

HORMIGONES REFORZADOS CON MACROFIBRAS SINTÉTICAS PARA LA EJECUCIÓN DE PISOS Y PAVIMENTOS INDUSTRIALES

M. G. Altamirano Profesor Titular UTN Regional Pacheco - Director de Obras de Bautec S.A.

R. Pombo Asesor en pisos industriales; pavimentos y tecnología del hormigón. Bautec S.A.

G. Giaccio Investigador CIC. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP.

R. Zerbino Investigador CONICET. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP. LEMIT-CICPBA, Av. 52 e/121 y 122. La Plata, Bs As, estudiosespeciales@lemit.gov.ar

Resumen

El Hormigón Reforzado con Fibras es un material de alto desempeño; la incorporación de fibras incrementa la capacidad de transferencia de cargas y controla la fisuración generando mayor durabilidad. Es un material especialmente ventajoso para construir estructuras hiperestáticas como pisos industriales y pavimentos. En estos casos las fibras permiten mayores espaciamientos entre juntas que los habituales en hormigones simples o reforzados con barras de acero y a la vez aprovechar su resistencia residual a la flexión para optimizar el cálculo estructural de las losas. Este trabajo muestra en primer lugar resultados de estudios de laboratorio donde se evaluó la performance de tres macrofibras sintéticas diferentes incorporadas en dosis variables sobre los que se determinaron los parámetros residuales en flexión. Luego, y en base a experiencias de obra, se analizan aspectos vinculados a la ejecución y comportamiento en servicio de pisos ejecutados en los últimos años, como la incorporación de macrofibras a la mezcla, la colocación y trabajabilidad del hormigón o detalles de terminación, entre otros. Finalmente se discute acerca de los espaciamientos entre juntas, sus efectos sobre la generación de fisuras y el alabeo, el cálculo estructural y la calidad del piso terminado.

Palabras Clave: Hormigón reforzado con fibras, macrofibras sintéticas, pisos industriales, contracción, espaciamiento entre juntas, fisuras, alabeo.

Abstract

Fiber Reinforced Concrete is a high performance material; as fibers are incorporated the load carrying capacity, as well as the crack control are improved; leading to a greater durability of the structures. Fiber concretes have special advantages for building redundant structures as pavements and industrial floor. In these cases, joint spacing greater than those usually adopted for plain or reinforced with conventional bars can be used; in addition, the fiber concrete residual bending capacity enables the optimization of the slabs structural design. This paper shows the laboratory studies developed to evaluate the mechanical performance of different dosages of three macrosynthetic fibers. Then, and based on field experiences, several aspects related with the construction and evaluation of the service behaviour of many floors built during the last years are presented, as the procedures for incorporation macrofibres in concrete, placement and workability, finishability, among others. Finally, a discussion on the joint spacing, and its effects on crack development, warping, structural design and quality of the finished floor is performed.

Keywords: ASR, degree of microcracking, concrete prisms, IRAM 1700-97 standard

Introducción

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es un material de alto desempeño, donde las fibras controlan la propagación, el espesor y el espaciamiento de fisuras, lo que permite la transferencia de cargas en estado fisurado y mejora el comportamiento en estado límite de servicio. Estas propiedades hacen que el HRF sea especialmente ventajoso para construir estructuras hiperestáticas como las losas sobre el suelo; pisos industriales y pavimentos que constituyen típicos ejemplos de aplicación. En estos casos, las fibras también permiten aumentar el espaciamiento de juntas e incluso reducir total o parcialmente la armadura convencional; no sólo se producen ahorros en los tiempos constructivos sino que la resistencia postfisuración del HRF incrementa la capacidad de carga total de la estructura. Además las fibras son particularmente efectivas para dar estabilidad a la mezcla fresca, reducir la fisuración plástica y térmica; se ha observado que las fibras pueden disminuir la sedimentación y la exudación del hormigón, modificando el proceso de secado, conduciendo a una menor contracción. El uso de HRF en pisos resulta altamente competitivo en caso de grandes cargas y/o suelos de pobre calidad.

En las últimas décadas se han desarrollado en el mundo muchas macrofibras sintéticas aptas para la construcción de pisos industriales, aeropuertos y rutas que compiten con las tradicionales fibras de acero; asimismo las fibras sintéticas poseen como campo de aplicación la realización de refuerzos tipo whitetopping [1-7]. Ante las numerosas fibras poliméricas disponibles el análisis de criterios de selección representa una cuestión determinante.

El HRF y el espaciamiento entre juntas

Las juntas que separan las losas de hormigón sobre suelo tienen como objetivo controlar las fisuras que se generan como consecuencia de la contracción por secado; el espaciamiento entre juntas se relaciona directamente con la contracción potencial del hormigón y cuanto mayor sea ésta, menor debe ser el espaciamiento. En hormigón simple, según la Portland Cement Association [8], los máximos espaciamientos entre juntas recomendados para reducir el riesgo de generación de fisuras varían en función del tamaño máximo de agregado (ver Tabla 1) y se basan en resultados estadísticos.

Dado que un espesor típico para losas de hormigón en pisos industriales es de 150 mm y que se suelen emplear agregados de tamaño máximo superior a 19 mm, el espaciamiento máximo recomendado es de 4,5 m.

Espesor de la losa (mm)	Tamaño máximo de agregado	
	< 19 mm	> 19 mm
125	3,00	3,75
150	3,75	4,50
175	4,25	5,25
200	5,00	6,00
225	5,50	6,75
250	6,00	7,50

Tabla 1: Espaciamiento máximo de juntas de contracción para hormigón simple (metros).

Si se considera el uso de barras de acero como refuerzo, cuando la cuantía es igual o menor a 0,1%, el espaciamiento entre juntas debe ser el mismo que para una losa sin refuerzo [9]. El típico refuerzo de acero (mallas electrosoldadas) no puede evitar la generación de fisuras, dado que las barras permanecen inactivas hasta que se origina la fisura, y recién entonces comienzan a transferir esfuerzos; no obstante dispuestas en la cantidad y ubicación adecuadas, permiten mantener cerradas las fisuras [10]. La experiencia señala que para aumentar el espaciamiento entre juntas por encima de 6 m es necesario aumentar apreciablemente el refuerzo de barras de acero. La Figura 1 [10] muestra la variación del porcentaje de refuerzo de barras convencionales en función del espaciamiento entre juntas; la línea de puntos responde a la experiencia estadística y la línea recta responde a la ecuación [1] que se refiere al arrastre sobre la base

$$(A_a/A_h)100 = W \mu L / 200 \sigma_a \quad (1)$$

donde A_a es la sección total de las barras (cm^2), A_h la sección de la losa (cm^2), W el peso unitario del hormigón (kg/m^3), μ el coeficiente de fricción de la base, L el espaciamiento entre juntas (m) y σ_a la tensión admisible del acero (kg/cm^2) [11].

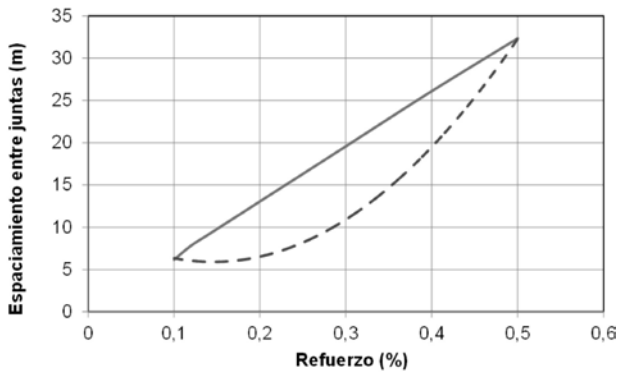


Figura 1. Variación del espaciamiento entre juntas con el porcentaje de refuerzo realizado con armaduras convencionales. Línea continua: ecuación (1), línea punteada: experiencia de obra [10].

Existen varias hipótesis acerca de cómo y por qué un alto volumen de macrofibras sintéticas tiene la capacidad de reducir la contracción y el alabeo en las losas sobre suelo. El alabeo es consecuencia de la mayor y más rápida contracción que se produce en la superficie expuesta de las losas con respecto a la cara apoyada sobre el suelo. Este fenómeno es la causa principal de las fallas en las juntas de los pisos industriales de hormigón, sin duda, el problema más importante de estas construcciones. Como la incorporación de macrofibras sintéticas suele reducir la segregación y la exudación del hormigón fresco, que en mayor o menor medida tiene lugar en todas las losas, el proceso de secado resulta más homogéneo en todo el espesor de la losa disminuyendo el alabeo.

La presencia de múltiples fibras en la sección transversal de las losas parece absorber o redistribuir las tensiones internas causadas por los cambios dimensionales del hormigón tanto en el estado plástico o endurecido. La consecuencia es que las macrofibras sintéticas modifican los efectos del proceso de contracción del hormigón de las losas sobre suelo, y la experiencia indica que permiten aumentar el espaciamiento entre juntas. Al mismo tiempo, como se verificará en los resultados que se presentarán a continuación, la incorporación de fibras otorga al hormigón lo que se denomina capacidad residual postfisuración, esto es, el material conserva capacidad resistente aún en estado fisurado con el consecuente aumento en la tenacidad. Dicho aumento de la tenacidad depende del material de las fibras, de su geometría,

longitud y adherencia [12]. Este comportamiento se aprovecha en el cálculo estructural de las losas sobre suelo porque la capacidad de carga de las losas de HRF en su conjunto aumenta al transmitir esfuerzos aunque existen fisuras (controladas) en la parte inferior [2].

Respecto al aprovechamiento en el cálculo estructural de la resistencia residual, cabe comentar que en la actualidad es tema de discusión el comportamiento de HRF en estado fisurado bajo cargas permanentes, en particular en el caso de las macrofibras sintéticas [13-15]. No obstante, el hecho de que se controlen las fisuras y transfieran esfuerzos (aunque fueran pequeños) a través de las mismas da lugar a notables mejoras en la performance de este tipo de estructuras redundantes y la experiencia muestra excelentes respuestas de este tipo de fibras en el caso de los pisos y pavimentos.

Finalmente otro atributo importante del HRF es que, inclusive con pequeñas dosis de fibras, se verifica una mejora de la resistencia a la fatiga comparada con el hormigón simple [12]. En muchas aplicaciones, particularmente en pavimentos, carpetas de rodamientos sobre puentes, pisos industriales, estructuras offshore, etc, la resistencia a la fatiga es un parámetro de diseño importante, porque estos elementos estructurales están sometidos a la fatiga de ciclos de carga.

Este trabajo sintetiza en primer lugar los resultados de un extenso estudio experimental destinado a seleccionar el tipo y dosis de macrofibras sintéticas para la construcción de pisos industriales; comprende diferentes macrofibras y en algunos casos mezclas que incorporan aditivo expansor. En la segunda parte se muestra la experiencia de obra relacionada con la ejecución de pisos y pavimentos, incluyendo aspectos como preparación y trabajabilidad del hormigón, geometría de las losas, seguridad de ejecución, descripción de las obras realizadas y criterios de cálculo estructural.

**Experiencias en laboratorio
Materiales y mezclas**

El programa experimental comprendió varios grupos de hormigones elaborados con tres

macrofibras sintéticas denominadas A, B y C. La formulación del hormigón de base sin fibras (S) fue similar en todos los casos y responde a la habitualmente utilizada para ejecutar pavimentos con fibras sintéticas. Con cada fibra se realizaron ensayos de resistencia a compresión y de resistencia y capacidad residual a flexión (ASTM C1609).

La Tabla 2 sintetiza la identificación adoptada para cada mezcla (tipo de fibra y dosis) así como las propiedades en estado fresco. Se realizaron HRF que incorporan 1, 2, 3, 4 y 5,5 kg/m³ de macrofibras A y B a los que se suman algunas mezclas que incorporan un aditivo expansor (se identifican con la letra “E”). Posteriormente se elaboraron pastones con 2, 4 y 6 kg/m³ con la fibra C. A la vez se realizaron pastones sin fibras como referencia.

El hormigón de base fue elaborado con 320 kg/m³ de cemento portland CPF 40, 680 kg/m³ de arena silíceo natural, 120 kg/m³ de arena de trituración y 1130 kg/m³ de piedra partida de 19 mm de tamaño máximo. En todos los hormigones se emplearon como aditivos una dosis fija (0,6 % en peso de cemento) de plastificante y una dosis de superfluidificante que fue ajustada para lograr el asentamiento deseado. En los casos en que se utilizó aditivo expansor, se lo incorporó a razón de 15 kg/m³.

Cabe comentar que considerando que la contracción por secado representa un punto crítico en el tipo de estructuras en cuestión, también se realizaron sobre las mezclas ensayos de contracción libre (ASTM C157) y de contracción restringida (ASTM C878) no incluidos en este trabajo y que han sido informados previamente [16].

Hormigón	Fibra	(kg/m ³)	Asentamiento (mm)	Aire (%)
S	-	0	120	3,5
A1	A	1	90	
A2		2	90	4,0
A3		3	100	
A4		4	85	
A5,5		5,5	95	
A1E	A	1	90	
A3E		3	110	4,5
B1	B	1	80	3,5
B2		2	80	3,5
B3		3	110	
B4		4	80	
B5,5		5,5	100	
SE	-	0	80	3,0
B1E	B	1	80	
B3E		3	100	4,0
B5,5E		5,5	70	
S	-	0	110	3,2
C2	C	2	50	3,2
C4		4	50	
C6			20	

Tabla 2: Hormigones elaborados y propiedades en estado fresco.

En concordancia con experiencias previas se verificó que la dosis de macrofibras no tiene mayor incidencia en la contracción libre medida en ensayos normalizados y que el uso de aditivo expansor modifica la contracción y provoca cambios en las pérdidas de peso durante el secado lo que se atribuye a que el aditivo consume agua. A la vez los ensayos comparativos de contracción restringida mostraron que las fibras no restringen la expansión como lo hace la barra de acero. Pero esto no significa, como fuera expuesto en el apartado anterior, que las fibras no tengan un efecto positivo sobre la distribución de esfuerzos y respuesta general de las losas sobre el piso, evitando alabeos y permitiendo mayor espaciamiento de juntas.

Métodos de ensayo

En cada caso se moldearon 3 o 4 cilindros de 100x200 mm para evaluar la resistencia a compresión y 3 prismas de 150x150x600 mm para evaluar la resistencia y capacidad residual en flexión según la norma ASTM C1609 [17]. En este último caso se utilizó un sistema INSTRON con control por lazo cerrado a partir de la señal de dos LVDT que registran la flecha, ubicados al centro de sendos marcos de carga fijos a ambos lados del prisma en coincidencia con los apoyos a mitad de altura, uno con posibilidad de rotar y otro que también permite movimiento lateral.

La luz entre apoyos fue 450 mm y se registraron las curvas carga – flecha hasta una flecha de 3 mm. Como resultados se calcularon el módulo de rotura para la carga máxima (f_{max}), las resistencias residuales para flechas de L/600 y L/150 (f_{600} , f_{150}) y la resistencia equivalente (R_{e3}), a partir del área bajo la curva hasta una flecha de 3 mm.

Las probetas se curaron en cámara húmeda hasta los 28 días, edad a la que se realizaron todos los ensayos.

Resultados

La Figura 2 muestra curvas típicas tensión – flecha obtenidas en los ensayos de flexión para los HRF con las fibras A y B; se aprecia con claridad cómo el uso de contenidos de fibras crecientes incrementa la capacidad residual. La Figura 3 hace lo propio para las mezclas que incorporan aditivo expansor, en este caso se representa la curva correspondiente al hormigón sin fibras (S) como referencia. Se aprecia que la inclusión del aditivo expansor no genera mayores cambios en la respuesta mecánica en flexión. Finalmente la Figura 4 corresponde a los HRF que incorporan la macrofibra C. Como era de esperar pueden existir diferencias sustantivas en la capacidad residual que aporta una dada dosis de refuerzo conforme el tipo de macrofibras empleado.

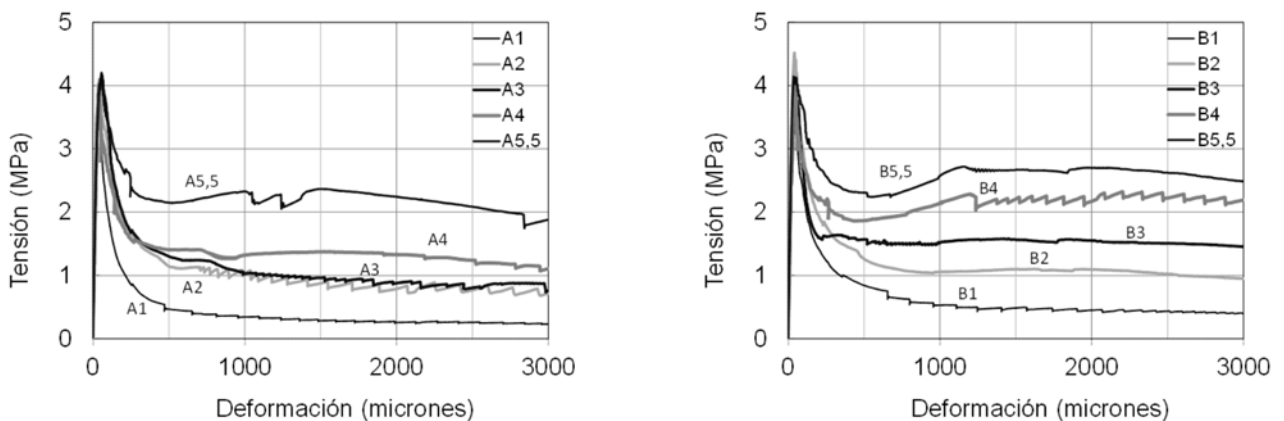


Figura 2. Respuesta típica tensión - flecha en flexión (ASTM C 1609) en hormigones con macrofibras A y B, sin aditivo expansor.

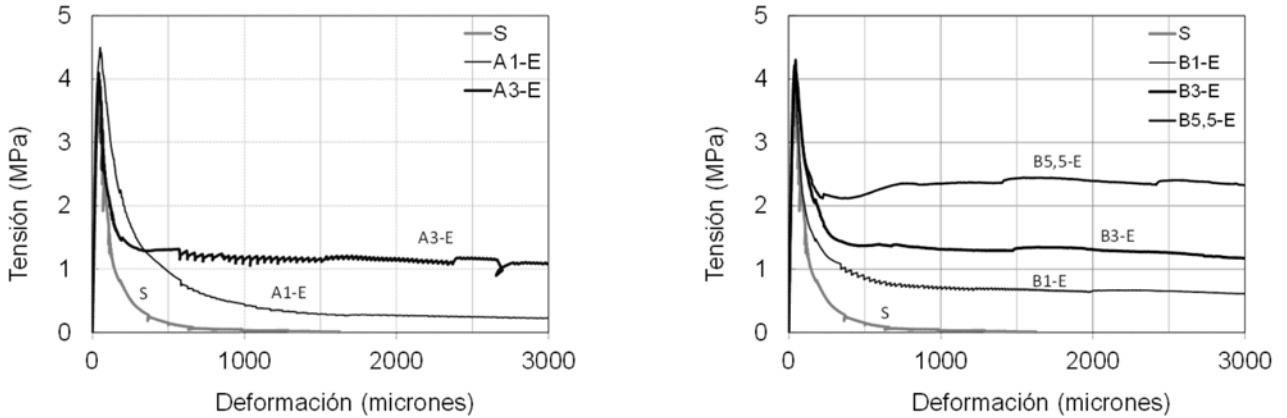


Figura 3. Respuesta típica tensión - flecha en flexión (ASTM C 1609) en hormigones con macrofibras A y B, con aditivo expansor.

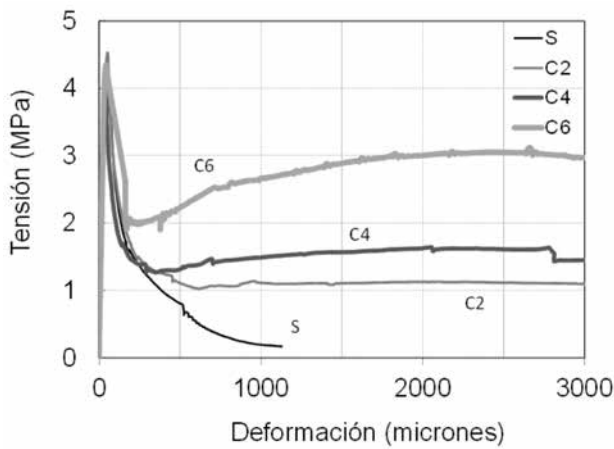


Figura 4. Respuesta típica tensión - flecha en flexión (ASTM C 1609) en hormigones con contenidos crecientes de macrofibra C.

La Tabla 3 sintetiza los resultados de los ensayos de compresión y flexión; todos corresponden al promedio de tres valores. Se informan la resistencia a compresión (f'_c), el módulo de rotura obtenido a partir de la carga máxima (f_{max}), las resistencias residuales (f_{600} , f_{150}) y la resistencia equivalente (R_{e3}) expresadas en valor absoluto y como porcentaje de f_{max} .

La Figura 5 representa la variación de las propiedades residuales en flexión en función del contenido de fibra. Cabe indicar que al momento de seleccionar una mezcla no sólo interesan las propiedades mecánicas sino las posibilidades de elaboración que dependen de la dosis y tipo de fibras, de los materiales componentes y proporciones del hormigón de base (principalmente el contenido de agregado grueso) y del equipamiento elegido para el mezclado, transporte y colocación. En este caso se observa que la fibra B muestra una performance ligeramente superior seguida por la fibra C. A lo dicho se suma el hecho de que, si bien en laboratorio todas las mezclas tenían asentamientos del mismo orden, en experiencias en obra se encontró que las dosis límite para las cuales no existen dificultades en cuanto a la elaboración y trabajabilidad en general de las mezclas eran iguales a 4, 5,5 y 5 kg/m³ para las fibras A, B y C, respectivamente.

En relación a la incorporación de aditivo expansor, los resultados confirman que el uso del mismo no incide prácticamente en la respuesta en flexión y en la capacidad residual que introducen las fibras en el hormigón.

Hormigón	Fibras	f'_c	f_{max}	f_{600}	f_{150}	f_{600}/f_{max}	f_{150}/f_{max}	f_{e3}	R_{e3}/f_{max}
	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)	(%)
SE	0	36,9	3,9	0,2	0,1	4	1	0,2	6
A1	1	33,4	4,1	0,4	0,3	11	8	0,6	15
A2	2	33,5	4,3	1,0	0,8	23	18	1,1	25
A3	3	36,2	4,1	1,1	0,8	26	20	1,1	27
A4	4	30,8	4,1	1,2	1,1	29	28	1,4	34
A5,5	5,5	32,8	4,1	1,9	1,7	47	42	1,9	47
A1E	1	36,3	4,4	0,6	0,3	13	7	0,6	14
A3E	3	34,5	4,3	1,2	1,0	27	23	1,2	29
B1	1	34,4	3,7	0,6	0,5	17	12	0,7	19
B2	2	37,1	4,4	1,3	1,1	30	26	1,4	33
B3	3	34,9	3,9	1,5	1,3	38	33	1,5	39
B4	4	34,7	4,3	2,1	2,0	50	47	2,2	51
B5,5	5,5	35,0	4,3	2,6	2,4	59	56	2,7	62
B1E	1	31,8	4,2	0,7	0,5	17	13	0,8	19
B3E	3	29,9	4,3	1,2	1,1	28	26	1,4	31
B5,5E	5,5	34,4	4,2	2,5	2,3	59	55	2,4	58
S	0	37,5	4,4	---	---	---	---	---	---
C2	2	41,6	4,3	1,1	1,2	26,3	28,9	1,3	31
C4	4	39,3	4,3	1,3	1,5	31,2	34,6	1,6	38
C6	6	40,5	4,2	2,5	2,7	59,7	64,3	2,6	62

Tabla 3: Propiedades mecánicas de los hormigones.

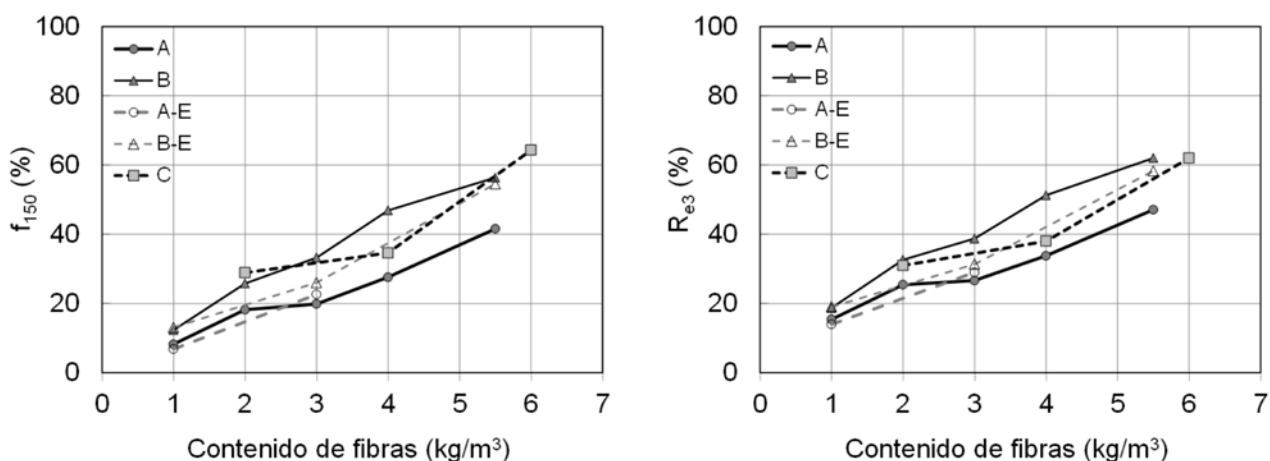


Figura 5. Variación de las propiedades residuales en flexión con el contenido de fibra.

Ejecución de pisos y pavimentos con HRF

En este apartado se tratan diferentes aspectos que surgen a partir de la experiencia acumulada en la construcción de pisos y pavimentos reforzados con fibras.

En cuanto a la preparación del hormigón se conoce que la incorporación de fibras modifica algunas de las propiedades del hormigón en el estado fresco, en particular provoca una disminución del asentamiento.

Una precaución es que las fibras pueden tender a aglomerarse durante el proceso de mezclado; esto depende del material de las fibras, de su geometría, longitud y dosis así como del tamaño de agregado grueso empleado en el hormigón. Esta segregación en forma de grumos o “erizos” genera sectores de hormigón no consolidado que causan el mismo efecto que un vacío en el hormigón endurecido (nido de abejas).

Como estos grumos, por su tamaño, son fácilmente perceptibles durante el volcado del hormigón, se los puede separar. La eventual modificación de la dosis de fibras en el hormigón como consecuencia de la separación de los grumos es despreciable y se acepta que la variación es menor al 10 % en la dosis de fibras.

Sin embargo estos “erizos” son por supuesto no deseables; el empleo de procedimientos adecuados de incorporación de las fibras es la mejor manera de evitar este tipo de segregación favoreciendo la distribución uniforme de las fibras en el seno del hormigón. Por ello se recomienda: a) incorporar las fibras al mezclador de la manera más uniforme posible durante el proceso de carga en la planta elaboradora del hormigón; b) antes de incorporar las fibras, desagregar eventuales grumos formados en el envase y c) incorporar las fibras a mezclas de consistencia plástica o fluida.

En lo que se refiere a la trabajabilidad, el asentamiento adecuado para distribuir el hormigón sobre el suelo depende de la técnica de ejecución del piso. Hay que tener en cuenta que el HRF es tixotrópico, esto es el material disminuye su viscosidad en el tiempo con la aplicación de energía; por lo tanto cuando se enrasa se percibe

más “blando” que un hormigón sin fibras con el mismo asentamiento. El asentamiento deseado se obtiene en obra utilizando un superplastificante. Las operaciones de ejecución de los pisos y pavimentos con hormigones con macrofibras sintéticas se pueden llevar a cabo de la misma manera que en los hormigones simples, tanto en lo que se refiere al volcado, el enrasado, la eventual incorporación en la superficie de una capa de desgaste y los procesos de terminación. En la superficie del piso o pavimento terminado suelen verse algunas fibras sobresalientes.

En lo relativo a la geometría de las losas, se destaca que las macrofibras permiten reducir los efectos de la contracción brindando mayor seguridad de control de la generación de fisuras en losas de geometría irregular; situación habitual en la mayoría de los pavimentos. También, de ser necesario, resulta más segura la ejecución de losas de espesores variables. Cabe notar que es posible diseñar losas con relación de lados muy extendida, mayor que la generalmente recomendada que es 1,5.

Finalmente en cuanto a la seguridad de ejecución, el uso de macrofibras que se suelen incorporar al hormigón en la planta de hormigón elaborado, brinda una garantía mucho mayor a la calidad de ejecución de los pisos y pavimentos, puesto que a) las barras o mallas de acero deben posicionarse correctamente para que cumplan adecuadamente su función y a pesar de los cuidados, esta tarea a menudo falla y b) es difícil recortar las mallas de acero electrosoldadas con cierta precisión en el caso de losas irregulares. Estos problemas desaparecen cuando se opta por incorporar macrofibras.

Ejemplos de obras

En este apartado se comentan varias obras realizadas entre 2011 y 2017 con cuatro macrofibras sintéticas diferentes; las características de las fibras se muestran en la Tabla 4, mientras que la Tabla 5 reseña las principales características de las obras. El objetivo principal del uso de macrofibras sintéticas fue lograr espaciamientos entre juntas mayores que los habitualmente adoptados cuando se utilizan mallas de acero. Entre dichas obras el 66 % correspondió a pisos interiores y el 24 % a pavimentos.

Macrofibra	1	2	3	4
Origen	Italia	Inglaterra	Argentina	Argentina
Largo (mm)	39	50	50	50
Diámetro (mm)	0,78	1,10	1,11	0,60
Material	Copolímeros de polipropileno			
Forma	Monofilamento sinusoidal (rizado)			
Resistencia a la tracción (MPa)	700	380	450	450
Módulo de elasticidad (MPa)	2100	2740	8170	8170

Tabla 4: Características de las macrofibras sintéticas empleadas en obra.

Fibra	Año	Obras	tipo	Losa típica (m)	
1	2011	Galpón de Bautec	Piso interior	10,00 x 10,00 x 0,15	
1	2011	Chetta Automotores		8,09 x 6,10 x 0,15	
1	2011	Chetta Automotores	Whitetopping	Espesor 0,05	
2	2012	Galpón Pagano SA, Carlos Casares		Piso interior	
2	2012	Galpón Nicieza SA, Chivilcoy	Piso interior	10,00 x 10,00 x 0,15	
3	2012	Galpón Nicieza SA, Chivilcoy		Piso interior	
3	2012	CD Quilmes		8,50 x 8,35 x 0,18	
3	2012	Plaza Logística		9,48 x 10,14 x 0,15	
3	2012	Chango Más Córdoba		8,52 x 7,54 x 0,12	
3	2013	Cruz del Sur		9,70 x 11,00 x 0,15	
3	2013	Chango Más Saenz Peña, Chaco		8,17 x 7,87 x 0,12	
3	2013	Iron Mountain		11,08 x 11,70 x 0,25	
3	2013	South State		8,05 x 7,55 x 0,15	
3	2013	Mecanizados Churruca		9,70 x 8,30 x 0,15	
3	2013	Chango Más San Pedro, Jujuy		6,00 x 6,30 x 0,12	
3	2013	Kel (sobre hormigón existente)		6,35 x 5,00 x 0,125	
3	2013	Barbieri		10,00 x 10,00 x 0,18	
3	2013	Guedekian (sobre hormigón existente)		6,14 x 5,00 x 0,10	
3	2013	Ferrum		7,26 x 8,13 x 0,15	
3	2014	PIU (sobre hormigón)		5,62 x 7,08 x 0,12	
3	2014	Schneider (*) (e: espesor variable)		8,05 x 7,04 x e	
3	2013	Bilseil		Pavimento	8,62 x 7,64 x 0,18
3	2013	Club Deportivo Moron			7,13 x 6,75 x 0,15
3	2014	CBN Group Zara			7,40 x 6,80 x 0,15
3	2014	Fedsan	7,20 x 7,15 x 0,18		
3	2014	Coto Mar del Tuyú	8,06 x 7,88 x 0,15		
3	2014	Dana Brasil	7,03 x 6,65 x 0,15		

Tabla 5: Reseña de las principales obras ejecutadas con HRFS.

Hormigones reforzados con macrofibras sintéticas para la ejecución de pisos y pavimentos industriales

Fibra	Año	Obras	tipo	Losa típica (m)
4	2014	Santuario San Nicolás	Piso interior	3,27 x 3,35 x 0,05
4	2015	Coto Morón (s/ losas premoldeadas)		10,00 x 8,00 x 0,07
4	2015	Proagro		8,00 x 6,29 x 0,15
4	2015	CTC (sobre base pobre)		6,71 x 6,73 x 0,15
4	2015	Giácomo La Virginia		5,64 x 4,85 x 0,15
4	2015	Andreani		7,89 x 8,97 x 0,15
4	2015	Molinos Esteban Echeverría		9,00 x 9,00 x 0,18
4	2016	CALSA		10,00 x 7,80 x 0,15
4	2016	FV		8,60 x 8,00 x 0,15
4	2016	Chango Más Morón		8,80 x 8,60 x 0,13
4	2016	Coto Monroe		9,30 x 6,90 x 0,13
4	2017	Samsung		10,00 x 10,00 x 0,15
4	2017	Claro		10,20 x 10,50 x 0,15
4	2014	Dana Brasil		Pavimento
4	2015	CD Día Paraná	7,50 x 6,50 x 0,18	
4	2015	Nivolet	8,50 x 8,00 x 0,18	
4	2015	CBN Group II	6,46 x 5,13 x 0,15	
4	2015	Ribeiro	6,90 x 6,80 x 0,18	
4	2015	Molinos Esteban Echeverría	8,00 x 6,50 x 0,15	
4	2015	CTC (120 tn de fibras)	6,80 x 7,00 x 0,20	
4	2016	CALSA	8,00 x 7,00 x 0,15	
4	2016	Chango Más Morón	8,30 x 7,10 x 0,15	
4	2016	Clamar	7,50 x 6,90 x 0,15	
4	2016	EPTA	7,40 x 7,05 x 0,15	
4	2016	Cervecería Quilmes	5,60 x 4,60 x 0,15	
4	2016	CBN Group II	7,70 x 7,15 x 0,15	
4	2017	Samsung	7,70 x 7,00 x 0,15	
4	2017	Claro	8,30 x 7,50 x 0,15	
4	2017	YPF Autopista BsAs- La Plata	7,00 x 6,00 x 0,16	
4	2017	YPF Autopista BsAs a La Plata	Whitetopping	Espesor 0,05

Tabla 5: (continuación). Reseña de las principales obras ejecutadas con HRFS

Entre los resultados más importantes resaltan el logro de espaciamientos entre juntas de 10x10 m en pisos interiores para losas de entre 0,12 y 0,18 m de espesor. En el caso de los pavimentos exteriores, donde las condiciones ambientales tienen una influencia mayor en los efectos de retracción, se han logrado espaciamientos de

8 x 8 m para losas de entre 0,15 m y 0,18 m de espesor. Los efectos de alabeo fueron menores que los habituales en losas con refuerzos de acero y la aparición de fisuras fue mucho menor, en especial en las losas de geometría irregular. En la Figura 6 se muestran algunas de las obras realizadas.



Centro de transferencia de cargas (CTC) – Villa Soldati – CABA. 112 módulos de 990 m² cada uno, distribuidos en 4 naves y conectados por 110000 m² de pavimento. Fueron construidos sobre el antiguo basural de la Ciudad de Buenos Aires. Ejemplo del uso de los HRF para fundar pavimentos sobre suelos pobres.



Plaza logística Pilar. 48000 m² de galpones para el depósito de aerosoles más grande de Latinoamérica. Piso diseñado en paños de 10 m x 10 m. Reducción de más del 50 % de metros lineales de juntas.

Centro de distribución de Día en Paraná. 20000 m² de pavimento en paños de 7,50 m x 6,50 m. Las macrofibras sintéticas facilitan la formulación de HRF empleando rodados triturados de la zona.

Figura 6. Ejemplos de pisos realizados con incorporación de macrofibras sintéticas.

Otro aspecto a destacar es el aprovechamiento de la resistencia residual post fisuración en el cálculo estructural. En la obra del Centro de Transferencia de Cargas de CABA, construido sobre el antiguo depósito de basura de la ciudad, se ejecutaron 115000 m² de pavimento, utilizando HRF sintéticas y se pudo disminuir el espesor de las losas. En base a los ensayos de laboratorio antes presentados se estimó una resistencia equivalente (R_{e3}) de 33 %. El uso de HRF incrementa la capacidad resistente efectiva de las losas sobre piso gracias a la capacidad de transferencia de carga aportada por las fibras; en este sentido se puede calcular un módulo de rotura a la flexión equivalente (MOR') [18] como:

$$MOR' = MOR (1 + R_{e3}/100) \quad (2)$$

$$h^2/h'^2 = MOR'/MOR \quad (3)$$

donde MOR es el Módulo de rotura del hormigón simple, h el espesor de la losa para el MOR y h' el espesor de la losa para el MOR'. En base a esto, el espesor originalmente calculado para hormigón sin fibras de 0,23 m se pudo reducir a 0,20 m en el caso de HRF.

El aprovechamiento de las propiedades mecánicas en el cálculo estructural requiere un análisis cuidadoso de cada caso, puesto que todavía no hay estudios concluyentes del comportamiento de las macrofibras sintéticas cuando el HRF está sometido a cargas permanentes en el tiempo.

Las fibras de polipropileno utilizadas en estos trabajos no fueron capaces de restringir la expansión de los hormigones de retracción compensada [16]. Sin embargo se están llevando a cabo estudios y ensayos en obra con hormigones formulados con la combinación de macrofibras sintéticas y aditivo expansor, con el fin de ejecutar losas de grandes dimensiones (20 m x 20 m). El objetivo es aprovechar la disminución de los efectos de la contracción por secado que generan las fibras en las losas sobre suelo, en combinación con la precompresión del hormigón que puede generar la expansión.

Conclusiones

Los estudios en laboratorio confirman que:

- La capacidad residual que provoca una misma

dosis de refuerzo no es independiente de la fibra seleccionada; las diferencias parecen crecer a mayores contenidos de fibras.

- El uso de aditivo expansor no afecta las propiedades mecánicas y en particular la capacidad residual del HRF.

Por su parte las experiencias en obra señalan que la ejecución de pisos y pavimentos con hormigones que incorporan macrofibras sintéticas ofrece las siguientes ventajas:

- Permite ampliar considerablemente los espaciamientos entre juntas respecto a hormigones simples o reforzados con barras de acero: típicamente de 6 m a 10 m en el caso de pisos interiores y de 5 m a 8 m en pavimentos exteriores.
- Disminuye los efectos de alabeo y el riesgo de aparición de fisuras.
- Controla de manera más eficiente la generación de fisuras en las losas de geometría irregular, incluyendo aquellas de espesores variables y de una relación de lados mayor que 1,5.
- Las macrofibras sintéticas uniformemente incorporadas al hormigón en la planta, brindan una garantía mucho mayor en la calidad de ejecución, eliminando el riesgo de un incorrecto posicionamiento y recorte de las barras de acero.
- En varios casos, se puede aprovechar en el cálculo estructural de las losas sobre suelo la mayor capacidad de carga de los hormigones con macrofibras sintéticas.

Cabe destacar que la incorporación de fibras en hormigones posee un impacto práctico en la ejecución de pisos y pavimentos, que involucra tanto aspectos tecnológicos como económicos; el uso de HRF no sólo permite asegurar mayor vida en servicio sino que, por ejemplo, hizo posible la realización de este tipo de obras en casos donde los agregados disponibles o las características de los suelo condicionaban su factibilidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Anabela Gerez y Pablo Bossio durante la realización de los trabajos experimentales en LEMIT-CIC.

Referencias

- 1.- Concrete Society "Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced Concrete", A cement and concrete industry publication, Technical Report N°65 (2007).
- 2.- TR 34-2003: "Concrete Industrial Ground Floors: A Guide to Design and Construction", The Concrete Society, England (2003).
- 3.- Federal Highway Administration, "Design and Concrete Material Requirements for Ultra-Thin Whitetopping", Publication N° FHWA-ICT-08-016, USA (2008).
- 4.- American Concrete Pavement Association, "Whitetopping, State of the Practice", Engineering Bulletin EB210.02P, USA (1998).
- 5.- Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program, "Thin and Ultra-Thin Whitetopping. A Synthesis of Highway Practice", NCHRP Synthesis 338, Washington, D.C. (2004).
- 6.- ACI Committee 325, "Concrete Overlays for Pavement Rehabilitation", Report ACI 325.13R-06, USA, (2006).
- 7.- Miguez Passada, D., González, A., Violini, D., Pappalardi, M. y Zerbino, R. "Desarrollo e Implementación de un Hormigón Reforzado Con Fibras Sintéticas para la Repavimentación de la Ruta 24 de Uruguay". En V Congreso Internacional; 19 Reunión Técnica AATH, Bahía Blanca, pp. 311-318 (2012).
- 8.- Pórtland Cement Association, "Concrete Floors on Ground", Fourth edition (2008).
- 9.- Walker W. and Holland J, "Reinforcement for slabs on ground", Concrete Construction, Floors p 20, (2007).
- 10.- Holland J, "Proper Use of Slab Reinforcement Systems: Avoiding Myths & Misconceptions", World of Concrete, (2013).
- 11.- Boyd R., "Designing Floors Slabs-on-Grade", Hanley Wood Inc, (1992)
- 12.- ACI Committee 544, "Report on Fiber Reinforced Concrete", ACI 544.1R-96 (Reapproved 2002)
- 13.- Zerbino, R., Monetti, D.H., & Giaccio, G. "Creep behaviour of Cracked Steel and Macrosynthetic Fibre Reinforced Concrete". Materials and Structures 49 8 (2016) pp. 3397–3410.
- 14.- Serna Ros, P., Martí-Vargas, J.R., Bossio, M.E., Zerbino, R. "Creep and Residual Properties of Cracked Macro-synthetic Fibre Reinforced Concretes". Magazine of Concrete Research 68 4, (2016), pp. 197-207.
- 15.- Bernard, E.S. "Influence of Fiber Type on creep Deformation Of Cracked Fiber-reinforced Shotcrete Panels". ACI Materials Journal, 107 5, (2010), pp. 474-480.
- 16.- Zerbino, R., Giaccio, G., Pombo, R. "Estudio Experimental de la Respuesta Mecánica de Hormigones Reforzados con Macrofibras Sintéticas para Uso en Pisos Industriales", VII Congreso Internacional 21ª Jornada Técnica de la AATH, Salta, Argentina (2016).
- 17.- ASTM C 1609 / C 1609M-07. "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)", ASTM Standards, Vol.04.02 (2012).
- 18.- Altoubat S. et al; "Simplified Method for Concrete Pavement Design with Discrete Structural Fibers"; Elsevier Ltd, Construction and Building Materials 22 (2008).