

## RESPUESTA MECÁNICA DE ELEMENTOS MIXTOS REPRESENTATIVOS DEL USO DE HORMIGÓN CON FIBRAS COMO REFUERZO TIPO WHITETOPPING

María Celeste Torrijos<sup>1</sup>, Francisco Morea<sup>1</sup>, Graciela Giaccio<sup>2</sup>, Raúl Zerbino<sup>1</sup>  
LEMIT-CIC, 52 e/121 y 122, (1900) La Plata, Argentina

**Palabras clave:** whitetopping, hormigón reforzado con fibras, respuesta mecánica.

### RESUMEN

Una de las aplicaciones más importantes del hormigón con fibras es la construcción de losas, pisos industriales y pavimentos. En este último caso, una de las soluciones para restablecer su nivel de servicio una vez deteriorados, es el uso de "overlays". Tanto en pavimentos dañados de concreto asfáltico como de hormigón de cemento Portland, los hormigones con fibras permiten el uso efectivo de capas delgadas de refuerzo, conocidas como whitetopping. Las fibras ejercen una acción de costura tanto sobre las juntas de contracción como sobre eventuales fisuras, permitiendo reducir el espesor de refuerzo, incrementando así la vida en servicio y prestaciones generales del pavimento. Dado que las condiciones ambientales pueden variar significativamente, este trabajo estudia el efecto de la temperatura sobre la respuesta de probetas compuestas sustrato asfáltico-hormigón con fibras; los resultados evidencian cambios importantes en capacidad de carga residual, rigidez y adherencia entre capas.

### INTRODUCCIÓN

Un pavimento con un nivel de fisuración y/o deformaciones permanentes (ahuellamientos) significativos no es seguro y confortable para el usuario del camino, ha perdido serviciabilidad. Dependiendo el grado de deterioro se lo puede reparar o mejorar con un refuerzo para de esta manera alargar su vida útil antes de tener que hacer una intervención de mayor escala (1). Los beneficios más importantes que derivan de la colocación de capas de refuerzo en el pavimento es la rehabilitación del camino a menor costo y con un menor tiempo de ejecución que una repavimentación completa (del tipo "full depth"). En tal caso una opción es el refuerzo con capas de hormigón de cemento portland, conocidas como "whitetopping".

Para rehabilitar el pavimento al menor costo posible, cuanto menor sea el espesor del refuerzo menor el costo de la intervención. Cuando el pavimento asfáltico presenta cierto deterioro (ahuellamientos, fisuración etc.) pero buenas condiciones estructurales se

---

<sup>1</sup> Investigador CONICET. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina.

<sup>2</sup> Investigador CIC. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina.

puede considerar la adherencia entre capas. Por tanto se pueden colocar menores espesores de hormigón pues el viejo pavimento, aunque deteriorado, es un material de suficiente calidad y ofrece capacidad de soporte estructural. Al existir adherencia el compuesto sustrato-refuerzo trabaja como un todo (2) se produce un descenso del eje neutro con lo que se reducen las tensiones de tracción en el overlay y permite diseñar menores espesores de refuerzo (3). La adherencia con el sustrato puede disminuir por diversas causas, condiciones adversas o defectos (suciedad, aceites) durante la construcción, curado inapropiado, impacto excesivo de los vehículos producto de la rugosidad superficial de la capa de refuerzo, formación de fisuras con acceso de agua y exposición al congelamiento, entre otras (4).

Los Hormigones Reforzados con Fibras (HRF) son hormigones de alta performance que se destacan por su capacidad mecánica residual (postfisuración) y tenacidad. Los HRF son particularmente eficientes en estructuras redundantes como losas sobre el piso, pavimentos y pisos industriales, permitiendo incluso el reemplazo total de armaduras de acero convencionales. También se destacan otras aplicaciones como el uso en elementos premoldeados y revestimientos de túneles. La incorporación de fibras permite la transferencia de esfuerzos a través de las fisuras manteniendo la integridad del sistema; por otro lado al reducir las aperturas de fisuras el refuerzo con fibras tiene un efecto destacable en estructuras expuestas a ambientes agresivos.

Un campo de aplicación muy importante de HRF lo constituye el empleo para capas de refuerzo, tanto para reparación o rehabilitación de estructuras. El HRF aparece como una alternativa excelente para la realización de overlays tipo whitetopping, ya que las fibras permiten la transferencia de fuerzas a través de las fisuras disminuyendo la intensidad de la discontinuidad mecánica y la tensión en la interfaz. Se ejerce una acción de costura tanto sobre las juntas de contracción como sobre eventuales fisuras reflejas. Esto permite reducir el espesor del refuerzo, incrementar la vida en servicio y las prestaciones generales del pavimento; existen referencias tanto con fibras de acero como con macrofibras sintéticas (5).

El estudio de la adherencia en la interfaz overlay-sustrato ha sido motivo de diversos trabajos vinculados al refuerzo de estructuras de hormigón armado (6-8); o al estudio del comportamiento mecánico de refuerzos de hormigón sobre pavimentos asfálticos o de hormigón de cemento portland (9,10).

En experiencias previas (11) se analizaron probetas compuestas por una capa de sustrato asfáltico y una capa de HRF que ponen en evidencia la contribución de las fibras con respecto a una capa de refuerzo de hormigón simple. Asimismo se ajustó un modelo de predicción del comportamiento para el caso concreto asfáltico-hormigón con fibras (12). Considerando que el asfalto es susceptible a los cambios de temperatura y que dentro de las condiciones de servicio esta variable puede modificarse en gran medida, este trabajo estudia la respuesta mecánica a flexión de probetas compuestas sustrato de concreto asfáltico - overlay de HRF, en muestras que al momento del ensayo presentaban temperaturas entre 10 y 50 °C.

## **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Se elaboraron vigas de 100 x 100 x 400 mm compuestas por un sustrato de concreto asfáltico de 50 mm de altura y un overlay de HRF del mismo espesor. El sustrato fue un Concreto Asfáltico en Caliente (CAC) tamaño máximo de agregado de 19 mm; para el mismo se emplearon asfalto convencional CA-30 (penetración 47 dmm, punto de ablandamiento de 54,8 °C y una viscosidad cinemática a 60 °C de 3350 dPa.s), piedra partida granítica como agregado grueso (6-20 mm y 6-12 mm), arena de trituración

y cal. La mezcla se diseñó a partir del método Marshall, resultando un contenido óptimo de asfalto 5 %, una densidad de 2,389 g/cm<sup>3</sup> y 4,1 % de vacíos.

Tabla 1. Materiales utilizados

Overlay de HRF		Sustrato de concreto asfáltico	
	(kg/m <sup>3</sup> )		(%)
Agua	170	Asfalto	5,0
Cemento	354	Ag. Grueso (6-20 mm)	23,7
Ag. Fino	785	Ag. Grueso (6-12 mm)	28,5
Ag. Grueso (6-20 mm)	950	Ag. Fino (0-6 mm)	40,9
Superfluidificante	3,5	Cal	1,9
Fibras de acero	40		

Como overlay se utilizó un HRF que incorpora 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero tipo hooked end (HRFA) de 50 mm de largo y 1 mm de diámetro. Para el hormigón de base se emplearon como materiales cemento CPC40, piedra partida granítica 6-20 mm como agregado grueso, arena silíceo natural y un aditivo superfluidificante. La resistencia a compresión fue igual a 35 MPa. La Tabla 1 detalla las proporciones de los materiales empleados.

Para fabricar las probetas compuestas se moldearon placas de concreto asfáltico de 300 x 400 x 50 mm utilizando un compactador según EN 12697-33 (13). Luego las placas fueron cortadas en prismas de aproximadamente 100 mm de ancho sobre los que se moldeó el HRF. En la Fig. 1 se observa un esquema de este proceso.

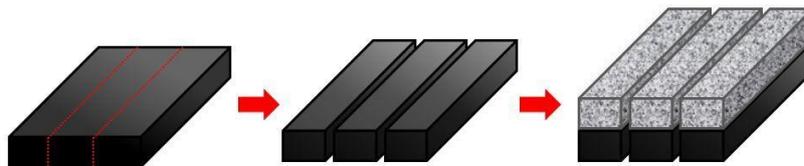


Figura 1. Proceso de elaboración de las vigas compuestas

A su vez se moldearon prismas de 150x150x600 mm del HRF y de 300x75x50 mm del concreto asfáltico con el fin de caracterizar estos materiales. Para realizar los ensayos de flexión tanto en estos prismas como en las probetas compuestas se realizó una entalla al centro de la cara traccionada (overlay de HRF en las probetas mixtas) con el fin de medir la apertura de fisura (CMOD).

La temperatura afecta principalmente la respuesta mecánica que ofrece el concreto asfáltico, dadas sus características de material termo-viscoelástico, y la adherencia entre sustrato y HRF. Considerando los objetivos del trabajo, se realizaron ensayos de flexión de las vigas compuestas sustrato asfáltico – overlay de HRF, luego de ser aclimatadas a diferentes temperaturas, realizando tres ensayos para cada caso.

Se adoptaron tres temperaturas diferentes que cubren ampliamente el rango usual de temperatura de servicio. El primer grupo (W10) se dejó 24 horas en heladera a 5°C; al comenzar el ensayo las probetas de este grupo tenían una temperatura cercana a los 10°C y aumentando al finalizar el ensayo a 12°C. El segundo grupo (W50) se dejó 5 horas en estufa a 60°C, la temperatura al inicio de los ensayos fue de aproximadamente

52°C descendiendo a 42°C al finalizar los mismos. Finalmente el tercer grupo (W20) se ensayó a temperatura ambiente (20°C).

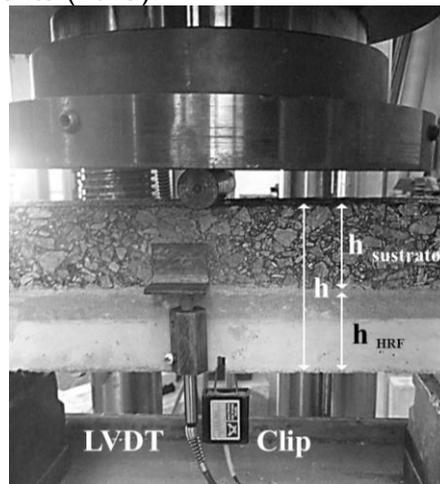


Figura 2. Medida de deformaciones en el ensayo de flexión sobre probetas compuestas sustrato-overlay

Los ensayos de flexión se realizaron con carga centrada en una máquina con control por lazo cerrado, controlando la velocidad de CMOD mediante un clip ubicado a ambos lados de la entalla. Se adoptó una velocidad inicial de 0,1 mm/minuto y una vez alcanzados 0,3 mm de apertura la velocidad se incrementó a 0,2 mm/minuto. Además se colocó un LVDT que cubre la zona de interfaz para evaluar si se propagan fisuras entre el sustrato y el overlay considerando la posible pérdida de adherencia. Un esquema de la forma de la instrumentación y montaje del ensayo se muestra en la Fig. 2. Como resultados se calcularon (14) los parámetros de resistencia y capacidad residual que indica la norma: la tensión de primera fisura ( $f_L$ ), la tensión de rotura para la carga máxima ( $f_M$ ) y las resistencias residuales ( $f_{R1}$ ,  $f_{R2}$ ,  $f_{R3}$ ,  $f_{R4}$  correspondientes a aperturas de fisura de 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 mm respectivamente) establecidas en la norma EN14651 (15). Para el cálculo de estas tensiones se asumió a las vigas compuestas como un material homogéneo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades del HRF de refuerzo

La Fig. 3 se presenta una curva típica obtenida a partir del ensayo de flexión del HRF utilizado como overlay siguiendo la norma EN14651 (15). Se obtuvieron en promedio resistencias residuales  $f_{R1}$  de 4,2 MPa y  $f_{R3}$  de 4,9 MPa, lo que resulta un HRF clase 4.c de acuerdo a lo indicado en la clasificación indicada en el *fib* Model Code 2010 (16).

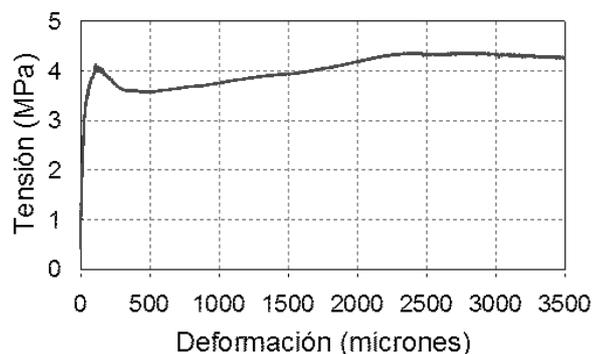


Figura 3. Curva Tensión - CMOD del HRF.

### Respuesta mecánica de compuestos sustrato-overlay

En las Fig. 4 se presentan curvas carga-CMOD correspondientes a los ensayos de flexión de las vigas compuestas. En primera instancia se observa una mayor capacidad residual en el grupo W10 seguido por los grupos W20 y W50, respectivamente. Esto se debe a que la rigidez del asfalto crece a medida que disminuye la temperatura de ensayo.

Considerando la capacidad de carga luego de la primera fisura, el grupo W10 no presenta un incremento importante como lo hace el grupo W20. Se observa que a partir de una apertura de fisura igual a 2500  $\mu\text{m}$  aproximadamente, las curvas de los grupos W10 y W20 presentan una capacidad residual similar. Este incremento en la capacidad de carga de W20 ya fue observado en trabajos anteriores y puede deberse a un cambio en la dirección de propagación de la fisura que no se interna fácilmente en el sustrato y a la rigidización del concreto asfáltico debido al aumento de las cargas para mantener la velocidad de apertura de fisura (11). Por su parte el no incremento en la capacidad de carga del grupo W10 se puede atribuir a que a bajas temperaturas el concreto asfáltico tiene un comportamiento tipo sólido elástico, mientras que a 20 °C la naturaleza viscoelástica del concreto asfáltico es más marcada. La preponderancia de la naturaleza viscosa del concreto asfáltico al aumentar la temperatura de ensayo hace que el incremento en la capacidad de carga residual en el grupo W50 resulte nulo o escaso.

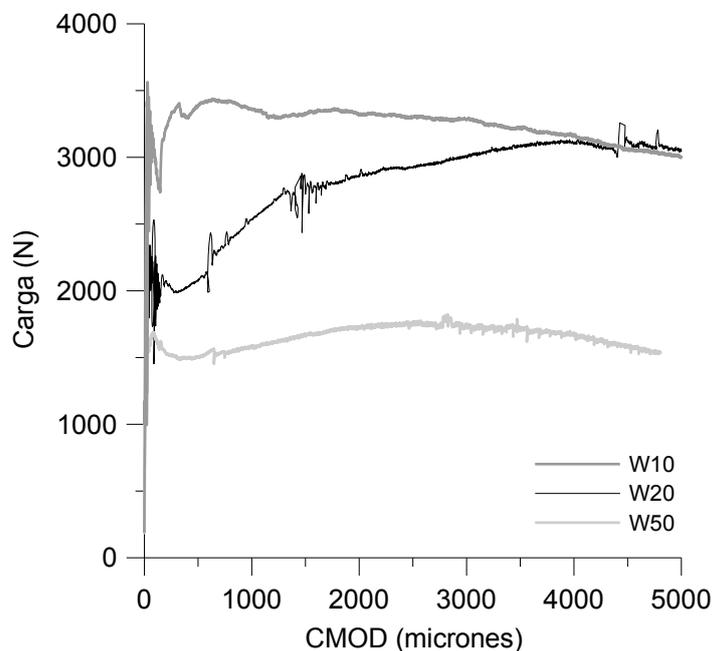


Figura 4. Curvas típicas carga - CMOD de las vigas compuestas sustrato – overlay.

En la Tabla 2 se indican las tensiones de primer pico ( $f_L$ ), tensión máxima ( $f_M$ ) y tensiones residuales ( $f_{R1}$ ,  $f_{R2}$ ,  $f_{R3}$  y  $f_{R4}$ ) calculadas a partir de los ensayos de flexión de probetas compuestas overlay-sustrato. Se observa un claro efecto de la temperatura sobre la capacidad residual post fisuración. Las mayores tensiones corresponden a las vigas del grupo W10, y las menores a las del grupo W50. En el grupo W10 el concreto asfáltico presenta mayor rigidez por efecto de las bajas temperaturas, aportando una mayor capacidad de carga al compuesto. Obsérvese que en este grupo las tensiones de primera fisura son más altas que las de los grupos W20 y W50. En contrapartida en el grupo W50 el concreto asfáltico tiene un comportamiento más viscoelástico, con menor rigidez, presentando mayor flexibilidad y mayores deformaciones.

Tabla 2. Tensiones de primera fisura ( $f_L$ ), máxima ( $f_M$ ) y residuales ( $f_{R1}$ ,  $f_{R2}$ ,  $f_{R3}$  y  $f_{R4}$ ).

Viga	$f_L$ (MPa)	$f_M$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R2}$ (MPa)	$f_{R3}$ (MPa)	$f_{R4}$ (MPa)
W10-7	2,3	2,3	2,1	2,2	2,1	2,0
W10-8	3,9	3,9	-	-	-	-
W10-9	2,6	2,6	2,5	2,5	2,4	2,4
Promedio W10	2,9	2,9	2,3	2,3	2,3	2,2
W20-1	1,7	2,5	1,5	2,0	2,1	2,2
W20-2	1,2	1,2	1,0	0,9	0,9	0,7
W20-3	1,6	2,3	1,3	1,5	1,9	2,1
Promedio W20	1,5	2,0	1,3	1,5	1,6	1,7
W50-4	0,8	1,0	0,6	0,7	0,8	0,9
W50-5	1,0	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0
W50-6	1,2	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1
Promedio W50	1,0	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0

En la Fig. 5 se representa la variación de los desplazamientos verticales en el entorno de la zona de interfaz (medidas a través del LVDT) en función de la apertura de fisura (CMOD). Se observa claramente la mayor deformación del grupo W50 respecto a los grupos W10 y W20 que se atribuye a la drástica disminución de la rigidez del concreto asfáltico con el aumento de la temperatura. Como tendencia general se observa que las deformaciones medidas por el LVDT son de compresión, lo que permite asumir que inicialmente la adherencia entre capas es buena y no existe una propagación de fisuras importante en la interfaz sustrato-overlay. No obstante ello, para grandes aperturas y particularmente en el caso de W10 cambia esa tendencia y las deformaciones del LVDT se reducen hasta hacerse positivas, lo que implica el despegue de las capas. En la Fig. 6 se muestran fotografías de las interfaces sustrato-overlay de cada grupo y se observa en el grupo W10 la aparición de fisuras en la interfaz.

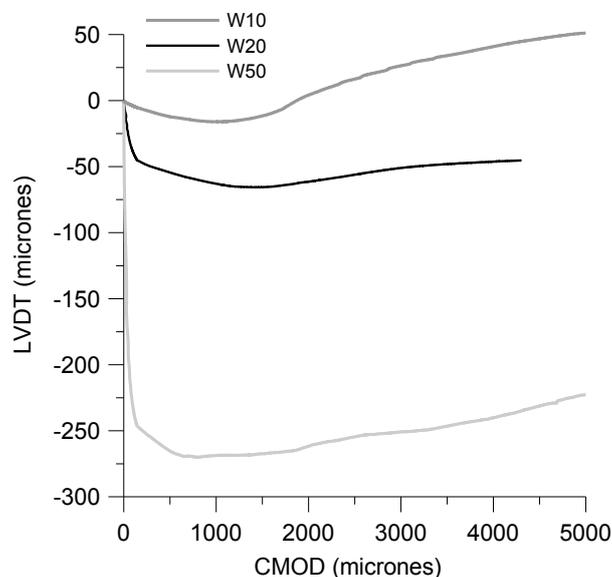


Figura 5. Curvas típicas LVDT - CMOD de las vigas compuestas sustrato – overlay.

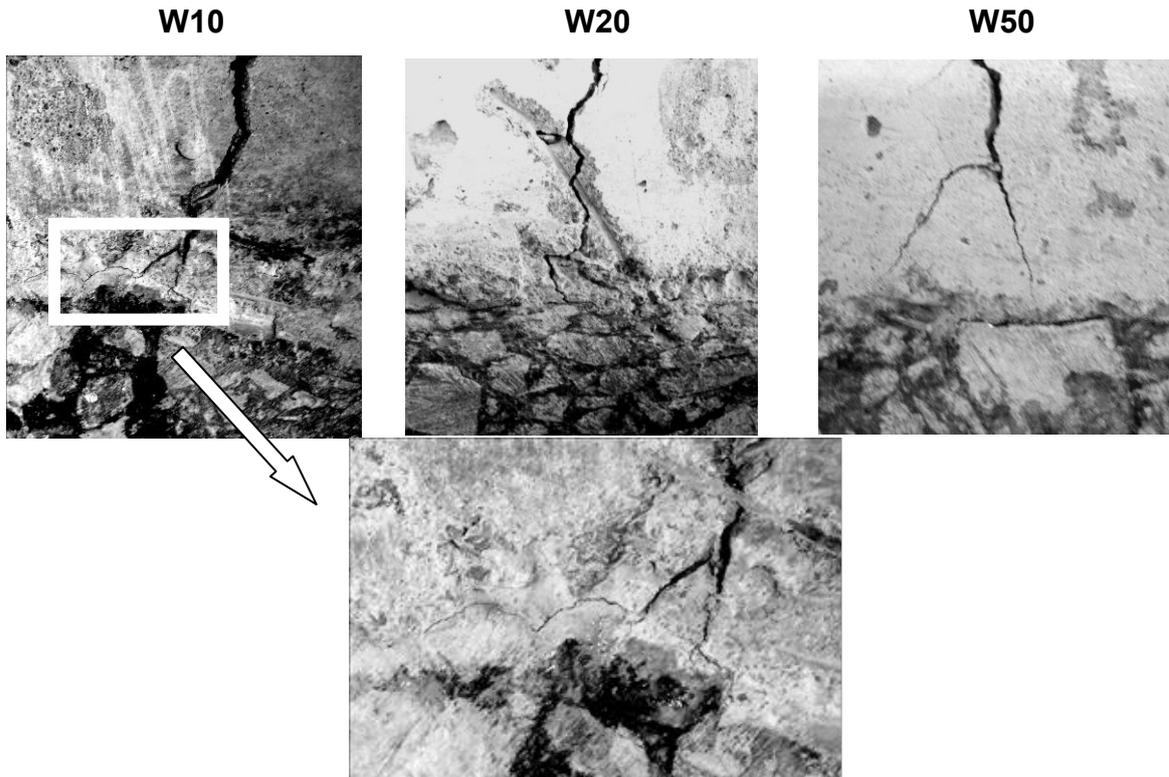


Figura 6: Aspecto de las interfaces sustrato-overlay luego del ensayo de flexión.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio sobre el efecto de la temperatura en el comportamiento mecánico en flexión de vigas compuestas sustrato asfáltico - overlay de hormigón reforzado con fibras. Como conclusiones surge que:

Debido a la mayor rigidez del concreto asfáltico a medida que disminuye la temperatura crece la capacidad portante postfisuración. Las probetas compuestas ensayadas a 10 °C (W10) presentaron inicialmente mayor capacidad residual que las ensayadas a 20 °C (W20); al elevar la temperatura (W50) la caída en capacidad residual fue notoriamente mayor.

A temperaturas elevadas (grupo W50) el concreto asfáltico tuvo un comportamiento viscoelástico mucho más acentuado, con menor rigidez, que dio lugar a mayor flexibilidad y mayores deformaciones, sin que se manifieste incremento en la capacidad residual a medida que crece la apertura de fisura.

La disminución en la capacidad residual de las muestras ensayadas a temperaturas del orden de 50°C fue de más del 50% con respecto a las ensayadas a temperatura ambiente. Si bien las muestras ensayadas a 10°C presentaron la menor caída en la capacidad portante, se observó la aparición y propagación de fisuras en la zona de interfaz sustrato-overlay.

Es importante destacar que la temperatura adoptada para el grupo W50, si bien supera los valores en servicio usuales en las obras, se seleccionó como valor extremo de laboratorio con el fin obtener datos para el ajuste del modelo numérico de predicción del comportamiento de compuestos sustrato asfáltico-hormigón con fibras.

## REFERENCIAS

- (1) Khazanovich, L., Lederle, R., Tompkins, D. (2012). "Guidelines for the Rehabilitation of Concrete Pavements Using Asphalt Overlays". FHWA Report TPF-5(149).
- (2) Rasmussen R. y Rozycki D. (2004). "Thin and Ultra-Thin Whitetopping. A Synthesis of Highway Practice" NCHRP SYNTHESIS 338.
- (3) Han, C. (2005) "Synthesis of current Minnesota practices of thin and ultra-thin whitetopping". Minnesota Department of Transportation Report. 43 p.
- (4) Turatsinze et al (2011) Chapter 6 "Debonding en "Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs pavements", RILEM State of the Art Reports.
- (5) Miguez Passada, D., González, A., Violini, D., Pappalardi, M., Zerbino, R. (2013). "Desarrollo e implementación de un hormigón reforzado con fibras sintéticas para la repavimentación de la ruta 24 de Uruguay". Revista Cemento Hormigón 956:52-58.
- (6) Turatsinze A., Granju J., Sabathier V, Farhat H. (2005). "Durability of bonded cement-based overlays: effect of metal fibre reinforcement". Materials and Structures 38: 321-327.
- (7) Tran Q.T., Toumi A., Granju J.L. (2006). "Experimental and numerical investigation of the debonding interface between an old concrete and an overlay". Materials and Structures 39:379-389.
- (8) Tran Q.T., Toumi A., Turatsinze, A. (2007). "Modelling of debonding between old concrete and overlay: fatigue loading and delayed effects". Materials and Structures 40:1045-1059.
- (9) Chabot A., Hun M., Hammoum, F. (2013). "Mechanical analysis of a mixed mode debonding test for "composite" pavements". Construction and Building Materials 40:1076-1087.
- (10) Qian S., Li V., Zhang H., Keoleian G. (2013). "Life cycle analysis of pavement overlays made with Engineered Cementitious Composites". Cement and Concrete Composites 35:78-88.
- (11) Giaccio G.M., Bossio M.E., Monetti D.H., Morea F., Torrijos M.C., Zerbino R.L. (2013) "Macrofibras sintéticas para el refuerzo de hormigón". Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia, Secretaría de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.
- (12) Isla F, Luccioni B., Ruano G., Torrijos MC, Morea F. Giaccio G., Zerbino R. "Mechanical response of fiber reinforced concrete overlays over asphalt concrete substrate: experimental results and numerical simulation". Construction and Building Materials 93 (2015), pp 1022-1033.
- (13) EN 12697-33 (2003). "Bituminous mixture: test methods for hot mix asphalts, part 33: specimen prepared by roller compactor".
- (14) Giaccio G., Tobes, J. M., Zerbino R. "Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete" Cement and Concrete Composites, 2008, V30 N4, pp. 297-306.
- (15) Eur Com for Standarization (2005) EN14651:2005 "Test method for metallic fibered concrete - measuring the flexural tensile strength (Limit of proportionality (LOP), Residual)". Brussels.
- (16) Fédération International du Béton. (2013) *fib* Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn, Berlin, Germany.