

Pavimento de hormigón armado continuo bicapa en el tramo Yecla-Caudete de la autovía A-33, entre Blanca y La Font de la Figuera



Continuous two-layer reinforced concrete pavement in the Yecla-Caudete section of the A-33 motorway, between Blanca and La Font de la Figuera

Angel García Garay

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos del Estado

Gustavo Pérez Morales

Jefe de Servicio de Planeamiento, Proyectos y Obras de la Demarcación de Carreteras del Estado en Murcia

Antonio Cerdá Ferrer

Ingeniero del Servicio de Planeamiento, Proyectos y Obras de la Demarcación de Carreteras del Estado en Murcia

Pedro Hernández Carrillo

Jefe del Laboratorio de la Demarcación de Carreteras del Estado en Murcia

Rafael Rueda Arriete

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)

El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de España, MITMA, está llevando a cabo, desde el año 2.020, la construcción de un tramo de la autovía A-33, entre las localidades de Yecla (Murcia), y Caudete (Albacete). El futuro tramo de autovía, con una velocidad de proyecto de 120 km/h, un tráfico de vehículos pesados previsto en el carril de proyecto y en el año de puesta en servicio cercano a los 3.000, y una longitud de 16 km, contará con un pavimento de hormigón armado continuo de 24 cm de espesor, construido en dos capas (19 cm + 5 cm), y con una textura de árido visto obtenida por la técnica de denudado. El hormigón de la capa inferior del pavimento será un HF-4,5 (de resistencia característica a flexo tracción a 28 días de 4,5 MPa), siendo el de la capa superior un HF-5,0 (de resistencia característica a flexotracción a 28 días de 5,0 MPa). El pavimento se apoyará sobre una capa de 15 cm de

hormigón magro, que descansará a su vez sobre una explanada tipo E3 (con $E_{v2} \geq 300$ MPa en el segundo ciclo del ensayo de carga con placa), formada por 30 cm de suelo estabilizado in situ con cemento tipo S-EST3, sobre 30 cm de suelo seleccionado con CBR ≥ 10 , cumpliendo todos los materiales lo recogido en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) del citado Ministerio.

Aunque en España existen varios tramos de autovía construidos con la técnica del pavimento de hormigón armado continuo, algunos de ellos con más de 45 años en servicio, este tramo supondrá un auténtico reto en nuestro país, al ser el primero que aglutina la técnica del armado continuo con la construcción en dos capas y con la textura de árido visto

ThisxxxThe Ministry of Transport, Mobility and Urban Agenda of Spain, MITMA, is carrying out, since 2020, the construction of a section of the A-33 motorway, between the towns of Yecla (Murcia), and Caudete (Albacete). The future stretch of highway, with a project speed of 120 km/h, heavy vehicle traffic expected in the project lane and in the year of commissioning of close to 3,000, and a length of 16 km, will have a continuous reinforced concrete pavement 24 cm thick, built in two layers (19 cm + 5 cm), and with an exposed aggregate texture obtained by the denuding technique. The concrete of the lower layer of the pavement will be HF-4.5 (characteristic resistance to flexotraction at 28 days of 4.5 MPa), being that of the upper layer HF-5.0 (characteristic resistance to flexotraction at 28 days of 5.0 MPa). The pavement will rest on a 15 cm layer of lean concrete, which will in

turn rest on an E3 type esplanade (with $E_{v2} \geq 300$ MPa in the second cycle of the plate load test), made up of 30 cm of stabilized soil in situ with S-EST3 type cement, on 30 cm of selected soil with $CBR \geq 10$, all materials complying with the provisions of the Specific Technical Specifications for Road and Bridge Works (PG-3) of the aforementioned Ministry.

Although in Spain there are several highway sections built with the continuous reinforced concrete pavement technique, some of them with more than 45 years in service, this section will be a real challenge in our country, as it is the first to bring together the reinforcement technique. continued with the construction in two layers and with the texture of exposed aggregate

1. Introducción

La autovía A-33, Blanca – Font de la Figuera situada en el sureste de España, es una autovía de nuevo trazado con dos calzadas de dos carriles cada una, y mediana de 10 metros que discurre entre los municipios de Blanca, en Murcia, y Font de la Figuera, en Valencia. Con una longitud total a de 90 km, frente a los 107,3 por la N-344.

Cuando entre en servicio servirá de conexión entre los corredores de la A-31 (que conecta la ruta Madrid-Valencia con Alicante), la A-30 (que comunica Albacete con Murcia y Cartagena), y la A-35 (que comunica Valencia con Albacete, partiendo de Almansa). Por tanto, la autovía A-33 discurre por tres comunidades autónomas distintas, la Región de Murcia, Castilla La Mancha y la Comunidad Valenciana, siendo la primera de ellas la que alberga un mayor número de kilómetros.

Su construcción, está motivada por el fuerte incremento del tráfico en los últimos años y por la necesidad de contar con una ruta alternativa a la autovía A-7 para realizar el trayecto Murcia – Valencia por el interior, y cuando esté finalizada, reducirá di-

cho trayecto, en 46 km con respecto al itinerario costero, mejorando notablemente los tiempos de recorrido, así como la comodidad y la seguridad de los usuarios. Además permitirá un ahorro de combustible estimado en 6l para los vehículos pesados con respecto al itinerario por la N-344

La rentabilidad de esta autovía fue analizada en el “Análisis Coste / Beneficio de las principales actuaciones contempladas en el Protocolo de Carreteras del Estado en la Comunidad de MURCIA”, realizado en 2012 por la Demarcación de Carreteras del Estado en Murcia, obteniendo los siguientes datos:

- TIR 15,02 %
- VAN 560.618.559
- PRI 2022 (10 años)
- B/C 3.19

A fecha de redacción de este artículo (noviembre de 2022), la autovía A-33, entre Blanca y la Font de la Figuera, se encuentra casi completamente finalizada, a falta de este último tramo de 16 km, entre los municipios de Yecla (Murcia) y Caudete (Albacete), que se encuentra en fase de construcción.

La principal característica de este último tramo entre Yecla y Caudete es el tipo de firme, constituido por un pavimento de hormigón armado continuo de 24 cm de espesor, construido con la técnica bicapa “fresco sobre fresco” (19 cm + 5 cm), y con una textura de árido visto obtenido por denudado químico.

Por dicha razón, creemos que esta obra constituye un auténtico reto en España, al ser la primera vez que se emplea la técnica del armado continuo con la construcción en dos capas y con la textura de árido visto.

2. Situación actual de los pavimentos de hormigón en España

La construcción de pavimentos de hormigón en España es generalizada y bien conocida en otros ámbitos como los puertos, los aeropuertos, las áreas industriales y logísticas, y también en las áreas urbanas, sin embargo, en el campo de las carreteras de alta capacidad, el pavimento de hormigón ha sido una solución escasamente empleada en los últimos 30 años, a pesar de que nuestro país contaba ya a mediados de la década



Figura 1. Situación de la actuación

de los 90 del siglo pasado con más de 1.600 km de calzada con esta tipología de pavimento (según el dato extraído del artículo publicado por D. Carlos Jofré en octubre de 2019, en la revista *Cemento-Hormigón*, más de 11 millones de metros cuadrados de calzada con pavimento de hormigón). [4]

Tras el Plan General de Carreteras del periodo 1984-1991, diversos factores (entre ellos, una rodadura poco confortable en ocasiones), motivaron que se abandonara prácticamente el empleo de estos pavimentos en la red estatal de carreteras, salvo algunas realizaciones aisladas. La más importante es el tramo Albuñol-Adra de la Autovía del Mediterráneo A-7, con una longitud de 10,5 km, puesto en servicio en 2008 y que cuenta con un pavimento de hormigón armado continuo construido en una sola capa y con textura estriada longitudinal. Aparte del anterior, únicamente puede mencionarse en la red de autovías un tramo experimental de 900 m de longitud en la autovía autonómica C-17, que conecta el área metropolitana de Barcelona con Ripoll (Girona). Dicho tramo, situado en el límite entre las provincias de Barcelona y Girona, se construyó para probar la viabilidad de la técnica austriaca de pavimentos de hormigón bicapa con pasadores en las juntas y dis-

curre, en gran parte, en el interior de un túnel. El comportamiento del pavimento en ambas obras ha sido muy satisfactorio. Dentro de las redes autonómicas hay que mencionar en la A-364 la variante de Marchena (Sevilla), abierta al tráfico en 2011, en la que se dispuso en una parte (2 km) un pavimento continuo de hormigón armado; y la carretera entre Castrofuerte y Toral (3,5 km), en la provincia de León, puesta en servicio en 2012, que tiene un pavimento de hormigón en masa con una terminación obtenida mediante fresado.

La publicación del Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, en el que se hace obligatorio el empleo de pavimento de hormigón en los túneles de más de 1 km de longitud, ha dado lugar a algunas realizaciones en este campo (túneles en la autopista Cartagena-Vera, túnel Juan Carlos I en Vielha o varios túneles en la provincia de Barcelona).

Como principal conclusión de lo expuesto se puede destacar que, al igual que en muchos otros países, la gran durabilidad de los pavimentos de hormigón se ha visto también confirmada en España. Las tres técnicas principales: los pavimentos en masa con juntas sin pasadores, los pavimentos en masa con pasadores en

las juntas y los pavimentos continuos de hormigón armado, han sido utilizadas con éxito, como lo demuestran la gran mayoría de los tramos construidos. Por citar uno de ellos, también con pavimento de hormigón armado continuo como el caso que nos ocupa, la autopista de Oviedo-Gijón-Avilés, conocida como "Y asturiana", con 43 km de longitud y cercana a cumplir los 50 años en servicio, fue la primera aplicación a gran escala en España de esta técnica.

No obstante, no podemos obviar otra de las principales conclusiones de lo argumentado en los párrafos anteriores, que es la pérdida de tecnología, maquinaria y la inexistencia de empresas subcontratistas especializadas en esta unidad de obra, lo que hace que el reto de la construcción de este tramo sea todavía más difícil si cabe.

3. Descripción de la actuación

3.1. Descripción general del proyecto

El presente proyecto constituye el último tramo que finalizará completamente la autovía A-33 de Blanca (Murcia) a Font de la Higuera (Comunidad de Valencia). El tramo que

nos ocupa conecta los términos municipales de Yecla, en la provincia de Murcia, y Caudete, en la provincia de Albacete (Castilla La Mancha), discurriendo paralelamente a la actual carretera N-344.

La longitud total del tronco principal es de 16 km, siendo la velocidad de proyecto de 120 km/h. La autovía está formada por dos calzadas separadas con dos carriles cada una de 3,5 m de anchura, arcén exterior de 2,5 m y arcén interior de 1 m.

A lo largo del trazado se proyectan 4 viaductos, con el fin de evitar el efecto de embalse que produciría un terraplén en las distintas ramblas que atraviesa la autovía, siendo las longitudes de estos viaductos las siguientes: 350 m, 240 m, 216 m y 210 m.

En cuanto al firme, éste está formado por una solución novedosa en España, un pavimento de hormigón armado continuo construido mediante la técnica bicapa con la textura de árido visto. Si bien en España existen varios tramos de autovía construidos con pavimento de hormigón armado continuo, algunos de ellos con más de 45 años en servicio, y también disponemos de algún tramo construido con la técnica bicapa y árido expuesto de hormigón en masa, este tramo supondrá un auténtico reto en nuestro país, al ser el primero que aglutina la técnica del armado continuo con la construcción en dos capas y con la textura de árido visto.

3.2. Diseño del firme

Para el diseño de los firmes de las carreteras de nueva construcción en España dependientes del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), resulta de aplicación la Norma 6.1-I.C., la cual nos proporciona un Catálogo de secciones de firme para distintas categorías de tráfico pesado y de explanada. Dentro de cada categoría de tráfico y explanada se nos aportan 3 o 4 posibles soluciones con distinta tipología de firme, quedando a criterio del proyectista la elección de la solución más adecuada en función de los condicionantes técnicos, económicos, ambientales y de disponibilidad de materiales en la zona, debiendo para ello realizar un análisis del comportamiento del firme durante toda la vida útil del mismo.

Por tanto, para dimensionar un firme es necesario conocer el tráfico de vehículos pesados que circulará por la carretera y la capacidad de soporte de la explanada sobre la que apoya el firme.

Por otra parte, desde el punto de vista de los requisitos a exigir a los materiales, es de aplicación el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3), actualizado en el capítulo de firmes por la Orden FOM 2523/2014, de 12 de diciembre, del Ministerio de Fomento (actual Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana MITMA).

3.2.1. Tráfico

Para llevar a cabo el estudio del tráfico, según se recoge en el proyecto constructivo, durante la redacción del mismo se realizó una campaña de aforos manuales en los cinco enlaces más significativos existentes en la carretera N-344, con el fin de determinar la distribución del tráfico en los nuevos enlaces previstos, así como su configuración en los distintos subtramos considerados de la futura autovía.

Los subtramos considerados con las distancias correspondientes entre enlaces, así como la Intensidad Media Diaria de vehículos Pesados (IMDP) que se prevé en el carril de proyecto y en el año de puesta de servicio en dichos subtramos, se presentan en la tabla 1.

De acuerdo con la Norma 6.1-IC sobre secciones de firme aprobada por la Orden FOM/3460/2003 de 28 de noviembre, las categorías de tráfico pesado son las referidas en la figura 2.

En consecuencia, la categoría de tráfico pesado obtenida para el tronco de la autovía de cara a la aplicación del catálogo es T0.

3.2.2. Materiales disponibles y formación de la explanada

La Norma 6-1-I.C. recoge en su apartado 5.1. FORMACIÓN DE LA EXPLANADA, tres categorías de explanada, denominadas respectivamente E1, E2 y E3. Estas categorías se determinan según el módulo de

Tabla 1. Tráfico en los distintos subtramos considerados de la futura autovía A-33

Elemento de diseño	Longitud (km)	IMD ₂₀₁₁	% Pesados	IMDP ₂₀₁₁	IMDp ₂₀₀₉ en el carril de proyecto	Categoría de tráfico pesado 6.1.
1. Yecla Centro (A-3223) – Yecla Este (C-3314)	6,1	14.153	39,4	5.576	2.788	T0
2. Yecla Este – Caudete Oeste (CM-3320)	8,8	13.859	39,8	5.516	2.758	T0
3. Caudete Oeste (CM-3320) – Semienlace Caudete Este.	4,4	16.625	35,8	5.952	2.976	T0
4. Semienlace Caudete E. – E. Caudete E.	1,2	16.146	36,3	5.860	2.930	T0
5. E. Caudete E. – Conexión A-31	1,5	16.751	34,8	5.829	2.915	T0

TABLA 1.A. CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T2

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T2
IMDp (vehículos pesados/día)	$\geq 4\,000$	$< 4\,000$ $\geq 2\,000$	$< 2\,000$ ≥ 800	< 800 ≥ 200

TABLA 1.B. CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T3 Y T4

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados/día)	< 200 ≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 25	< 25

Figura 2. Categorías de tráfico pesado en la Norma 6.1-I.C.

TABLA 2. MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD EN EL SEGUNDO CICLO DE CARGA

CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	E2	E3
E_{v2} (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

Figura 3. Categorías de explanada en la Norma 6.1-I.C.

compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}), obtenido en el ensayo de carga con placa (según Norma UNE 103808:2006), cuyos valores se recogen en la figura 3.

Para la categoría de tráfico que se define en este Proyecto, T0, la Norma 6.1-IC sólo admite el tipo de explanada E3. Por otro lado, según lo dispuesto en la Nota de Servicio 5/2006

sobre Explanaciones y Capas de firme tratadas con cemento del MITMA, independientemente de la categoría de tráfico pesado previsto en la fecha de puesta en servicio, todo tramo de autovía de nueva construcción que se proyecte deberá disponer de una categoría de explanada tipo E3.

Por todo ello, se adopta en este caso una explanada de categoría

E3, con una capacidad de soporte medida mediante el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga del ensayo de carga con placa, superior a los 300 MPa ($E_{v2} \geq 300$ MPa). Esta explanada es la de mayor calidad recogida en la norma y por ello la más extendida en la construcción de las autovías en nuestro país, permitiendo, debido a su mayor capacidad de soporte, optimizar los espesores de las secciones de firme, con el consiguiente menor coste de los mismos.

Para alcanzar la capacidad de soporte en la explanada (superficie sobre la que apoya el firme), la Norma 6.1-I.C. nos aporta la siguiente tabla, en la que se nos proporciona una serie de soluciones para cada categoría, a partir de la calidad del suelo subyacente. (Figura 4)

Considerando la calidad de suelo subyacente como tolerable (0), a la vista del estudio geotécnico elaborado en el proyecto, se plantean dos posibles soluciones para obtener la

		TIPOS DE SUELOS DE LA EXPLANACIÓN (DESMONTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-UNO)				
		SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES (IN)	SUELOS TOLERABLES (0)	SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) y (3)	ROCA (R)
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1 $E_{v2} \geq 80$ MPa					
	E2 $E_{v2} \geq 120$ MPa					
	E3 $E_{v2} \geq 300$ MPa					

IN Suelo inadecuado o marginal (Art. 330 del PG-3)

0 Suelo tolerable (Art. 330 del PG-3)

1 Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)

2 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

3 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

S-EST 1 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

S-EST 2 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

S-EST 3 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

HM-20 Hormigón (Art. 610 del PG-3)

tgo de material
espesor
mínimo en cm
suelo de explanación
o de la obra de
tierra subyacente

Figura 4. Tabla de formación de la explanada recogida en la Norma 6.1-I.C.

categoría de explanada E3. De entre las dos posibles opciones para conformar la explanada E3, el proyecto opta por la solución con 30 cm de suelo estabilizado con cemento tipo S-EST3, sobre 30 cm de suelo seleccionado tipo 2 (CBR ≥ 10 según norma UNE 103502:1995), por resultar la más económica en el caso que nos ocupa. Esa solución se aplicará igualmente tanto en zonas de desmonte como en zonas de terraplén. (Figura 5)

Los materiales necesarios para la ejecución del S-EST3 y del Suelo Seleccionado 2 proceden de la excavación de la traza y no es necesaria la aportación externa de material.

3.2.3. Elección de la sección del firme

Una vez conocidas la categoría de tráfico (T0) y de explanada (E3), podemos acudir al catálogo de secciones de firme de la Norma 6.1-I.C., el cual nos proporciona cuatro posibles soluciones para el firme, con distinta tipología. (Figura 6)

Para la selección de la sección más adecuada, en el proyecto se llevó a cabo una comparación técnica y económica de las distintas soluciones propuestas por la norma, descartando desde un principio las secciones semirrígidas debido a la abundancia de zahorras en el entor-

no del trazado, centrándose por tanto esa comparativa entre la sección 031 (sección semiflexible) y la 034 (sección rígida), las cuales tienen las siguientes características:

- La sección 031 de firme semiflexible está formada por 30 cm de mezclas bituminosas en caliente sobre una capa de 25 cm de zahorra artificial.
- La sección 034 de firme rígido está formada por 24 cm de un pavimento de hormigón armado continuo sobre una capa de 15 cm de hormigón magro. Como veremos más adelante, se propone la construcción de la capa de pavimento de 24 cm mediante la técnica bicapa o "wet on wet", en dos capas de 19 + 5 cm (para optimizar el coste al definir una textura de árido visto).

La sección con pavimento de hormigón presenta la ventaja de su

durabilidad, pudiendo alcanzar, sin grandes actuaciones de conservación, una vida útil de 30 años, e incluso superarlos. Por ello, para poder tomar finalmente la decisión del tipo de firme a emplear, el proyecto realizó un estudio comparativo desde el punto de vista económico, comparando ambas soluciones a largo plazo, considerando no sólo los costes de construcción, sino también los costes de conservación y mantenimiento durante ese periodo de vida.

Para el estudio comparativo de los costes de conservación y mantenimiento se emplean los ratios obtenidos del "Estudio económico de las secciones de firme de la Norma 6.1-I.C. de la Instrucción de Carreteras", realizado por IECA en 2007. Este estudio se basa, a su vez, en un estudio realizado por la Demarcación de Carreteras del Estado en Aragón, en 1987, titulado "Estudio económico de las nuevas secciones de firme en autovías".

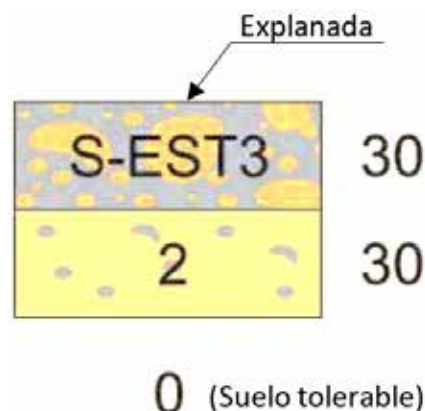


Figura 5. Capas de coronación para la formación de la explanada a partir de un suelo tolerable

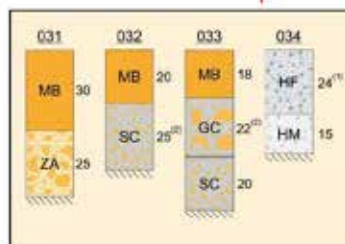
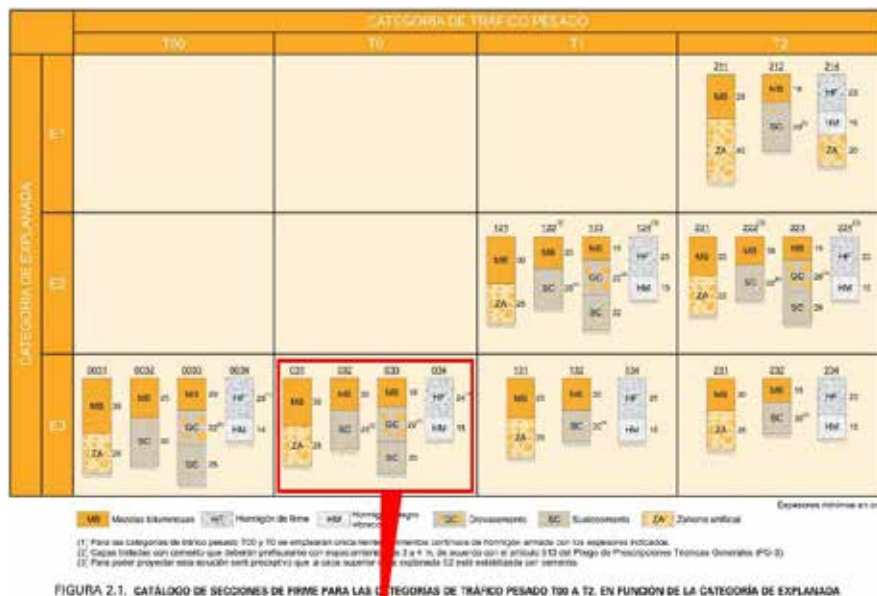


Figura 6. Secciones proporcionadas por la Norma 6.1-I.C. para tráfico T0 y explanada E3

Según el estudio, las actuaciones tipo de mantenimiento a realizar son las siguientes:

- Secciones con pavimento bituminoso (031): 6 cm de aglomerado a los 10 y a los 20 años.
- Secciones con pavimento de hormigón armado continuo (secciones 034): Extracción del material de sellado, reparación de labios y sellado de juntas longitudinales a los 10 y a los 20 años.

En cuanto a los costes de conservación, no existe en nuestro país una valoración precisa que cuantifique estos costes de los diversos tipos de firme. En otros países de nuestro entorno, con la misma carencia de datos fiables, se estiman estas necesidades en un tanto por ciento de los costes de construcción. Queda pues la dificultad en establecer los coeficientes a aplicar, si bien la experiencia demuestra que los costes de conservación para pavimentos de hormigón son menores que los de los firmes bituminosos.

Entre las cifras que suelen barajarse, es normal considerar un gasto anual del 0,50 % de los costes de construcción para las secciones flexibles o semirrígidas y el 0,25 % para los firmes de hormigón.

Dentro del estudio comparativo se consideró también un valor de actualización del gasto, ya que económicamente no es lo mismo realizar un gasto hoy que dentro de 10 o 20 años. Existen dos factores contrapuestos, por un lado, el coste de los factores de producción (materiales, maquinaria y mano de obra) sufre un incremento y, por otro lado, hasta que no se produzca el gasto, el importe de éste podemos invertirlo con el consiguiente beneficio económico. Este beneficio será mayor que el incremento de coste de los factores de producción. La diferencia entre ambos será el valor de actualización. No

Tabla 2.

ACTUALIZACIÓN	α Suma de gastos acumulados en los 30 años	β Gasto en el año 10	γ Gasto en el año 20
0%	30,000	1,000	1,000
1%	25,808	0,905	0,820
2%	22,396	0,820	0,673
3%	19,600	0,744	0,554
4%	17,292	0,676	0,456
5%	15,372	0,614	0,377

es fácil fijar este valor a priori, al depender de múltiples factores.

Durante el periodo de proyecto de 30 años, tendremos inversiones de mantenimiento (refuerzo o renovación superficial) a 10 y 20 años y gastos anuales de conservación que serán un porcentaje del coste de construcción.

El coste "C" de una operación de refuerzo, renovación o gasto de conservación realizado en un año i cualquiera depende del valor de actualización adoptado, que se estima mediante la siguiente expresión:

$$\text{Valor actualizado} = C \cdot \frac{1}{(1 + \text{Actualización})^i}$$

Y el gasto de conservación realizado todos los años y acumulado hasta el año j sería:

$$\text{Valor actualizado} = C \cdot \sum_{k=1}^j \frac{1}{(1 + \text{Actualización})^k}$$

Por tanto, tendríamos los siguientes coeficientes de actualización:

- Suma de gastos de conservación:

$$\alpha = \sum_{k=1}^{30} \frac{1}{(1 + \text{Actualización})^k}$$

- Gastos de mantenimiento en el año 10:

$$\beta = \frac{1}{(1 + \text{Actualización})^{10}}$$

Gastos de mantenimiento en el año 20:

$$\gamma = \frac{1}{(1 + \text{Actualización})^{20}}$$

En la tabla 2, se recoge la siguiente tabla con los coeficientes de actualización a aplicar a los costes de conservación y mantenimiento en diferentes periodos, en función de la tasa de actualización adoptada.

En nuestro caso, el proyecto adoptó una tasa de actualización del 3%. Conviene señalar que dicho proyecto se finalizó en 2009, por lo que los costes de construcción y de los materiales en ese momento eran muy inferiores a los actuales.

En las tablas 3 a 6, se recogen las tablas extraídas del proyecto con los costes de construcción y los costes de conservación y mantenimiento por km de carretera, y finalmente la tabla resumen comparativa de los costes totales en los 30 años considerados.

Por tanto, si bien el pavimento de hormigón armado continuo presenta un coste de construcción superior al del pavimento bituminoso, si tenemos en cuenta los costes de conservación y mantenimiento durante los 30 años de vida útil, el resultado demuestra que es el pavimento de hormigón es el que tiene un menor coste total. Por ello, se elige la sección 034 de la Norma 6.1-IC para este tramo de la autovía A-33, formada por 24 cm de un pavimento, apoyado sobre una

Tabla 3. Resumen de costes de construcción (costes por km)				
	SECCIÓN	COSTES DE CONSTRUCCIÓN CALZADA €/km	COSTES DE CONSTRUCCIÓN ARCENES €/km	COSTES DE CONSTRUCCIÓN €/km
TRÁFICO T0 EXPLANADA E3	031	334.013,39	96.442,16	430.455,55
	034 CRCP	411.833,50	88.615,20	500.448,70

Tabla 4. Resumen de costes de conservación (costes por km)					
	SECCIÓN	COSTE DE CONSTRUCCIÓN €/km	Ratio	Actualización del 3% en 30 años	COSTES DE CONSERVACIÓN €/km
TRÁFICO T0 EXPLANADA E3	031	430.455,55	0,50%	19,600	42.184,64
	034 CRCP	500.448,70	0,25%	19,600	24.521,99

Tabla 5. Resumen de costes de mantenimiento (costes por km)						
	SECCIÓN	REFUERZO 6 cm AGLOMERADO A LOS 10 AÑOS Coste (€/km)	REFUERZO 6 cm AGLOMERADO A LOS 20 AÑOS Coste (€/km)	REPARACIÓN Y SELLADO JUNTAS A LOS 10 AÑOS Coste (€/km)	REPARACIÓN Y SELLADO JUNTAS A LOS 20 AÑOS Coste (€/km)	COSTES DE MANTENIMIENTO €/km
TRÁFICO T0 EXPLANADA E3	031	49.464,15	36.832,18			86.296,33
	034 CRCP			2.976,00 (1)	2.216,00 (1)	5.192,00

Tabla 6. Resumen de costes totales (costes por km)					
	SECCIÓN	COSTES DE CONSTRUCCIÓN €/km	COSTES DE MANTENIMIENTO €/km	COSTES DE CONSERVACIÓN €/km	COSTES TOTALES €/km
TRÁFICO T0 EXPLANADA E3	031	430.455,55	86.296,33	42.184,64	558.936,52
	034 PHAC	500.448,70	5.192,00	24.521,99	530.162,69

base de 15 cm de hormigón magro. Dado que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) del Ministerio nos permite tanto la textura de árido visto como la construcción bicapa, finalmente se adoptan las siguientes características finales para el pavimento:

- Pavimento de hormigón armado continuo de 24 cm de espesor total construido mediante la técnica bicapa (wet on wet), con una primera capa de 19 cm de hormigón vibrado HF-4,5 (resistencia característica a flexotracción a 28 días

de 4,5 MPa), y una capa superior de 5 cm de hormigón vibrado HF-5,0 (resistencia característica a flexotracción a 28 días de 5,0 MPa), ésta última con áridos de la mayor calidad para conseguir una textura de árido visto.

- La cuantía geométrica mínima de la armadura se fija en el 0,72%. Esta cuantía se materializa mediante la colocación de barras longitudinales de acero corrugado B500SD Ø20 mm cada 18 cm.
- Transversalmente se colocarán barras de acero corrugado B500SD Ø10 mm espaciadas 80

cm e inclinadas 60° respecto al eje longitudinal de la calzada. La armadura transversal se apoyará sobre piezas especiales y su función principal es servir de armadura de montaje de la armadura longitudinal.

- El árido grueso de la capa superior deberá tener un coeficiente de Los Ángeles ≤ 20 y un coeficiente de pulimento acelerado $\geq 0,56$, según lo exigido por el artículo 550 del Pliego PG-3.
- La base estará constituida por una capa de hormigón magro de 15 cm de espesor.

- La textura superficial será de árido visto obtenida mediante la aplicación de un producto retardador de fraguado. Este producto, con una dotación mínima de 200 g/m², afectará a los milímetros superiores del pavimento, evitando su fraguado y permitiendo que, mediante un barrido mecánico, se elimine la lechada y quede en superficie el árido visto que configurará la textura final denudada de la capa de rodadura. La profundidad de textura estará comprendida entre 0,9 mm y 1,4 mm.
- Posteriormente al barrido y eliminación del mortero, se procederá a realizar un segundo curado mediante la extensión de un líquido de curado que cumpla la norma europea EN 14754.1. La dotación será superior a 250 g/m².
- El ancho de extendido de la capa del pavimento será de 8,5 m, incluyendo los dos carriles, el arcén interior de 1 m y 0,5 m del arcén exterior. Los restantes 2 m del arcén exterior se ejecutarán con hormigón en masa HF-4,5 sobre la base de hormigón magro, obteniéndose la textura superficial en esta zona del arcén exterior mediante cepillado transversal.
- Se dispondrá una junta longitudinal de alabeo entre los carriles, ejecutadas por serrado, con 7 cm de profundidad y sellada. La posición de esta junta deberá quedar 25 cm a la izquierda del eje separador de los dos carriles, fuera de la marca vial y evitando situarla en las zonas de mayor incidencia de la rodadura del tráfico.
- La junta longitudinal entre carril y arcén exterior será una junta de construcción y se dispondrá 50 cm a la derecha del borde de la calzada, dentro del arcén exterior.
- Se realizará el cosido de las juntas longitudinales carril-arcén exterior

y carril-carril con barras de atado de 12 mm de diámetro y 80 cm de longitud, separadas entre sí 1 m, situadas en la mitad del espesor.

- Se plantea la ejecución de 6 rastriillos de anclaje antes de cada estructura y al inicio y final del firme.
- Para conseguir el patrón de fisuración deseado, se inducirán las fisuras transversales mediante cortes en los laterales de 40 cm de longitud y 4 cm de profundidad, separados cada metro, según la técnica desarrollada en Bélgica en los últimos años.

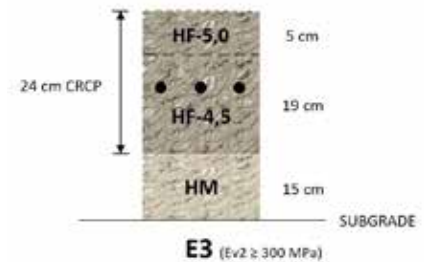


Figura 7. Sección 034 del Catálogo de Secciones de Firme de la Norma 6.1-I.C., construida mediante la técnica bicapa

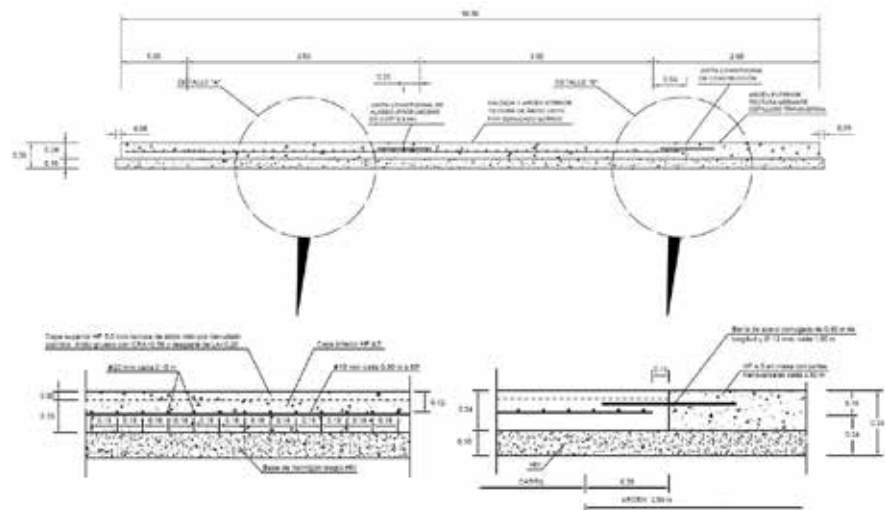


Figura 8. Sección transversal y detalles

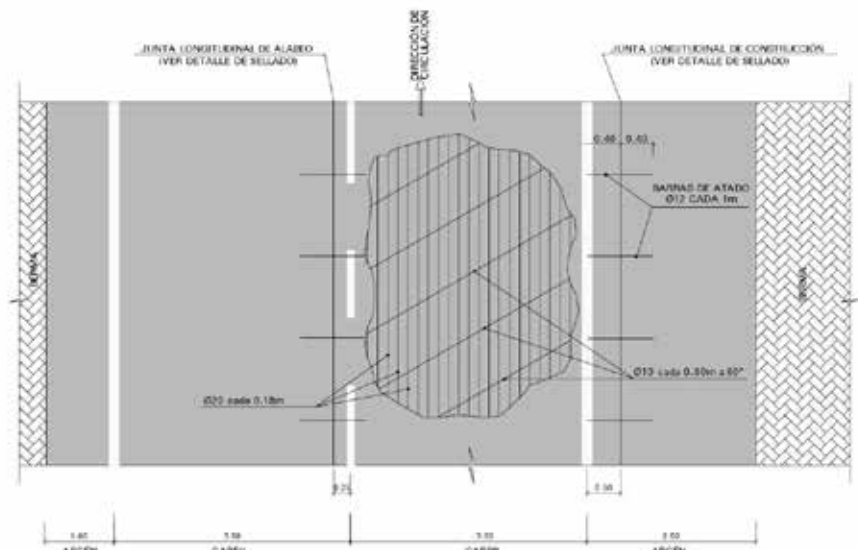


Figura 9. Planta del pavimento armado continuo

4. Construcción del firme

4.1. Consideraciones generales

Como se ha comentado en el apartado 2 de este artículo, la construcción de pavimentos de hormigón en carreteras de alta capacidad en España, en los últimos 30 años, ha sido muy reducida, siendo la solución habitual la de los firmes semirrígidos, formados por una capa de suelocemento sobre la que se disponen las capas necesarias de mezclas bituminosas, apoyándose todo el firme sobre una explanada estabilizada con cemento.

A pesar de ello, muchas de las grandes empresas constructoras españolas siguen disponiendo en su parque de maquinaria de las extendedoras de encofrados deslizantes que fueron empleadas en los años 80 y 90 en la construcción de un buen número de tramos de autovía en nuestro país. Tal es el caso de la empresa Fomento de Construcciones y Contratas (FCC), adjudicataria del tramo de la A-33 objeto del presente artículo, la cual presentó a principio de la obra una propuesta técnica para la ejecución de las capas del firme mediante el empleo de una serie de equipos propios, que se muestran a continuación.

La sección transversal de cada calzada de la carretera se ajusta a la sección tipo en tronco de autovía de dos carriles, con un ancho total de 10,50 m. Dicha sección está constituida por dos carriles de 3,50 m de anchura cada uno, un arcén interior de 1,00 m y un arcén exterior de 2,50 m. Por ello, en este caso se decidió, durante la redacción del proyecto constructivo, adoptar una anchura mínima de extendido de 8,5 m, de manera que dicha anchura incluyera los dos carriles, el arcén interior, y 0,50 m del arcén exterior, destinada esta última medida a alejar las cargas producidas por los

vehículos pesados, de la junta longitudinal existente entre el carril y el arcén exterior, minimizando así el “efecto de borde” y disminuyendo las tensiones. Los 2,00m restantes más exteriores del arcén exterior se construirán con hormigón en masa con juntas del tipo HF-4,5.

4.2. Maquinaria empleada y procedimiento constructivo

La maquinaria empleada en la obra, propuesta por el contratista FCC, es la siguiente:

- Extendidora de encofrados deslizantes CMI modelo SF-450,

para la ejecución del hormigón magro y de la capa inferior del pavimento bicapa.

- Extendidora de encofrados deslizantes CMI modelo SF-350 dotada de fratasadora longitudinal oscilante (“bailarina”), para la ejecución de la capa superior del pavimento bicapa. Regla alisadora CMI SF-350.
- Carro dosificador del líquido retardador de fraguado y del líquido de curado CMI modelo TC-250.
- Extendidora de encofrados deslizantes WITGEN SP-500,



Figura 10. CMI SF-450 para el hormigón magro y la capa inferior del pavimento bicapa (Fuente: FCC)



Figura 11. Puesta a punto de la extendidora CMI SF-350 (arriba), carro de curado (abajo izqda.) y equipo de barrido (Fuente: FCC)

para completar la anchura del hormigón magro y del arcén exterior.

- Camiones bañera para el transporte del hormigón, retroexcavadoras giratorias para el preextendido y cajas de bañera.
- Manipuladores telescópicos con implemento de barrido.
- Equipo tractor con cisterna para segundo curado.

4.2.1. Hormigón magro

La capa de base de hormigón magro cuenta con un espesor de 15 cm. Este hormigón se ajusta a los requisitos recogidos en el artículo

551 HORMIGÓN MAGRO VIBRADO del Pliego PG-3, siendo la resistencia característica a compresión a 28 días mínima exigida en dicho artículo, determinada sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de 15 MPa.

En cuanto a la anchura de dicha capa, previamente al inicio de su construcción se decidió dotar a ésta de un sobreancho de 5 cm en cada extremo, respecto del ancho del pavimento, de manera que su anchura total es de 10,60 m. Por ello, dado que la extendidora CMI SF-450 se han ajustado a 8,5 m, para tenerla preparada para la construcción de la capa inferior del

pavimento bicapa, se debe completar esa anchura adicional, lo que se lleva a cabo mediante una extendidora WIRTGEN SP-500.

El hormigón se transporta a la obra mediante camiones bañera, llevándose a cabo su preextendido mediante la ayuda de una retroexcavadora giratoria.

En la figura 15 se muestra la dosificación aproximada del hormigón magro.

4.2.2. Armadura

Una vez finalizado el hormigón magro se comienza la ejecución, sobre dicho hormigón, del armado del pavimento.

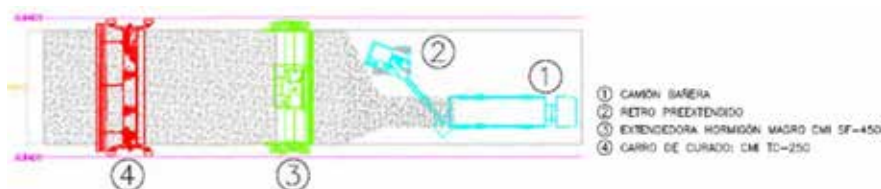


Figura 12. Croquis de extendido del hormigón magro



Figura 13. Imágenes del extendido del hormigón magro y curado (fotos tomadas a finales de junio de 2022)



Figura 14. Extendidora WIRTGEN completando el ancho de la capa de hormigón magro

El armado longitudinal está formado por 47 barras de acero B500SD, de 20 mm de diámetro, colocadas cada 18 cm, lo que supone una cuantía geométrica aproximada del 0,72%.

La armadura transversal de montaje se elabora mediante celosías a base de barras de acero corrugado B500SD de 10 mm de diámetro, espaciadas 80 cm e inclinadas 60° respecto al eje longitudinal de la calzada. Tanto en la junta longitudinal central de alabeo como en la junta longitudinal de construcción con el arcén, se colocan barras corrugadas de atado de 12 mm de diámetro y 80 cm de longitud, apoyadas sobre la armadura longitudinal, con el objetivo de mantener dichas juntas cerradas.

4.2.3. Pavimento bicapa

Como ya se ha comentado anteriormente, el pavimento cuenta con un espesor total de 24 cm y se ejecuta en dos capas con la técnica “fresco sobre fresco”, siguiendo las exigencias recogidas en el Pliego PG-3. La capa inferior, de 19 cm de espesor, alberga la armadura, empleándose para ella un hormigón HF-4,5, el cual se extiende, se vibra y se nivela mediante la extendidora de encofrados deslizantes CMI SF-450. Sobre esta primera capa se coloca la segunda capa de 5 cm de un hormigón HF-5,0 MPa, mediante la extendidora de encofrados deslizantes CMI SF-350.

El ancho de extendido de ambas máquinas es de 8,5 m, yendo éstas lo suficientemente próximas una de la otra para que los dos hormigones queden perfectamente adheridos. Posteriormente se completan los 2,00 m restantes del arcén exterior, con un hormigón HF-4,5 en un espesor total de 24 cm, mediante la extendidora de encofrados deslizantes WIRTGEN SP-500, atestando el hormigón por una de sus caras al pavimento bicapa ejecutado con anterioridad.

Materia Prima	Dosificación (1 m ³)
	HL200P20 MAGRO
CEM III A 42,5 N - CEMEX	200 Kg
AGUA APORTADA- ABSORCION = AGUA EFECTIVA	196 lit - 33 lit = 163 lit
ARENA 0/4 - ARIHORSA, S.L	1225 Kg
GRAVA 6/12- ARIHORSA, S.L.	150 Kg
GRAVA 12/20 - ARIHORSA, S.L.	635 Kg
PLASTIFICANTE MC	2.4 lit
AIREANTE MC	0.4 lit

Figura 15. Dosificación aproximada del hormigón magro



Figura 16. Armado del pavimento

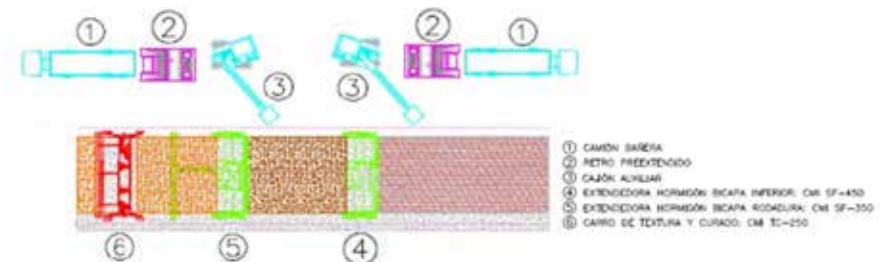


Figura 17: Croquis de extendido del pavimento bicapa



Figura 18: Imágenes del extendido de la capa inferior del pavimento bicapa (fotos tomadas el 7 de noviembre de 2022)



Figura 19: Imágenes del extendido de la capa superior del pavimento bicapa (fotos tomadas el 7 de noviembre de 2022)

Materia Prima	Dosificación (1 m ³)
	HF-4.5P20Ib (INFERIOR)
CEM III A 42,5 N - CEMEX	325 Kg
AGUA APORTADA- ABSORCION = AGUA EFECTIVA	181 lit - 33 lit = 148 lit
ARENA 0/4 - ARIHORSA, S.L.	1.042 Kg
GRAVA 6/12- ARIHORSA, S.L.	150 Kg
GRAVA 12/20 - ARIHORSA, S.L.	642 Kg
PLASTIFICANTE MC	2,9 lit
AIREANTE MC	1,1 lit

Figura 20. Dosificación aproximada del hormigón de la capa inferior

Materia Prima	Dosificación (1 m ³)
	HF-5P12Ib (RODADURA)
CEM III A 42,5 N - CEMEX	450 Kg
AGUA APORTADA- ABSORCION = AGUA EFECTIVA	183 lit - 36 lit = 147 lit
ARENA 0/3 - PORFIDO	100 Kg.
ARENA 0/4 -PORFIDO	285 Kg
GRAVA 6/12 - PORFIDO	1540 Kg
PLASTIFICANTE MC	3,6 lit
AIREANTE MC	1,5 lit

Figura 21. Dosificación aproximada del hormigón de la capa superior

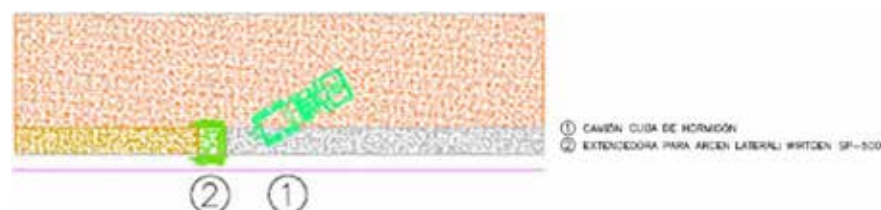


Figura 22. Croquis de extendido de los 2,00 m restantes del arcén exterior



Figura 23. Operaciones de barrido, limpieza y curado final



Figura 24. Pruebas de textura realizadas en la zona de hormigón magro

Debido a que la anchura de la capa de hormigón magro es prácticamente la misma que la del pavimento bicapa, ello obliga a que las orugas de las extendedoras empleadas para la ejecución de este último deban circular sobre la base estabilizada con cemento.

Dada la imposibilidad de que los camiones entren de frente a las extendedoras, por la presencia del armado, el vertido de los hormigones de ambas capas se realiza desde el lateral, mediante el empleo de dos retroexcavadoras giratorias, ayudándose de sendos cajones auxiliares en el que se vierten los hormigones desde las bañeras, de manera que se puede regular el suministro de hormigón delante de las máquinas.

Una cuestión fundamental es limitar la velocidad de extendido de dichas máquinas por debajo de 1 m/minuto. Velocidades superiores a ésta pueden conllevar problemas de regularidad superficial y derrames de los bordes, al liberar éstos demasiado rápido.

En la tabla de la figura 20 se muestra la dosificación aproximada del hormigón de la capa inferior del pavimento bicapa.

Y en la tabla de la figura 21 se muestra la dosificación aproximada del hormigón de la capa superior del pavimento bicapa.

4.2.4. Barrido y curado final

A las 24 h del extendido del pavimento bicapa se lleva a cabo el barrido mecánico de la superficie mediante un rodillo de púas metálicas acoplado a una manipuladora telescópica, para eliminar el mortero que no ha fraguado, dejando visto el árido. Posteriormente se aplica un líquido de curado mediante un tractor que lleva acoplada una cisterna.

Los restos dejados por el barrido se recogen mediante varias minicar-

gadoras de neumáticos modelo BOB-CAT S175.

En las pruebas iniciales realizadas, la profundidad de la textura oscila entre 1,1 y 1,5 mm, por encima de la mínima exigida en el Pliego PG-3 de 0,9 mm.

4.2.5. Otros detalles

Antes de cada estructura y en los extremos inicial y final del pavimento se ejecutan unos rastrillos de anclaje, disponiendo en cada una de las zonas, un conjunto de 6 rastrillos de unos 90 cm de profundidad y 65 cm de anchura, atados a la armadura del pavimento.

Para conseguir el patrón de fisuración deseado, se inducirán las fisuras transversales mediante cortes en los laterales de 40 cm de longitud y 4 cm de profundidad, separados cada metro, según la técnica desarrollada en Bélgica en los últimos años.

5. Conclusiones

El tramo Yecla y Caudete de la autovía A-33, entre las provincias de Murcia y Albacete, que se encuentra actualmente en construcción (noviembre de 2022), constituye un auténtico reto en España, al ser el primero que aglutina la técnica del pavimento de hormigón armado continuo con la construcción en dos capas y con la textura de árido visto.

Hasta el momento actual (noviembre de 2022), se ha ejecutado parte del hormigón magro de la base, el cual se ha aprovechado para realizar todas las pruebas posibles de cara a la construcción del pavimento bicapa: funcionamiento de las dos extendedoras, dosificaciones de las dos capas, funcionamiento del carro de distribución del líquido retardador de fraguado y curado, la consecución de la textura, los equipos y tiempos de barrido, profundidad de la textura,



Figura 25. Rastrillos de anclaje



Figura 26. Cortes para inducción del patrón de fisuración

regularidad superficial (IRI), adherencia neumático-pavimento, etc. En este sentido, el empleo de una base de hormigón magro supone un magnífico entrenamiento para poder conseguir después un buen pavimento, sobre todo en el caso de nuestro país, en el que no existe una ejecución habitual y continua de este tipo de pavimentos en carreteras.

Actualmente sólo se ha ejecutado un tramo de 2.300 m de pavimento bicapa en su ubicación definitiva con buenos resultados y se espera que después de los meses de invierno se retome la ejecución, finalizando dicho pavimento durante la primavera de 2023.

Referencias

- [1] Norma 6.1-IC: sobre Secciones de firme. Ministerio de Fomento, Madrid, 2003.
- [2] Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).
- [3] Jofré, C. "Achieving and maintaining the evenness of concrete pavements". European Concrete Pavement Association (Eupave), Bruselas (Bélgica), 2017.
- [4] Jofré, C. "Estudio de idoneidad de los pavimentos de hormigón en carreteras. Ventajas e inconvenientes". Artículo Cemento-Hormigón.
- [5] Jofré, C. "Experiencias Experiencias recientes con pavimentos de hormigón armado armado continuo. Parte 1 y 2". Revista Rutas mayo-junio de 2006. Asociación Técnica de Carreteras.
- [6] Ponencias de las IV Jornadas sobre Pavimentos de Hormigón. Oviedo, 29-30 de septiembre y 1 de octubre de 1993. Editadas por la Asociación Técnica de Carreteras, Madrid, 1994.
- [7] Ponencias de las V Jornadas sobre Pavimentos de Hormigón. Alicante, 2 y 3 de diciembre de 1999. Editadas por la Asociación Técnica de Carreteras, Madrid, 2000.
- [8] Rens, L. "Revêtements en béton armé continu". Présentation visita técnica Amberes, octubre 2021.
- [9] Rens, L. "Active Crack Control for Continuously Reinforced Concrete Pavements in Belgium Through Partial Surface Notches".
- [10] Toledo, J. & Relancio, J.M. "Análisis de la idoneidad de los equipos mecánicos previstos para realizar el extendido del pavimento de hormigón bicapa. Autovía A-33". ASEMAQ.- Informe N°- 20220124 . Rev.2. Enero 2022.
- [11] Rueda, R. "Informe sobre la idoneidad de los equipos y del procedimiento constructivo planteado por FCC para la construcción del firme con pavimento de hormigón armado continuo en el tramo Yecla-Caudete de la autovía A-33". Febrero 2022. ❖