

HORMIGONES AUTOCOMPACTABLES REFORZADOS CON FIBRAS

Tobes, J.M.¹, Monetti, D.¹, López, A.², Giaccio, G.³ y Zerbino, R.⁴

RESUMEN

La incorporación de fibras cortas dispersas en la matriz del hormigón favorece el control de la fisuración y aumenta la tenacidad. Se reconoce al hormigón reforzado con fibras (HRF) como un material de alta performance para la fabricación de elementos premoldeados, revestimientos de túneles, pavimentos o tableros de puentes. También es posible sustituir o combinar las armaduras transversales con el refuerzo de fibras para mejorar la capacidad resistente al corte y lograr un comportamiento más dúctil, lo que es de interés en elementos estructurales de alma delgada. Aunque las fibras de acero han sido las más utilizadas para reforzar al hormigón, en la actualidad se han desarrollado fibras sintéticas estructurales que pueden competir en ocasiones con las anteriores. La fabricación de HRF de alta resistencia y más recientemente Hormigones Autocompactables Reforzados con Fibras (HACRF) dan lugar a nuevas alternativas de aplicación, entre las que se destacan la realización de reparaciones y refuerzos. Este trabajo muestra las primeras experiencias desarrolladas con el fin de explorar las posibilidades de elaboración y propiedades de HACRF, los estudios se orientaron a la valoración de elementos estructurales de aplicación en la ingeniería vial incluyendo tanto fibras de acero como sintéticas.

INTRODUCCION

Desde su aparición en las últimas décadas del siglo XX el Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) ha sido empleado en diversas obras. En la actualidad no existen dudas acerca de que la incorporación de fibras cortas dispersas en la matriz del hormigón confiere al material una mayor capacidad para controlar el desarrollo de la fisuración con beneficios directos en las propiedades en estado endurecido, particularmente en la tenacidad del hormigón (1-2).

Entre las aplicaciones tradicionales del HRF se destaca el uso en revestimientos de túneles, la fabricación de elementos premoldeados y la construcción o reparación de pavimentos o tableros de puentes. A estas se suma el uso de fibras o microfibras sintéticas para el control de la fisuración por contracción plástica (1-3). El empleo de HRF a nivel estructural es más limitado, no obstante se reconoce que es posible sustituir o combinar las barras de armaduras transversales con el refuerzo de fibras con el fin de mejorar la capacidad resistente al corte y lograr un comportamiento más dúctil, esto resulta beneficioso en elementos estructurales de alma delgada donde puede resultar muy difícil la colocación de estribos (4).

¹ Docente Facultad de Ingeniería UNLP.

² Becario CONICET - UTN-FRC, GINTEMAC

³ Investigador CIC-LEMIT- Prof. Facultad de Ingeniería UNLP.

⁴ Investigador CONICET-LEMIT- Prof. Facultad de Ingeniería UNLP.

zerbino@ing.unlp.edu.ar

Inicialmente la mayoría de las aplicaciones se realizaron empleando fibras de acero, más recientemente han aparecido en el mercado fibras sintéticas estructurales que pueden competir en varios casos con las primeras (5-6). Cabe notar que además de las nuevas fibras disponibles, han surgido avances en las características del HRF como material en sí mismo; por un lado se pueden elaborar HRF de alta resistencia y en los últimos años se obtuvieron Hormigones Autocompactables Reforzados con Fibras (HACRF). Este nuevo hormigón posee una fluidez muy elevada sin riesgos de segregación y permite la construcción de estructuras en menos tiempo y, fundamentalmente, libres de defectos; los HACRF pueden abrir nuevas alternativas de aplicación entre las que se destacan reparaciones y refuerzos.

En este trabajo se presentan las primeras experiencias desarrolladas a fin de explorar las posibilidades de elaboración y propiedades de HACRF preparados con diversas fibras disponibles en el mercado local, considerando algunas alternativas de aplicación en elementos estructurales para la ingeniería vial.

Entre los objetivos propuestos se busca comparar el comportamiento postpico que proveen las diferentes fibras, obtener los parámetros de diseño a partir del ensayo de flexión y verificar la respuesta estructural de elementos tipo panel de reducido espesor incluyendo el régimen postfisuración. Los efectos de la incorporación de las fibras sintéticas al hormigón revisten particular interés, dado que sobre el comportamiento de hormigones con diversos tipos de fibras de acero existen mayores antecedentes (7-10).

El tema se enmarca dentro de la línea de investigación del LEMIT para el desarrollo de innovaciones en el campo de la tecnología del hormigón y posee como antecedentes varios trabajos de colaboración con investigadores del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Catalunya (7-10).

EXPERIENCIAS

Diseño del Hormigón Autocompactable

Los hormigones autocompactables (HAC) fueron elaborados empleando como materiales para el hormigón de base cemento portland fillerizado combinado con filler calcáreo adicional y un aditivo superfluidificante a base de éters policarboxílicos. En una primera serie se utilizó como agregado grueso piedra partida granítica de 12 mm de tamaño máximo y en una segunda fase piedra partida granítica de 20 mm, el agregado fino fue una combinación de arenas silíceas de origen natural (módulo de finura 2.39).

Para el diseño del HAC de base se siguió un procedimiento de selección de materiales y optimización previa a través de los ensayos de Ecurrimiento y Embudo en V realizados sobre morteros (11). El método ha demostrado ser capaz de diseñar HAC con diferentes tipos de agregados así como considerar el uso de diversos tipos de aditivos, adiciones y pigmentos (12). En dicho procedimiento como primera etapa se selecciona el tipo y dosis de partida de superfluidificante y se ajustan la relación filler/cemento y el volumen de pasta para la arena elegida. El paso siguiente es el ajuste del contenido de agregado grueso; finalmente en el caso de HACRF es necesario considerar el efecto del contenido de fibras sobre la autocompactabilidad.

Fibras empleadas

Para elaborar los hormigones se seleccionaron tres fibras disponibles en el mercado en Argentina, a saber:

A (Twincone): es una fibra de acero de bajo carbono que poseen sus extremos en forma de cono con el objeto de aumentar el anclaje mecánico. Posee 54 mm de largo y 1 mm de diámetro. No se recomienda para hormigones de baja calidad, sus principales aplicaciones incluyen entrepisos sin vigas y pisos industriales.

S1 (50 PS): es una fibra extruida monofilamento, no fibrilada, el material de base es una mezcla de oleofinas. Está compuesta en un 100 % de copolímero virgen de alta tenacidad. Fue diseñada para reforzar y extender la durabilidad del hormigón para soporte de roca. La dosis recomendada por el fabricante es de 5 a 9 kg/m³.

S2 (Strux 90/40): es una fibra sintética estructural de alto módulo. Aporta tenacidad, resistencia al impacto y a la fatiga y permite el control de la fisuración. Indicada para usos en pisos comerciales, industriales y residenciales. La dosis recomendada por el fabricante es de 1.8 a 7 kg/m³.

Aunque las dos fibras sintéticas utilizadas son para uso estructural, difieren en su forma y propiedades mecánicas. Es reconocido que la adherencia fibra matriz dependen en gran medida de los procesos de anclaje mecánico y no tanto de la adhesión superficial, en este sentido pueden existir diferencias entre fibras de acero y fibras sintéticas. La Figura 1 muestra el aspecto de las fibras empleadas.

En la segunda fase con hormigones con agregados de 20 mm de tamaño máximo, además de las fibras sintéticas antes utilizadas, se utilizó como referencia una fibra de acero conformada tipo "hooked end", D (Dramix 80/35). Es una fibra de acero de alto carbono de 35 mm de longitud y 0.45 mm de diámetro y se utiliza para en hormigones autonivelantes, vigas pretensadas, estructuras militares y hormigón proyectado de alta resistencia.

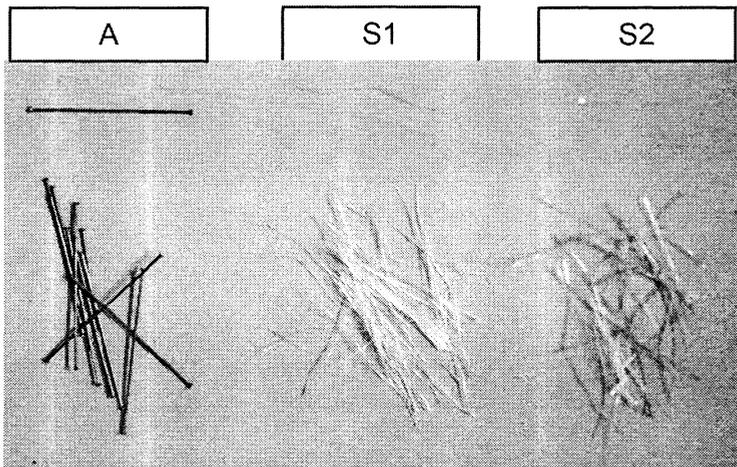


Figura 1. Fibras empleadas.

Hormigones

Dado que el objetivo inicial se limitaba a explorar las posibilidades de elaboración y comparar en forma cualitativa la respuesta postpico de HACRF de distinto tipo, se incorporó cada una de las fibras al HAC de base en un solo contenido, buscando que se mantuviera la autocompactabilidad. Sobre el hormigón fresco se realizaron los ensayos ingenieriles de Escurrimiento y Embudo en V. Este último ensayo se tuvo en cuenta para una primera valoración de la tendencia al bloqueo. No se realizaron en estas experiencias ensayos como la Caja en L dado que se reconoce que es necesario definir los requerimientos para este ensayo en HACRF, que son diferentes a los adoptados para HAC sin fibras (8). No obstante algunas determinaciones del Escurrimiento con Anillo mostraron una respuesta aceptable.

Las fibras se incorporaron una vez elaborado un HAC de base sin fibras. En la Tabla 1 se indican las proporciones y propiedades en estado fresco de los hormigones elaborados en la primera serie, las relaciones agua/cemento fueron próximas a 0.50 y la relación filler/cemento estuvo comprendida entre 1 y 1.25; los hormigones se identifican según la fibra empleada. Como propiedades en estado fresco se determinaron el diámetro de escurrimiento (D_f), el tiempo en alcanzar una circunferencia de 500 mm (T_{50}) y el tiempo de pasaje en el embudo en V (T_v). También se indican las propiedades de un HAC de referencia sin fibras (B).

Se moldearon probetas cilíndricas de 150 x 300 mm para ensayos de compresión y vigas de 150 x 150 x 550 mm con el objeto de caracterizar la resistencia y tenacidad en flexión. Además, como representativos de elementos estructurales, se fabricaron paneles de 70 x 150 x 2000 mm que fueron ensayados a flexión bajo diversas configuraciones y velocidades de carga.

Tabla 1. Proporciones y propiedades en estado fresco de los hormigones de la serie 1.

HORMIGONES	1B	1A	1S1	1S2
Fibras utilizadas	No	A	S1	S2
Proporciones (kg/m ³)				
Fibras	0	40	4	2
Cemento con filler	314	332	323	332
Filler calcáreo	283	266	258	332
Agua	157	166	160	159
Arena natural silícea	735	775	760	730
Piedra granítica 6 - 12 mm	850	825	875	805
Superfluidificante	5.0	4.2	4.1	6.2
Propiedades hormigón fresco				
D_f (mm)	800	720	620	670
T_{50} (s)	1.1	2.0	3.0	2.2
T_v (s)	11.4	No pasa	20.2	10.7

En la segunda fase se realizaron HACRF incorporando al mismo hormigón de base 1.5 kg/m^3 de las fibras sintéticas S1 y S2 y un tercer hormigón con 40 kg/m^3 de una fibra de acero conformada tipo "hooked end". La relación agua/cemento fue igual a 0.50 y la relación filler/cemento 0.90. En la Tabla 2 se indican las proporciones y propiedades en estado fresco de los hormigones con agregados de 20 mm. En la Fig. 2 se muestran detalles de la elaboración del hormigón 2S1, y el aspecto del mismo en los ensayos en estado fresco.

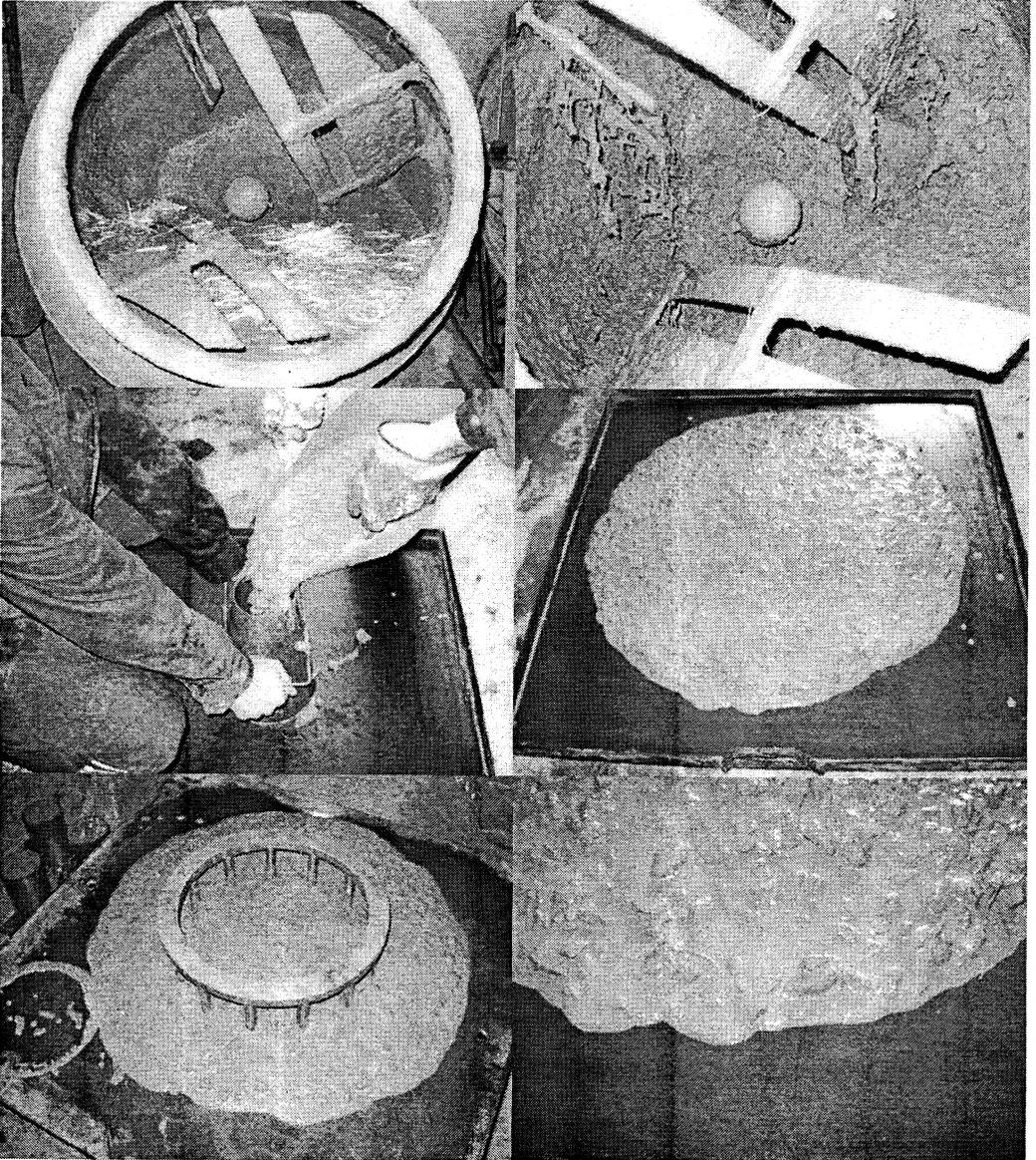


Figura 2. Elaboración y ensayos de escurrimiento y escurrimiento con anillo en HAC con agregados de 20 mm de tamaño máximo reforzados con fibras sintéticas.

Tabla 2. Proporciones y propiedades en estado fresco de los hormigones de la serie 2.

HORMIGONES	2B	2D	2S1	2S2
Fibras utilizadas	No	D	S1	S2
Proporciones (kg/m ³)				
Fibras	0	40	1.5	1.5
Cemento con filler			330	
Filler calcáreo			300	
Agua			166	
Arena natural silícea			760	
Piedra granítica 6 - 20 mm			855	
Superfluidificante			5.5	
Propiedades hormigón fresco				
D _f (mm)	700	540	635	580
T ₅₀ (s)	2.6	5.2	2.7	3.7
T _v (s)	11.9	No pasa	8.1	9.2

En la segunda serie se moldearon cilindros de 150 x 300 mm para ensayos y vigas de 150 x 150 x 550 mm y de 75 x 105 x 430 mm para caracterizar la resistencia y tenacidad en flexión de cada HACRF. Se ha comprobado que, si el tamaño de las fibras lo admite, es posible emplear vigas de menor tamaño para realizar la caracterización en flexión de HRF. Las vigas más pequeñas son más fáciles de manipular y pueden resultar más representativas del comportamiento del HRF cuando su altura se asemeja a la de los elementos estructurales para los cuales está destinado el material (13). En forma similar a la etapa anterior se fabricaron paneles representativos de elementos estructurales, en este caso de 100 x 150 x 2000 mm.

Todas las probetas fueron curadas en cámara húmeda (95 % humedad relativa, temperatura 20 °C) hasta la edad de 28 días. Posteriormente fueron mantenidas al aire en ambiente de laboratorio hasta el momento de ensayo.

Métodos de ensayo

Los ensayos de compresión se realizaron siguiendo los lineamientos de las normas ASTM C-39 y C-469. Para el cálculo del módulo de elasticidad se consideraron las deformaciones axiales entre el 5 y el 40 % de la resistencia.

La evaluación del comportamiento en flexión se realizó en base a la propuesta del RILEM TC-162 (14) utilizando prismas de 150 x 150 x 550 mm. El método emplea vigas entalladas cargadas al centro en coincidencia con la carga, lo que permite medir la apertura de fisuras (CMOD). Se obtienen como resultados el módulo de rotura, la resistencia a primera fisura, dos resistencias equivalentes (f_{eq2} , f_{eq3}) que representan un valor promedio de la capacidad resistente hasta una dada deformación, y cuatro resistencias residuales,

que representan el valor de la tensión para cuatro deformaciones crecientes (f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} , f_{R4}), todos ellos expresados en unidades de tensión (MPa). En los hormigones de la segunda etapa se realizaron ensayos sobre vigas de menor altura (75 x 105 x 430 mm) que poseen una altura más representativa del tamaño de los elementos estructurales, obteniendo los mismos parámetros.

En la Fig. 3 se aprecia la disposición del marco de carga para la medida de la flecha y sobre la entalladura el extensómetro tipo clip para la medida de la apertura de fisuras. Se ha verificado que mediante este último es posible calcular en forma adecuada la flecha sin necesidad de utilizar el marco de carga, lo que simplifica notoriamente el ensayo.

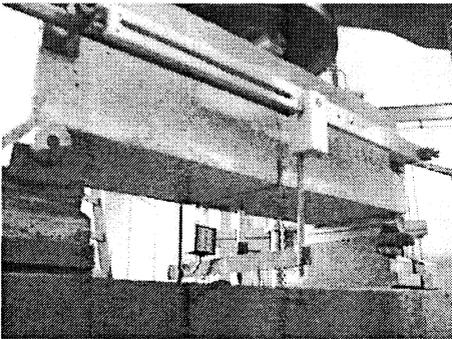


Figura 3. Ensayo de flexión sobre probetas entalladas.

Uno de los objetivos del trabajo fue estudiar la respuesta en flexión de las vigas placa, representativas de elementos estructurales tipo refuerzo con altura asimilable a la de las carpetas de rodamiento en pavimentos. Para ello se utilizó una disposición de carga en cuatro puntos, adoptando como luz entre apoyos 1800 o 840 mm. En todos los casos se empleó una distancia entre los puntos de carga igual a 280 mm, de este modo se pudieron medir las deformaciones de las fibras extremas más traccionadas en un sector con esfuerzo constante. Para las vigas placa se plantearon diversas condiciones de ensayo que se describen a continuación.

- A) Ensayos de corta duración sobre placas largas: se realizaron ensayos de corta duración y luz entre apoyos 1800 mm sobre una placa de cada hormigón. La carga fue aplicada mediante un sistema de palanca articulado dentro de un pórtico y se registró mediante una celda de 5 t. Se midió la flecha con un extensómetro tipo LVDT colocado en el centro de la viga en contacto con la cara inferior y como control se ubicaron transductores en los apoyos para descartar movimientos en los mismos. A la vez mediante otro LVDT se midió la deformación de tracción de las fibras inferiores del panel.
- B) Ensayos de larga duración sobre placas largas: Empleando la misma configuración de carga que el caso anterior se realizaron ensayos de larga duración. En este caso la carga se aplicó colocando pesas de 10 kg (implican un incremento de tensión del orden de 0.27 MPa) sobre el dispositivo ubicado en el centro de la viga, a razón de dos veces por semana para niveles inferiores al 80% de la resistencia obtenida en el ensayo de carga rápida, y luego pesas de 5 kg por semana (incremento de tensión 0.14 MPa aproximadamente) hasta alcanzar la rotura. Todos los ensayos de larga duración se realizaron en una cámara con temperatura controlada.

Las mitades resultantes de los ensayos de las placas largas fueron reutilizadas para realizar dos nuevas determinaciones en flexión con luces de ensayo menores (840 mm): ensayos de corta duración bajo un sistema de control de deformaciones y ensayos sobre elementos prefisurados.

- C) Ensayos de corta duración sobre placas cortas: se realizaron ensayos empleando un sistema de lazo cerrado utilizando la flecha como señal de control. Se utilizó la misma máquina de ensayo que la empleada para ensayar las probetas entalladas (RILEM TC162). Se obtuvieron como resultados las curvas carga – deformaciones de las fibras extremas traccionadas y carga - flecha.
- D) Ensayos sobre placas prefisuradas: uno de los temas de interés en la respuesta de los HRF es su comportamiento postfisuración. Por ello se planteó el estudio de la respuesta bajo cargas de larga duración de paneles prefisurados. Se utilizó la misma configuración de ensayo que en el caso anterior, esto es una luz entre apoyos de 840 mm y carga a los tercios que fue materializada en los pórticos. Para prefisurar los paneles se probaron dos alternativas: algunos paneles se cargaron utilizando en la máquina de ensayo con control por lazo cerrado deteniendo el proceso cuando se registraba una reducción del 10 % en la carga con respecto a la carga de primera fisura, en cambio otros paneles fueron cargados en una máquina convencional deteniendo el proceso cuando se visualizaba la aparición de una fisura. Luego de prefisurados los paneles se ubicaron en los pórticos y se aplicaron cargas sostenidas a tensiones variables. En los ensayos de vigas prefisuradas se registraron como resultados de la prueba la carga aplicada, la extensión en las fibras inferiores y la flecha.

En la Fig. 4 se muestra un esquema de la configuración de carga de las vigas placa como también detalles de los ensayos en la máquina de ensayos y en los pórticos de carga, mostrando la disposición de los dispositivos para la medición de la flecha o de la extensibilidad, en este caso se empleó una base de medida de 250 mm.

Finalizados cada uno de los ensayos de flexión, se procedió a separar en forma definitiva las mitades de las muestras y se contaron las fibras en las superficies de fractura.

El recuento de fibras aparece como una herramienta útil para el control de calidad en HRF. Es importante realizar una comparación entre la dosis de fibras incorporadas y la cantidad de fibras que atraviesan una dada sección. Este dato permite verificar la relación entre los parámetros resistentes, en especial las resistencias residuales, y la cantidad de fibras en cada sección (15). También resulta de interés para analizar la orientación de las fibras en los diferentes planos de las probetas o de las placas; se ha comprobado que la orientación del refuerzo afecta en gran medida las propiedades del HRF (16). Otra particularidad de este trabajo es el conteo de fibras sintéticas, mientras la valoración de la cantidad de fibras es relativamente sencilla cuando se analizan hormigones con fibras de acero, se hace más compleja con fibras sintéticas donde a veces se produce la desfibrilación y aparecen fibras en ambas caras de una misma superficie fracturada.

En varios casos además de contar las fibras en las superficies fracturadas se realizó un recuento sobre superficies cortadas próximas a aquellas, esto último tuvo como objetivo analizar la relación entre el conteo sobre secciones aserradas y el realizado sobre las caras fracturadas.

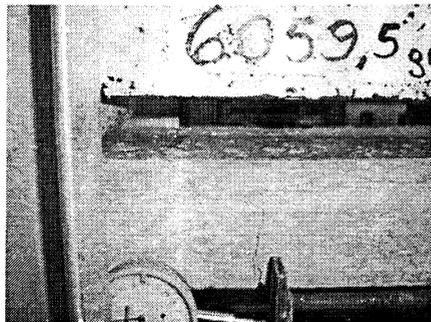
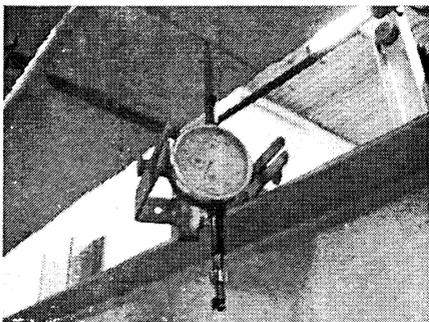
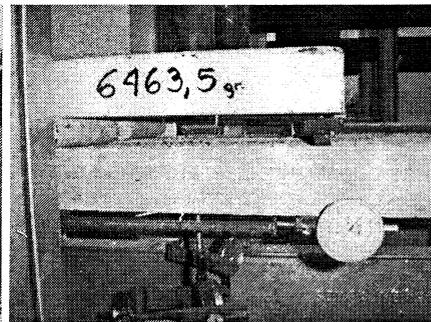
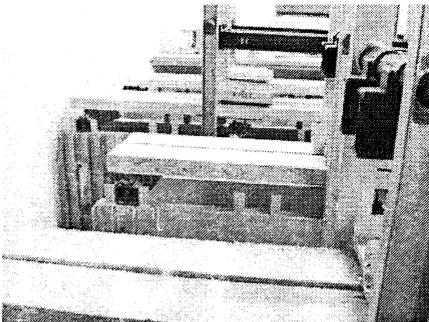
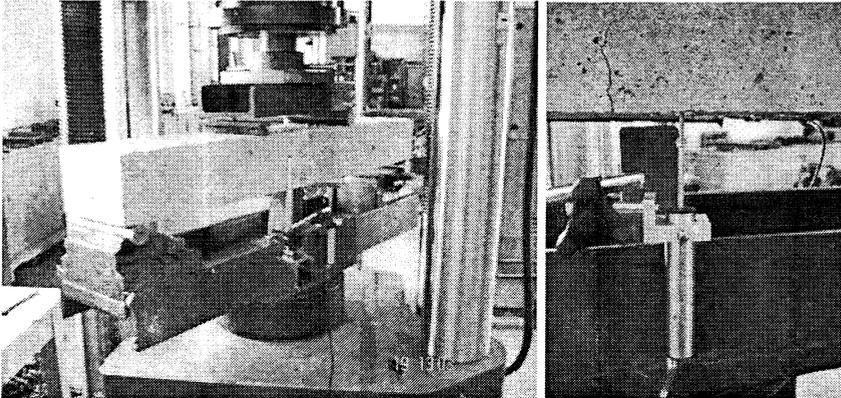
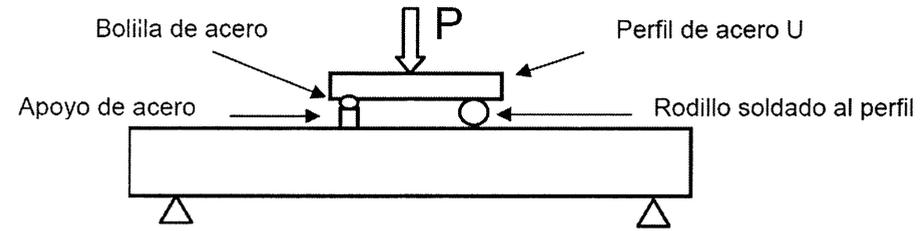


Figura 4. Arriba: configuración adoptada para el ensayo de las vigas placa. Centro: ensayos en la prensa INSTRON. Abajo: ensayos en los pérticos de carga.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 5 se presentan para cada uno de los hormigones elaborados en la primera etapa, curvas típicas carga - flecha y carga - CMOD representativas del comportamiento en flexión de vigas entalladas. También se incluye la curva correspondiente al hormigón autocompactable sin fibras.

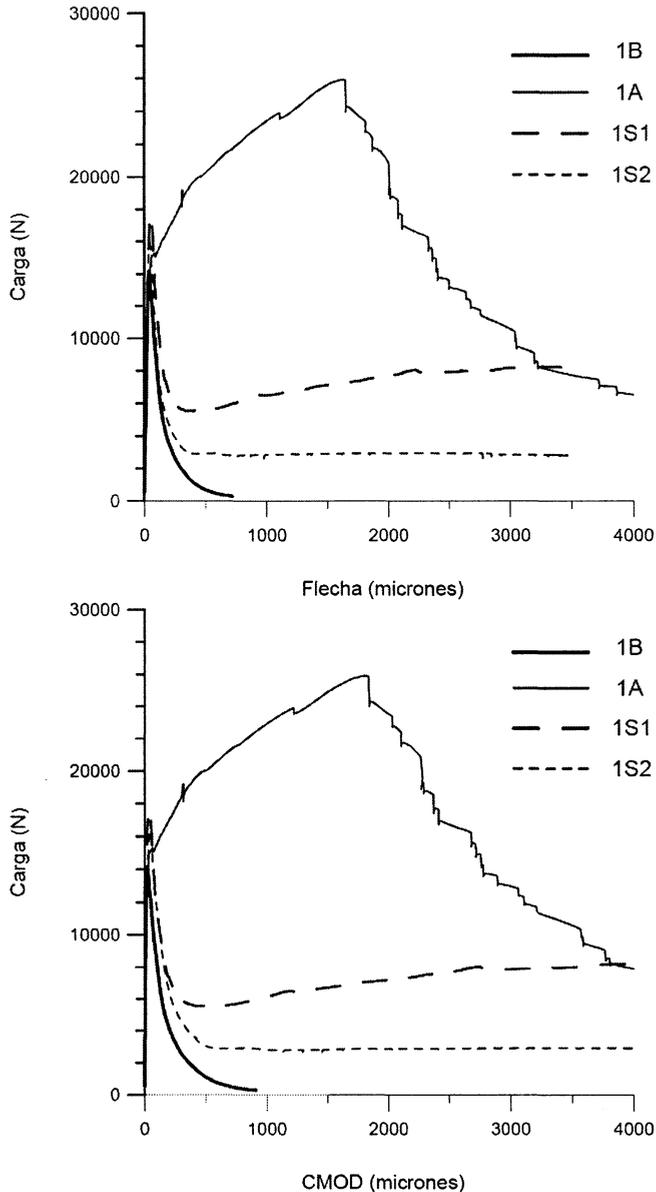


Figura 5. Curvas típicas carga – desplazamiento de probetas entalladas (RILEM TC-162).

Tabla 3. Primera etapa. Resultados de ensayos de flexión según RILEM TC 162.

HAC	MR	M_{1pk}	f_{eq2}	f_{eq3}	f_{Rd1}	f_{Rd2}	f_{Rd3}	f_{Rd4}	$f_{R\ cmod1}$	$f_{R\ cmod\ 2}$	$f_{R\ cmod\ 3}$
1B	4.4	4.4	-	-	0.2	-	-	-	0.4	-	-
1A	7.9	4.7	7.1	4.6	6.4	7.2	4.5	2.7	6.3	7.4	5.0
1S1	5.2	5.2	1.5	2.1	1.6	2.1	2.4	2.5	1.6	2.1	2.4
1S2	5.3	5.3	1.3	1.1	1.3	1.0	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0

Cabe indicar que en la primera etapa si bien los ensayos se realizaron a la edad de 28 días en los hormigones 1B y 1A, por razones operativas en el caso de 1S1 y 1S2 recién pudieron implementarse a los 60 días, luego de un mes de permanencia en ambiente de laboratorio. Como referencia la resistencia a compresión medida en ensayos sobre cilindros fue igual a 38.3 y 38.4 MPa en los dos primeros hormigones y alcanzó 51.7 y 46.0 MPa en los hormigones 1S1 y 1S2. Este hecho sumado a que las cuatro mezclas fueron realizadas en distintas épocas del año y empleando diferentes partidas de cemento justifica las diferencias en la carga de primera fisura que se observa en los ensayos de flexión.

No obstante lo expuesto, se pueden verificar claras diferencias cualitativas en lo que se refiere a la respuesta postpico a la que da lugar la incorporación de cada tipo de fibra. Como fuera indicado la caracterización se realizó siguiendo los lineamientos de la recomendación del RILEM TC-162, a partir de la misma se obtienen como resultados de ensayo varios parámetros representativos de la respuesta postfisuración. Los valores obtenidos como promedio de tres determinaciones utilizando vigas de 150 mm de altura se consignan en la Tabla 3.

Las fibras provocaron un ligero incremento en la carga de primer pico para niveles de resistencia a compresión similares. De los tres HACRF el único que mostró un postpico con endurecimiento fue el elaborado con la fibra A, por su parte en los HACRF con fibras S1 y S2 la tensión de primera fisura coincide con la tensión de rotura.

Si bien en los hormigones con fibras sintéticas estructurales no existe un incremento en la carga de rotura con respecto al hormigón sin fibras se verifica un aumento importante en la capacidad residual luego de la primera fisura con respecto al hormigón de base. Estos incrementos de tenacidad se pueden analizar en base a parámetros como las tensiones equivalentes y residuales propuestas en la normativa de ensayo.

En la Tabla 3 es posible observar que las tensiones equivalentes medidas para 1S1 y 1S2 son en promedio del orden del 30 % de la resistencia a flexión, como era de esperar las tensiones residuales son de una magnitud comparable a las tensiones equivalentes. Otro aspecto interesante que surge de estos ensayos es que no se observa un decrecimiento en los parámetros de postpico a medida que crecen las deformaciones, incluso en el caso de la fibra S1 aumenta la capacidad residual. Aunque no se aprecian grandes diferencias entre la respuesta de ambos HACRF aparece como más efectiva la fibra S1, sin embargo es de notar que en esta etapa el contenido incorporado de S1 fue el doble del empleado con la fibra S2. El comportamiento observado en los HAC con fibras sintéticas estructurales es similar al que suele observarse en hormigones reforzados con dosis moderadas o bajas de fibras de acero.

En una segunda etapa se realizaron HAC con agregados de 20 mm de tamaño máximo, se incluyeron un hormigón con fibras de acero tipo hooked end y dos HACRF con el mismo contenido de fibras S1 y S2. En este caso todos los ensayos de caracterización sobre cilindros y vigas entalladas se realizaron a la edad de 28 días, en forma inmediata a la salida de cámara húmeda. Se registraron para los hormigones 2B, 2D, 2S1 y 2S2 valores de resistencia a compresión iguales a 46.4, 44.0, 46.5 y 44.0 MPa respectivamente.

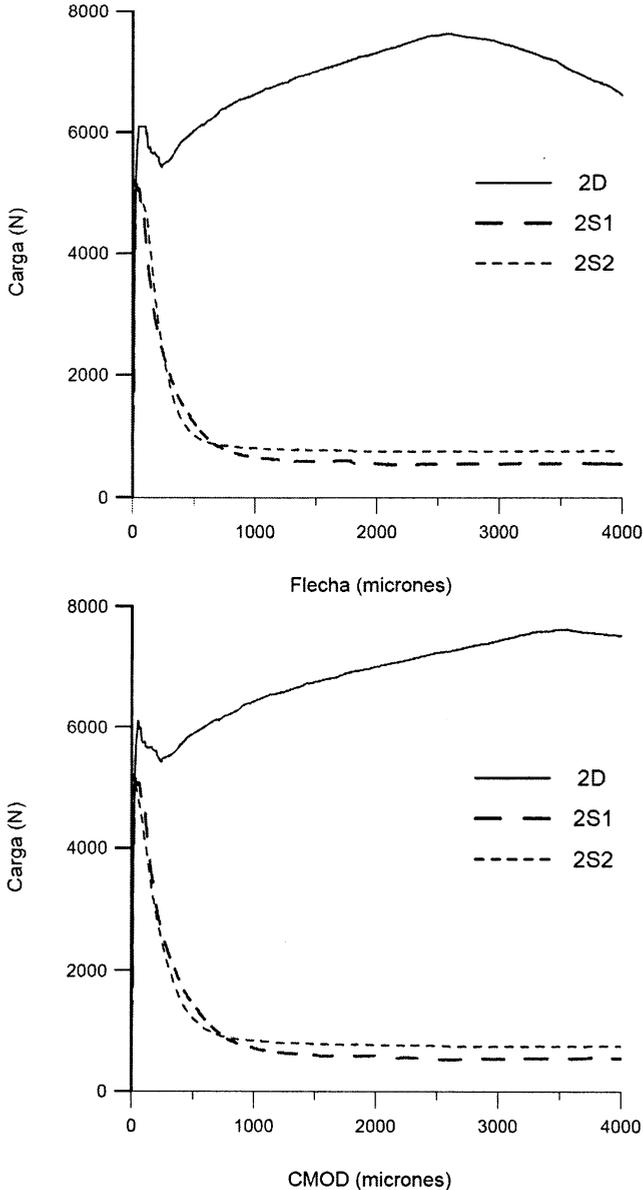


Figura 6. Curvas carga – desplazamiento obtenidas en vigas de 100 mm de altura.

Tabla 4. Segunda etapa. Resultados de ensayos de flexión según RILEM TC 162.

HAC	MR	M _{1pk}	f _{eq2}	f _{eq3}	f _{Rd1}	f _{Rd2}	f _{Rd3}	f _{Rd4}	f _{R cmod1}	f _{R cmod 2}	f _{R cmod 3}
2D	7.3	5.9	6.9	6.7	6.2	6.8	6.5	6.0	6.1	6.9	6.6
2S1	5.0	5.0	1.3	0.7	1.0	0.6	0.5	0.5	1.1	0.6	0.6
2S2	5.2	5.2	1.3	0.7	1.2	0.6	0.6	0.6	1.3	0.6	0.6

La Fig. 6 muestra curvas típicas carga – flecha y carga – CMOD de los hormigones 2D, 2S1 y 2S2 en ensayos de vigas entalladas de 100 mm de altura. En la Tabla 4 incluyen los parámetros resistentes obtenidos en dichos ensayos. Se aprecia que con las fibras de acero D se obtuvo una respuesta con endurecimiento en el post pico comparable a la antes observada con la fibra A. Sin embargo se debe destacar que tanto el escurrimiento como la capacidad de pasaje en el embudo en V se redujeron sensiblemente en este hormigón. En cuanto a las fibras sintéticas estructurales, no se observaron diferencias en la respuesta postpico entre 2S1 y 2S2, obteniéndose una resistencia residual de sólo un 10 % de la carga de primera fisura. En consecuencia las diferencias de respuesta antes observadas en los HACRF con las dos fibras sintéticas empleadas se atribuyen principalmente al contenido de refuerzo que fue posible incorporar. Es evidente que al aumentar el tamaño de los agregados la posibilidad de incorporar fibras y obtener un HACRF se reduce sensiblemente.

Los resultados obtenidos sobre vigas placa ensayadas bajo diferentes condiciones se sintetizan en la Tabla 5, se incluyen los valores correspondientes a la tensión de rotura, la flecha en el pico y la extensibilidad al 90% de la carga máxima. Además como referencia se indica el número de fibras por unidad de área medido en cada caso sobre el plano de fractura que, como se puede apreciar resultó lógicamente similar para diferentes ensayos realizados sobre un mismo hormigón.

Tabla 5. Resultados de ensayos de flexión sobre elementos estructurales.

Tipo de ensayo	HAC	Tensión máxima (MPa)	Flecha en el pico (mm)	Extensibilidad al 90% de MR (µm/m)	Número de fibras (fibras/cm ²)
carga rápida en pórticos (luz entre apoyos = 1.80 m)	1B	4.2	1.0	90	-
	1A	4.2	1.7	160	0.2
	1S1	4.7	1.6	130	1.0
	1S2	4.1	1.1	110	1.7
carga lenta en pórticos promedio de dos placas (luz entre apoyos = 1.80 m)	1B	4.2	1.9	220	-
	1A	5.6	1.9	130	0.2
	1S1	4.8	1.1	185	1.2
	1S2	4.8	1.6	120	1.7
carga rápida en máquina de ensayos, promedios de tres placas (luz entre apoyos 0.84 m)	1B	5.9	0.8	160	0
	1A	5.9	0.7	150	0.2
	1S1	6.6	0.7	160	1.0
	1S2	7.6	0.9	160	1.8

Los valores consignados en la Tabla 5 muestran que las tensiones máximas medidas sobre de los elementos estructurales ensayados bajo carga rápida y 1.8 m de luz entre apoyos siguen una tendencia acorde a los valores de primer pico obtenidos en los ensayos normalizados sobre vigas con entalladura, que fueron respectivamente iguales a 4.4, 4.7, 5.2 y 5.3 para los hormigones 1B, 1A, 1S1 y 1S2. Cabe tener en cuenta para justificar valores de resistencia algo menores, que existe mayor probabilidad de falla y una disposición de carga con mayor dispersión e inestabilidad. Como era de esperar en los HACRF se observa mayor extensibilidad y flecha de rotura que en el HAC de base.

Comparando los ensayos de carga rápida con los de carga lenta realizados con la misma luz entre apoyos, surge que la resistencia fue similar en el HAC de base pero tiende a crecer en los HACRF, en especial en el reforzado con fibras de acero. En general los ensayos de carga lenta se extendieron durante más de 15 días, lo que puede justificar que se produzcan aumentos en la extensibilidad y flecha de rotura debido a procesos de microfisuración y fluencia. Aunque estas experiencias son limitadas por el reducido número de paneles ensayados, es interesante notar que el aumento en la deformabilidad fue mayor en el hormigón de base (1B) que en los HACRF, lo que puede asociarse a los beneficios que provoca la incorporación de fibras sobre la capacidad de control de las deformaciones.

Al finalizar los ensayos con 1.8 m de luz sobre paneles, se realizaron otras pruebas sobre las mitades resultantes. Algunas se ensayaron con carga rápida y deformación controlada, otras se destinaron a los estudios sobre elementos prefisurados. Como es fácil intuir se produjo una evolución en la resistencia del hormigón en el tiempo y cambios en el estado de saturación de los hormigones. Al analizar los resultados es importante recordar que la resistencia del hormigón fue algo mayor en el caso de 1S1 y 1S2.

En la Fig. 7 se muestran curvas carga – flecha y carga – extensión obtenidas en ensayos sobre paneles realizados con carga rápida y control de desplazamiento (luz entre apoyos = 0.84 m). A pesar de que existe una configuración de carga y geometría diferente a la de las vigas entalladas es muy interesante destacar la consistencia en la respuesta con respecto a lo observado en la Fig. 5. El hormigón 1A presenta una capacidad portante durante el postpico muy importante que lo asimila a un comportamiento elastoplástico ideal, por su parte los hormigones con fibras sintéticas evidencian un descenso continuo durante el postpico pero una resistencia residual que los diferencia del hormigón sin fibras. De todos modos en el ensayo normalizado, probablemente por efecto de la localización que provoca la entalla, en el hormigón 1A existe endurecimiento y se aprecian diferencias entre los hormigones 1S1 y 1S2. En los ensayos de paneles estas diferencias pueden haberse minimizado por una zona de fractura menos localizada. Asimismo en la Tabla 5 no se observan grandes diferencias en la extensibilidad previa a la fisuración; los valores de flecha en el pico menores que en los casos anteriores, son consistentes con la reducción de la luz entre apoyos. Tampoco se aprecian mayores diferencias en la carga de rotura para los distintos hormigones, la carga parece estar más vinculada a la resistencia del hormigón de base. El control de ensayo que favorece notoriamente la estabilidad, la menor luz de ensayo y la evolución de resistencia por el paso del tiempo y el secado son factores que pueden contribuir al incremento en la tensión máxima registrada respecto a los otros paneles.

Además de haber explorado las posibilidades de elaboración de HACRF, uno de los aspectos más interesantes de estas experiencias se relaciona con la evaluación del comportamiento de elementos de HRF prefisurados, tema sobre el cual no existen mayores antecedentes de trabajos o métodos para materializar el estudio. En lo que respecta al uso

de HRF en pavimentos o refuerzos estructurales el tema adquiere singular importancia ya que la vida en servicio de las estructuras dependerá de la capacidad residual que aporten las fibras para la transferencia de esfuerzos y control en el crecimiento de fisuras. En la Fig. 8 se observa el mecanismo de acción de las fibras sintéticas para la transferencia de esfuerzos en un panel prefisurado bajo carga.

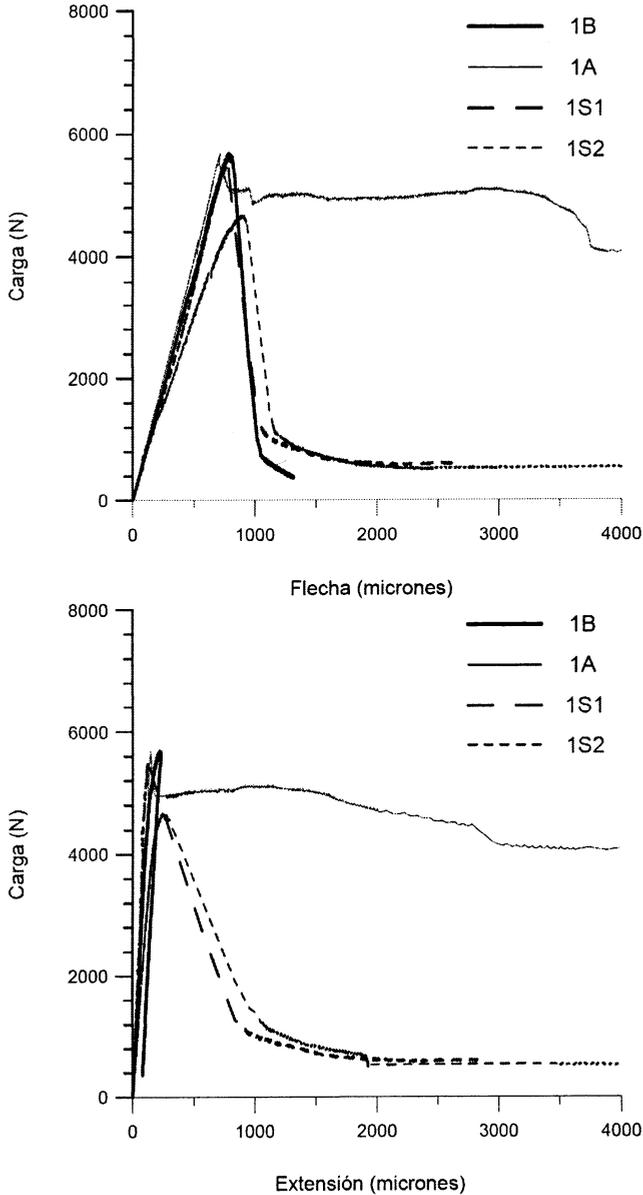


Figura 7. Curvas carga – flecha y carga – extensión obtenidas en ensayos de paneles.

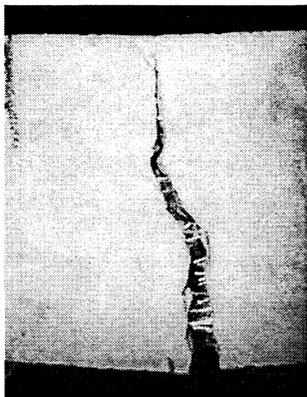


Figura 8. Transferencia de esfuerzos a través de las fibras sintéticas en un panel prefisurado bajo carga.

Para prefisurar los paneles se probaron dos alternativas de aplicación de la carga, con control y sin control de deformaciones. Como los ensayos sobre elementos prefisurados se realizaron varias semanas después de las determinaciones sobre las vigas entalladas, también se tomó referencia de la carga de fisuración de cada panel.

En los paneles reforzados con fibras de acero (1A) cuando la prefisuración se realizó con control de desplazamiento por lazo cerrado deteniendo el proceso cuando se verificaba un descenso de carga del 10%, la tensión de fisuración fue comparable a la de las probetas entalladas y a la de las vigas placa antes evaluadas. Sin embargo cuando se intentó prefisurar en una máquina de ensayo convencional (sin control de deformaciones) y se detuvo la carga al detectar en forma visual la primera fisura, la tensión de fisuración fue notablemente mayor. Esto se atribuye a un menor control en la velocidad de carga y a la incapacidad del método utilizado para detectar los primeros cambios en la linealidad.

Si bien la tensión de prefisuración registrada fue utilizada como referencia para definir los niveles de carga, los diferentes esfuerzos aplicados no dieron lugar a grandes diferencias en la respuesta de los elementos prefisurados en el hormigón 1A. Esto se atribuye a que en este HACRF tenía un comportamiento postpico con endurecimiento.

Por lo observado se decidió fisurar los paneles con fibras sintéticas con control de desplazamientos, teniendo en cuenta que la respuesta postpico en las vigas entalladas.

En la Tabla 6 se muestran algunos resultados representativos de la respuesta observada en las vigas placa prefisuradas. Se incluyen como referencia los valores de tensión de primera fisura (M_{1pk}) y tensión máxima (MR) obtenidos en los ensayos sobre vigas entalladas (RILEM TC162); se indican el método empleado para prefisurar (C: con control, SC: sin control y la tensión a la cual fue sometido el panel y luego los niveles de carga lenta junto con los días durante los que fueron aplicados hasta alcanzar la rotura.

Se observa que los paneles prefisurados reforzados con fibras de acero sobrellevaron durante varias semanas tensiones muy superiores a las de primera fisura del ensayo normalizado, alcanzando la rotura para tensiones entre 6.2 y 7.3 MPa, un valor entre el 80 y el 90 % de la tensión de rotura de las vigas entalladas. El HACRF 1A fisurado sometido a esfuerzos superiores a la tensión de rotura del hormigón sin fibras posee una respuesta totalmente estable en el tiempo.

Tabla 6. Estudios sobre vigas placa prefisuradas sometidas a cargas de larga duración.

Hormigón	RILEM TC162		Preensayo para prefisurar		Ensayo - post fisuración	
	M_{1pk} (MPa)	MR (MPa)	Tipo	Máximo esfuerzo (MPa)	Carga (MPa)	Días bajo carga
1A	4.7	7.9	C	4.7	1.9	10
					2.1	10-50
					4.3	50-90
					4.5	90-110
					5.9	110-120
					7.3	120-340
			8.0	340-rotura		
			SC	9.3	2.0	4
					4.6	4-40
6.2	40-rotura					
SC	10.6	2.1	2			
		2.1	20			
		3.0	25			
		5.6	32			
		6.4	32			
		7.3	32-rotura			
1S1	5.2	5.2	C	7.6	0.9	1
					1.8	1-rotura
1S2	5.3	5.3	C	6.4	2.4	Rotura
2S1	5.0	5.0	C	3.9	0.9	125
					1.9	125-rotura

En los paneles reforzados con fibras sintéticas estructurales al aplicar esfuerzos próximos al 30 % de la carga de fisuración se alcanzó la rotura en forma casi inmediata. Esto es consistente con las tensiones residuales medidas en los ensayos sobre vigas entalladas (Tabla 3). Sin embargo a menores tensiones la respuesta fue estable.

En la Fig. 9 se muestra el desarrollo de tres ensayos sobre los paneles fisurados consignados en la Tabla 6, uno con fibras de acero y dos con fibras sintéticas. Se representan las tensiones aplicadas en función de la apertura de fisuras y del tiempo bajo carga. Los puntos rellenos indican el momento donde se produjo la rotura de cada placa. Las cargas se fueron incrementando en forma sucesiva una vez que se observaba que no se estabilizaba el crecimiento de la apertura de la fisura. En la figura se indican como referencia los valores de las tensiones de rotura y las tensiones residuales de cada hormigón, que fueran determinadas en los ensayos de vigas entalladas. Es muy interesante comprobar cómo las tensiones residuales representan la respuesta de los elementos estructurales, en el hormigón con fibras de acero la rotura se alcanzó para niveles de tensión superiores a f_{R2} . En el hormigón 1S1 durante el primer día se aplicó una tensión menor a f_{R1} y la pieza se mantuvo estable, pero al superarla se produjo la rotura. En una prueba con el hormigón 2S1 se encontró que sometido a una tensión menor a f_{R1} la pieza se mantuvo prácticamente estable durante más de cuatro meses, cuando se le aplicó un esfuerzo mayor rompió de inmediato.

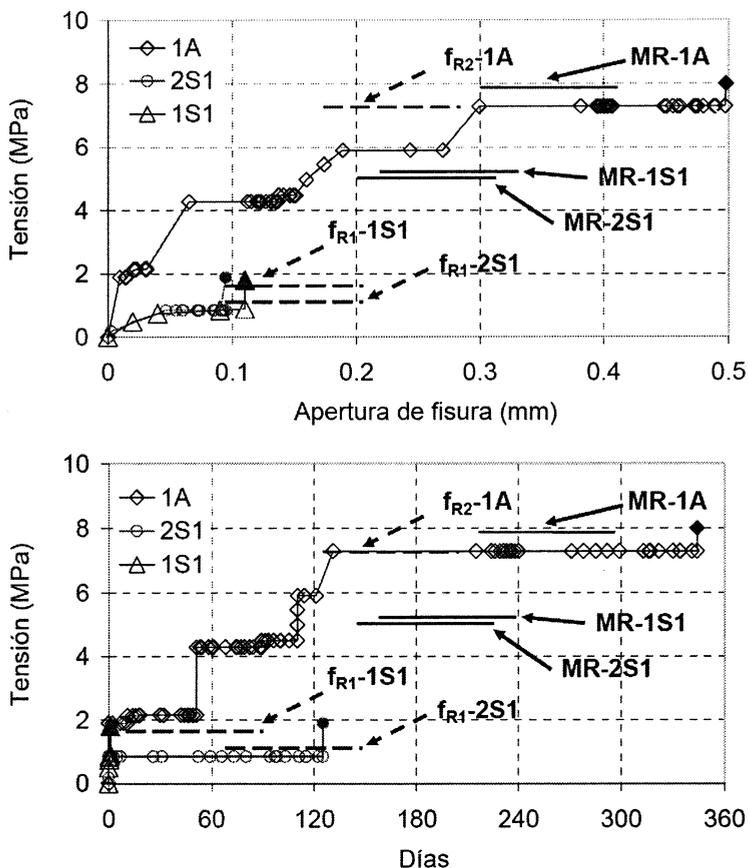


Figura 9. Desarrollo de los ensayos sobre paneles fisurados elaborados con hormigones reforzados con fibras de acero y fibras sintéticas estructurales.

CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo forma parte de las primeras experiencias realizadas para explorar las posibilidades de elaboración y propiedades de hormigones autocompactables reforzados con fibras (HACRF). Se elaboraron hormigones con agregados de diferente tamaño máximo y se consideró el uso de fibras de acero y fibras de sintéticas de tipo estructural. Las principales conclusiones se sintetizan a continuación.

Se elaboraron hormigones autocompactables reforzados con fibras sintéticas estructurales y fibras de acero. Si bien las fibras redujeron la fluidez con respecto al hormigón de base, las mezclas fueron estables y fue posible llenar sin dificultades tanto las probetas normalizadas como vigas placa de 2 m de largo. Los hormigones con fibras mostraron incrementos en la viscosidad y, como era de esperar menor capacidad de pasaje que el hormigón sin reforzar.

En el caso de los hormigones elaborados con 40 kg/m^3 de fibras de acero se verificó una respuesta mecánica con endurecimiento en el postpico similar a la que se obtuvo previamente con esos mismos contenidos y tipos de fibras en hormigones vibrados convencionales.

También se prepararon hormigones con fibras sintéticas de tipo estructural con contenidos variables de refuerzo entre 1.5 y 4 kg/m^3 . Si bien se observó el efecto de la dosis utilizada sobre los parámetros de postpico (tensiones equivalentes o residuales) en todos los casos se obtuvieron hormigones con una respuesta postfisuración que evidenciaba una reducción progresiva de la capacidad de carga, propia de hormigones con bajos contenidos de refuerzo. Los hormigones con fibras sintéticas estructurales alcanzaron una capacidad de carga residual del orden del 30 % o menor con respecto a la resistencia del hormigón sin fibras. Este comportamiento también es consistente con el observado en experiencias con las mismas fibras y hormigón vibrado convencional.

Al analizar la respuesta de elementos estructurales (vigas placa) elaborados con estos hormigones, se observó un comportamiento post pico que sigue las tendencias de los ensayos sobre probetas entalladas empleados para la caracterización en flexión. Se observaron algunas diferencias en la capacidad de deformación en tracción (extensibilidad) y un aporte de las fibras en el control de deformaciones bajo cargas de larga duración con relación al HAC sin fibras.

Un aspecto de interés fue el estudio del efecto de las cargas de larga duración sobre elementos fisurados. Los parámetros resistentes y de tenacidad post fisuración determinados en el ensayo normalizado fueron representativos de la respuesta bajo carga lenta del hormigón fisurado. En los paneles elaborados con un hormigón reforzado con fibras de acero que presentaba una respuesta postpico con endurecimiento se observó capacidad de carga residual permanente para niveles de tensión menores o iguales a f_{R2} . En los elementos reforzados con fibras sintéticas estructurales se produjo la rotura al superar los niveles de la resistencia residual f_{R1} , pero para tensiones menores se verificó una respuesta estable durante varios meses. Esta observación resulta promisoriosa en lo relativo a las posibilidades de aplicación de este tipo de fibras.

Dado que estas primeras experiencias sólo tenían un propósito exploratorio de índole cualitativa, la verificación y cuantificación de los efectos observados así como el análisis de la influencia sobre la autocompactabilidad de la incorporación de diferentes contenidos de cada tipo de fibra y sobre las propiedades mecánicas del hormigón constituyen el objeto de futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las empresas que han contribuido a través del aporte de materiales para el desarrollo de investigaciones sobre hormigones autocompactables y hormigones reforzados con fibras de las cuales este artículo forma parte. Las fibras empleadas han sido gentilmente suministradas por BASF S. A., Acindar S.A., Grace S.A. y Ferrocement S.A., en este sentido los autores destacan la colaboración de los Ing. Humberto Bálsamo, Guillermo Slucka, Nancy Ecurra, Enrique Kenny, Ernesto Peyru y Hernán Rodríguez. A Cementos Avellaneda S.A., en particular a los Ing. Daniel Violini y Carlos Milanesi, por el suministro de los cementos y el filler empleados en estos estudios.

REFERENCIAS

- (1) Zerbino, R. "Hormigón reforzado con fibras: propiedades y aplicaciones estructurales", en *Hormigones Especiales* Cap. 5, Ed. E. Irassar, AATH, Argentina, 2004, pp. 143-181.
- (2) Barragán, B. y Zerbino, R. "Propiedades y aplicaciones estructurales de los hormigones reforzados con fibras de acero" *Ciencia y Tecnología del Hormigón* N 9, 2002, pp. 47-70
- (3) ACI Committee 544 "State of the art report on fiber reinforced concrete" (ACI 544 1R-82) *Concrete International* vol 4, N 5, 1982, pp. 9-30.
- (4) Barragán, B. E. "Failure and Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2002, 151 p.
- (5) Jeffery R. Roesler, Salah A. Altoubat, David A. Lange, Klaus-Alexander Rieder, Gregory R. Ulrich, 2006, "Effect of Synthetic Fibers on Structural Behavior of Concrete Slabs-on-Ground", *ACI Materials Journal*, Enero/Febrero 2006, pp. 3 – 10.
- (6) Tobes, J. M., Torrijos, M.C., Matiasich, C., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Propiedades de hormigones reforzados con fibras sintéticas de uso estructural" Congreso Binacional SAM/CONAMET 2005, Mar del Plata, Argentina, en CD, Trabajo 277.
- (7) Torrijos, M. C., Barragán, B. and Zerbino R. "Physical-mechanical properties, and mesostructure of plain and fiber reinforced self compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 2007, en prensa, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.05.008.
- (8) Barragán B., Zerbino, R. Gettu, R. Soriano, M., de la Cruz, C. Giaccio G. and Bravo, M. "Development and application of steel fiber reinforced self-compacting concrete", Sixth RILEM Symp. on Fibre Reinforced Concrete (FRC) BEFIB 2004. Varenna, Italy, 2004.
- (9) Zerbino, R., Giaccio, G. and Gettu, R. 2006 "Pseudo-ductile behavior of steel fiber reinforced high-strength concretes". *The Indian Concrete Journal*, Feb. 2006, pp. 37-43.
- (10) Giaccio, G., Zerbino, R. y Gettu, R. 1999, "Hormigones de alta performance con fibras de acero para aplicaciones estructurales" *Revista Hormigón* N 33, AATH, pp 53-63.
- (11) Tobes, J. M., Torrijos M. C., Giaccio G., Zerbino R. "Ensayos sobre morteros para el diseño de hormigón autocompactable". 16ª Reunión Técnica AATH, 2006, Mendoza, Argentina, pp. 129-136.
- (12) López, A., Tobes, J.M., Giaccio, G., Positieri, M., Oshiro, A., Zerbino, R., and Barragán, B. "Design and characterization of coloured self-compacting concrete", in *Concrete Structures – Stimulators of development*, J. Radic ed., fib Symposium, 2007, Dubrovnik, Croatia, pp 443-450.
- (13) Giaccio G., Tobes, J. M., and Zerbino R. "Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete" *Cement and Concrete Composites*, 2007, en prensa, doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.10.004.
- (14) RILEM TC 162-TDF Test and design methods for steel fiber reinforced concrete Bending test, Final Recommendation. *Materials and Structures* 2002, Vol 35, pp. 579-582.
- (15) Torrijos, C., Tobes, J. M., Giaccio, G. y Zerbino, R., "Estudio de la distribución del refuerzo en hormigones con fibras", *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, N 12, 2005, pp. 31-46.
- (16) Barragán, B.E. Gettu, R. Martín, M.A. y Zerbino, R.L. 2003 "Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete - A parametric study" *Cement and Concrete Composites*, Elsevier Science, Oxford, UK., Vol 25, N 7, pp. 767-777.