



Received: 09-03-2016
Accepted: 22-03-2016

Anales de Edificación
Vol. 2, Nº3, 41-51 (2016)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2016.3471

Revisión del empleo de fibras de acero en hormigones autocompactantes Review of the steel fibers use in concrete self-compacting

Gabriela Vega

Departamento de Estructuras, E.U. Arquitectura, Universidad de Alcalá (gaby_veg14@hotmail.com)

Resumen— En la actualidad el hormigón es un material indispensable en la construcción. Tiene muchas ventajas, entre las que destaca su alta resistencia a compresión, pero a su vez presenta algunas deficiencias sobre las que se va a centrar este documento. Entre las deficiencias más destacables están la baja resistencia a tracción del material y su comportamiento frágil. Por ello desde sus orígenes se ha intentado cubrir esas deficiencias utilizando diferentes tipos de materiales para reforzar y complementar las capacidades estructurales del hormigón. La incorporación de fibras en este material ha ido implantándose en el mercado ya que gracias a sus características ayudan a abaratar los costos de ejecución y a una sustitución parcial o total de la armadura. En este trabajo se hará un repaso a al uso de los hormigones autocompactantes en la construcción y a las diferentes tipos de fibras que pueden aplicarse al hormigón convencional para la mejora de la tenacidad, control de fisuración y resistencia a flexotracción, con el fin de elaborar un hormigón autocompactante con fibras de acero que reúna las características propias del hormigón y que optimice algunos aspectos del mismos.

Palabras clave— Fibra de acero; hormigón autocompactante; refuerzo estructural; orientación de fibras.

Abstract- Concrete is now an indispensable material in construction. It has many advantages, including its high resistance to compression, but in turn presents some deficiencies on which this document will be focused. Among the most notable deficiencies are the low tensile strength of the material and its brittle behavior. Therefore, from the outset, attempts have been made to cover these deficiencies by using different types of materials to reinforce and complement the structural capacities of concrete. The incorporation of fibers in this material has been implanted in the market since, thanks to their characteristics, they help to reduce the execution costs and to a partial or total replacement of the armature. This work will review the use of self-compacting concrete in construction and the different types of fibers that can be applied to conventional concrete for the improvement of toughness, cracking control and flexural strength, in order to develop a Self-compacting concrete with steel fibers that meets the specific characteristics of the concrete and that optimizes some aspects of the same.

Index Terms— Steel fiber; Self-compacting concrete; Structural reinforcement; Fiber orientation.

I. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material con un comportamiento frágil, que muestra una buena resistencia a compresión, pero una reducida resistencia a tracción. Desde sus inicios se han ido empleando diferentes tipos de materiales para reforzarlo, que le proporcionen capacidades estructurales al hormigón.

Entre los refuerzos utilizados los más notables son las barras de acero que aportan al hormigón secciones más pequeñas manteniendo un equilibrio tensional. Otras de las mejoras que ha tenido este material es la incorporación de fibras las cuales empezaron a utilizarse entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX.

La incorporación de acero aporta una mayor tenacidad y ductilidad a la frágil matriz de hormigón. Este beneficio, no obstante, depende también de la orientación en la que se orientan las fibras dentro de la masa. En base a la formulación del hormigón creada, es posible obtener una repartición aleatoria en el espacio, conformando un material isótropo. En función del proceso de hormigonado, se puede imponer la disposición de las fibras en un plano o dirección predominante.

A. Hormigón reforzado con fibras

Es conocido que el hormigón reforzado con fibras (HRF) incorpora en su composición fibras cortas y discretas aleatoriamente distribuidas en su masa, que se incorporan a la masa del hormigón con el fin de aportarle ciertas propiedades específicas.

Por otro lado, el Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA), constituye una de las innovaciones más relevantes en el campo de los hormigones especiales. El uso de este tipo de hormigón está avanzando a una gran velocidad debido a las nuevas tendencias constructivas.

La adición al hormigón de fibras de acero de un tamaño y forma normalizada mejora su capacidad de protección a la fisuración, le hace dúctil, incrementa su resistencia a la tensión y mejora de forma notable su durabilidad; por ello, demostradas estas cualidades, los hormigones HRFA son de utilización habitual en numerosos países. El uso de las fibras ayuda a reducir el espesor de los elementos estructurales ya que evita la necesidad de utilizar recubrimientos mínimos que garanticen la integridad de las armaduras, al mismo tiempo las diferentes fibras cosen mejor la matriz del hormigón obteniendo con ello un mejor control de la fisuración y mejorando su durabilidad.

La dosificación de este tipo de hormigón esta condicionada a varios aspectos, como son la resistencia requerida, el ambiente de exposición o la consistencia prevista.

El principal efecto de las fibras es el control de los procesos

de fisuración en este material cuya capacidad de deformación en tracción es muy pequeña. Esto da lugar a notables incrementos de tenacidad en el compuesto, como así también a beneficios adicionales en su capacidad resistente frente a sollicitaciones de tracción. La figura 1 explica cómo se modifican las propiedades del compuesto a medida que crece el contenido de fibras.

Se fabrican distintos tipos de fibras para incorporar al hormigón, entre las más utilizadas se destacan las de acero que se emplean en volúmenes entre 0.25 y 1 %, esto es entre 20 y 80 kg/m³. Sin embargo en los últimos años ha crecido muchísimo el uso de fibras sintéticas; al respecto se deben distinguir dos tipos, las microfibras que se usan desde hace bastante tiempo principalmente para el control de la fisuración en estado plástico o para mejorar la respuesta frente a altas temperaturas (se utilizan unos 0,6 kg/m³ en hormigón) y las macrofibras, también denominadas fibras sintéticas estructurales ya que pueden aportar capacidad residual al hormigón endurecido. Estas últimas surgen como alternativa frente a algunas aplicaciones con bajos contenidos de fibras de acero y se incorporan en dosis entre 2 y 8 kg/m³ aproximadamente. También existen fibras de vidrio, tanto microfibras como macrofibras.

En el compuesto al incorporar fibras resistentes dentro de una matriz frágil, crece la capacidad de carga post-fisuración

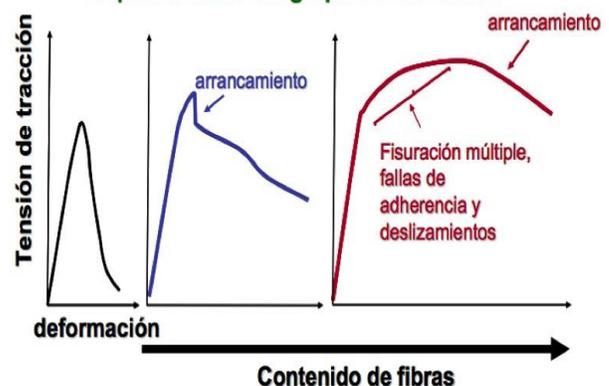


Fig. 1. Evolución de la deformación frente a la tensión de tracción en función del contenido en fibras.

Entre los parámetros que inciden sobre la efectividad de las fibras aparecen el tipo de material, su longitud (l) y diámetro (d) que definen el llamado aspecto geométrico (l/d), y el volumen incorporado. Cuando las fisuras se propagan principalmente por las interfaces mortero--agregado (hormigón convencional), la fibra será efectiva si su longitud es mayor que el tamaño máximo del agregado (d_{max}), en general se recomienda $l \geq 2$ o $2.5 d_{max}$. Sin embargo cuando existe fisuración a través de los agregados (como en

G. Vega pertenece al Departamento de Estructuras, E.U. Arquitectura de la Universidad de Alcalá.

hormigones de alta resistencia), el largo de la fibra no es tan importante como el volumen incorporado (que suele ser mayor que en hormigones convencionales).

En síntesis las fibras controlan la fisuración, provocan grandes incrementos en tenacidad, mejoras en la resistencia a tracción y pero prácticamente no modifican la resistencia a compresión. Además de los beneficios en resistencia también se utilizan mucho para controlar los efectos de la contracción en el hormigón.

Entre las ventajas que pueden motivar la elección del HRF frente al hormigón armado convencional aparecen mejoras en costos relacionados con el suministro y ahorro de tiempos de obra para la ubicación de las barras convencionales soldadas, beneficios en la salud y seguridad en los operarios durante el manipuleo del refuerzo, el aporte de soluciones a problemas derivados de defectos en la ubicación del refuerzo, y aumentos de ductilidad o tenacidad estructural.

Las primeras aplicaciones de HRF con fibras de acero incluyeron pavimentos, losas de aeropuertos, puentes y pisos industriales, reparaciones de diques sujetos a cavitación, estabilización de rocas y túneles mediante HRF proyectado, premoldeados y en menor medida refractarios. Las fibras de acero se usa en (CONCRETE SOCIETY 2007a):

- Losas: sobre el piso (pisos industriales, caminos, aeropuertos, overlays, railways), elevadas sobre pilas o sobre columnas eliminando todas las armaduras, uso combinado con hormigón armado (reducción del 50 % de armaduras en estructuras para contención de aguas; reemplazo de armaduras en muros, en fundaciones de casas, muros de seguridad ante impactos), losas compuestas con perfiles de acero.
- Elementos premoldeados: segmentos para túneles (transporte y manipuleo), tanques de almacenamiento, tuberías (formas, fatiga, durabilidad), vigas y paneles.
- Hormigón proyectado: obras de minería, túneles, proyectos hidráulicos ya que permite la eliminación de mallas, adaptación a movimientos de tierra súbitos, y mejoras en la adherencia sustrato – hormigón. Revestimiento de túneles y estabilizado de taludes.
- Reparaciones: puentes, edificios, túneles, torres de enfriamiento.
- Estructuras expuestas a impactos y explosiones.

Sobre aplicaciones de fibras sintéticas CONCRETE SOCIETY 2007b menciona:

- Losas sobre el piso: pavimentos, playas de estacionamiento (sales descongelantes), caminos, pisos, refuerzo de losas para trenes (efectos magnéticos), overlays.

- Hormigón proyectado: Túneles y minería; pueden reemplazar a las de acero y ser convenientes en ambientes agresivos (corrosión) y por el menor desgaste en los equipos; la pérdida de performance por fuego puede inhabilitarlas.
- Construcción in situ: revestimiento de túneles; en aplicaciones marinas en reemplazo de las de acero, muros, estructuras para contención de aguas.
- Elementos premoldeados: baldosones para veredas, tanques y tuberías (formas, fatiga, durabilidad), paneles para viviendas.

B. Hormigón autocompactante

El hormigón autocompactante (HAC) fue desarrollado en Japón a finales de la década de los 80 (Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005). Se trata de un hormigón, que presenta una gran fluidez y tiene la capacidad para llenar el encofrado y compactarse gracias a su propio peso. Todo ello, sin que ocurra un indeseado bloqueo de la masa al atravesar las zonas armadas. Su comienzo se origina en el interés de mejorar la durabilidad de las estructuras de hormigón, ya que para realizar este tipo de trabajo se necesita de una mano especializada que realizase una adecuada compactación (Okamura and Ouchi, 2003).

TABLA I
CLASES DE ESCURRIMIENTO

Clase	s/UNE 83.361
AC--E1	$550\text{mm} \leq D_f \leq 650\text{mm}$
AC--E2	$650\text{mm} < D_f \leq 750\text{mm}$
AC--E2	$750\text{mm} < D_f \leq 850\text{mm}$

El primer prototipo de HAC fue diseñado en Japón en el año 1988 (Ozawa et al., 1989). La utilización de este tipo de hormigón es diferente en función del país. En Europa, se introdujo a través de los países del norte, como el primer puente construido por completo mediante el uso de HAC en Suecia, considerado como el primero fuera de Japón (Billberg, 1999). Al principio se designó como Hormigón de Altas Prestaciones, hasta que estudios paralelos emplearon la misma designación para hormigones de alta durabilidad con reducidas relaciones agua/cemento (Gagne and Pigeon, 1990). En la actualidad este tipo de hormigones es más conocido gracias a sus propiedades autocompactantes. El desarrollo de estos hormigones ha venido ligado a la investigación del sector químico, que ha profundizado en el campo de nuevos aditivos reductores de agua de alta actividad con idea de reducir la

floculación de las partículas, dispersando el cemento.

TABLA II
CLASES DE VISCOSIDAD

Clase	s/UNE 83.361	s/UNE 83.364
AC-V1	$2.5 \text{ s} \leq T_{50} \leq 8 \text{ s}$	$10 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$
AC-V2	$2 \text{ s} < T_{50} < 8 \text{ s}$	$6 \text{ s} \leq T_v \leq 10 \text{ s}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2 \text{ s}$	$4 \text{ s} \leq T_v \leq 6 \text{ s}$

Este tipo de hormigones destaca sobre todo ya que cumple ciertos requisitos en estado fresco. Este tipo de hormigón debe ser capaz de rellenar el encofrado sin ayuda externa y presentar un alto nivel de acabado, denominándose a esta característica capacidad de relleno. A la vez, se le exige también fluir a través de la armadura de refuerzo dispuesta en el elemento estructural, sin que ocurra el bloqueo de los agregados de mayor tamaño, propiedad conocida como capacidad de paso. Y finalmente debe cumplir la propiedad de resistencia a la segregación, garantizando con ello la homogeneidad de su composición durante el flujo y una vez detenido. De acuerdo a la normativa vigente EHE dentro de su anexo nº17, la tipificación de dichos hormigones es similar a la de los hormigones vibrados, destacando su mayor fluidez en relación a la consistencia. De manera complementaria, es posible especificar el grado de las propiedades requeridas. En este último caso, las clases se definen de acuerdo a las tablas 1 a 3.

Estas características del hormigón, permiten prescindir de la fase de vibrado y con ello mejorar la calidad del hormigón gracias también a una dosificación más elaborada y compleja. Estos beneficios pueden acometer incluso en aspectos económicos (reducción de mano de obra), temporales (reducción de plazos), medioambientales (reducción de ruidos en la obra) y relativos a la seguridad y salud laboral (síndrome del dedo blanco).

Para equiparar la potencial segregación ocasionada por la gran fluidez propia de dichos hormigones se necesita de una gran cohesión de los componentes de la masa. Además de las

ventajas antes mencionadas, desde el punto de vista estructural también adquiere gran interés dado que su microestructura se ve mejorada.

A medida que el cemento se hidrata, las propiedades reológicas del HAC varían reduciendo su fluidez. Esta mayor fluidez inicial, origina unos mayores empujes en los encofrados. El HAC es considerado un material tixotrópico, que regenera su estructura en reposo, pero que un aporte de energía permite activar su capacidad de fluidez.

Las fibras constituyen un agregado más, pero con una relación de aspecto elevada que difiere respecto a la forma de los áridos. Añadir las fibras en la matriz de hormigón origina reducir de manera notoria la docilidad del mismo, dificultando su autocompactabilidad.

Gracias a la cantidad de investigaciones realizadas con hormigones reforzados con fibras, cabe mencionar una obra de notable interés en la ámbito de la edificación. La primera edificación en España en la que se han empleado losas macizas de HRFA para los forjados, lo ha realizado la ingeniería LKS para su sede central en Arrasate (Gipuzkoa) y se encuentra ampliamente detallado en (Maturana, 2013).

En lo que se refiere al HAC, su empleo se ha extendido a pesar de ser un material más joven. Esto se debe ya que para su refuerzo se emplean armaduras tradicionales y su comportamiento en estado endurecido no se ve excesivamente alterado, y en caso contrario siempre de forma positiva. Aún cuando su dosificación puede resultar complicada, su empleo genera elevados beneficios en lo que respecta a su puesta en obra (estado fresco). Es un material ampliamente empleado en la edificación, pero sobre todo en la obra civil.

C. Hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero

El hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero (HACRFA) es un material que se está estudiando en la actualidad, con ello se quiere conseguir unir las características de autocompactabilidad y el refuerzo mediante fibras consiguiendo con ello la fase de vibrado y el ferrallado produciendo una reducción en costes y en plazos de ejecución.

La combinación entre las ventajas propias del HAC (eliminación del trabajo de compactación, reducción del

TABLA III
CLASES DE RESISTENCIA ALBLOQUEO

Clase	Exigencia	s/UNE 83.362	s/UNE 83.363
AC-RB1	TM > 20 mm o 80 mm < paso < 100 mm	Dj f ≥ df – 50 mm (anillo de 12 barras)	≥ 0.80 (2 barras)
AC-RB2	TM ≤ 20 mm o 60 mm < paso < 80 mm	Dj f ≥ df – 50 mm (anillo de 20 barras)	≥ 0.80 (3 barras)

tiempo de construcción, menor contaminación acústica, mejor homogeneidad del material, facilidad de operación, ahorro en personal y equipos, acceso a zonas densamente armadas, excelente terminación superficial) y las que aporta el refuerzo con las fibras (aumento de ductilidad y tenacidad estructural, mejoras de durabilidad, nuevas reducciones de tiempos por sustitución total o parcial de estribos), da lugar es este material de altas prestaciones del cual ya existen varios ejemplos de aplicación.

Entre las aplicaciones del HACRF aparece su uso para reparación y refuerzo de estructuras de hormigón. En la actualidad crece el interés en prolongar la vida en servicio de las construcciones. Incluso a veces el reemplazo total de la estructura puede no ser viable por razones económicas o por imposibilidad de cese de funcionamiento;; entre las técnicas de refuerzo y reparación se encuentra la adhesión de capas finas de morteros u hormigones con fibras. El HACRF resulta particularmente apto para tal fin gracias a su mayor tenacidad y modo de falla dúctil, control del ancho de fisuras, mejoras de la resistencia al corte y frente a la acción de cargas dinámicas, y buena adherencia entre capas de hormigones. Las fibras de acero, a diferencia de las armaduras convencionales, prácticamente no presentan riesgos de corrosión;; esto incluso desaparece con macrofibras sintéticas. La fluidez del HAC permite trabajar en espesores pequeños y minimiza los defectos internos.

II. MÉTODOS EXPERIMENTALES

Como las fibras se distribuyan en forma homogénea durante el mezclado, el moldeo y la compactación pueden afectar la distribución y orientación, y consecuentemente la respuesta mecánica del HRF. En HRF convencional vibrado se conoce que existe una distribución en planos (2D), en HACRF existen efectos del flujo y de los encofrados (pared) que modifican la orientación. Varios antecedentes dan cuenta que las fibras se orientan por efecto de la energía externa (vibrado) en el hormigón convencional o a causa del flujo en el caso del HAC. También las fibras pueden ubicarse en mayor número en el fondo de un elemento, por su mayor densidad con respecto a los demás materiales componentes (Barros et al, 2008).

Trabajos recientes (Ferrara et al, 2008) han estudiado la disposición de fibras en losas que fueron llenadas desde diferentes sectores. Se observó que las fibras se orientan en la dirección del flujo, resultando una fuerte anisotropía del material que debe considerarse en el diseño estructural al estimar la capacidad resistente (en especial en tracción). En estudios sobre losas de mayores dimensiones (4 x 5.3 m de lado y 0.10 m de altura) elaboradas con HACRF se encontró que las fibras se orientan en la dirección del flujo, pero que la orientación es afectada por el lugar de colocación del

hormigón, el movimiento de los trabajadores durante el llenado y el efecto pared (Tanikella, Gettu, 2008).

Recientemente se evaluó la orientación de fibras de acero sobre las vigas utilizadas para el ensayo de flexión y sobre vigas de mayor longitud (Vanderwalle et al, 2008) preparadas con HRF vibrado y HACRF. En el HRF vibrado los vibradores de inmersión producen fuertes distorsiones en la orientación del refuerzo y las fibras tienden a ubicarse en la parte inferior del molde;; en el HACRF la distancia que recorre el hormigón, la velocidad y el efecto pared son determinantes para la orientación; comparando ambos tipos de hormigón, las fibras se orientan en mayor medida en el HACRF. Son muy escasas las experiencias sobre orientación de fibras sintéticas en HAC, este caso puede diferir con respecto a las fibras de acero y, dada su menor rigidez, es posible que se adapten de un modo diferente al movimiento del hormigón. En este apartado se resumen varias experiencias (Tobes et al, 2008; Zerbino et al, 2012) donde se analiza la orientación del refuerzo con fibras sintéticas y de acero en diferentes elementos estructurales delgados.

Además, para determinar la influencia en la dirección de las fibras hay diferentes técnicas que emplean métodos indirectos no destructivos, y que permiten definir la distribución y orientación de las fibras a lo largo de la masa. Dado que la cuantía de fibras, en función de la orientación, es proporcional a la resistencia a tracción del material, se considera posible establecer la correspondiente correlación. Se analizan a continuación, algunos de los métodos adoptados para el control de calidad del material.

A. Extracción de fibras

El método más directo de entre los aquí presentados, se basa en la extracción de las fibras de entre la masa para proceder a su pesado y estimación de la cuantía dispuesta (Soroushian and Lee, 1990; Kooiman, 2000). Este procedimiento se puede realizar sobre la masa fresca y en el hormigón endurecido de acuerdo a la norma UNE--EN 14721. Mediante lavado de la pasta en el primer caso, y machacando las probetas en el segundo, se consigue separar y extraer manualmente o con ayuda de un imán las fibras del hormigón. La densidad de fibras se obtiene de la división del peso de las fibras y el volumen de hormigón estudiado. La orientación resulta imposible de determinar de acuerdo a este método. De forma añadida el estudio de la masa fresca, impide analizar la variabilidad en la distribución de fibras motivada por el procedimiento de ejecución empleado.

B. Métodos estereológicos

Los principios del método estereológico (Stroeven, 2009) establecen la posibilidad de determinar la densidad y orientación de las fibras dentro de la pieza de hormigón en base al estudio de secciones planas. General-- mente, estas

secciones consisten en las caras generadas mediante el corte realizado sobre las probetas, aunque varios estudios emplean imágenes radiográficas (Stroeven and Shah, 1978; Robins et al., 2003; Vandewalle et al., 2008) realizadas al elemento (Figura 2).

Es un método interesante que introduce el concepto de factor de orientación aplicado en posteriores estudios para relacionarlo con el comportamiento estructural del material. El empleo de fibras de pequeño diámetro y grandes cuantías para desarrollar hormigones de altas prestaciones, puede ralentizar el, ya de por sí, áspero procedimiento de ensayo. Para evitar dichas complicaciones se pueden emplear herramientas de análisis de imágenes digitales como los mencionados en (Mlekusch, 1999).

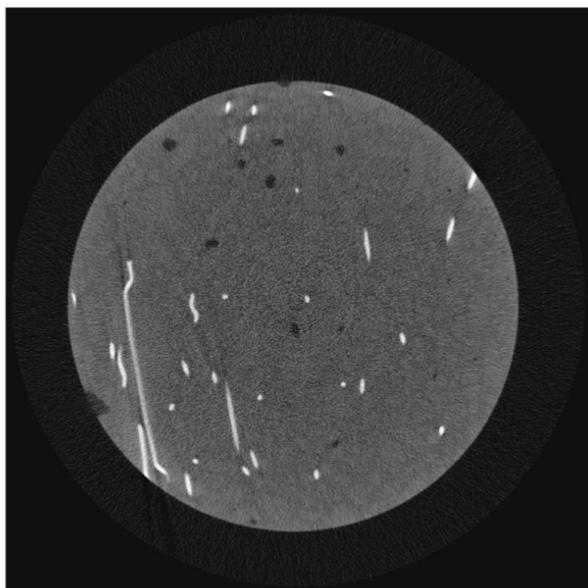


Fig. 2. TAC sobre probetas de HRFA.

C. Tomografía Axial Computarizada

Otra posible técnica consiste en la reconstrucción realizada en base a imágenes radiográficas, denominada Tomografía Axial Computarizada (TAC) (Stähli et al., 2008; Farhat et al., 2007) y ampliamente empleado en estudios clínicos. El TAC se centra en el estudio de imágenes obtenidas repetidamente para secciones de reducido espesor a lo largo de la probeta. El post-procesado de dichas imágenes planas, permite la reconstrucción tridimensional del conjunto con gran fiabilidad sobre el contenido de la muestra. Sin embargo, su elevado coste y no poder ser empleado en elementos de gran escala impide su uso como técnica de control.

D. Métodos magnéticos

Los métodos inductivos propuestos en (Torrents et al., 2012; Ferrara et al., 2012) permiten el estudio de la densidad y orientación de las fibras en probetas cúbicas y elementos

superficiales de HRFA. La técnica resulta sencilla y no requiere de complejas configuraciones, ni acoplamientos entre el paramento y la pieza. El procedimiento consiste en hacer pasar un campo magnético a través del hormigón y medir la variación de la inductancia generada. A mayor variación, más elevada será la densidad de fibras ya que éstas alteran el campo magnético para el que el hormigón es "transparente".

E. Espectroscopia de impedancia en corriente alterna

La espectroscopia de impedancia en corriente alterna (AC-IS) puede ser empleada en múltiples aspectos tales como el desarrollo de la hidratación de los componentes del hormigón, la estructura de poros, la fisuración o la difusividad de ion cloruro (Ozyurt et al., 2006a). Pero su práctica también permite monitorizar la orientación de las fibras en elementos estructurales de HRFA (Ozyurt et al., 2006b; Ferrara et al., 2008). Parece una técnica prometedora, pero la configuración del ensayo debe ser ajustada para cada geometría de fibra y tamaño del elemento.

F. Resistividad eléctrica

El estudio de la resistividad eléctrica ofrecida en varias direcciones, permite analizar la posible orientación de las fibras en elementos de HRFA (Lataste et al., 2008). El contacto de los electrodos se mejora mediante el empleo de un electrolito, que permite estimular la intensidad eléctrica más correcta por parte de estos. Otros electrodos se encargan de recibir la señal, que se procesa para obtener los resultados. Como otras técnicas de reflexión, la sensibilidad disminuye considerablemente con el espesor del elemento.

G. Reflectometría de microondas

La reflectometría de ondas electromagnéticas de microondas en una línea de transmisión coaxial acabada en circuito abierto (Van Damme et al., 2004), permite analizar la onda reflejada por el material en base a una onda previamente emitida por el sensor coaxial abierto. Los sensores empleados en los estudios hasta la fecha, tienen limitada la penetración de la onda en función de sus propias dimensiones. Es por ello, que esta técnica únicamente aporta información superficial del elemento a caracterizar.

H. Antenas de guía de ondas

El empleo de antenas de guía de ondas, permite analizar la alteración de la señal emitida al atravesar un medio como el HRFA (Roqueta et al., 2010). Las propiedades dieléctricas del compuesto difieren en función de variables como la humedad, frecuencia del estudio y, sobre todo, cuantía de fibras. Estas últimas aportan una permisividad variable al medio de estudio. Aunque aún presenta sus limitaciones, parece una técnica interesante que permite mapear las estructuras en base a microondas transmitidas, a través del espesor del elemento con

TABLA IV
UBICACIÓN DE LAS PROBETAS CÚBICAS ENSAYADAS A ROTURA POR COMPRESIÓN (EN NEGRO)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114
115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133
134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152
153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171
172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209
210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228
229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247
248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266
267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285
286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304
305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323
324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342
343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361
362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380

antenas emisora y receptora a cada lado. Resulta posible determinar zonas con diferentes densidades, pero carece de los suficientes datos para estimar su orientación.

I. Ensayos de laboratorio

La finalidad de los ensayos reside en cuantificar de manera normalizada las propiedades mecánicas del HACRFA formulado. Se trata de realizar ensayos a rotura solicitando las

probetas en diversas configuraciones generando esfuerzos axiales de compresión o tracción, además de esfuerzos tangenciales, dado que la propuesta de aplicación estructural del material consiste en depósitos de contención cilíndricos.

Los ensayos descritos y cuyos resultados se muestran a continuación se enmarcan en la correspondiente caracterización mecánica de los hormigones, y especialmente

TABLA V
UBICACIÓN DE LAS PROBETAS CÚBICAS ENSAYADAS A CORTANTE (EN NEGRO)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114
115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133
134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152
153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171
172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209
210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228
229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247
248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266
267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285
286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304
305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323
324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342
343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361
362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380

TABLA VI
UBICACIÓN DE LAS PROBETAS CÚBICAS ENSAYADAS A FLEXOTRACCIÓN (EN NEGRO)

15 cm		15 cm		60 cm		60 cm		60 cm		15 cm		15 cm		60 cm		15 cm		15 cm		60 cm		60 cm		15 cm		15 cm																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380

los reforzados con fibras. Por un lado se han realizado los habituales ensayos de compresión para caracterizar el mismo. Por otro lado, se emplean ensayos específicos que cuantifiquen el incremento de resistencias residuales a tracción y/o ductilidad que aportan las fibras.

La mayor aportación del refuerzo en base a fibras permite a la sección absorber esfuerzos de tracción tras la fisuración de la matriz.

Para complementar el estudio se han realizado ensayos a cortante que permitan determinar el incremento de resistencia frente a esfuerzos tangenciales.

Para ello se van a realizar los siguientes ensayos adoptados para un muro de unas dimensiones determinada. La determinación de unas dimensiones básicas para las probetas origina, en consecuencia, la modulación del muro.

- Ensayo de compresión

La caracterización de las propiedades mecánicas del hormigón en estado endurecido requiere la comprobación de su resistencia a compresión (Tabla 4). Para ello, se ha empleado la norma de referencia de dichos ensayos, UNE 83507 (2004).

- Ensayo a cortante

El ensayo a cortante permite analizar la resistencia del material respecto a esfuerzos tangenciales mediante corte directo doble. Es de esperar que la adición de fibras, además de aportar un incremento en la tenacidad frente a diversos

tipos de rotura, también aumente la resistencia del material frente a este tipo de esfuerzos (Tabla 5).

- Ensayo a flexotracción

Los ensayos a flexotracción son los establecidos por la mayoría de las normativas con motivo de obtener los parámetros necesarios para la estimación de la ley constitutiva del material. En el presente apartado, se expondrán el procedimiento de los ensayos realizados, los resultados obtenidos y las correlaciones con respecto a otros parámetros, que permitan la predicción de la respuesta del material.

III. RESULTADOS

A. Ensayo a compresión

La tabla 7 resume los resultados del ensayo de las probetas extraídas. En la misma se relacionan los valores de resistencia a compresión de las probetas respecto a su densidad de fibras.

Además, el patrón de rotura para las probetas cúbicas, se corresponde de manera acertada con el esperado (Tabla 8).

El hormigón alcanza una resistencia media cercana a los 60 MPa, sin una relación obvia respecto al refuerzo de fibras de cada una de las probetas. En concordancia con lo expuesto en las conclusiones de varios estudios (Grünewald, 2004), la adición de fibras no afecta apreciablemente la resistencia a compresión del material. Aunque para las probetas cúbicas se alcanza, como era previsible, un valor superior al de las

TABLA VII
RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CÚBICAS

Nº	25	29	34	143	148	253	257	262	367	371	376
f_c (MPa)	58.7	55.3	60.9	73.4	64.5	55.7	68.1	66.7	56.6	57.8	56.9
f_{cm} (MPa)	61.3										
CV (%)	9.77										
Fibras (kg/m ³)	0	0	0	56	N/A	62	65	57	66	85	76

TABLA VIII
RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS

Edad del hormigón (días)	f_c				f_{cm} (MPa)	CV (%)
3	42.3	42.3	41.8	43.3	42.4	1.48
7	50.0	49.2	50.7	51.0	50.2	1.60
14	55.2	53.2	54.7	43.8*	54.4	1.99
28	61.0	59.6	59.0	56.8*	59.9	1.71

* Probeta defectuosa

probetas cilíndricas debido a su menor esbeltez, éste no es acusado (un 2.3%). Muchas de las normativas (EHE-08, ACI-318, etc) también introducen unos factores de conversión entre la resistencia obtenida en probetas cúbicas y cilíndricas, que varían entre un 70% y un 90%, o incluso la unidad en caso de hormigones de alta resistencia (>80 MPa) (EHE-08, 2008). El caso de estudio presenta unos valores similares para ambos tipos de probetas, que difieren en menos de un 3% entre sí.

Se obtienen valores de resistencia a compresión de acuerdo a las expectativas iniciales. Ello se debe a la formulación del hormigón para cumplir requisitos de autocompactabilidad, que exigen una cantidad elevada de finos y que en este caso han sido aportados en su mayoría como cemento (430 kg/m³). Por su lado, Domone (2006) establece en un estudio realizado sobre HAC fabricados entre 1993 y 2003 por diversos equipos investigadores, que más del 80% de los casos estudiados supera una resistencia a compresión de 40 MPa. Es por tanto razonable decir, que el HAC diseñado en el presente estudio, se encuentra en el rango inferior de lo que habitualmente obtiene un HAC en cuanto a resistencia a compresión se refiere.

La homogeneidad del HRFA a lo largo y ancho del muro se manifiesta en los resultados obtenidos, no habiendo muestras de la influencia de la segregación de fibras detectada en la parte superior del muro en lo que a resistencia máxima a compresión se refiere. Por contra es de destacar que la fibras aportan un incremento de la ductilidad ya detectado por

Bencardino et al. (2008), debido a su capacidad de coser las fisuras generadas y continuar con la transmisión de cargas a través de ellas. Todo ello depende de la cuantía de fibras de la que dispone cada una de las probetas, presentando las correspondientes al hormigón sin refuerzo, una rotura brusca y repentina sin capacidad de absorción de energía posterior a la fractura de la matriz.

Contrastando estos valores con los obtenidos de las probetas moldeadas, cuya orientación diferirá de las extraídas del muro debido a procesos de hormigonado y llenado dispares, se observa que la resistencia media a compresión presenta valores muy similares.

TABLA IX
RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A CORTANTE DE LAS PROBETAS

Probetas Moldeadas τ_v (MPa)	Probetas Extraídas	
	Nº Probeta	τ_v (MPa)
7.39	41	5.64
7.85	55	3.70
8.6	193	6.31
8.51	198	7.58
10.05	207*	6.41
6.73	345	7.55
	350	11.21
	359	5.55

B. Ensayo a cortante

Se determinan que la resistencia a compresión, en primer lugar, y el volumen de fibras, en segundo lugar, son las

TABLA X
RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN DE LAS PROBETAS

Probeta n°	$f_{ct,L}^f$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	Fibras (ud)	L_m (H)
60	3,97	3,21	2,83	2,68	1,72	N/A	N/A
61	3,00	0,83	0,85	0,68	0,71	10	0,2
62	3,99	0,69	0,73	0,45	0,31	7	0,2
65	3,34	0,84	0,80	0,76	0,61	8	N/A
68**	0,66	0,63	0,17	0,12	0,11	3	0,07
73	3,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0
74	2,89	0,46	0,02	0,02	0,02	0	N/A
98	4,78	2,39	2,21	2,04	1,81	70	1,141
99	4,32	4,60	5,09	3,46	0	50	0,641
100	5,66	7,92	6,45	5,46	5,07	87	1,369
103	6,07	5,64	7,92	4,30	-1,53	59	1,002
106	4,13	3,19	3,54	3,24	3,33	26	0,523
111	4,62	1,16	0,87	0,34	-0,09	N/A	0,113
112	3,80	0,03	-0,03	0,00	0,00	0	0,008
119	6,26	10,13	6,52	5,07	4,57	N/A	1,445***
136	5,56	2,63	2,41	2,42	2,42	26	N/A
137	3,77	5,43	6,02	4,75	4,08	69	1,227
138	6,51	7,12	6,28	4,62	4,04	71	1,376
141	5,21	8,82	6,63	5,69	5,65	70	N/A
144	5,00	7,98	8,74	8,21	7,29	85	1,099
149	4,35	3,49	2,98	2,43	2,31	31	0,475
150	3,34	1,36	1,35	1,59	1,58	12	N/A
156**	0,78	1,27	1,06	0,98	0,91	N/A	1,427***
160	7,61	6,39	5,46	5,01	4,03	N/A	1,462***
163	4,46	5,71	6,15	4,40	3,77	N/A	1,512***
168	4,42	2,28	2,08	1,90	1,93	N/A	0,662***
169	3,38	1,99	2,24	2,27	2,11	N/A	0,436***
174	4,93	2,08	1,08	1,11	1,02	38	0,645
175	7,10	10,52	9,07	6,21	0,51	86	1,278
176	6,53	11,08	8,68	7,12	5,65	94	1,338
179	6,03	9,70	10,37	8,73	7,30	100	1,489
182	5,58	9,00	6,71	6,49	5,99	86	1,531
187	5,76	5,35	5,78	3,20	1,05	83	0,996
188	5,42	2,76	2,73	2,92	2,56	41	0,504
201	4,86	4,55	5,28	1,12	4,01	N/A	0,914***
212	4,75	3,65	2,41	1,57	1,57	28	N/A
213	5,97	9,57	8,23	6,63	5,03	87	1,681
214	4,61	4,14	4,14	4,14	4,15	59	0,914
217	5,73	5,35	5,06	4,51	4,34	67	N/A
220	5,46	9,00	8,86	8,45	7,36	87	1,183
225	4,65	5,99	6,02	4,14	4,04	53	1,072
226	5,28	4,84	3,81	3,92	3,87	42	N/A
233	4,31	0,95	0,89	0,64	0,58	N/A	0,344***
236	4,64	4,88	5,00	3,79	3,54	N/A	0,952***
244	6,28	6,64	5,90	4,31	3,67	N/A	1,478***
250	5,20	2,37	1,84	1,75	1,70	39	0,895
251**	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	79	1,323
252	4,56	1,81	2,32	2,38	1,83	N/A	0,603
255	5,72	5,90	6,08	5,82	5,14	58	1,001
258	6,30	10,28	10,00	9,36	8,05	106	1,463
263	6,77	9,00	8,79	7,64	7,16	90	1,068
264	6,61	3,79	3,96	3,5	3,29	N/A	0,645
289	3,52	2,66	2,65	2,69	2,61	39	0,74
290	4,66	7,78	6,9	5,76	4,59	71	1,139
293	6,53	9,49	9,37	8,63	7,33	86	N/A
296	6,12	9,17	9,33	8,29	7,43	127	1,98
301	6,94	10,66	10,84	9,49	8,89	117	2,058
302	6,47	11,40	9,19	7,97	7,83	95	N/A
320	6,39	9,48	9,17	8,00	4,62	N/A	1,388***
326	5,78	8,52	7,34	6,88	5,75	76	0,967
327	5,87	6,19	4,77	3,8	3,51	65	1,112
328	7,30	9,09	7,17	5,08	4,42	N/A	1,975
331	5,97	8,48	8,78	7,82	7,24	108	1,735
334	6,79	7,94	8,79	0,58	0,58	141	1,85
339	6,90	11,51	11,08	9,29	7,79	99	1,707
340	5,68	5,16	4,52	3,11	2,02	34	0,585
347	7,34	11,97	10,96	8,34	7,38	N/A	2,584***
364	9,89	13,01	13,01	11,72	11,67	124	N/A
365*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
366	7,87	11,12	11,88	10,55	9,45	154	2,367
369	8,64	10,36	9,65	8,89	8,69	135	N/A
372	5,18	7	9,49	8,68	7,62	155	2,232
377	5,81	9,58	8,86	7,32	6,13	88	1,588
378	5,41	6,31	6,92	5,99	5,44	65	N/A

* Probeta defectuosa

** Ensayo defectuoso

*** Valor central

variables que mejoran en mayor medida la resistencia a cortante del material. La relación de aspecto influye en menor medida en dicho incremento. No se ha establecido como influyen estos parámetros en el material estudiado, pero en vista de la tabla 6, los valores medidos en los ensayos, resultan superiores a los que la estructura propuesta tendría en servicio (Tabla 9).

C. Ensayo a flexotracción

Como era de esperar, la dispersión de resultados ha sido elevada. Más si cabe, puesto que las probetas no han sido moldeadas en igualdad de condiciones en el laboratorio, sino que la densidad y orientación de las fibras dentro de las mismas responde a los condicionantes impuestos por la ejecución del muro (Tabla 10).

IV. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista técnico en HAC aparece como una excelente alternativa tanto para la reducción en los tiempos de ejecución, como para dar la posibilidad de realizar nuevos diseños y todo ello acompañado de una reducción de costos (mano de obra, compactación, etc.), también cabe mencionar que se han desarrollado y facilitado métodos de reparación que aseguran un nivel de compacidad y una ausencia de defectos proporcionando que con ello las estructuras sean más durables.

La incorporación de fibras ofrece ventajas frente a diversos problemas que aparecen durante la ejecución y vida de las estructuras.

El uso de fibras ha permitido reducir espesores y el efecto costura permite mantener en servicio elementos con un grado de fisuración que en otros casos habrían acabado su vida útil.

La combinación entre las ventajas del HAC y las que aporta el refuerzo con las fibras, da lugar a un material de altas prestaciones, el HACRF, que ya ha sido aplicado exitosamente.

El HACRF ofrece particulares ventajas para la realización de reparaciones y refuerzos. En HACRF aparecen efectos particulares en cuanto a orientación del refuerzo que deben ser considerados para un mejor aprovechamiento de este material.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento a D. Alfonso Cobo Escamilla, director del departamento de Tecnología de la Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, por el apoyo recibido.

REFERENCIAS

- Aimar Orbe, M. (2013). Tesis doctoral. Optimización del uso de hormigones autocompactantes con fibras de acero en aplicaciones convencionales de resistencias moderadas, 1-356.
- Cánovas, F. (1982). Informes de La Construcción, Hormigones reforzados con fibras de acero, 5-17.
- Cristina, P., & Salazar, M. (2010). Hormigones con Fibras de Acero Características Mecánicas Hormigones con Fibras de Acero, 1-81. Trabajo Fin de Máster.
- Cuenca Ascencio, E. (2013). Introducción sobre hormigón autocompactante (HAC) y hormigón reforzado con fibras (HRF), 2-35. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12318/1_Introduccion_HAC_HRF_.pdf.
- MACCAFERRI (2007). Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo del Hormigón. Manual Técnico, 2007, 3-239. http://www.aprocons.org.py/doc/pavimento/manual_fibras.pdf
- Zerbino, R. (2012). Congreso Brasileiro Do Concreto, Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras, 1-27. http://www.ibracon.org.br/eventos/54CBC/I_SILAMCAA/HACRF_Zerbino_SILAMCAA.pdf.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.