

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE HORMIGONES REFORZADOS CON MACROFIBRAS SINTÉTICAS PARA USO EN PISOS INDUSTRIALES

Raúl Zerbino¹, Graciela Giaccio², Roberto Pombo³
LEMIT-CIC, 52 e/121 y 122, (1900) La Plata, Argentina. e-mail: zerbino@ing.unlp.edu.ar

Palabras clave: Hormigón reforzado con fibras, macrofibras sintéticas, pisos industriales.

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 dando lugar a una mayor durabilidad. Es un material especialmente ventajoso para construir estructuras hiperestáticas como pisos industriales y pavimentos, que constituyen típicos ejemplos de aplicación. En estos casos las fibras permiten reducir total o parcialmente la armadura convencional y aumentar el espaciamiento de juntas. Este trabajo muestra los resultados de un extenso estudio donde se evaluó la performance de dos macrofibras sintéticas diferentes incorporadas en dosis variables entre 1 y 5,5 kg/m³, sobre un mismo hormigón de base. Asimismo se analizaron hormigones similares que incorporan aditivo expansor. Para la caracterización se determinaron los parámetros residuales en flexión y la contracción por secado. En base a los resultados se discuten los criterios a considerar en la selección del tipo y contenido de fibras.

INTRODUCCION

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es un material de alto desempeño, donde las fibras controlan la propagación, el ancho y el espaciamiento de fisuras, incrementando la capacidad de transferencia de cargas en estado fisurado y mejorando el comportamiento en estado límite de servicio.

El HRF resulta especialmente ventajoso para la construcción de estructuras hiperestáticas como las losas sobre el suelo; los pisos industriales y pavimentos constituyen típicos ejemplos de aplicación. En estos casos, la incorporación de fibras 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 total de carga de la estructura. Además las fibras son particularmente efectivas para dar estabilidad a la

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

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

³ Asesor en pisos industriales; pavimentos y tecnología del hormigón. Bautec SA Beccar Argentina

mezcla fresca, reducir la fisuración plástica y térmica. El uso de HRF en pisos resulta altamente competitivo en caso de grandes cargas y/o suelos de pobre calidad.

Entre las opciones de fibras para este tipo de aplicaciones aparecen las macrofibras sintéticas que compiten con las tradicionales fibras de acero; existen muchos ejemplos de uso para la construcción de pisos industriales, aeropuertos y rutas; asimismo la incorporación de fibras sintéticas posee un campo muy importante en la realización de refuerzos tipo whitetopping (1-7). Cabe comentar que el refuerzo de hormigón proyectado constituye otro campo de aplicación relevante de las macrofibras sintéticas. En las últimas décadas se han desarrollado numerosas fibras poliméricas que representan potenciales alternativas para realizar HRF por lo que el análisis de los criterios de selección representa una cuestión determinante.

Este trabajo muestra los resultados de un extenso estudio experimental destinado a seleccionar el tipo y dosis de macrofibra sintética para la construcción de pisos industriales. Comprende hormigones con contenidos variables entre 1 y 5,5 kg/m³ de dos macrofibras sintéticas, algunos incorporan aditivo expansor y otros sin expansor. La amplitud de los contenidos de fibras adoptados permite analizar el desempeño de mezclas con baja y alta dosis de refuerzo.

EXPERIENCIAS

El programa experimental comprende dos grupos de hormigones elaborados con dos macrofibras sintéticas denominadas A y B. La formulación del hormigón de base sin fibras (S) responde a la habitualmente utilizada para ejecutar pavimentos con fibras sintéticas. Con cada fibra se realizaron ensayos de resistencia a compresión y a flexión (ASTM C1609), contracción restringida (ASTM C878) y contracción libre (ASTM C157).

La Tabla 1 sintetiza el programa de ensayos y la identificación adoptada para cada mezcla (tipo de fibra y dosis). El programa principal estudia HRF que incorporan 1, 2, 3, 4 o 5,5 kg/m³ de macrofibras y se complementa con mezclas donde se agrega al hormigón un aditivo expansor (se identifican con la letra "E"). En los hormigones sin fibras se midió la resistencia a compresión y en un caso se realizó el ensayo de flexión como referencia.

Tabla 1. Programa de ensayos.

Hormigón	Fibra	kg/m ³	Compresión	ASTM C1609	ASTM C157	ASTM C878
S	-	0	X		X	
A1	A	1	X	X	X	
A2		2	X	X		
A3		3	X	X	X	
A4		4	X	X		
A5,5		5,5	X	X	X	
B1	B	1	X	X	X	
B2		2	X	X		
B3		3	X	X	X	
B4		4	X	X		
B5,5		5,5	X	X	X	
SEa	-	0	X		X	
A1E	A	1	X	X	X	
A3E		3	X	X	X	
SEb	-	0	X		X	
B1E	B	1	X	X	X	

B3E		3	X	X	X	
SEc	-	0	X	X		X
B5,5E	B	5,5	X	X		X

Materiales y propiedades en estado fresco

El hormigón de base fue elaborado con 320 kg/m³ de cemento portland CPF 40, 680 kg/m³ de arena silíceas 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. Cuando se utilizó aditivo expansor, se lo incorporó a razón de 15 kg/m³. En cada caso se tomaron muestras del hormigón de base (sin fibras). La Tabla 2 presenta los resultados en estado fresco, asentamiento, temperatura, peso unitario (PUV) y contenido de aire.

Tabla 2. Propiedades en estado fresco.

Hormigón	Fibras (kg/m ³)	Asentamiento (mm)	Aire (%)	PUV (kg/m ³)	Temperatura (°C)
S	0	120	3,5	2,43	26
A1	1	90	4,0	2,39	26
A2	2	90			
A3	3	100			
A4	4	85			
A5,5	5,5	95			
B1	1	80	3,5	2,43	25
B2	2	80	3,5	2,43	25
B3	3	110			25
B4	4	80			25
B5,5	5,5	100			25
SEa	0	80	4,5	2,42	28
A1E	1	90			28
A3E	3	110	4,5	2,42	28
SEb	0	80	3,0	2,46	28
B1E	1	80			28
B3E	3	100	4,0	2,43	28
SEc	0	80	4,0	2,42	25
B5,5E	5,5	70			25

Detalles metodológicos

En cada caso se moldearon 3 cilindros de 100x200 mm para evaluar la resistencia a compresión a 28 días. A la misma edad se evaluaron la resistencia y capacidad residual en flexión sobre 3 prismas de 150x150x600 mm según la norma ASTM C1609 (8). 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 los 3 mm. 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.

Los cambios dimensionales (expansión/contracción) en condición libre de cada mezcla se evaluaron sobre 3 prismas de 75x105x430 mm con pernos en sus extremos empleando un comparador con precisión de $1 \cdot 10^{-4}$ pulgadas, según ASTM C157 (9).

Se realizaron ensayos de contracción restringida sobre el hormigón de base (SEc) empleando 3 prismas de 70x70x300 mm que cuentan con una barra de acero en el eje central que fija dos cabezales de acero, conforme establece la norma ASTM C878 (10). En el HRF B5,5E se emplearon los mismos moldes realizando dos series de 3 probetas, una con la barra de acero interior inserta dentro de un tubo plástico para evitar la adherencia (con barra) y otra donde se fijaron los pernos en los extremos pero se eliminó la barra a lo largo del prisma (sin barra) buscando poner en evidencia si las fibras pueden contribuir a transferir esfuerzos ante la acción del aditivo expansor.

Las probetas destinadas a evaluar la resistencia se curaron en cámara húmeda hasta los 28 días. Los prismas para contracción libre se desmoldaron a las 24 horas, se midieron y se conservaron bajo agua hasta los 28 días, edad a la cual fueron expuestos al aire en cámara seca. Las probetas de contracción restringida se desmoldaron a las 8 horas y se ubicaron dentro de un recipiente cerrado con una pequeña capa de agua en su interior 1 semana y a partir de entonces se expusieron al aire en cámara seca.

RESULTADOS

La Figura 1 muestra curvas típicas tensión – flecha obtenidas en los ensayos de flexión para cada HRF; se aprecia con claridad cómo el uso de contenidos de fibras crecientes incrementa la capacidad residual. La Figura 2 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.

La Tabla 3 informa los resultados de los ensayos de compresión y flexión; todos corresponden al promedio de tres valores: 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} .

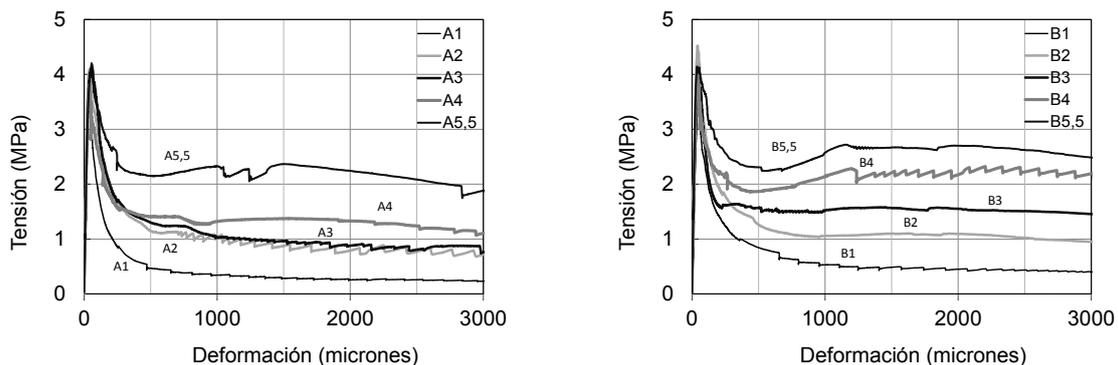


Figura 1. Curvas típicas tensión – flecha en ensayos de flexión. Mezclas sin aditivo expansor.

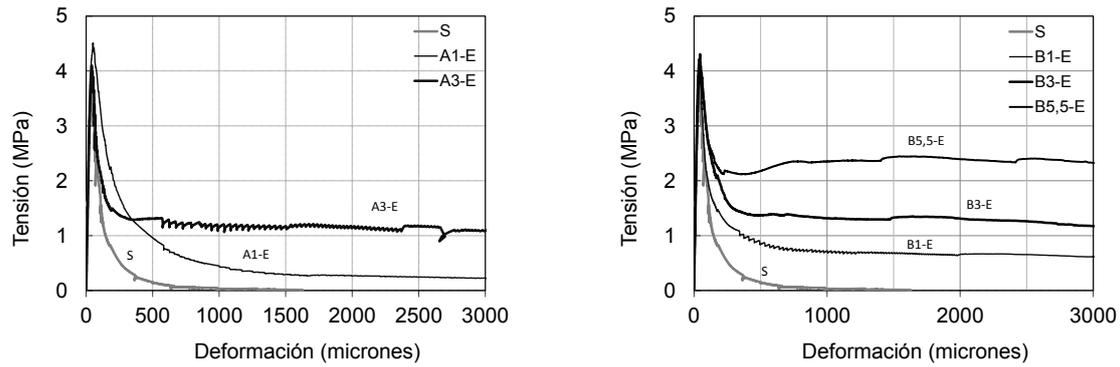


Figura 2. Curvas típicas tensión – flecha en ensayos de flexión. Mezclas con aditivo expansor.

Tabla 3. Propiedades mecánicas.

Hormigón	Fibras (kg/m ³)	f _c (MPa)	f _{max} (MPa)	f ₆₀₀ (MPa)	f ₁₅₀ (MPa)	f ₆₀₀ / f _{max} (%)	f ₁₅₀ / f _{max} (%)	f _{e3} (MPa)	R _{e3} / f _{max} (%)
S	0	33,7	*	*	*	*	*	*	*
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
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
SEa	0	34,3	*	*	*	*	*	*	*
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
SEb	0	28,2	*	*	*	*	*	*	*
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
SEc	0	36,9	3,9	0,2	0,1	4	1	0,2	6
B5,5E	5,5	34,4	4,2	2,5	2,3	59	55	2,4	58

*: no medido

La Figura 3 representa el valor 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 agregado grueso) y del equipamiento elegido para el mezclado, transporte y colocación. En este caso se observa que la fibra B muestra una performance superior. 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 y 5,5 kg/m³ para las fibras A y B respectivamente.

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

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de los ensayos de contracción libre y las correspondientes variaciones en peso durante la exposición en cámara seca. Se toma como referencia la edad de 28 días que es el momento en el cual las probetas saturadas se expusieron al ambiente seco. Se observa que la dosis de fibras no modificó mayormente la contracción medida en los ensayos normalizados. Pero esto no significa 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. Además la contracción en obra en general es bastante menor por las condiciones ambientales y la geometría y condiciones de borde. Complementariamente y como orientación, la Figura 6 presenta resultados de contracción en obra sobre losas de HRF sintéticas con materiales similares moldeadas en verano, las medidas se iniciaron del día siguiente al moldeo utilizando un deformómetro de láminas paralelas de 20 pulgadas de base que mide sobre pernos insertos de acero inoxidable. Los registros, que comprenden varios meses, a la derecha de la figura han sido corregidos en función de la variación de la temperatura del hormigón en el tiempo.

En comparación, en las series con aditivo expansor se aprecia mayor variación dimensional durante los primeros 28 días; además el aditivo provoca diferencias en las variaciones de peso lo que se atribuye al consumo de agua por la reacción del producto.

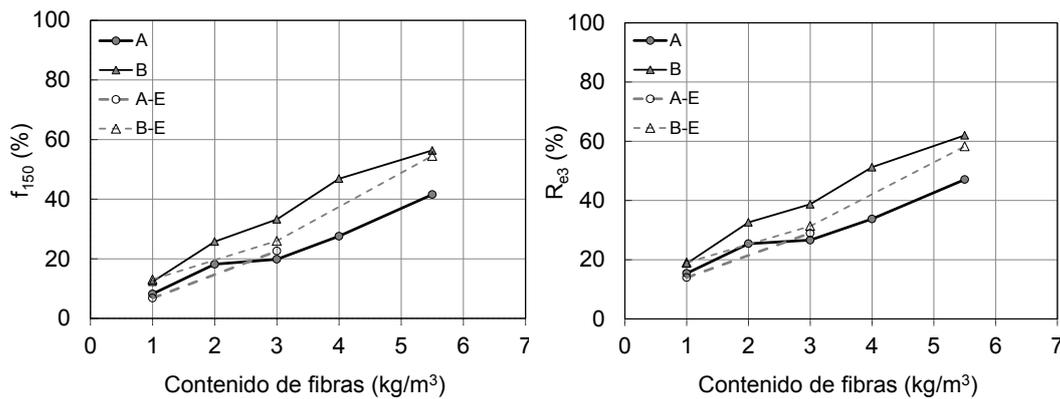


Figura 3. Variación de las propiedades residuales en flexión en función del contenido de fibra.

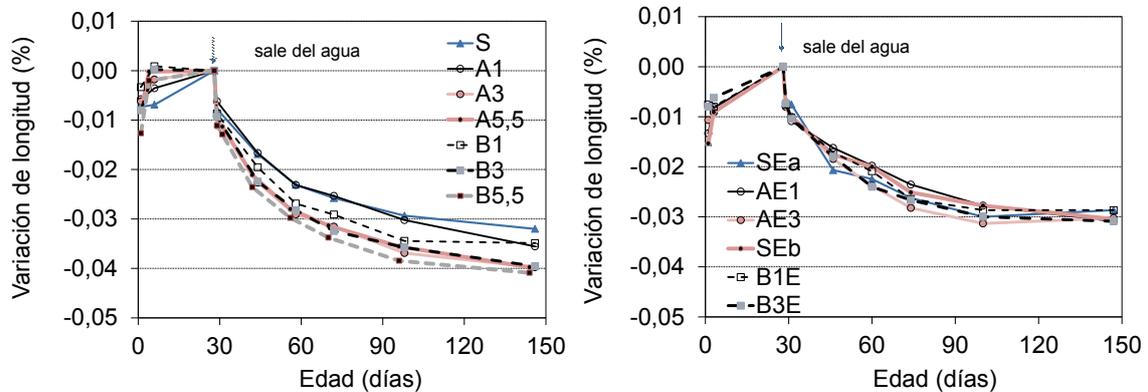


Figura 4. Variación de la contracción libre en el tiempo.

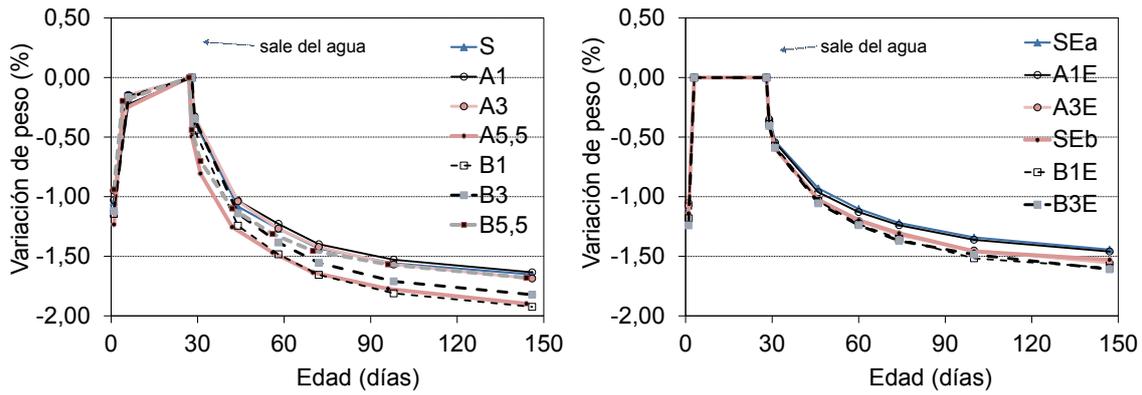


Figura 5. Variaciones de peso durante los ensayos de contracción.

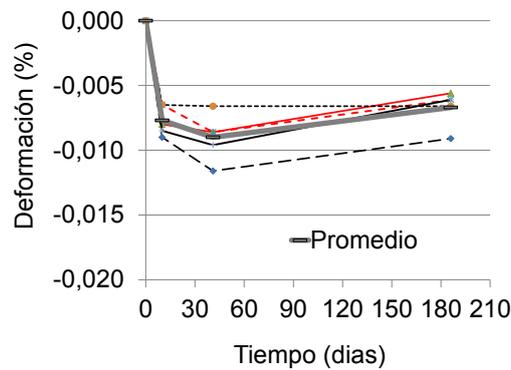


Figura 6. Variaciones dimensionales durante 7 meses medidas en losas de HRF sintéticas

Las Figura 7 muestra los resultados de variación de longitud y variación de peso a lo largo del tiempo correspondientes a los ensayos contracción restringida (ASTM C878); cabe recordar que mientras en el hormigón sin fibras SEc se realizó el ensayo tal cual prevee la norma, con B5,5E se estudiaron dos grupos, uno con la barra aislada (B5,5Ecb) y otro sin la barra a lo largo de la probeta (B5,5Esb). Se observa que mientras la barra restringe la expansión, aún sin adherencia, las fibras no tienen esa capacidad.

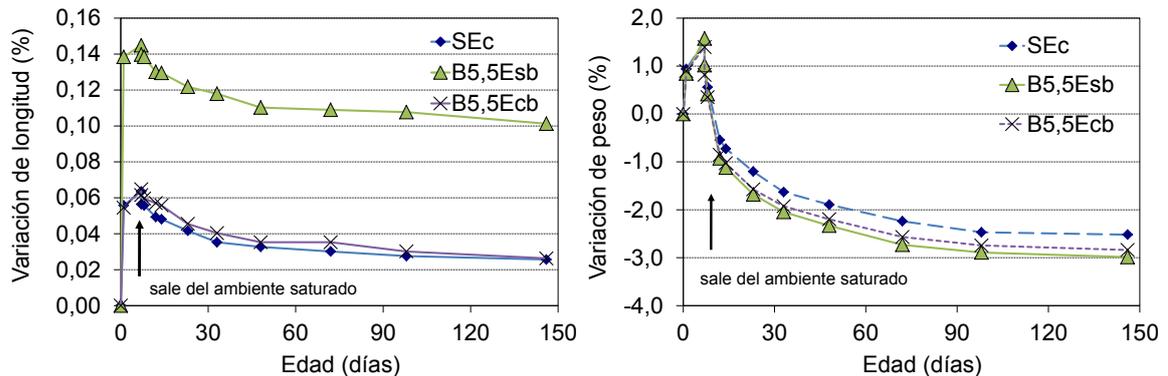


Figura 7. Variación de longitud (izquierda) y variación de peso (derecha) en ensayos de contracción restringida según ASTM C 878, sobre hormigones con aditivo expansor.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un extenso estudio que compara la performance de dos macrofibras sintéticas diferentes incorporadas en dosis variables entre 1 y 5,5 kg/m³. Los resultados permiten concluir que:

- Como era de esperar 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 la capacidad residual del HRF.
- La dosis de macrofibras no tiene mayor incidencia en los valores de contracción libre medidos en ensayos normalizados.
- La incorporación de aditivo expansor modifica los valores de contracción y también provoca cambios en las pérdidas de peso durante el secado lo que se atribuye a que el aditivo consume agua.
- Los ensayos comparativos de contracción restringida indican que las fibras no restringen la expansión como lo hace la barra de acero.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- (1) Concrete Society "Guidance on the use of Macro-synthetic-fibre-reinforced Concrete", A cement and concrete industry publication, Technical Report N°65, April 2007.
- (2) TR 34-2003: Concrete Industrial Ground floors: A Guide to Design and Construction, The Concrete Society, England.
- (3) Federal Highway Administration, Design and Concrete Material Requirements for Ultra-Thin Whitetopping, Publication N° FHWA-ICT-08-016, USA, June 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, February, 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, 2012, Bahía Blanca, Argentina, pp. 311-318.
- (8) 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).
- (9) ASTM C157 / C157M - 08 "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete" ASTM Standards, Vol.04.02, (2014).
- (10) ASTM C878 / C878M "Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete". ASTM Standards, Vol.04.02, (2014).