

REHABILITACIÓN DEL FIRME DE CUATRO GLORIETAS MEDIANTE UN REFUERZO DELGADO DE HORMIGÓN ("THIN WHITETOPPING")

Authors Rubén D. López-Carreño¹, Sergio Carrascón², Antonio Aguado¹, Pablo Pujadas³

¹Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-Barcelona Tech)

²Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

³Departamento de Ingeniería de Proyectos y de la Construcción. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-Barcelona Tech)

Received: DD/MM/AA – Reviewed: DD/MM/AA -- Accepted: DD/MM/AA - DOI: <https://dx.doi.org/10.6036>

ABSTRACT: *El presente artículo describe el proyecto y la construcción de la rehabilitación estructural del firme bituminoso de cuatro glorietas mediante la disposición de una capa de hormigón de 12 cm de hormigón vibrado con fibras con juntas muy próximas (técnica conocida como "thin whitetopping"). Las glorietas, pertenecientes a la Carretera Nacional N-II a su paso por La Jonquera (España), están sometidas a un tráfico elevado de vehículos pesados (IMDp > 4.000 veh. pesados/día). En la fase de proyecto se estudiaron las causas de deterioro del firme original, se caracterizó su capacidad portante remanente y se calculó el espesor de hormigón a disponer. En las zonas más dañadas se sustituyó por completo la mezcla bituminosa por un hormigón de menor calidad que se adhería en con el hormigón del refuerzo mediante conectores metálicos. Además, se realizó también un diseño detallado de las transiciones entre el firme rehabilitado y el existente y de la disposición de las juntas. A lo largo del documento se describen con detalle las diferentes tareas llevadas a cabo para el diseño y la construcción de la solución adoptada y, finalmente, se proporcionan unas recomendaciones de diseño y construcción basadas en los resultados obtenidos.*

Keywords: *Adherencia hormigón - hormigón, Hormigón con fibras, Refuerzo de firmes con hormigón, Resistencia a los combustibles, Whitetopping.*

1. - INTRODUCCIÓN

La Jonquera es un pueblo del noreste de España, situado en su frontera con Francia y con una gran actividad comercial y multitud de servicios para el transporte rodado. Por su término municipal discurre la Autopista de Peaje AP-7 (E9), principal vía de conexión entre España y Francia, mientras que su núcleo urbano es atravesado por la Carretera Nacional N-II, la cual también conecta Madrid con la frontera francesa. La N-II dispone de dos conexiones con la autopista AP-7 en un tramo de 5 km y las cuales son utilizadas por un elevado número de conductores para repostar en las gasolineras y/o utilizar otros servicios. La densidad de camiones en este tramo de la carretera nacional es de unas 4.000 unidades por día.

Hace quince años se construyeron en la N-II cuatro glorietas para mejorar el acceso a dicho servicios. Originalmente, sus firmes estaban formados por una capa base de 25 cm de zahorra y 31 cm de mezcla bituminosa de acuerdo con el proyecto constructivo. Debido al daño producido por los continuos derrames de combustible de los camiones, los cuales disuelven el betún ligante de la mezcla bituminosa, ha sido necesario reemplazar varias veces los pavimentos a diferentes profundidades. Este daño se reflejaba en forma de fisuración abierta de la mezcla, pérdida de los áridos y una pésima calidad de rodadura.

Para evitar la frecuente rehabilitación de estos firmes, el Ministerio de Fomento de España decidió buscar una solución a largo plazo. La recurrente reposición de la capa de rodadura con mezcla bituminosa resultaba ser una alternativa insostenible en términos de coste y durabilidad. Así mismo, otra solución tradicional como la reconstrucción completa del firme mediante la ejecución de un pavimento de hormigón suponía una fuerte inversión económica inicial. Por ello, el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) junto a la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) propusieron una solución innovadora en España: sustituir la capa superior de mezcla bituminosa (MB) por una carpeta de hormigón (CF).

El diseño del refuerzo de hormigón se hizo para que el firme resistiese el tráfico pesado y con la condición de minimizar el espesor del recubrimiento y el alcance de la intervención y así reducir el coste económico de la solución. Además, debía eliminarse también la MB dañada por los derrames de combustible y las roderas existentes. A nivel constructivo, las obras exigían un acceso

ininterrumpido a todos los servicios colindantes a las glorietas (centros comerciales, estaciones de servicio, restaurantes, etc.). Para resolver este problema se planteó una construcción por fases que tenía en cuenta diferentes desvíos del tráfico.

2. – ESTUDIOS PREVIOS

El cálculo del espesor de firme a reemplazar se diferenció en dos fases. La primera de ellas consistió en la determinación del espesor real de las capas de MB. Mientras, en la segunda fase se verificó si existían zonas altamente deterioradas y también se estimó la capacidad de carga de los pavimentos en aras de calcular el espesor de la capa de CF de refuerzo.

Para la obtención del espesor de MB se extrajeron cuatro testigos de cada una de las glorietas. El espesor encontrado varió desde un mínimo de 22 cm hasta un máximo de 35 cm. Debe destacarse que los refuerzos delgados ("thin whitetoppings") necesitan un mínimo de unos 10 cm de MB en buenas condiciones para evitar su fallo prematuro.



Fig 1. Estado previo del firme de las glorietas

En la Figura 1 se muestra el estado del firme de las rotondas antes de su rehabilitación. Pueden observarse daños superficiales localizados debidos a la fatiga de la MB (fisuración de piel de cocodrilo), presencia de roderas y baches, etc. De cara a realizar el diseño del "thin whitetopping", se verificó la capacidad de carga de los pavimentos para calcular el espesor de la capa de hormigón de refuerzo. La verificación del estado del pavimento y de su capacidad soporte se hizo respectivamente mediante inspección visual y con el ensayo de placa de carga UNE 103808:2006 [1].

En cada una de las rotondas se llevaron a cabo dos ensayos de placa de carga en las zonas que donde visualmente se concentraban las peores condiciones superficiales y/o con mayores deformaciones verticales. Los ocho ensayos realizados dieron como resultado asientos de 0,25 a 2,54 mm (media de 1,00 mm y desviación típica de 0,79 mm), módulos de elasticidad Q0 de 0,22 a 0,90 MN/m² (media de 0,53 MN/m² y desviación típica de 0,29 MN/m²) y coeficientes de balasto K60 de entre 118,4 y 717,6 MN/m³ (media de 424,36 MN/m³ y desviación típica de 235,29 MN/m³).

En vista de los valores obtenidos, se detectaron cuatro zonas candidatas a una intervención especial debido a un coeficiente de balasto K60 inferior a 500 MN/m³. Por otro lado, a partir de valores del ensayo y considerando un único espesor de MB de 10 cm, se calculó analíticamente un coeficiente de reacción (coeficiente de Winkler) de 391 MPa. La metodología de cálculo se puede encontrar detallada en [2].

3. – SOLUCIÓN ADOPTADA

La Figura 2.a esquematiza la solución adoptada para la construcción del "whitetopping". Ésta estaba constituida por una carpeta de hormigón de refuerzo de CF-5,0 de 12 cm colocada tras el fresado de 12 cm espesor de la MB original. La dosificación, las características mecánicas y de puesta en obra del hormigón CF-5,0 se muestran en la Tabla 1. El cemento empleado era de tipo CEM

I 52,5 R, con un desarrollo de resistencias más rápido que el de otros cementos comúnmente utilizados en la construcción de pavimentos (32,5 N y 42,5 N), ya que permite una reapertura al tráfico más rápida.

En los blandones se adoptó la solución de la Figura 2.b, en la que se fresaron por completo los 31 cm de MB y los 25 cm de zahorra y seguidamente se reemplazaron ambos materiales por un hormigón de 15 MPa de resistencia a compresión a 28 días (HL-15) y 44 cm de espesor. De esta manera, el hormigón del blando quedaba nivelado en la cota -12 cm respecto a la rasante inicial, al igual que el fresado de la MB de la solución de la Figura 2.a. La transición entre los pavimentos de las rotondas y de los viales de acceso se hizo siguiendo las directrices de la "Guide to Concrete Overlays" de la ACPA [3], dando lugar a la solución de la Figura 2.c.

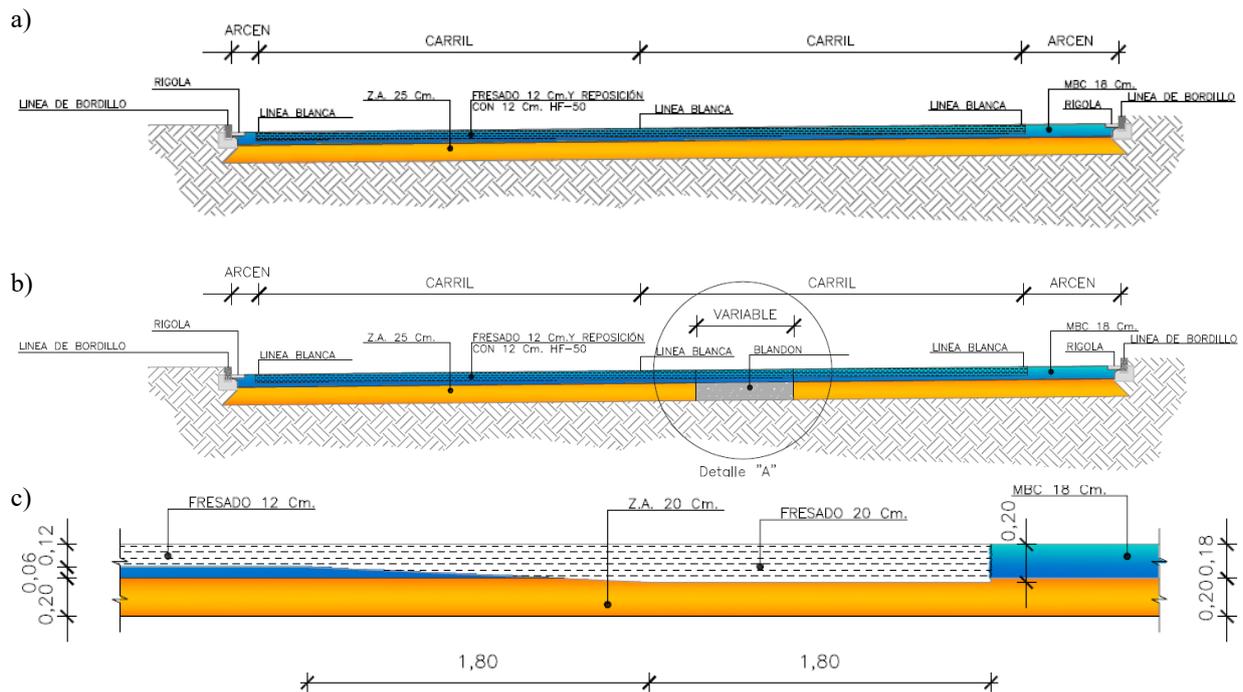


Fig 2. Sección transversal: a) general, b) zonas con blandones y c) transición entre pavimentos.

Material	Proporción	Ensayo	Valor medio
CEM I 52,5 R	430 kg/m ³	Resist. compresión a 7 días	39,5 MPa
Árido 10/20 mm	750 kg/m ³	Resist. compresión a 28 días	45,3 MPa
Árido 4/12 mm	200 kg/m ³	Resist. flexotracción a 7 días	5,2 MPa
Arena 0/4 mm	900 kg/m ³	Resist. flexotracción a 28 días	6,7 MPa
Agua	155 l/m ³ (a/c = 0,36)	Resist. flexotracción a 56 días	7,2 MPa
Superplastificante	3 l/m ³ (0,70%)	Consistencia (cono de Abrams)	12 cm
Reductor de agua	5 l/m ³ (1,72%)		

Tabla 1. Dosificación y propiedades del hormigón CF-5,0 del refuerzo.

Para su dimensionamiento se utilizó el programa StreetPave [4] de la American Concrete Pavement Association (ACPA) utilizando los datos de entrada de la Tabla 2, los cuales se basan en los resultados obtenidos de los estudios previos. También se adoptaron soluciones especiales en las zonas con algún blando y en las transiciones entre el nuevo firme reforzado y el existente. El análisis detallado de los datos de entrada usados en el programa de cálculo está disponible en [2].

Parámetro	Valor
Tráfico inicial de vehículos pesados en el carril de proyecto.	2.000 veh. pesados /día
Crecimiento anual del tráfico.	2,0 %
Período de proyecto.	20 años
Total de ejes equivalentes de 13 Tn durante el período de proyecto.	22.500.000 ejes
Losas fisuradas (agotadas) al final del proyecto.	15 %
Coefficiente de estado de servicio al final del período de proyecto.	2,25 (en buen estado)
Fiabilidad.	85 %
Módulo de deformabilidad del conjunto base + explanada.	137 MPa
Espesor de MB considerado.	10 a 19 cm
Resistencia a flexo-tracción a 28 días del CF.	5,0 MPa (CF-5,0)
Módulo de elasticidad del refuerzo de hormigón.	33.750 MPa
Microfibras estructurales de poliolefina en el HCF.	4,0 Kg/cm ³

Tabla 2. Datos para el dimensionamiento del firme

Como muestra la Figura 3.a, para garantizar la adherencia entre el hormigón HL-15 y el CF-5,0 de las zonas con blandones se dispusieron unos conectores metálicos de acero B500 SD en forma de "T" de dimensiones 150 mm + 250 mm +150 mm y diámetro 8 mm (ver Figura 3.b). Este tipo de solución ya había sido probado previamente con éxito por la UPC y el IECA [5]. Su dimensionamiento se hizo para resistir los esfuerzos tangenciales de las cargas de tráfico en la interfase entre los hormigones. Puede encontrarse más detalle del dimensionamiento en [6].

Los conectores se colocaron en la cara superior de la capa de hormigón HL-15, penetrando 100 mm en ésta y sobresaliendo 50 mm de su superficie. De esta forma se evitaba que apareciesen oquedades después de la vibración del "whitetopping" ya que se garantizaba una distancia entre el conector y la capa de HL-15 superior a dos veces el tamaño máximo del árido del hormigón CF-5,0 (20 mm).

Tal y como aparece en la Figura 3.c, los conectores se dispusieron formando una parrilla de 25 cm x 25 cm para que la interfase estuviese cosida de forma homogénea en la dirección del tráfico y su perpendicular. Para el proceso de instalación de los conectores se asumió una precisión de $\pm 10,0$ mm en las tres direcciones (tráfico, perpendicular y vertical).

4. – DISEÑO DE JUNTAS

El patrón de distribución en planta de las juntas se hizo considerando cuatro reglas fundamentales y que también se aplican en la construcción de firmes de hormigón convencionales. Estas eran: (1) el tamaño máximo de las losas no podía superar en 20 veces a su espesor, (2) el ratio longitud/ancho de las losas tenía que ser inferior a 1,5, (3) se debían evitar esquinas con ángulos de menos de 60° y (4) no podían existir juntas en "T". Además, se asumieron también los requisitos de las normativas españolas PG3 (Artículo 550) [7] y Norma 6.1-IC sobre Secciones de Firme [8].

A modo de ejemplo, en la Figura 3.d se muestra la vista en planta de la distribución de las juntas de una de las glorietas. Nótese que las principales juntas seguían una geometría de circunferencias concéntricas y líneas rectas en dirección radial. En las zonas cercanas a los accesos y salidas el patrón era más complicado por tal de cumplir los requisitos mencionados en el párrafo anterior. Las juntas radiales se sellaron con perfiles preformados de Goma de Nitrilo Butadieno (NBR), material capaz de resistir a los aceites y combustibles, mientras que el resto de las juntas se sellaron con perfil extruido de material de policloropreno (ver Figura 3.e).

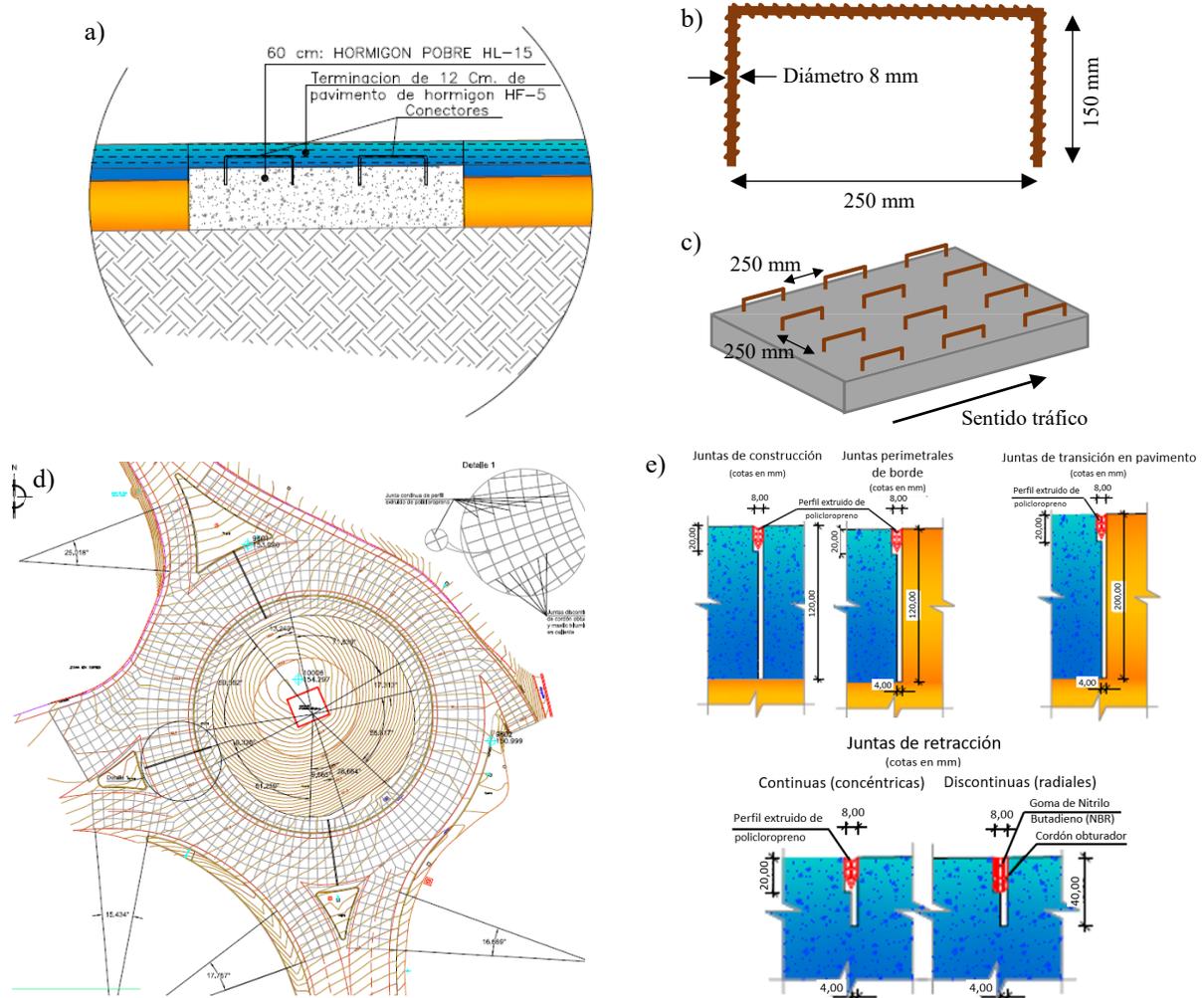


Fig 3. a) Detalle de conexión entre hormigones. b) Conectores metálicos. c) Disposición de los pasadores en el HL-15. d) Distribución en planta de las juntas de la Glorieta. e) Detalle de los perfiles de NBR

5. – PROCESO CONSTRUCTIVO

5.1.- PREPARACIÓN DEL FIRME BITUMINOSO EXISTENTE

La primera operación realizada fue el fresado de las MB en sus 12 cm superiores, dejando tanto en el borde exterior como en el interior de las glorietas unas bandas sin fresar de 30-50 cm de ancho. Tras limpiar las superficies fresadas se realizó una inspección visual con el fin de detectar la superficie de MB expuesta que seguía estando dañada por los combustibles.

Las zonas dañadas por combustibles se fresaron en la totalidad del espesor de MB hasta dejar a la vista la base de zahorra natural. El espesor de MB eliminado se reemplazó por un relleno de hormigón HL-15 nivelado con el entorno de MB fresado (cota -12 cm). Posteriormente, en el HL-15 se colocaron los conectores metálicos en forma de "Π".

5.2.- PUESTA EN OBRA DEL HORMIGÓN CF-5,0 DEL PAVIMENTO

La puesta en obra, el vibrado y el acabado del hormigón se hicieron utilizando métodos manuales. Se seleccionó este tipo de colocación del hormigón por la geometría del "thin whitetopping" y su tamaño, aunque fue posible hormigonar cada rotonda en dos jornadas de trabajo. La cota del hormigón se definió mediante una tupida red de puntos en aras de garantizar una buena nivelación de la superficie. Dichos puntos fueron definidos topográficamente con elevada precisión (ver Figura 4.a).

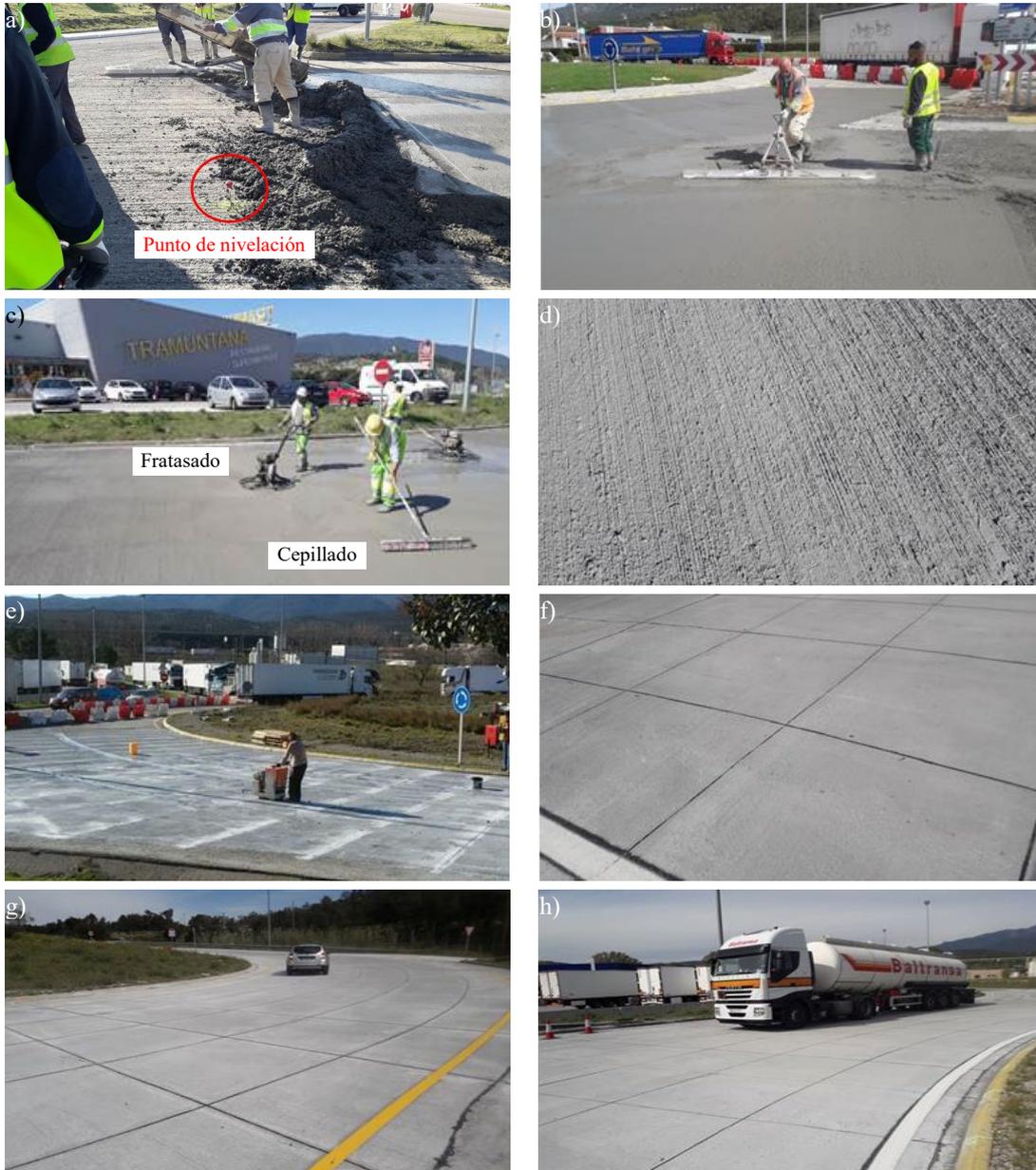


Fig 4. a) Fratasado y cepillado del hormigón. b) Detalle de textura. c) Vertido del hormigón. d) Compactación con regla vibrante flotante. e) Corte de las juntas. f) Aspecto de las losas. h, i) Aspecto de las glorietas tras su apertura al tráfico

El hormigón CF-5,0 utilizado en el refuerzo fue suministrado por una planta situada a 30 km de la obra. Éste debía tener una resistencia mínima a flexotracción a 28 días de 5,0 MPa, una consistencia en el instante de puesta en obra de 7 a 10 cm en el cono de Abrams y una cuantía de fibras estructurales de poliolefina de 4,0 kg/m³, las cuales mejoran el comportamiento post-fisuración del material [9, 10]. La compactación y el vibrado se realizaron mediante reglas vibrantes flotantes (ver Figura 4.b).

5.3.- ACABADO SUPERFICIAL

El acabado superficial efectuado debía estar en consonancia con el tráfico y la velocidad de los vehículos que van a circular por el pavimento. Al tratarse de glorietas, la velocidad de circulación es baja y la textura de la superficie (relacionada con la adherencia) es más importante que su regularidad (generalmente medida en términos del IRI según la UNE-EN 13036-8:2008, [11]).

	<p style="text-align: center;">REHABILITACIÓN DEL FIRME DE CUATRO GLORIETAS MEDIANTE UN REFUERZO DELGADO DE HORMIGÓN ("THIN WHITETOPPING")</p>	<p style="text-align: right;">UNESCO Discipline Sub-discipline</p>
<p>RESEARCH / COLLABORATION</p>	<p style="text-align: center;">R.D. López-Carreño, S. Carrascón, A. Aguado, P. Pujadas</p>	

De acuerdo con esto y tal y como aparece en la Figura 4.c, se optó por realizar un fratasado superficial seguido de un cepillado profundo en dirección transversal a la de circulación de los vehículos. En la Figura 4.d puede observarse un detalle de la textura superficial obtenida.

5.4.- CORTE DE LAS JUNTAS

Las juntas se realizaron mediante sierra de disco entre las 6 y 12 horas posteriores al extendido del hormigón (ver Figura 4.e). El ancho y la profundidad de corte de las juntas de retracción fueron de 4 mm y 40 mm (33% del espesor), respectivamente. También se realizó un cajeadado superior de ancho y profundidad 8 mm y 20 mm. Para el sellado de las juntas se utilizaron dos tipos de materiales. En las juntas radiales se introdujo el perfil preformado de NBR, mientras que las concéntricas se sellaron con el perfil extruido de policloropreno. La Figura 4.f muestra el aspecto de las losas tras ejecutar las juntas.

6. – RESULTADOS FINALES DE LA OBRA

En las Figura 4.h e i se muestra el pavimento acabado de las glorietas con el tráfico abierto. El tiempo transcurrido entre la construcción y la apertura al tráfico fue de entre 7 y 15 días. El criterio que se consensuó con el Ministerio de Fomento fue que el instante de apertura el CF-5,0 hubiese alcanzado una resistencia a flexotracción de 4,0 MPa (80% de la resistencia a los 28 días). Los ensayos de control de calidad del CF-5,0 mostraron que esta resistencia se alcanzaba a los 7 días. También se midió la macrotextura en las 4 glorietas con el método del círculo de arena según lo descrito en la norma UNE-EN 13036-1 [12]. En todas ellas se obtuvieron profundidades medias superiores a 1,10 mm, adecuadas incluso para velocidades de circulación superiores a los 100 km/h. Estos resultados mostraban que el tratamiento superficial aplicado era adecuado.

7. – CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la primera experiencia en España de una rehabilitación de un firme bituminoso mediante la construcción de una carpeta de hormigón de poco espesor. Se trata de una técnica conocida como "thin whitetopping" y cuyo uso es frecuente en los Estados Unidos. De ella se pueden extraer las siguientes recomendaciones de diseño para el proyecto de este tipo de firmes, algunas de ellas específicamente para glorietas:

- Es necesario identificar los deterioros presentes en el firme bituminoso y las razones por las cuales se han producido.
- Para diseñar el refuerzo se debe caracterizar en detalle el firme existente. Ello puede hacerse mediante la extracción de testigos, realizando ensayos de placa de carga y deflectómetro de impacto, así como analizando los antecedentes en su construcción (número y tipo de capas, condiciones de las mismas y espesores).
- Se deben delimitar y proyectar en detalle las zonas especiales más deterioradas así como las de transición entre el nuevo pavimento y el de su entorno. En este sentido, es necesario disponer de, por lo menos, 9-10 cm de espesor de MB en buen estado.
- En el diseño de las juntas hay que evitar losas con ángulos menores de 60° y aislar la glorieta de sus accesos mediante juntas serradas en todo el espesor. Asimismo, para los espesores y geometría de juntas de este proyecto, el tamaño máximo de las losas no deben exceder los 2,25-2,50 m y las juntas deben cortarse hasta por lo menos un 50% de la profundidad del refuerzo.
- Por último, es recomendable añadir al hormigón fibras cortas estructurales de poliolefina (no más de 25 mm) para controlar la fisuración a edades tempranas.

REFERENCIAS

- [1] UNE 103808:2006. Ensayo de carga vertical de suelos mediante placa estática.
- [2] Carrascón, S., Verdú, J., Cortes, F., Senés, C., Molina, G., Santos, O., Romero, M., & Álvar, D. (2018). Proyecto y construcción de una rehabilitación estructural mediante un refuerzo delgado de hormigón en cuatro glorietas de la N-II en la Jonquera (Girona). En SNF2018: Simposio Nacional de Firmes: en Ruta Hacia una Economía Circular (pp. 1-23).
- [3] Harrington, D., & Fick, G. (2014). Guide to concrete overlays: sustainable solutions for resurfacing and rehabilitating existing pavements (No. ACPA publication TB021. 03P).
- [4] American Concrete Pavement Association (ACPA) (2014). StreetPave: Structural Design Software for Street and Roads Concrete Pavements (Versión 12) [software]. Obtenido de <http://www.acpa.org/streetpave/>.
- [5] López-Carreño, R.D. (2018). Aportaciones al proyecto, construcción y gestión de pavimentos de hormigón (Tesis Doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

- [6] López-Carreño, R. D., Carrascón, S., Aguado, A., & Pujadas, P. (2020). Mechanical Connectors to Enhance the Interfacial Debonding of Concrete Overlays. *Applied Sciences*, 10(11), 3876.
- [7] Ministerio de Fomento (2004). Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3. Artículo 550: Pavimentos de hormigón. Dirección General de Carreteras. Madrid.
- [8] Ministerio de Fomento (2003). Norma 6.1-IC sobre Secciones de Firme. Dirección General de Carreteras, Madrid, 2003
- [9] Picazo-Iranzo, A., Garcia-Alberti, M., Enfadaque-Diaz, A., Galvez-Ruiz, J.. (2018). ASSESSMENT OF SHEAR STRENGTH OF POLYOLEFIN AND STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE. *DYNA*, 93(2). 211-215. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8485>
- [10] Picazo-Iranzo, A., Garcia-Alberti, M., Enfadaque-Diaz, A., Galvez-Ruiz, J.. (2019). EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE TENSILE AND SHEAR STRENGTH BEHAVIOUR OF POLYOLEFIN FIBRE REINFORCED CONCRETE . *DYNA*, 94(4). 437-441. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9022>
- [11] UNE-EN 13036-8:2008. Características superficiales de carreteras y superficies aeroportuarias. Métodos de ensayo. Parte 8: Determinación de los índices de regularidad superficial transversal.
- [12] UNE-EN 13036-1 (2010). Características superficiales de carreteras y aeropuertos. Métodos de ensayo. Parte 1: Medición de la profundidad de la macrotextura superficial del pavimento mediante el método volumétrico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar su agradecimiento al Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) por su estrecha colaboración en este trabajo. El primer autor quiere mostrar su gratitud a la Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca de la Generalitat de Catalunya por la beca pre-doctoral FI-DGR 2015. Finalmente, el cuarto autor también quiere agradecer al Plan Serra Húnter (SHP, Serra Húnter Programme) de la Secretaria d'Universitats i Recerca del Departament d'Empresa i Coneixement de la Generalitat de Catalunya y a la financiación del grupo de investigación 2017 SGR 1481.