

# EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE OVERLAYS DE HORMIGÓN CON FIBRAS SOBRE SUSTRATO DE CONCRETO ASFÁLTICO

## ASSESSMENT OF THE MECHANICAL RESPONSE OF FIBER REINFORCED CONCRETE OVERLAYS OVER ASPHALT SUBSTRATE

*F. Morea<sup>1</sup>, M.C. Torrijos<sup>2</sup>, G. Giaccio<sup>3</sup>, R. Zerbino<sup>4</sup>*

*1.- Investigador Asistente CONICET-LEMIT. [franmorea@yahoo.com.ar](mailto:franmorea@yahoo.com.ar)*

*2.- Investigadora Asistente CONICET-UNLP-LEMIT. [celestetorrijos@hotmail.com](mailto:celestetorrijos@hotmail.com)*

*3.- Investigadora Independiente CIC-LEMIT-UNLP.*

*4.- Investigador Independiente CONICET-UNLP-LEMIT*

### RESUMEN

El uso de overlays de Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) aparece como una alternativa para la reparación y refuerzo en obras viales. Las fibras ejercen una acción de costura tanto sobre las juntas constructivas como sobre eventuales fisuras, y como consecuencia permiten reducir el espesor del refuerzo e incrementar la vida en servicio y prestaciones generales del pavimento. El diseño y comportamiento de refuerzos tipo whitetopping de bajo espesor está íntimamente ligado al nivel de adherencia con el sustrato; en este sentido la presencia de las fibras también reduce la propagación de fallas en la interfaz sustrato-overlay. Este trabajo muestra algunas experiencias orientadas al desarrollo de un método para evaluar la eficiencia de diferentes tipos de fibras en este tipo de aplicaciones. Con este fin se analiza la respuesta mecánica de probetas compuestas sustrato-overlay sometidas a ensayos de flexión. Se incluyen overlays de hormigón simple, de HRF con macrofibras sintéticas y de acero aplicados sobre concreto asfáltico como sustrato. Adicionalmente se estudió la adherencia en la interfaz mediante ensayos de corte.

**Palabras clave:** *Hormigón reforzado con fibras, overlay, macrofibras de acero, mocofibras sintéticas.*

**ABSTRACT**

The use of overlays of Fiber Reinforced Concrete (FRC) appears as an alternative for the repair and reinforcement of pavements. The fibers make a sewing action over the construction joints and eventual cracks and, as a consequence, allow reducing the thickness of the repair and increase service life and the general performance of the pavements. The design and behaviour of thin concrete overlays is related to the bond level developed between the substrate and the overlay; in this sense the presence of fibers also reduces the propagation of cracks through the substrate-overlay interface. This work shows some experiences oriented to the development of a method for assessing the efficiency of different types of fibers in this kind of applications. With this aim, the mechanical response of substrate-overlay compound specimens subjected to flexure test is analysed. It includes overlays of simple concrete, of FRC with steel and synthetic macrofibers applied over asphalt as substrate. Additionally, the bond strength in the interface was studied by shear tests.

**Keywords:** *Fiber reinforced concrete, overlay, steel macrofibers, synthetic macrofibers.*

**INTRODUCCIÓN**

**Planteo del problema**

Una vez que un pavimento se encuentra deteriorado necesita ser intervenido para continuar prestando un nivel de servicio adecuado. Una de las soluciones para restablecer el nivel de servicio del pavimento es el uso de refuerzos u “overlays” para mejorar o recomponer el desempeño del mismo, su durabilidad y calidad de servicio al tránsito. Estos refuerzos pueden ser de distintas clases, los conocidos como “whitotopping” consisten en aplicar una capa de hormigón de cemento portland; en la actualidad se recomienda el uso de hormigón reforzado con fibras (HRF). Se distinguen tres tipos de whitotopping, el convencional, el delgado y el ultra delgado; la diferencia entre ellos radica en los espesores

pudiendo ser superior a 15 cm, de 10 a 15 cm y de 5 a 10 cm respectivamente para cada clase.

El whitotopping convencional es una capa de refuerzo sobre el pavimento deteriorado, que en adelante pasa a ser una base de buena calidad pero sin considerar de parte de la misma ningún aporte estructural. No se considera que exista adherencia entre las capas, Figura 1, y por lo tanto el refuerzo es el encargado de soportar las tensiones del tránsito. Esto genera en el diseño un mayor espesor de la capa de refuerzo.

Dado el interés de generar la rehabilitación del pavimento al menor costo posible, cuanto menor

20

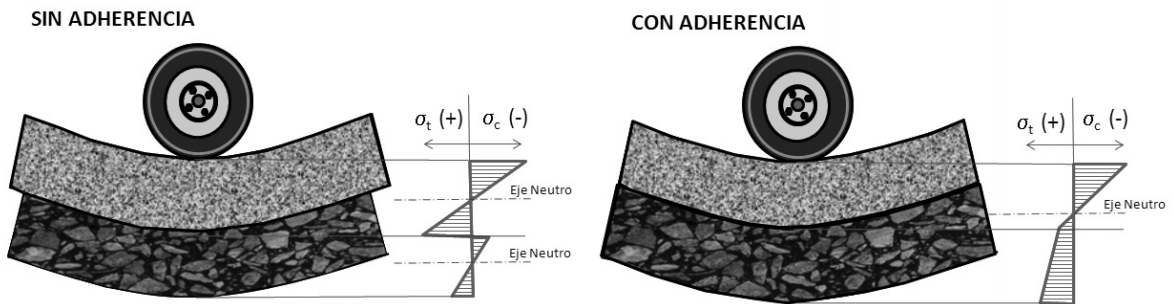


Figura 1. Esquema de tensiones en el sistema compuesto con y sin adherencia.

sea el espesor de refuerzo menor el costo de la intervención. Considerando la adherencia entre capas se pueden colocar menores espesores pues el viejo pavimento aunque deteriorado es un material de alta calidad y puede ofrecer un soporte estructural. Al existir adherencia el compuesto sustrato-refuerzo trabaja como un todo, ver Fig. 1, se produce un descenso del eje neutro con lo que se reducen las tensiones de tracción en el overlay de hormigón y permite diseñar menores espesores de refuerzo.

La adherencia con el sustrato es la base de un diseño apropiado y un proceso de construcción óptimo del whitetopping de bajo espesor y debe utilizarse sobre mezclas que presentan ahuellamientos o fisuración pero en buenas condiciones estructurales para poder considerar su aporte. Se necesita tener adherencia con el sustrato para tener soporte estructural. Algunas referencias marcan que la adherencia lograda durante la construcción decae a lo largo del tiempo [1].

La adherencia 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 [2]. Según Turatsinze et al [2] la pérdida de adherencia desde el punto de vista mecánico del comportamiento del compuesto se debe a dos causas: las cargas mecánicas externas y los cambios en longitud entre el sustrato y el overlay. En ambos mecanismos la pérdida de adherencia se inicia preferentemente en las discontinuidades de la capa de refuerzo, bordes, fisuras y juntas.

El efecto de las cargas de tránsito se observa en la Figura 2. Bajo el paso de las cargas existe un momento en el cual el refuerzo de hormigón se ve sometido a esfuerzos de tracción en la parte superior. Estos esfuerzos en coincidencia con una fisura o junta y debido a la diferente respuesta que ofrecen el overlay de hormigón y el sustrato

de concreto asfáltico, favorecen el despegue entre capas y, debido al efecto cíclico de las cargas, dicha fisura en la interfaz progresa en el tiempo.

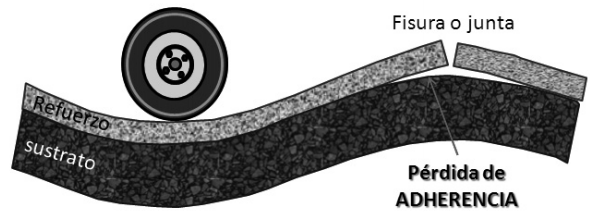


Figura 2. Efecto del tránsito sobre el compuesto.

El despegue por variaciones de longitud en el sustrato y el overlay se asocia principalmente a la fisuración del refuerzo por cambios de temperatura; la pérdida de adherencia, a su vez, favorece el crecimiento de fisuras en el overlay.

Ya sea por efecto de las cargas o por los cambios de longitud, Turatsinze et al [2] indican que la causa del despegue se debe al desarrollo de tensiones perpendiculares de corte ( $\tau_{\text{corte}}$ ) en la interfaz sustrato-overlay debido a que se genera un momento de “peladura” (peeling) como se observa en la Figura 3.

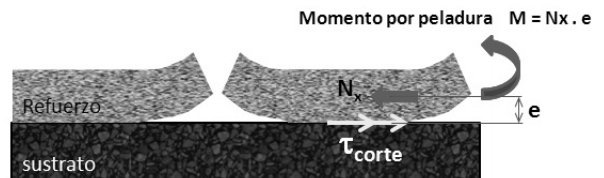


Figura 3. Solicitaciones que causan la pérdida de adherencia

El uso de Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) aparece como una alternativa para realizar el overlay de refuerzo, 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 constructivas como sobre eventuales fisuras reflejas o de contracción. Esto permite reducir el espesor

del refuerzo, incrementar la vida en servicio y las prestaciones generales del pavimento.

La acción de las fibras depende como es lógico del tipo y contenido de refuerzo, pero también puede variar en el compuesto con respecto a la respuesta observada en ensayos normalizados de HRF. Puede modificarse debido al cambio en la forma de propagación de la fisura al llegar a la interfaz overlay-sustrato, por la diferencia de rigidez entre hormigón y concreto asfáltico que implica un esfuerzo diferente para un mismo giro (apertura de fisura), por las modificaciones en la rigidez del concreto asfáltico por efecto de la velocidad de deformación o la temperatura, por el grado de adherencia que exista en la interfaz, o ante la aplicación de cargas repetidas, entre otras.

En este sentido resulta de interés valorar experimentalmente el comportamiento del compuesto sustrato-overlay. Este trabajo muestra experiencias realizadas con el fin de desarrollar una forma de evaluación del efecto de la incorporación de las fibras en la respuesta mecánica en flexión de probetas compuestas sustrato-overlay. Se comparan overlays de hormigón sin fibras con los realizados con hormigones reforzados con macrofibras sintéticas y con fibras de acero, todos ellos aplicados sobre un sustrato de concreto asfáltico. Asimismo se realizaron ensayos de corte para evaluar la adherencia entre capas.

### **Algunos antecedentes sobre el uso de fibras en overlays**

El estudio de la adherencia en la interfaz overlay-sustrato ha sido motivo de diversos trabajos [3-7]. Turatsinze y Tran [3-5] analizaron la respuesta en flexión de compuestos de HRF como refuerzo de sustratos de hormigón simple o sobre una viga de acero hueca que simula un sustrato de rigidez equivalente. Su investigación se orienta a la reparación o refuerzo de estructuras de hormigón armado. Entre sus conclusiones destacan: a) que el fenómeno de traba mecánica (interlocking) gobierna la fisuración del overlay

y la propagación de fisuras en la interfaz, b) que existe un efecto significativo de la contracción por secado en la aparición de fisuras y en su velocidad de propagación y que este proceso reduce la durabilidad de la reparación, c) que el refuerzo con fibras mejora la durabilidad de overlays delgados a partir de una reducción de la velocidad de crecimiento de fisuras y d) que una menor rigidez y una mayor resistencia del overlay favorece la adherencia y durabilidad al igual que la resistencia a tracción entre overlay y sustrato lo que enfatiza la importancia de una preparación adecuada de la superficie a tratar. También indican que un ensayo monotónico en flexión no evidencia todos los efectos beneficiosos que generan las fibras ya que, además del control de fisuras de contracción y retardo del crecimiento de fisuras en la interfaz, las fibras aún en bajas dosis son capaces de transferir esfuerzos que limitan el crecimiento de fisuras por fatiga mejorando la respuesta en comparación con un refuerzo de hormigón simple.

Por otro lado los resultados de Fabien Perez et al [6], que estudiaron el efecto de la adherencia entre material de reparación y sustrato, indican que una mejora de la rugosidad y adherencia no siempre asegura una respuesta monolítica y que, si bien la adherencia es importante, por encima de cierto grado de rugosidad decrece rápidamente el riesgo de pérdida de adhesión.

Tayeh et al [7] estudiaron la adherencia de un HRF de ultra alta performance para uso como reparación de estructuras de hormigón en ensayos de corte y tracción directa. Emplearon un hormigón simple como sustrato que fue sometido a diferentes preparaciones de la superficie que actúa como interfaz, previo a la colocación del HRF. Sus resultados muestran que la preparación de la superficie del sustrato es altamente recomendable para obtener una mejor adherencia mecánica del compuesto.

Ya en el campo de la ingeniería vial una síntesis de uso de whitetopping fino y ultra fino que data del 2004 [8] muestra que gran parte de las

obras realizadas incorporaron fibras en la capa de reparación; también indica que existe un óptimo en la relación de costos considerando contenido de fibras y separación de juntas. A la vez consigna que las fibras otorgan beneficios reduciendo la permeabilidad, minimizando el ancho de fisuras, reduciendo las saltaduras superficiales e incrementando la resistencia al desgaste. Entre las fibras más utilizadas aparecen las de polipropileno fibriladas, poliolefinas monofilamento y, en menor porcentaje, fibras de acero.

En otro extenso reporte Cervantes y Roesler [9] indican que el uso de macrofibras sintéticas aumenta la vida en fatiga a partir de una mayor capacidad y eficiencia en la transferencia de cargas en las juntas con respecto a las losas de hormigón simple. Al mismo tiempo se previenen los movimientos entre losas adyacentes. En otro trabajo se muestra que la tecnología de hormigones autocompactantes con fibras sintéticas también puede aplicarse al refuerzo mediante capas ultrafinas [10]. Finalmente Bordelon and Roesler [11] presentan un método de diseño para overlays ultrafinos donde se aprecia una significativa contribución de la incorporación de fibras.

## METODO DE EVALUACIÓN

El método estudiado consiste básicamente en un ensayo de flexión en tres puntos ubicando el sustrato en la zona comprimida y el overlay en la parte traccionada. Para localizar la falla se realiza una entalladura en el overlay y se ubica sobre la misma un extensómetro tipo clip gage para medir la apertura de fisura y al mismo tiempo controlar el ensayo. A la vez se registran las deformaciones en dirección vertical a la altura de la interfaz sustrato-overlay a través de un LVDT, con el fin de observar el desarrollo de fisuras.

### Fabricación de las probetas

Se elaboraron probetas prismáticas compuestas de 400 mm de largo, 100 mm de ancho y 100 mm de altura. Los prismas constan de dos capas de igual

espesor, aproximadamente 50 mm, un sustrato de concreto asfáltico y un overlay de hormigón. Para fabricarlas se moldearon placas de 300 x 400 x 50 mm de concreto asfáltico en un compactador de placa según EN 12697-33 [12]. Luego las placas fueron cortadas en prismas de aproximadamente 100 mm de ancho sobre los que se moldeó el hormigón. En la Figura 4 se observa un esquema de este proceso y una fotografía de la viga compuesta.

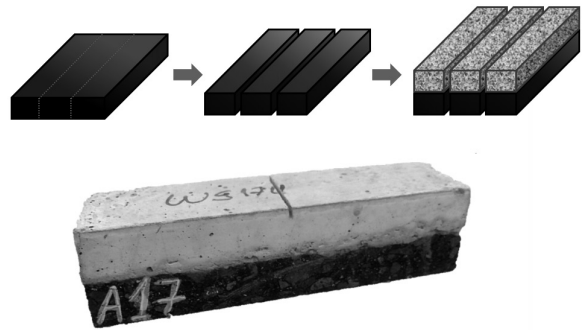


Figura 4. Proceso de elaboración de las vigas compuestas.

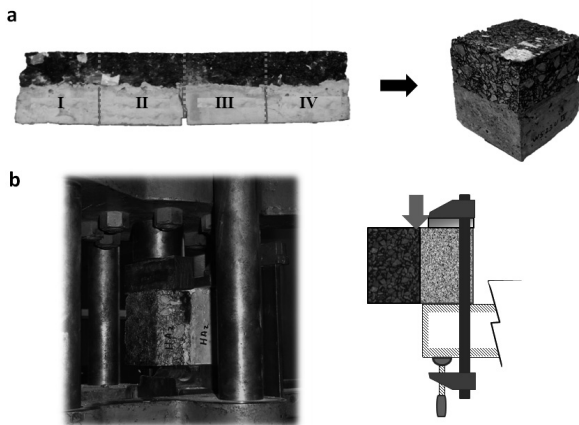
Los prismas compuestos fueron entallados en la zona correspondiente al overlay de hormigón con una profundidad de 10 mm, simulando una situación de carga como la que muestra la Fig. 2. Los prismas se ensayaron a flexión con carga al centro ubicando la entalladura en el centro de la cara traccionada en coincidencia con el punto de aplicación de la carga. Para el control del ensayo se empleó un clip gage que registra la apertura de fisura estableciendo una velocidad inicial de 0,05 mm/min, una vez alcanzados 0,3 mm de apertura la velocidad se incrementó a 0,2 mm/min. Simultáneamente se ubicó un LVDT para medir los movimientos en dirección vertical en la interfaz sustrato–overlay a un lado del centro de la probeta y apreciar posibles fallas de adherencia entre las capas. La Figura 5 muestra el aspecto de las probetas y su disposición en la máquina de ensayo.

Finalizados los ensayos de flexión y para evaluar de algún modo la adherencia en la interfaz overlay – sustrato, se realizó un ensayo de resistencia al corte sobre elementos obtenidos a partir de las

vigas compuestas. La Figura 6 muestra algunos detalles del procedimiento. Los resultados de ensayo se discriminaron entre probetas internas (II y III) y externas (I y IV) para contemplar posibles diferencias de adherencia entre la zona cercana a la fisura donde debería empezar el desprendimiento, y la zona más alejada.



**Figura 5.** Ensayo de flexión sobre prismas compuestos sustrato-overlay.



**Figura 6.** Ensayos de corte sobre la interfaz sustrato-overlay

A la misma edad a la cual se ensayaron las probetas compuestas overlay-sustrato se realizaron ensayos complementarios para caracterizar tanto el overlay como el sustrato.

Sobre cada uno de los hormigones empleados como overlay se evaluó la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad mediante los ensayos habituales utilizando en este caso cilindros de 100x200 mm. Además se evaluó la respuesta a flexión sobre cada overlay siguiendo los lineamientos generales de la norma EN14651 para hormigones con fibras [13] empleando vigas pequeñas, de similar tamaño al de los prismas compuestos: 105 mm de altura, 75 mm de ancho y 430 mm de largo. De este modo se podrá comparar la respuesta de los prismas compuestos con la de prismas de HRF ensayados bajo una configuración de carga similar. A los prismas de hormigón se les realizó una entalladura de 18 mm en la cara traccionada y fueron ensayados con carga central y 350 mm de luz entre apoyos. 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 ( $f_{max}$ ) 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 en el ensayo EN14651).

Para caracterizar el sustrato de concreto asfáltico se hicieron ensayos tradicionales aplicados en ingeniería vial: módulo dinámico, estabilidad Marshall y resistencia a tracción indirecta. Pero además, y considerando que el sustrato asfáltico trabajaría en compresión al flexionar la probeta compuesta y que se necesitaría este dato para modelar la respuesta del compuesto, se implementaron ensayos de compresión con medidas de la deformación axial sobre los laterales de las muestras a una velocidad similar a la que estaría sometido el sustrato de la viga compuesta en el ensayo de flexión. En base a las medidas de deformación se calculó un “módulo de elasticidad estático” siguiendo un criterio semejante al utilizado en hormigón pero sin realizar ciclos

de carga. La Figura 7 muestra detalles de dichos ensayos y una curva típica obtenida en compresión estática.

**Algunas pruebas preliminares**

Para ajustar aspectos de la metodología de ensayo como las velocidades de carga e instrumentación

del ensayo, en una etapa previa se realizaron probetas compuestas aplicando diferentes tipos de overlay tanto sobre sustratos de hormigón simple como de concreto asfáltico. Por ejemplo la Figura 8 izquierda compara la respuesta de un overlay con 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero tipo hooked end con la de una probeta compuesta de iguales dimensiones que utiliza hormigón simple como

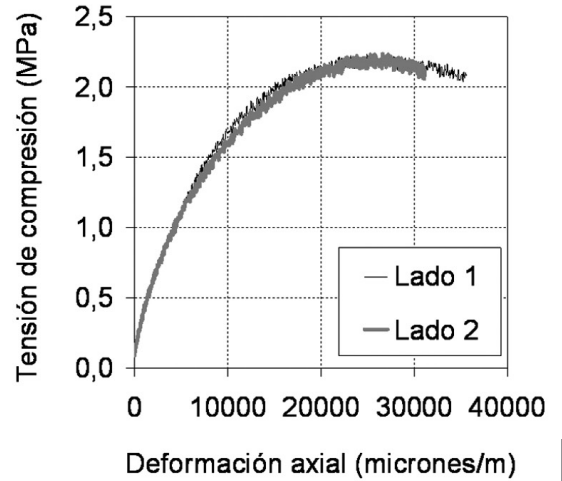
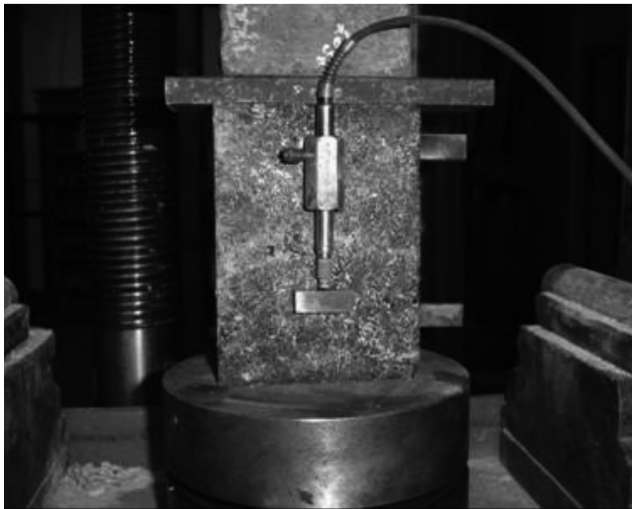


Figura 7. Ensayo de compresión sobre el sustrato de concreto asfáltico.

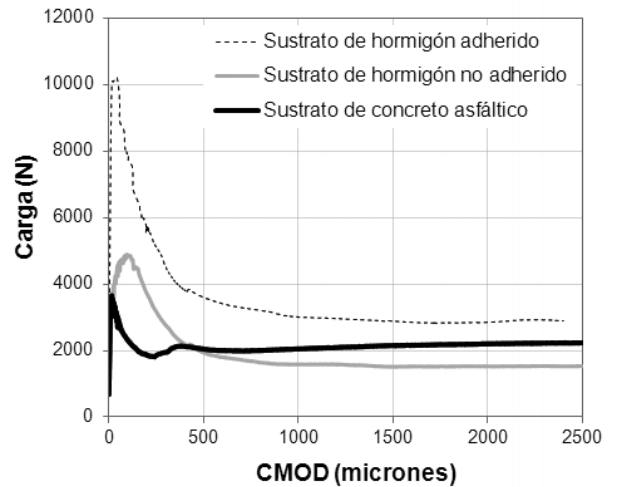
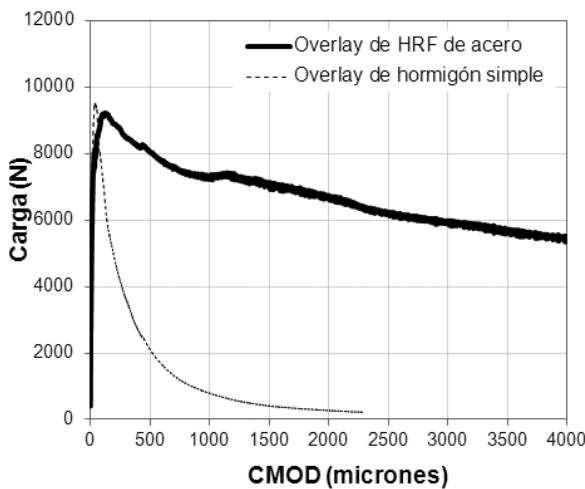


Figura 8. Experiencias preliminares Izquierda: Respuesta en flexión de probetas compuestas sobre un sustrato de hormigón simple reforzadas con un overlay de hormigón simple y con el mismo overlay reforzado con 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero tipo hooked end. Derecha: Curvas carga – COD de overlay con 3,5 kg/m<sup>3</sup> de macrofibras sintéticas aplicados sobre distintos sustratos

overlay. En otro ajuste se comparó la respuesta de un overlay con 3,5 kg/m<sup>3</sup> de macrofibras sintéticas (HRFS) aplicado sobre un sustrato de hormigón simple adherido, sobre el mismo sustrato pero eliminando la adherencia mediante un film plástico y sobre un concreto asfáltico (CA). En la Figura 8 derecha se aprecia el efecto de la falta de adherencia. También se verifica como era de esperar una menor capacidad de carga en la probeta compuesta con sustrato de CA, de menor rigidez, pero es interesante notar que a diferencia de los sustratos de hormigón donde, como es habitual en HRFS, la carga disminuye a lo largo del postpico hasta estabilizarse en un valor relativamente constante, en el caso del CA a medida que crecen las deformaciones comienza a crecer la capacidad residual.

## EXPERIENCIAS

### Materiales y mezclas

Se prepararon vigas compuestas empleando tres overlays caracterizados por una respuesta postpico marcadamente diferente, todos ellos a partir del mismo hormigón de base: el hormigón simple (HB), un HRF incorporando 3kg/m<sup>3</sup> de macrofibras sintéticas (HRFS) de 60 mm de largo y 0,62 mm de diámetro y un HRF con 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero tipo hooked end (HRFA) de 35 mm de largo y 0,55 mm de diámetro. Las vigas compuestas

sustrato overlay se identifican respectivamente como B, FS y FA.

Como sustrato se empleó un Concreto Asfáltico en Caliente (CAC), tamaño máximo de agregado de 19 mm, elaborado con un asfalto convencional CA-30 (penetración de 47 dmm, punto de ablandamiento de 54,8 °C y una viscosidad cinemática a 60 °C de 3350 dPa.s), dos agregados gruesos (6-20 mm y 6-12 mm), arena de trituración y cal. El diseño de esta mezcla se hizo a partir del método Marshall, resultando un porcentaje óptimo de asfalto de 5 %, una densidad de 2,389 g/cm<sup>3</sup> y un porcentaje de vacíos de 4,1 %.

La Tabla 1 muestra las proporciones de las mezclas.

### Caracterización de los overlays y el sustrato

Para caracterizar los hormigones utilizados como overlays se realizaron ensayos de compresión y flexión.

La resistencia a compresión del hormigón de base sin fibras (HB) resultó igual a 37,3 MPa y el módulo de elasticidad igual a 27,2 GPa. En el caso de los HRF los valores fueron, como es lógico, similares alcanzado una resistencia a compresión y módulo de elasticidad de 33,0 MPa y 26,4 GPa y de 38,0 MPa y 26,1 GPa para el HRFS y el HRFA respectivamente.

Tabla 1. Materiales utilizados.

Overlay de hormigón	HB	HRFS	HRFA	Sustrato de concreto asfáltico	
Materiales	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	Materiales	(%)
Agua		157		Asfalto	5,0
Cemento		259		Ag. Grueso (6-20 mm)	23,7
Filler		175		Ag. Grueso (6-12 mm)	28,5
Ag. Fino		735		Ag. Fino (0-6 mm)	40,9
Ag. Grueso (6-12 mm)		865		Cal	1,9
Superfluidificante		2,5		-	-
Fibras de acero	-	-	40	-	-
Fibras sintéticas	-	3	-	-	-



En cuanto a la capacidad residual, la Figura 9 presenta curvas típicas obtenidas en ensayos de flexión realizados sobre los hormigones usados como overlays. En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos como promedio de tres vigas de cada hormigón. La tensión de primera fisura  $f_L$  como era de esperar fue similar en los tres casos ya que depende de la resistencia del hormigón de base. En los valores de la tensión máxima y de las resistencias residuales se observa el diferente comportamiento de los HRF, una respuesta con endurecimiento en el caso de las fibras de acero mientras que en el hormigón con macrofibras sintéticas luego de la primera fisura la capacidad de carga disminuyó en forma continua hasta una tensión residual del orden del 30% de la carga de fisuración. Como es lógico el hormigón simple presentó una capacidad de carga residual despreciable

overlay de hormigón simple es cualitativamente similar a la de una viga del mismo hormigón (ver HB, Figura 9). En cambio en el caso de la viga FS con el overlay de HRFS es interesante observar que, luego de la fisuración de la matriz, las tensiones residuales aumentan progresivamente hasta casi un 70 % de la tensión de primera fisura

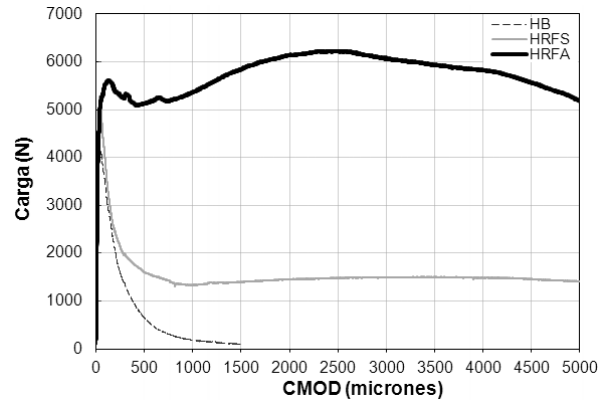


Figura 9. Curvas típicas obtenidas a partir de ensayos de flexión realizados sobre los hormigones usados como overlays.

Sobre el concreto asfáltico utilizado como sustrato se obtuvieron los siguientes resultados: módulo dinámico a 20°C  $E_d=7.453$  MPa, estabilidad Marshall  $E=15,3$  kN y resistencia a tracción indirecta  $RTI=1.448$  kPa. En los ensayos realizados para estimar la respuesta en compresión se obtuvieron como resultados una resistencia del orden de 2,3 MPa y un “módulo de elasticidad estático” de 1,5 GPa.

**Análisis de los resultados**

La Figura 10 compara curvas típicas carga-CMOD (apertura de fisura) correspondientes a las vigas compuestas sustrato-overlay. Se aprecia con claridad la contribución de las fibras; el comportamiento de la viga compuesta B que tiene

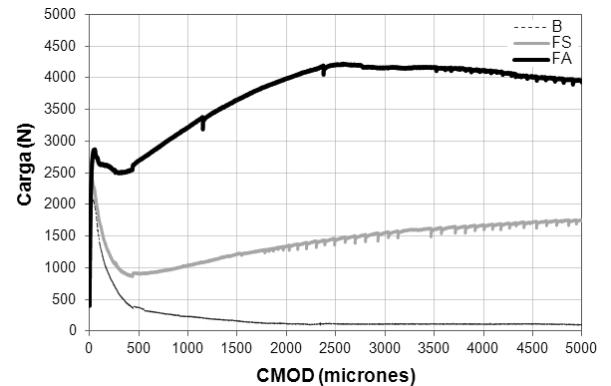


Figura 10. Curvas Carga-CMOD.

Tabla 2. Caracterización en flexión de los hormigones aplicados como overlays.

Viga	$f_L$ (MPa)	$f_M$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R2}$ (MPa)	$f_{R3}$ (MPa)	$f_{R4}$ (MPa)
HB	4,7	4,7	0,7	0,1	0	0
HRFS	4,8	4,8	1,6	1,5	1,6	1,7
HRFA	5,0	5,6	4,0	4,8	5,1	5,1

en lugar de permanecer la capacidad residual relativamente constante como ocurre en el propio HRFS (Figura 9). Esto que ya había sido observado en las experiencias previas difiere de lo que ocurre al aplicar un overlay con macrofibras sintéticas sobre un sustrato de hormigón donde no existe incremento de la capacidad de carga durante el postpico (Figura 8 derecha). Estas mejoras progresivas en la capacidad de carga residual de las vigas compuestas 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. El comportamiento de la viga FA con un overlay reforzado con fibras de acero fue también similar al del respectivo hormigón (HRFA, Figura 9); sin embargo la respuesta residual observada fue comparativamente superior a la que se encontró en estudios previos con overlays reforzados con el mismo tipo y contenido de fibras aplicados sobre sustratos de hormigón (Figura 8 izquierda). De esta observación, es posible inferir que la capacidad residual del HRF se incrementará al reforzar sustratos más deformables (tal el caso del CA) con respecto a sustratos de hormigón y cuando la adherencia demore la propagación de la fisura a lo largo de la interfaz.

La Figura 11 representa la variación de la deformación vertical que registra el LVDT en la zona de interfaz con respecto al crecimiento de la apertura de fisura (CMOD). Es posible observar

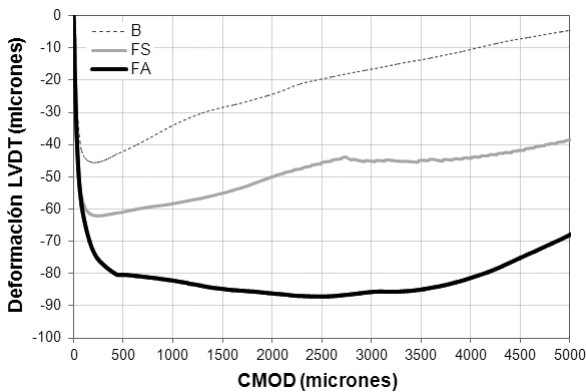


Figura 11. Curvas LVDT-CMOD.

que el LVDT se comprime rápidamente hasta alcanzar la carga pico, luego cuando se produce una apertura de fisura (giro) importante en el overlay comienza a descomprimirse en función de la carga aplicada, pero sin llegar a estar traccionado. Con el overlay de hormigón sin fibras (B) cuando la carga empieza a caer la deformación del LVDT varía poco hasta llegar a una carga inferior a los 500 N (coincidente con CMOD igual a 500 micrones) y luego se descomprime rápidamente. En el caso de la viga compuesta FS, que posee como overlay HRFS, cuando se alcanza la menor carga postpico (correspondiente a un CMOD mayor a 600 micrones) el LDVT empieza a descomprimirse. En las probetas FA el LVDT recién comienza a descomprimirse a partir de una apertura de fisura mucho mayor, aproximadamente de 2500 micrones.

Si bien el comportamiento descrito no parece deberse a una pérdida de adherencia entre el sustrato y el overlay, en algunos casos se observó el inicio de fisuras en la interfaz sustrato-overlay (Figura 12).

Para comparar los resultados obtenidos en los ensayos de flexión sobre las vigas compuestas sustrato-overlay en la Tabla 3 se indican las capacidades residuales como valores relativos a la carga de primera fisura (primer pico, P1ª fisura). A la vez y para asimilarlos al criterio utilizado

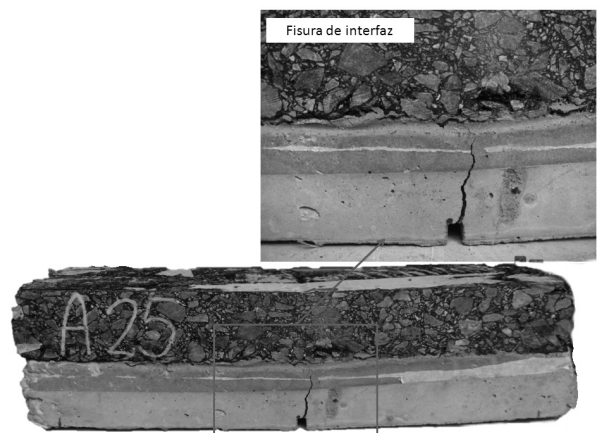


Figura 12. Detalle de una probeta luego de ser ensayada.

para caracterizar al HRF (ver Tabla 2), se toman como puntos característicos los correspondientes a la carga máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ), y a las rotaciones (giros) utilizados para definir las tensiones residuales, que se corresponderían, en una viga ensayada según norma EN 14651, con aperturas de fisura iguales a 0,5, 1,5, 2,5 y 3,5 mm ( $P_{0,5}$ ,  $P_{1,5}$ ,  $P_{2,5}$  y  $P_{3,5}$ ). Se aprecia que comparadas con las vigas de hormigón de cada overlay de referencia, la capacidad residual crece en las vigas compuestas en especial cuando el overlay se realizó con macrofibras sintéticas, donde la misma casi se duplica.

Con el objetivo de evaluar el nivel de adherencia en la interfaz sustrato-overlay se realizaron ensayos de resistencia al corte de elementos obtenidos de las vigas compuestas luego del ensayo de flexión. En la Tabla 4 se resumen los resultados de los ensayos de adherencia para las dos zonas planteadas (externa e interna). En el caso de los overlays realizados con HRF la resistencia al corte fue ligeramente menor en la zona interior, con el hormigón simple el resultado fue el opuesto. Sin embargo, la dispersión propia del ensayo no permite concluir que la diferencia sea significativa. Como hecho particular en las fotos de la Figura 13 se puede apreciar que en los overlays de HRF parte del sustrato quedó adherido al overlay, no así en el caso del overlay de hormigón simple. Es posible que las fibras al restringir las deformaciones, eviten el desprendimiento del HRF del sustrato asfáltico.

Tabla 4. Resultados de los ensayos de corte.

Zona	$\tau_{prom}$ (MPa)	
	Externa	Interna
B	0,86	0,92
FS	0,72	0,67
FA	0,98	0,94

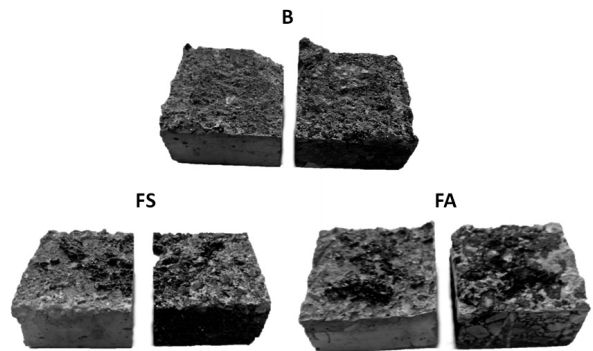


Figura 13. Fotos de probetas luego del ensayo de corte.

### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En ensayos de flexión se comparó la respuesta mecánica de probetas compuestas por un sustrato de concreto asfáltico y un overlay de hormigón. El método empleado aplica cargas en tres puntos; el overlay se ubica en la zona traccionada y lleva una entalladura en el centro sobre la que se fija un

Tabla 3. Comparación entre la capacidad residual observada en los ensayos de flexión sobre vigas compuestas sustrato-overlay y vigas de hormigón. Valores de carga relativos a la carga de primera fisura.

	$P_{1^{\circ} \text{ fisura}}$	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{0,5}$	$P_{1,5}$	$P_{2,5}$	$P_{3,5}$
<b>Vigas compuestas overlay-sustrato de concreto asfáltico</b>						
B	1	1	0,20	0,08	0,05	0,05
FS	1	1	0,38	0,50	0,59	0,67
FA	1	1,44	0,89	1,24	1,41	1,43
<b>Vigas de hormigón simple y reforzado con fibras</b>						
HB	1	1	0,15	0,02	0,00	0,00
HRFS	1	1	0,33	0,31	0,33	0,35
HRFA	1	1,12	0,80	0,96	1,02	1,02

extensómetro tipo clip gage para la medición de la apertura de fisura y el control del ensayo. Una vez finalizado, el ensayo de flexión se complementa con ensayos de corte que se realizan sobre bloques aserrados en dirección transversal, con el fin de valorar la adherencia de la interfaz sustrato-overlay.

La metodología adoptada permitió comparar y diferenciar con claridad la respuesta de overlays de hormigón simple y overlays reforzados con fibras de acero y con macrofibras sintéticas. Entre las observaciones de mayor interés surge que en el caso de las vigas compuestas con overlay reforzado con macrofibras sintéticas, a diferencia de lo que ocurre en vigas de hormigón, el postpico muestra un aumento progresivo y muy importante de la capacidad de carga residual, que llega a alcanzar casi un 70% de la tensión de primera fisura. El comportamiento de las vigas compuestas con overlay reforzado con fibras de acero fue cualitativamente similar al de las respectivas vigas de hormigón reforzado con fibras de acero, pero también se observó mayor crecimiento de la capacidad residual verificando un decrecimiento

en la carga residual para aperturas de fisura mayores a 2,5 mm.

Los ensayos de corte no evidenciaron diferencias significativas de adherencia entre los compuestos estudiados, sin embargo se apreció que, a diferencia del hormigón simple, en el caso de los overlays con fibras parte de la matriz del sustrato quedó adherida en el overlay.

Además de apreciar el efecto del uso de diferentes tipos y contenidos de fibras, el método permitiría comparar compuestos con diferentes grados de adherencia en la interfaz sustrato–overlay, como los provocados por distintas rugosidades (escarificado) o por efecto de la falta de limpieza del sustrato (una situación frecuente en obra). A la vez la configuración de ensayo adoptada parece apropiada para evaluar el efecto de la velocidad de deformación, la aplicación de ciclos de carga o cargas repetidas de diferente frecuencia (fatiga), así como, variando el acondicionamiento previo de las probetas podría evaluarse la respuesta del compuesto dentro de un rango considerable de temperaturas.

## REFERENCIAS

- 1.- Chunhua Han (2005) Synthesis of Current Minnesota Practices Of Thin and Ultra-Thin Whitetopping. Minnesota Department of Transportation Report. 43 páginas.
- 2.- 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.
- 3.- Turatsinze A., Granju J., Sabathier V y Farhat H. (2005). Durability of bonded cement-based overlays: effect of metal fibre reinforcement. *Materials and Structures* 38:321-327.
- 4.- Tran Q. T., Toumi A. y 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.
- 5.- Tran Q. T., Toumi A. y Turatsinze A. (2007). Modelling of debonding between old concrete and overlay: fatigue loading and delayed effects. *Materials and Structures* 40:1045–1059.
- 6.- Perez F., Bissonnette B. y Gagne R. (2009). Parameters affecting the debonding risk of bonded overlays used on reinforced concrete slab subjected to flexural loading. *Materials and Structures* 42:645–662.
- 7.- Tayeh B.A., Abu Bakar B. H. Megat Johari M. A. (2013). Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra high performance fiber concrete repair composite. *Materials and Structures* DOI 10.1617/s11527-012-9931-1

- 8.- R.O. Rasmussen and D.K. Rozycki, NCHRP Synthesis of Highway Practice 338: Thin and Ultra-Thin Whitetopping (Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 2004).
- 9.- Victor Cervantes and Jeffery Roesler “Performance of concrete pavements with optimized slab geometry”, Research Report ICT-09-053, August 2009, Illinois Center for Transportation Series No. 09-053 UILU-ENG-2009-2034 ISSN: 0197-9191.
- 10.- Bordelon, A. C., and Roesler, J. R. “Flowable Fibrous Concrete for Thin Concrete Inlays” Transportation and Development Institute Congress 2011 American Society of Civil Engineers.
- 11.- Bordelon, A. C., and Roesler, J. R. (2011). “Design with Fiber-Reinforcement for Thin Concrete Overlays Bonded to Asphalt.” ASCE Journal of Transportation Engineering, 2012.138:430-435.
- 12.- EN 12697-33 (2003). Bituminous mixture: test methods for hot mix asphalts, part 33: specimen prepared by roller compactor.
- 13.- EN 14651 (2005): Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 18p.
- 14.- Giaccio G., Tobes, J. M., and Zerbino R. “Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete” Cement and Concrete Composites, 2008, V 30 N 4, pp. 297-306.