



★ **Primer Premio del ICPA** ★

El siguiente trabajo fue presentado en el marco del XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito organizado por la Asociación Argentina de Carreteras, la Dirección nacionalidad de Vialidad y el Consejo Vial Federal realizado entre el 22 y 26 de octubre de 2012 en la ciudad de Córdoba.

Durante el evento que reunió a más de 1.400 congresistas provenientes de 15 países, se presentaron alrededor de 200 trabajos técnicos realizados por profesionales de Argentina, Brasil, Bolivia, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, España, México, Paraguay y Venezuela.

XVI CONGRESO ARGENTINO DE VIALIDAD Y TRÁNSITO

OCTUBRE DE 2012 – CÓRDOBA, ARGENTINA

ÁREA TEMÁTICA 3: PAVIMENTOS

Nº DE ORDEN: 109

NOVEDOSA REPAVIMENTACIÓN EN URUGUAY MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UNA CAPA ADHERIDA DE HORMIGÓN CON FIBRAS SINTÉTICAS ESTRUCTURALES EMPLEANDO TECNOLOGÍA DE ALTO RENDIMIENTO

AUTORES: David Fontáns - Héctor Machín - Darío Miguez - Álvaro González - Daniel Violini
Mariano Pappalardi

INSTITUCIÓN: Grinor S. A. - Hormigones Artigas S. A. - Cementos Avellaneda S. A.

PAÍS: Uruguay – Argentina

RESUMEN

El mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos que integran la Red Vial de un país, es un recurso estratégico para sostener el crecimiento. Para tal fin, se vienen desarrollando diversos métodos de pavimentación y materiales, que pueden ofrecer la mejor solución técnico-económica de un proyecto.

El objetivo del presente trabajo es transmitir la experiencia adquirida durante la rehabilitación de la Ruta 24 en Uruguay, la cual consistió en la aplicación de un hormigón reforzado con macro fibras sintéticas, destinado a un whitetopping del tipo delgado, con adherencia a la capa de concreto asfáltico existente, donde se destaca además la inclusión en el contrato de exigencias singulares de rugosidad, por lo que se empleó en obra un perfilómetro pivotante Dipstick para evaluar la regularidad superficial de cada subtramo construido.

Se han abordado los aspectos fundamentales que previamente se tuvieron en cuenta durante el relevamiento de la calzada asfáltica, la caracterización del hormigón reforzado con fibras (HRF), y los resultados de los ensayos obtenidos durante el control de calidad en obra, donde se pudo superar con éxito las dificultades adicionales que se plantearon por el solo hecho de la incorporación de las fibras.

Como desafío final, se trabajó en forma rigurosa sobre un ítem clave del proyecto, como lo es la adherencia entre la nueva capa del HRF y el pavimento preexistente. Esto se logró a partir de la aplicación de un método de trabajo sistemático para la intervención de la capa asfáltica, el cuál consistió en el fresado, texturizado, hidrolavado, y el mantenimiento de la superficie limpia mediante el soplado con aire comprimido, previo al hormigonado.

Cabe señalar que la adherencia es un pilar fundamental en el desempeño de este tipo de pavimentos, el cual ya se encuentra habilitado al tránsito, y está siendo monitoreado, encontrándose actualmente en perfectas condiciones.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es transmitir la experiencia adquirida durante la rehabilitación de la Ruta 24 de Uruguay, entre los meses de Agosto de 2011 y Abril de 2012, donde se aplicó una capa delgada de hormigón con fibras sintéticas estructurales, con adherencia a la capa de concreto asfáltico existente.

Se han abordado los aspectos fundamentales que previamente se tuvieron en cuenta, como el relevamiento geométrico de la calzada, la irregularidad transversal, el bacheo y el proyecto altimétrico. También se mencionan aspectos correspondientes a la puesta en obra, como la gestión del tránsito, la preparación de la superficie de concreto asfáltico existente y la pavimentación con tecnología de alto rendimiento (TAR).

Finalmente se describen los resultados obtenidos durante el control de calidad en obra y el logro de una adecuada adherencia entre el hormigón reforzado con fibras (HRF) y el sustrato asfáltico, como así también las características superficiales de la calzada.

2. ANTECEDENTES

La Ruta 24 de Uruguay pertenece a la Red Vial Nacional, y recorre la zona del litoral uruguayo en la región Noroeste del país, enlazando las Rutas 2 y 3 desde Fray Bentos hasta Paysandú respectivamente, donde predomina el tránsito pesado agroforestal. En los últimos años esta actividad se ha incrementado en forma notoria, por lo que en el año 2010 surgió la necesidad de rehabilitar la ruta, y se llamó a licitación un primer tramo de 21,6 km, comprendido entre las Rutas 2 y 20 (figura 1). Se cotizaron dos alternativas de rehabilitación para una vida útil de 15 años, una mediante una nueva carpeta asfáltica y otra mediante el refuerzo con una capa adherida de hormigón con fibras sintéticas estructurales, resultando la oferta de esta última opción con un costo inferior al 10 %.

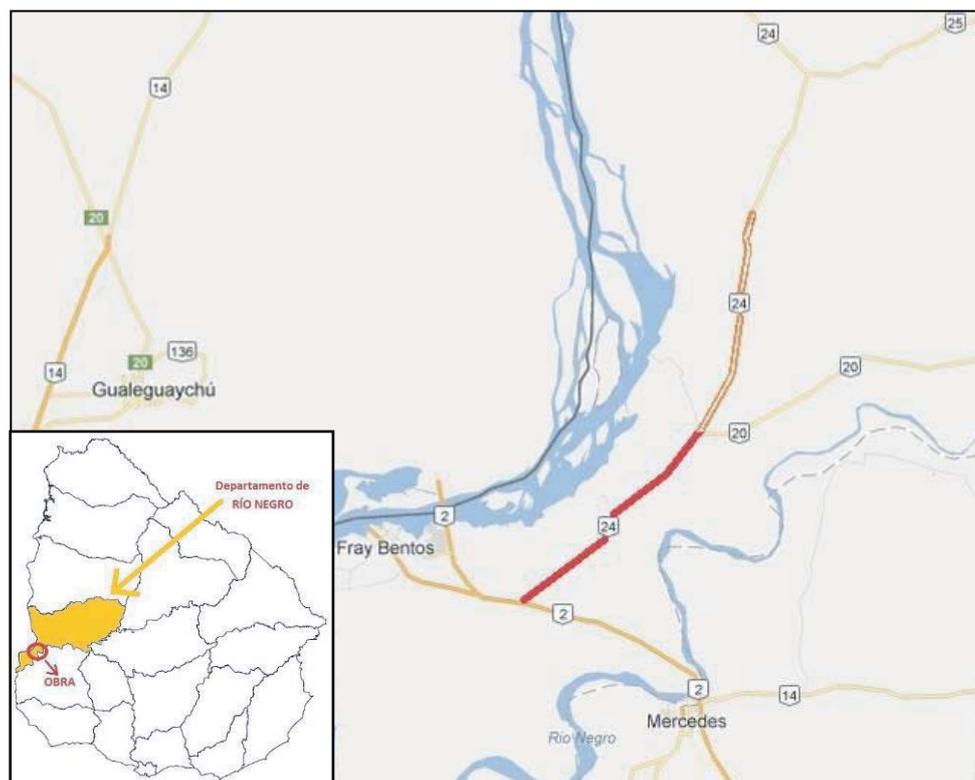


Fig. 1. Mapa de la Ruta 24 de Uruguay, destacando el tramo de obra y su futura ampliación.

2.1. WHITETOPPING

Dentro de las diversas técnicas de rehabilitación de calzadas asfálticas, existen aquellas en que el refuerzo estructural se realiza a través del recapado con hormigón, práctica que comúnmente se denomina “whitetopping”, y cuya clasificación depende del espesor de la capa de hormigón, además de asumir o no, adherencia entre ambas capas (tabla 1).

Inicialmente tuvo una clasificación original: convencional y ultra-delgado, según superara o no, los 10 cm de espesor⁽¹⁾. Posteriormente esta clasificación fue ampliada con una mención intermedia, incorporando el término de whitetopping delgado⁽²⁾.

Tabla 1. Clasificación del whitetopping, según el espesor de hormigón y la adherencia.

Whitetopping	Espesor de hormigón	Observaciones
Convencional (CW)	≥ 20 cm	No se asume adherencia con capa asfáltica
Delgado (TWT)	entre 10 cm y 20 cm	Se puede asumir adherencia, o no asumir
Ultra-Delgado (UTW)	entre 5 cm y 10 cm	Se asume adherencia con la capa asfáltica

CW: Conventional Whitetopping; TWT: Thin Whitetopping; UTH: Ultra-Thin Whitetopping.

Actualmente se sugiere reemplazar el término whitetopping por la sola mención de una sobrecapa de hormigón (concrete overlay)⁽³⁾, destacando el hecho de ser una capa adherida o no adherida.

2.2. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS (HRF)

La incorporación al hormigón de fibras estructurales discontinuas o discretas, le concede al material una serie de propiedades especiales, tanto en estado fresco como endurecido.

En el estado fresco, la incorporación de las fibras produce en el hormigón un incremento de la cohesión, una reducción de la trabajabilidad y puede modificar la exudación.

En el estado endurecido, la incorporación de las fibras modifica el comportamiento mecánico del hormigón, adquiriendo tenacidad y control del proceso de fisuración. La resistencia a la tracción se puede incrementar frente a cierta dosis y tipos de fibras estructurales, aunque dicha mejora tiene una magnitud de segundo orden frente a la tenacidad que adquiere el hormigón al mejorar su capacidad de deformación. La resistencia a compresión del hormigón, no cambia por el solo hecho de haber incorporado fibras.

La principal acción de las fibras comienza luego de la primera fisura, donde se inician los fenómenos de arrancamiento y deslizamiento fibra-matriz. Las fibras producen una acción de costura o puente a través de las fisuras, controlando su propagación y permitiendo la transmisión de esfuerzos, lo que confiere de esta manera una resistencia remanente del material (capacidad residual).

¹ AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION, *Whitetopping, State of the practice*, Engineering Bulletin EB210.02P, USA, 1998.

² 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.

³ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI Committee 325, *Concrete Overlays for Pavement Rehabilitation*, Report ACI 325.13R-06, USA, February, 2006.

3. ESTUDIOS PREVIOS

3.1. DISEÑO

Para determinar el espesor de la capa del HRF de acuerdo al tránsito previsto (15 millones de ejes equivalentes AASHTO) durante la vida útil adoptada (15 años), el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) de Uruguay, con el asesoramiento de Jeffery Roesler, adoptó un novedoso método de diseño desarrollado en Illinois, USA⁽⁴⁾, el cual considera la resistencia residual que le confieren las macro fibras al hormigón, entre otros parámetros de diseño. De esta manera, el proyecto resultó en una capa de HRF de 15 cm de espesor, con losas cortas de 1,8 m x 1,8 m, considerando además adherencia con la capa asfáltica, la cual luego de su tratamiento (fresado y texturizado) debe tener un espesor remanente mínimo de 12 cm⁽⁵⁾.

Se destacan dos particularidades sobre las juntas de este tipo de pavimento de hormigón, como lo es la ausencia de barras (sin pasadores en las juntas transversales y sin barras de unión en las juntas longitudinales), como así también la materialización de las juntas mediante un único corte delgado (aserrado primario), sobre el cual posteriormente no se realiza ningún tipo de sellado.

3.2. DESARROLLO DEL HORMIGÓN CON MACRO FIBRAS SINTÉTICAS

A partir de los parámetros de diseño adoptados para el cálculo del espesor de la capa de hormigón, se debió desarrollar un HRF que cumpla con los siguientes requisitos establecidos en el Pliego de Especificaciones Técnicas Particulares:

Resistencia a compresión media a la edad de 28 días = 35 MPa.

Módulo de Rotura media a la edad de 28 días = 5 MPa (725 psi).

Resistencia Residual 150⁽⁶⁾ media a la edad de 28 días = 1 MPa (20% del MR)

Requisito de habilitación rápida: MR = 3,8 MPa (550 psi)

En una primera etapa de desarrollo, se evaluaron en laboratorio diversos HRF donde se emplearon distintos tipos y dosis de fibras sintéticas estructurales (macro fibras), de diferentes orígenes (Argentina, Australia, Italia, Estados Unidos, Japón y China), al que se le sumaron las microfibras sintéticas, de amplia difusión para el control de la fisuración plástica⁷.

En base a dichos estudios se seleccionaron los materiales a emplear, principalmente la combinación cemento-aditivo y el tipo de fibras, y se continuó el desarrollo del HRF con el Dr. Ing. Raúl Zerbino en el LEMIT, lográndose obtener la siguiente dosificación (tabla 2), la cual demostró ser la mejor solución técnico-económica para ser implementada en la obra⁸.

⁴ FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, *Design and Concrete Material Requirements for Ultra-Thin Whitetopping*, Publication N° FHWA-ICT-08-016, USA, June 2008.

⁵ PASTORINI, Magdalena, *Experiencia en Uruguay: Proyecto de rehabilitación con Whitetopping en Ruta Nacional N° 24*, 8° Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo, Octubre 2011.

⁶ ASTM C 1609/C 1609M-07. *Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*, ASTM Standards, USA, 2007.

⁷ Vázquez, Esteban., *Hormigones reforzados con fibras*, 8° Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo, Octubre 2011.

⁸ MIGUEZ, D., GONZALEZ, A.C., 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*, 19ª Reunión Técnica de la AATH, Bahía Blanca, Argentina, 2012.

Tabla 2. Dosificación correspondiente al HRF para la rehabilitación de la Ruta 24.

Hormigón	HRF
Asentamiento objetivo a los 30 minutos (cm)	2 a 3
Aire incorporado (%)	2,0

Cemento Artigas CPN40 (Montevideo), granel (kg/m ³)	340
Agua (kg/m ³)	140
Arena natural fina (Río Negro) MF = 1,80 (kg/m ³)	235
Arena natural gruesa (Río Negro) MF = 3,20 (kg/m ³)	565
Piedra partida 5-20 granítica (Palmitas, Soriano) (kg/m ³)	570
Piedra partida 20-30 granítica (Palmitas, Soriano) (kg/m ³)	570
Aditivo Viscocrete Artigas (Sika) (kg/m ³)	2,05
Macrofibra sintética Barchip 54 (EPC) (kg/m ³)	2,7
Microfibra sintética FibroMac 12 (Maccaferri, Brasil) (kg/m ³)	0,6
Peso Unitario por unidad de Volumen (PUV) (kg/m ³)	2450
Relación agua/cemento	0,41

Nota: Las cantidades consignadas corresponden a los agregados en condición saturada y superficie seca (sss).

3.3. AUSCULTACIÓN DE LA CALZADA ASFÁLTICA EXISTENTE

La Ruta 24 se constituyó con una calzada asfáltica indivisa de dos carriles, uno para cada sentido de circulación, de 3,60 m de ancho y banquetas de 1,50 m (figura 2).

El paquete estructural original se conformó con 45 cm de material granular (base y subbases), más 15 cm de concreto asfáltico y carpeta, habiéndose efectuado su anterior rehabilitación entre los años 1999 y 2000.



Fig. 2. Estado de la Ruta 24 antes de ser rehabilitada (fotografía del 17/09/2010).

Con la premisa del diseño, para cumplir el espesor mínimo remanente del concreto asfáltico existente (12 cm), se realizó la auscultación del deterioro de la calzada, realizando un relevamiento topográfico detallado que permitió determinar el perfil transversal existente, con el fin de optimizar el posterior fresado de las crestas del ahuellamiento y acotar su profundidad a un máximo previsto de 25 mm (figura 3)⁹.



Fig. 3. Relevamiento de la calzada con perfilómetro transversal, nivel digital, regla y cuña.

Complementariamente, a través de pruebas de carga con camión del tipo C11, se definió por parte del Comitente las áreas a bachear en forma puntual, indicando además la profundidad que corresponde en cada caso, donde algunos baches pueden ser de profundidad parcial y otros de profundidad total. Dichas zonas de bacheo son marcadas para que la apertura del bache coincida con las juntas de contracción del HRF durante la pavimentación.

Dado que la especificación indica que los baches se deben ejecutar de hormigón, dependiendo de la profundidad de los mismos, para los casos de bacheo en espesor parcial el whitetopping podría ser del tipo delgado adherido o convencional, no considerando la adherencia en la interfaz con la superficie de apoyo en este último caso.

En ese sentido, el hormigón en la zona del bache puede alcanzar espesores de 20 a 25 cm, dependiendo del espesor adicional inducido por la geometría. Espesores mayores también se han alcanzado en situaciones puntuales, pero no ha sido lo habitual.

Dado que las zonas de bacheo se encuentran bien identificadas, es sencillo al momento del aserrado de las juntas, profundizar el corte para cumplir con la condición habitual de 1/3 del espesor de hormigón.

⁹ FONTANS, David, MACHIN, Héctor y GOMEZ, Diego, *Primera experiencia en ejecución de Whitetopping en la Red Vial Nacional*, 8° Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo, Octubre 2011.

4. CONSTRUCCIÓN

Para la realización del whitetopping rigen todas las prácticas constructivas del buen arte empleadas habitualmente durante la construcción de los pavimentos de hormigón.

Además, se implementaron las recomendaciones indicadas en la Guía de referencia de la American Concrete Pavement Association, correspondiente a las sobrecapas de hormigón⁽¹⁰⁾. En lo que refiere al HRF, la obra tiene como principal particularidad el efecto de las fibras en cada una de las tareas del hormigonado (elaboración y mezclado, transporte y colocación, compactación y terminación), considerando el empleo de Tecnología de Alto Rendimiento. Complementariamente, por ser un whitetopping adherido, además de ser clave el hecho de asegurar la adherencia, también hay que tener en cuenta en esta obra los efectos de una pavimentación por media calzada (reflejo del trabajo de juntas transversales, hormigón de habilitación rápida y gestión del tránsito).

4.1. GESTIÓN DEL TRÁNSITO DURANTE LA OBRA

Dado que la ruta se mantuvo habilitada al tránsito durante la obra, las especificaciones de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV) establecen que no es posible la ocupación de la vía en más de dos kilómetros. Por tanto, luego de pavimentada esta distancia en media calzada, fue necesario mover el tren de pavimentación a otro tramo, mientras el hormigón adquiere la resistencia necesaria para su habilitación.

El 90% de los trabajos se realizó con tránsito. Teniendo en cuenta que se trata de la ruta de Uruguay de mayor cantidad de camiones, se emplearon banderilleros que operaban las 24 hs., para regular el sentido del tránsito.

Durante el hormigonado, resulta fundamental la continuidad en el extendido, por tanto no solo interesa la cantidad de camiones, la distancia de transporte y la producción de planta, sino también, la coordinación entre los banderilleros para permitir la entrada del hormigón al área de pavimentación evitando demoras innecesarias.

4.2. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE ASFÁLTICA

Dado que el diseño de este tipo de pavimento consiste en una estructura compuesta formada por el asfalto preexistente y la nueva capa de hormigón, actuando en forma conjunta, se hace imprescindible la adherencia entre ambas capas.

A tales efectos, para asegurar dicha adherencia, se empleó un procedimiento simple pero de aplicación rigurosa, que consiste en conseguir sobre el pavimento asfáltico existente, una superficie rugosa y limpia, previa a la colocación del hormigón.

La primera tarea constructiva sobre la superficie asfáltica, consistió en el fresado de las crestas del ahuellamiento según los niveles que se obtuvieron a partir del relevamiento topográfico, lo cual permite optimizar el espesor de la capa del HRF que se va a aplicar, cumpliendo con su espesor mínimo de diseño (15 cm). Para esta tarea se empleó una fresadora Wirtgen 1000.

Posteriormente, se realizó el texturizado del ancho completo de la superficie asfáltica, siendo este el primer requisito para garantizar la hipótesis de adherencia de la capa del HRF, establecida en el proyecto. Para esta tarea se empleó una fresadora Wirtgen 500 con tambor texturizador, respetándose el espesor remanente mínimo de la capa asfáltica previsto en el diseño (12 cm).

¹⁰ NATIONAL CONCRETE PAVEMENT TECHNOLOGY CENTER, *Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements*, Second Edition, ACPA publication TB021-02P, USA, September 2008.

Luego de las tareas de fresado y texturizado que se llevan a cabo en los días previos a la pavimentación, cuando el hormigonado es inminente, se realiza la limpieza intensiva de la superficie asfáltica. Esta tarea es fundamental para conseguir el objetivo de adherencia con la capa del HRF.

Por lo general, la limpieza se realiza el día previo o el mismo día del hormigonado, mediante un barrido hidráulico con hidrolavadoras de alta presión, a razón de 40 l/min. Esto implica contar con un equipo con gran capacidad de almacenamiento de agua y los correspondientes dispositivos instalados en el mismo (figura 4).

Finalmente, una o dos horas antes que el hormigón tome contacto con la superficie de concreto asfáltico, se realiza el barrido con aire comprimido (figura 5). Esta tarea depende de las condiciones climáticas y del tránsito que circula por la senda adyacente, por lo que muchas veces se hace necesario mantener el barrido delante del tren de pavimentación, de forma de retirar el polvo que pudiera depositarse sobre la calzada texturizada. En caso de ser necesario, previamente se puede complementar la limpieza con un barrido mecánico con cepillo.



Fig. 4. Limpieza con hidrolavado (cisterna de 22 m³ con dos bombas independientes).



Fig. 5. Barrido con aire comprimido para liberar la superficie del polvo adherido.

4.3. ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN

Para la elaboración del hormigón se dispuso de una planta con mezcladora central de 2 m³ (tiempo de mezclado del orden de 50 segundos). Se obtuvo en forma holgada picos de producción de 60 m³/h (promedio 50 m³/h). Con dicha producción promedio, se pudo abastecer sin inconvenientes la sección de hormigonado (media calzada: ancho 3,60 m y espesor 0,15 m), hasta una velocidad de avance de la pavimentadota = 1,5 metros/minuto.

Uno de los puntos claves en la producción del hormigón, fue el empleo de un dosificador automático para las macro fibras, de origen austriaco, sumamente preciso y con una tecnología de avanzada nunca antes utilizada en la región, el cuál fue entregado en comodato por el proveedor de las fibras (figura 6).

A partir del empleo de este moderno equipamiento, se logró incorporar las fibras en forma uniforme, garantizando la distribución homogénea en el hormigón y evitar la formación de erizos durante el mezclado.



Fig. 6. Dosificador automático de las macro fibras, instalado en la planta de hormigón.

4.4. TRANSPORTE Y COLOCACIÓN DEL HORMIGÓN

El transporte del hormigón se realizó en camión volcador, con la carga que corresponde a la elaboración de tres pastones (6 m³) por viaje. Dado que la planta se instaló en la progresiva 9 km de la obra, la máxima distancia de transporte empleada fue de 12,5 km, y se tuvo la precaución de programar la obra para que dicha distancia no sea alcanzada en verano.

La variable clave es el tiempo de transporte y la pérdida de asentamiento que se obtiene en dicho lapso, frente a la condición climática reinante. Ante esta problemática, se destaca el buen desempeño del aditivo empleado (fabricado con policarboxilatos), con el cual se logró minimizar la pérdida de asentamiento y cumplir sin inconvenientes con el asentamiento objetivo al frente de pavimentación (2 a 3 cm).

Respecto a la influencia de las fibras sintéticas, cabe señalar que su incorporación favorece la cohesión del material, pero ante la segregación que se puede producir durante el transporte, su efecto es de segundo orden, frente a la incidencia que tienen, tanto el asentamiento como la distancia de transporte y la lisura del camino por el que se transita, por lo que se mantiene la recomendación de acotar el asentamiento a la salida de planta a un valor máximo de 7 cm.

La colocación del hormigón al frente de la pavimentadora se realizó mediante la descarga del camión volcador en un avance controlado, de manera de obtener sobre la base un manto de hormigón de altura uniforme. Complementariamente se utilizó una mini-pala cargadora para facilitar la distribución del hormigón, operando la misma en forma prioritaria desde un lateral, de manera de minimizar su tránsito sobre el hormigón. El hecho de realizar el hormigonado por media calzada, con la dificultad adicional de encontrarse la ruta habilitada al tránsito, no permitió acceder a otras opciones laterales de distribución del hormigón, como por ejemplo una retroexcavadora.

4.5. COMPACTACIÓN Y TERMINACIÓN

La compactación y terminación del hormigón se realizó con una extendidora de moldes deslizantes Wirtgen SP 500, la cual permite realizar la pavimentación por media calzada. Teniendo en cuenta que la pavimentadora es el verdadero indicador de la trabajabilidad del hormigón, la principal observación constructiva de este sistema de pavimentación se realizó al comienzo de la obra, durante la materialización de la faja de prueba, donde se verificó al colocar hormigones de asentamiento ≥ 4 cm, una tendencia del sistema de compactación (vibrado de alta frecuencia), que segregaba en forma parcial, las fibras sintéticas hacia arriba, provocando su acumulación en la cámara de vibrado.

A partir de este hecho, se realizó el seguimiento del hormigonado de la faja de prueba empleando asentamientos más bajos, sumado a la realización de un ensayo de conteo de fibras mediante la extracción de un par de muestras en la misma sección del hormigón recién compactado y terminado, la primera en correspondencia con los 5 cm superiores de la calzada, y la segunda muestra en correspondencia con los 5 cm inferiores. De esta manera se pudo establecer el rango adecuado del asentamiento al frente de pavimentación, encontrándose el valor ideal entre 2 cm y 3 cm.

Durante el hormigonado de la segunda mitad de la calzada, se tomó la precaución adicional de realizar una imprimación sobre el tercio superior del canto del hormigón preexistente, de manera de facilitar la materialización de la junta constructiva longitudinal. Complementariamente, se colocó un parche aislante (film), en coincidencia con el extremo de las juntas transversales de contracción del hormigón preexistente, para evitar que el trabajo de las mismas se refleje a edad temprana en el nuevo hormigón (figura 7).



Fig. 7. Pavimentación de la segunda media calzada. Se coloca film en canto de juntas.

Para la terminación superficial se realizó un texturado longitudinal, el cual se aplica a través de una arpillera húmeda solidaria a la pavimentadora (figura 8). Luego, las aplicaciones manuales se trata que sean mínimas, solo para resolver contingencias en caso de que las hubiera.

Se verificó que a pesar de observarse en forma sistemática la aparición de algunas macro fibras sintéticas expuestas parcialmente sobre la superficie del hormigón terminado, este hecho no afectó bajo ninguna circunstancia las tareas de texturado del hormigón.



Fig. 8. Detalle de la superficie recién terminada y texturada con arpillera húmeda.

4.6. CURADO

En lo que refiere al curado del hormigón, se destaca el desempeño del compuesto líquido utilizado (base solvente), el cual facilitó la formación de la membrana en tiempo y forma, bajo cualquier condición climática y de exudación del hormigón (figura 9). Tal fue el éxito de este producto, y ante la ausencia de fisuras plásticas, que se planteó un tramo experimental en la obra para la discusión sobre la utilidad de las microfibras, dado que su principal función es el control de la fisuración plástica.

Para la aplicación del curado se empleó un carro autopropulsado que permite realizar sin demoras la distribución uniforme del compuesto líquido para la formación de la membrana. El pulverizado se realiza mediante tres boquillas reguladoras, que están dispuestas longitudinalmente sobre un brazo mecánico, el cual se mueve en sentido transversal.

Para verificar la dosis efectiva del compuesto líquido de curado aplicado sobre la superficie del hormigón, se procedió a pesar una bandeja de tara y superficie conocida (figura 10), obteniéndose por lo general una dosis de 100 a 120 g/m² (120 a 150 ml/m², según la densidad del producto indicada: 0,80 a 0,84), cumpliendo de esta manera con la recomendación del fabricante (mínimo 120 ml/m²). Complementariamente, en forma diaria, se verifica el consumo del producto a lo largo de toda la jornada de hormigonado, obteniéndose por lo general un valor promedio de 200 ml/m², el cual suele incluir la aplicación con mochilas de curado sobre el borde, sumado a lo que se vuela por el viento.



Fig. 9. Detalle de la formación de la membrana de curado en base a solvente.



Fig. 10. Aplicación del compuesto líquido con carro de curado, y control de la dosis efectiva.

4.7. ASERRADO

El aserrado es una tarea fundamental en esta obra, ya que presenta la dificultad adicional de una mayor cantidad de juntas (losas cortas de 1,8 m x 1,8 m) y una mayor restricción de la base (superficie texturada), lo cual incrementa el riesgo de fisuración ante cualquier demora del aserrado.

Para asegurar esta tarea, se trabajó con una cuadrilla permanente y con experiencia, empleando tres aserradoras en forma simultánea para las juntas transversales y a continuación otra aserradora para la junta longitudinal, la cual tampoco se debe retrasar. En todos los casos se debe cumplir con una profundidad de corte que alcance 1/3 del espesor del HRF.

Conceptualmente, el hecho de realizar sin demoras un aserrado simultáneo de varias juntas, implica que se liberen las tensiones del hormigón en forma homogénea, provocándose que el trabajo de las juntas se distribuya de manera uniforme entre todas las juntas (hipótesis de diseño), con el objetivo que la apertura de la junta sea lo menor posible, y permita la fricción entre sus caras para colaborar también con la transferencia de carga entre losas contiguas.

El inicio de la ventana de aserrado se determinó a partir del tiempo final de fraguado del hormigón en condiciones de obra, donde se logró obtener un corte limpio con mínimos desprendimientos. El tiempo para dar comienzo al aserrado depende principalmente de la temperatura, por lo que se obtuvieron registros en verano de 6 a 8 horas, mientras que en invierno este plazo se extendió de 18 a 24 horas.

5. CONTROL DE CALIDAD

5.1. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

A excepción de los ensayos correspondientes al conteo de fibras para evaluar su uniformidad en el hormigón fresco, y la determinación de la resistencia residual del hormigón endurecido (Norma ASTM C 1609), el control de calidad del HRF en pavimentos no difiere de los ensayos habituales para este tipo de hormigones de consistencia seca, cuando se emplean pavimentadoras de encofrados deslizantes.

De esta manera, durante la ejecución de la obra, se realizaron los siguientes ensayos de rutina para evaluar las propiedades del hormigón fresco: asentamiento, temperatura, PUV, pérdida de asentamiento, además del ensayo particular del conteo de fibras, el cual consiste en tamizar una muestra de hormigón de peso conocido, de manera tal de poder luego extraer todas las macro fibras en forma manual y determinar su porcentaje referido en peso seco. Al iniciar la obra, este ensayo se realizó en tres muestras consecutivas de un mismo pastón, para poder evaluar la repetibilidad del ensayo y validar el método empleado. Luego de comprobar en sucesivos días la correcta homogeneidad de la distribución de las fibras en el hormigón, este ensayo se continuó realizando en forma sistemática de dos a tres veces por semana, complementándose además estos resultados con el control diario de stock de las macro fibras (registrado por el dosificador), en correspondencia con el volumen de la producción hormigón.

Para optimizar el moldeo de probetas cilíndricas y vigas, se instaló una mesa vibrante al pie de la planta (figura 11), de manera de obtener una compactación similar a la del equipo de pavimentación.



Fig. 11. Mesa vibratoria instalada al pie de la planta para el moldeo de probetas.

Se realizaron además en forma semanal, los ensayos de exudación y tiempo de fraguado.

Otro requisito de resistencia del hormigón, producto del sistema de construcción adoptado por media calzada y ante la necesidad de mantener ininterrumpido el tránsito en la obra, fue el de obtener un material tipo Fast-Track, donde el método de diseño que se adoptó especifica un módulo de rotura = 3,8 MPa para la habilitación del pavimento.

Para verificar dicho requisito en función de la resistencia a compresión, se adoptó para habilitar el pavimento una resistencia a compresión de 25 MPa, según el empleo de la siguiente fórmula de correlación flexión-compresión⁽¹¹⁾:

$$MR (\text{psi}) = 2,3 \cdot Rc (\text{psi})^{2/3} \rightarrow MR (\text{MPa}) = 0,445 \cdot Rc (\text{MPa})^{2/3} = 0,445 \cdot (25 \text{ MPa})^{2/3} = 3,8 \text{ MPa}$$

Operativamente en la obra, en los tramos que requerían una habilitación rápida, dado que no fue posible implementar el método de la madurez para establecer el cumplimiento de la resistencia, se realizó el moldeo de probetas cilíndricas, expuestas a la condición climática en el frente de pavimentación, a partir de las cuales se determinó la resistencia a compresión, que permitió establecer el momento que corresponde a la habilitación rápida del pavimento.

A fin de poder determinar la capacidad residual del HRF mediante las vigas moldeadas en la obra, de acuerdo al pliego de licitación, el MTOP adquirió por intermedio de la empresa Contratista, una moderna prensa que permite medir las deformaciones como variable de control por lazo cerrado (figura 12). De esta manera se determinó el Módulo de Rotura (MR) y la resistencia residual 150 (ASTM C-1609), como parte del control de calidad de la obra.



Fig. 12. Dispositivo de ensayo adquirido, para determinar la resistencia residual del HRF.

En forma complementaria, también se evaluó la adherencia entre la nueva capa del HRF y la capa existente de concreto asfáltico, mediante la extracción de testigos de espesor total, los cuales posteriormente fueron ensayados al corte en la interfase entre ambas capas según la Norma AASHTO T 323-03 (2007)¹² (figura 13).

¹¹ Raphael, J.M., "Tensile strength of concrete," ACI Journal, Vol. 81, Number 2, Mar-Apr 1984 pp. 158-165.

¹² American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Method of Test for Determining the Shear Strength at the Interface of Bonded Layers of Portland Cement Concrete, AASHTO Designation: T 323-03 (2007), USA, 2007.

Los valores obtenidos se encontraron entre un mínimo de 1,1 MPa y un máximo de 1,6 MPa (en promedio 1,3 MPa), a partir del cual se considera una buena adherencia según la calificación de referencia indicada en la tabla 3⁽¹³⁾. En la Tabla 4 se resumen todas las propiedades evaluadas del HRF.



Fig. 13. Ensayo de adherencia por resistencia al corte en la zona de la interfaz HRF-asfalto.

Tabla 3. Calificación de la adherencia al corte.

Calificación de la adherencia	MPa	psi
Excelente	≥ 2,1	≥ 300
Muy buena	1,7 a 2,1	250 a 290
Buena	1,4 a 1,7	200 a 249
Regular	0,7 a 1,4	100 a 199
Mala	0 a 1,7	0 a 99

Tabla 4. Control de calidad: propiedades evaluadas.

Resistencia a compresión	Unidad	Valor medio	Desvío	Valor máximo	Valor mínimo
Asentamiento	cm	3,2	0,5	4,0	2,0
Capacidad de exudación	%	1,4	0,9	2,5	0,3
Contenido de macro fibras	%	2,63	0,03	2,69	2,60
Probetas*, edad 7 días	MPa	33,3	3,4	44,7	20,7
Probetas*, edad 28 días	MPa	38,3	3,3	44,7	27,3
Testigos**, edad 28 días	MPa	37,6	4,7	51,3	26,2
Módulo de rotura, 28 días	MPa	5,6	0,3	6,4	5,1
Resistencia residual (f^D_{150})	MPa	1,2	0,2	1,6	0,9
Adherencia HRF-Asfalto (corte)	MPa	1,3	0,2	1,6	1,1

*Diámetro de las probetas = 15 cm; Capacidad de la prensa de obra = 100 Tn (se usa a 80 Tn);
 **Diámetro de los testigos = 10 cm;

¹³ Federal Highway Administration, *Portland Cement Concrete Overlays, State of The Technology Synthesis*, Publication N° FHWA-IF-02-045, USA, April 2002. Chapter 3, Page 9.

5.2. REGULARIDAD SUPERFICIAL

La nueva exigencia para contratos en la red vial uruguaya impuesta por el MTOP, consiste en que es de rechazo el tramo de obra cuyo Índice de Rugosidad Internacional (IRI) sea superior a 2,8 m/km. Esto condicionó a la empresa Contratista (Grinor S.A.) a la adquisición de una pavimentadora acorde a tales requerimientos, optándose por la Wirtgen SP500.

La exigencia antedicha obligaba a una evaluación permanente de este aspecto de la calidad. Dado que no estaba asegurada la disponibilidad de los equipos de medición de la Dirección Nacional de Vialidad (DNV), aparte de que los mismos son de alto rendimiento y para tramos tan cortos como lo son los de una jornada de pavimentación, se vería subutilizada la capacidad de estos, se adquirió un equipo de bajo rendimiento para la evaluación de la regularidad superficial.

Esto permitió hacer mediciones lo suficientemente precisas del perfil longitudinal y a partir de allí determinar el IRI del tramo recientemente construido.

Cabe mencionar, que el límite impuesto para la aceptación de la obra no admitía tolerancia de ningún tipo, por lo que se procuró que el equipo a adquirir fuera de los definidos como Clase I (de mayor precisión) por el HDM-4, organismo desarrollador de dicho índice internacional.

Para aplicar la perfilometría estática, se utilizó el perfilómetro pivotante Dipstick 2272 (figura 14). Dicho instrumento consta de gran prestigio en la materia y es usado por muchas administraciones de carreteras para calibrar equipos de alto rendimiento también Clase I.



Fig. 14. Registro de la regularidad superficial mediante el uso de un perfilómetro pivotante.

La integración de las mediciones hechas después de cada jornada permitió determinar luego el IRI en tramos de obra de longitud 1 km, que es lo considerado en las especificaciones particulares.

Cabe consignar que el IRI medio de la senda a (-), cuyo sentido de circulación es de norte a sur fue de 2,1 m/km. En tanto que el IRI de la senda a (+) (sentido sur-norte) fue de 2,0 m/km.

Estos valores fueron confirmados por la DNV con un equipo Mays Meter, del tipo de respuesta dinámica. No obstante, se obtuvieron diferencias importantes en la evaluación por km, siendo más dispersas las de éste último, aunque sin afectar las condiciones de recepción.

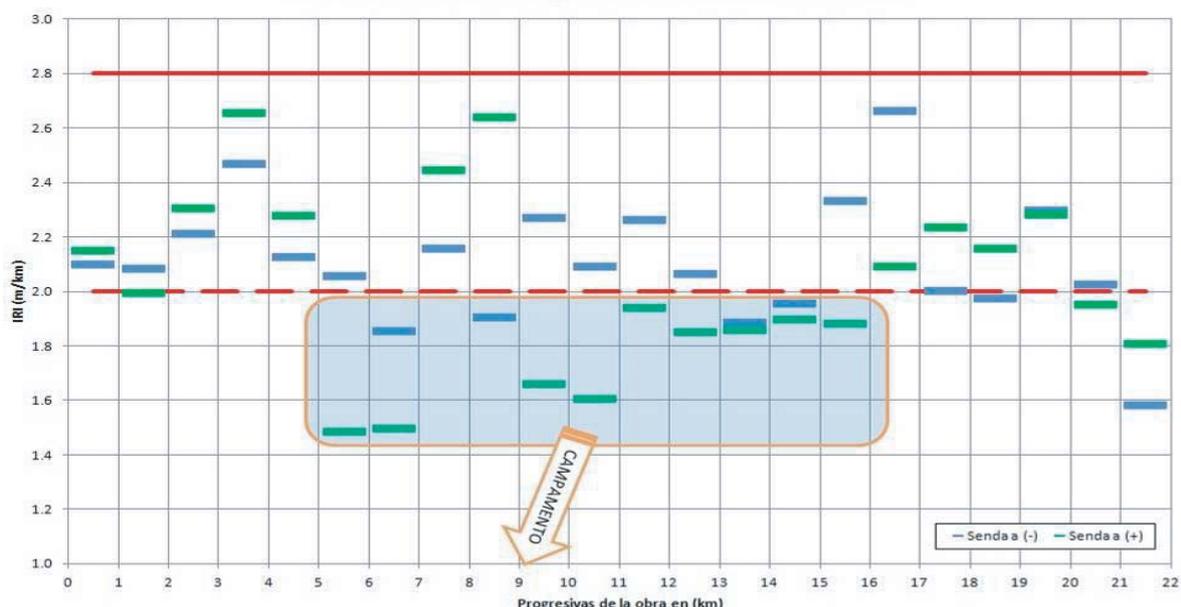
En el gráfico 1 se observa que los valores más bajos de IRI se obtuvieron en el entorno de la planta de elaboración de hormigón, así como también en la senda (+), sur-norte, que es la que tenía menor irregularidad transversal y en la que prácticamente no se ejecutaron baches. Se destacan dos líneas horizontales que responden a los umbrales de aceptación y de bonificación.

La línea llena corresponde al umbral de aceptación para tramos de 1 km que es de 2,8 m/km, donde se evidencia claramente que todos los tramos cumplen con esa condición.

Por otra parte, la línea segmentada corresponde a los tramos que están por debajo del umbral de bonificación. Dicha bonificación consiste en algo más de 1 U\$S por m², para aquellos tramos kilométricos en que la regularidad superficial es tal que $IRI \leq 2$ m/km.

No obstante, esta obra no es objeto de bonificación alguna, ya que la condición anterior se debe cumplir para el 90% de los tramos kilométricos, considerando como IRI del tramo el mayor de las dos sendas.

Gráfico 1: Valores medios de IRI por km de senda construida.



6. CONSIDERACIONES RESPECTO A LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Sin perjuicio de reconocer que las especificaciones son claras y ofrecen la posibilidad de pagar no solo por el volumen de trabajo, sino también por la calidad del mismo, se entiende que este aspecto de la especificación es perfectible, ya que de la forma en que está planteado no conduce al mayor perfeccionamiento posible.

Esto es debido a dos motivos. Uno es por el hecho que se considera como IRI de un tramo, el mayor IRI de las dos sendas. Algo que en principio no parece tener demasiado interés en sendas con sentido de circulación diferente. No obstante, el mayor inconveniente de este aspecto de la especificación radica en que si en la primera de las sendas construidas se obtuvo un IRI de aceptación, pero no lo suficientemente bajo, el IRI del tramo ya quedó sentenciado en ese valor, y por mejores resultados que se obtengan en la construcción de la segunda senda, esto no mejorará el indicador de calidad. En cambio si se consideran las sendas en forma independiente, el estímulo para obtener la mejor calidad persistirá.

Por otra parte, algo similar ocurre en la exigencia del 90% de los tramos con un IRI por debajo del umbral especificado para cumplir la bonificación. Este aspecto puede ser contraproducente, ya que si promediando la obra se ha superado el 10% de los tramos no bonificados, en ese momento deja de existir el estímulo que generaba la bonificación, y se

pierde la posibilidad que el constructor esté hasta el último día intentando mejorar su performance, y por lo tanto la calidad de la obra.

Entendemos que la exigencia de un IRI característico es adecuada, ya que se estimula a mejorar los procesos y por tanto la uniformidad del producto, evitando así que algunos tramos queden excesivamente irregulares en compensación de otros que hayan quedado muy bien.

Consideramos que un paso evolutivo en la implementación del premio, es la aplicación de una bonificación escalonada, según el IRI obtenido, o en función del percentil, pudiendo variar de 100% de los tramos, al 50% por ejemplo. Cualquier mecanismo sirve en la medida que se estimule hasta que el último tramo pavimentado tenga como objetivo la mayor calidad posible.

En el caso de esta obra, pronto resultó que el premio o la bonificación no era alcanzable al menos sin la aplicación de alguna técnica posterior a la construcción. A pesar de que en los dos primeros meses los valores de IRI eran relativamente bajos, avanzada la primavera rápidamente se superó el 10% de tramos con IRI > 2m/km.

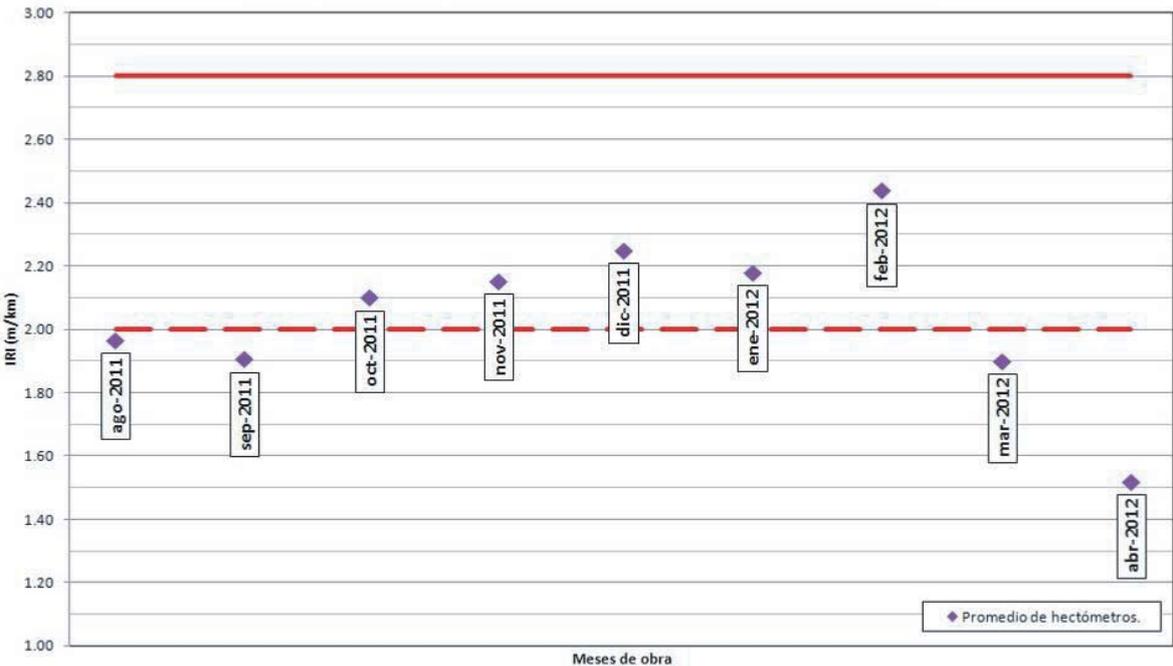
A parte de las conocidas precauciones para hormigonar en tiempo caluroso, como característica de los proyectos de whitetopping adherido, se exige que la temperatura del concreto asfáltico no exceda 49 °C. Por este motivo, muchos hormigonados en verano se hicieron en jornadas muy cortas de trabajo, aumentando las juntas de construcción, zona crítica en cuanto al logro de la calidad de rugosidad.

A pesar de esto, se procuró mejorar, fundamentalmente ajustando los aspectos de logística, así como las características y homogeneidad del hormigón fresco.

Eso condujo a que en los dos últimos meses de pavimentación, aún con calor y las vicisitudes descritas, la calidad aumentara progresivamente, incluso por encima de las expectativas iniciales.

En el gráfico 2 se representa el IRI promedio de los hectómetros pavimentados en los referidos meses. En promedio, cada mes se pavimentó unos 5 km de senda, siendo diciembre 2011 y enero 2012 los que están más debajo de ese promedio debido a que se contó con mucho menos días de trabajo por la licencia anual de la construcción.

Gráfico 2: Valores medios de IRI por hectómetro y por mes de obra.



7. CONSIDERACIONES FINALES

- ? La concreción de este proyecto se debe a la decisión de los profesionales del MTOP de Uruguay, en avanzar sobre una metodología innovadora, dando lugar a la primera experiencia de repavimentación de la región, mediante la aplicación de una capa adherida de hormigón con fibras sintéticas estructurales, empleando TAR.
- ? La incorporación de fibras reduce la trabajabilidad del hormigón, lo cual fue compensado mediante el empleo de un aditivo de última generación, reductor de agua de alto rango, fabricado con policarboxilatos, evitando de esta manera un incremento adicional de la demanda de agua.
- ? La presencia de las fibras no afectó las tareas de mezclado, transporte y colocación del hormigón. El hecho de emplear un dosificador automático para la incorporación uniforme de las macro fibras, permitió una distribución homogénea sin la formación de erizos.
- ? En lo que refiere a la compactación con la vibración de alta frecuencia que entrega la pavimentadora, se verificó un asentamiento de trabajo óptimo de 2 cm a 3 cm, dado que por encima de ese valor la terminadora segrega en parte las macro fibras, reduciendo la homogeneidad en su distribución.
- ? La presencia de macro y microfibras, no afectaron los procesos de terminación y texturado de la superficie.
- ? La incorporación de las fibras modifica el comportamiento mecánico del hormigón, adquiriendo tenacidad y control del proceso de fisuración, lo que confiere de esta manera la resistencia residual. La resistencia a compresión del hormigón, no cambia por el solo hecho de haber incorporado las fibras.
- ? Para la ejecución del whitetopping rigen todas las prácticas constructivas del buen arte empleadas habitualmente durante la construcción de los pavimentos de hormigón, destacando la dificultad adicional del aserrado, debido a la mayor cantidad de juntas y la mayor restricción de la base.
- ? El hecho de realizar una pavimentación por media calzada, presentó las dificultades adicionales del reflejo del trabajo de juntas transversales, la disposición de un hormigón de habilitación rápida y la gestión del tránsito, las cuales se pudieron superar con éxito.
- ? Las propiedades del HRF cumplieron satisfactoriamente todos los requisitos de calidad establecidos.
- ? El nivel de adherencia entre el HRF y la superficie asfáltica texturizada, fue aceptable, encontrándose entre los parámetros esperados. La adherencia es clave para el futuro desempeño del pavimento, y se asigna la misma al cumplimiento en forma rigurosa del procedimiento de limpieza de la superficie asfáltica.
- ? El logro de esta construcción fue posible gracias a la conformación de un grupo de trabajo entre las empresas involucradas y los organismos públicos y el soporte de especialistas y organismos científicos.
- ? En la actualidad el pavimento está habilitado al tránsito en la totalidad del tramo y se encuentra en perfectas condiciones. Su desempeño es monitoreado (control de cargas) con el objeto de evaluar este novedoso método de diseño y constructivo, incluyendo además la materialización de un tramo experimental de 100 m lineales sin microfibras, y otro tramo experimental de 500 m lineales con un HRF de 12 cm de espesor y losas cortas de 1,2 m x 1,2 m.
- ? A partir del éxito de esta experiencia, recientemente se otorgó la ampliación del 100 % de la obra, quedando de esta manera confirmado para la región, la disponibilidad de una nueva alternativa para la rehabilitación de los pavimentos asfálticos.

REFERENCIAS

- (1) AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION, *Whitetopping, State of the practice*, Engineering Bulletin EB210.02P, USA, 1998.
- (2) 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.
- (3) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI Committee 325, *Concrete Overlays for Pavement Rehabilitation*, Report ACI 325.13R-06, USA, February, 2006.
- (4) FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, *Design and Concrete Material Requirements for Ultra-Thin Whitetopping*, Publication N° FHWA-ICT-08-016, USA, June 2008.
- (5) PASTORINI, Magdalena, *Experiencia en Uruguay: Proyecto de rehabilitación con Whitetopping en Ruta Nacional N° 24*, 8° Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo, Octubre 2011.
- (6) ASTM C 1609/C 1609M-07. *Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*, ASTM Standards, USA, 2007.
- (7) Vázquez, Esteban., *Hormigones reforzados con fibras*, 8° Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo, Octubre 2011.
- (8) MIGUEZ, D., GONZALEZ, A.C., 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*, 19ª Reunión Técnica de la AATH, Bahía Blanca, Argentina, 2012.
- (9) FONTANS, David, MACHIN, Héctor y GOMEZ, Diego, *Primera experiencia en ejecución de Whitetopping en la Red Vial Nacional*, 8° Congreso de la Vialidad Uruguaya, Montevideo, Octubre 2011.
- (10) NATIONAL CONCRETE PAVEMENT TECHNOLOGY CENTER, *Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements*, Second Edition, ACPA publication TB021-02P, USA, September 2008.
- (11) Raphael, J.M., "*Tensile strength of concrete*," ACI Journal, Vol. 81, Number 2, Mar-Apr 1984 pp. 158-165.
- (12) American Association of State Highway and Transportation Officials, *Standard Method of Test for Determining the Shear Strength at the Interface of Bonded Layers of Portland Cement Concrete*, AASHTO Designation: T 323-03 (2007), USA, 2007.
- (13) Federal Highway Administration, *Portland Cement Concrete Overlays, State of The Technology Synthesis*, Publication N° FHWA-IF-02-045, USA, April 2002. Chapter 3.