 1105-1116.
- (22) Yoo, D-Y Kang S-T, Yoon Y-S "Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC", *Cons Build Mat* 64, 2014, pp. 67–81Mohammadi et al 2015
- (23) Mohammadi Hosinieh, M., Aoude, H, Cook, WD. Mitchell, D. "Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under pure axial loading" *Engineering Structures* 99, 2015, pp. 388–401.
- (24) Mechtcherine V. "Towards a durability framework for structural elements and structures made of or strengthened with high-performance fibre-reinforced composites", *Const Build Mat* 31, 2012, pp. 94-104