

Experiencias recientes con pavimentos de hormigón armado continuo. Parte 1



Figura 1. Armadura de pavimento armado continuo.

Carlos Jofré, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

Resumen

Los pavimentos continuos de hormigón armado correctamente proyectados y construidos precisan una conservación muy reducida, lo que compensa el sobre coste de la armadura de acero. Por ello, en la actualidad son una de las opciones favoritas en muchos países para autopistas con tráfico pesado. En el artículo, después de una breve presentación de esta técnica se analiza el comportamiento a largo plazo de algunas obras y se describen varias realizaciones de las que de algunas de sus características se carece de experiencia en España y que, por tanto, pueden ser de interés: refuerzos y rehabilitaciones de tramos de autopista, pavimentos polifuncionales en

autopistas de peaje, aplicaciones en túneles y glorietas, pavimentos adheridos a una subbase bituminosa y pavimentos para uso combinado de tranvías y autobuses.

Palabras clave: hormigón, armadura, pavimento continuo, polifuncional.

1. Definición y características

Los pavimentos continuos de hormigón armado (PCHA) se pueden considerar como una extrapolación de los pavimentos de hormigón armado con juntas, en las que éstas se sitúan a distancias mayores que en los pavimentos de hormigón en masa, llegando a la eliminación casi completa de las juntas transversales, lo cual constituye su característica más representativa.

En estos pavimentos, las armaduras se disponen para mantener cosi-

das y cerradas las fisuras que inevitablemente se forman por la retracción del hormigón, así como por el acortamiento debido a una disminución de la temperatura de la losa, ambos parcialmente impedidos por el rozamiento entre la losa y la superficie del asiento. Evidentemente, las tensiones provocadas por las cargas del tráfico y por los gradientes de temperatura desempeñan también un importante papel en el proceso de fisuración.

Experimentalmente se ha comprobado que la cuantía necesaria de acero es proporcional a la longitud de la losa hasta unos 150-200 m, manteniéndose constante a partir de este valor. Por ello, las losas largas (en pavimentos de hormigón armado con juntas) requieren ya cuantías importantes; y, aunque de este modo se reduce el número de juntas transversales, las que quedan están sometidas a mayores variaciones de abertura, lo que se traduce en una peor transmi-

sión de cargas a través de ellas, pudiéndose producir una más fácil entrada de agua y de cuerpos extraños que podrá repercutir en mayores gastos de conservación.

Así, estos pavimentos están fuertemente armados (*figura 1 de la página anterior*) en el sentido longitudinal y constituyen una estructura continua, es decir, sin juntas transversales. Solo se interrumpen en los extremos del pavimento y en las proximidades de obras de paso de cierta importancia. Normalmente se han empleado como armaduras barras corrugadas de alto límite elástico (510 a 620 MPa).

La cuantía geométrica de la armadura longitudinal depende de varios factores; entre ellos, el límite elástico del acero y la resistencia del hormigón. Con hormigones HF-45, dicha cuantía se sitúa entre 0'65-0'7 %.

El proceso de fisuración transversal aleatoria de los PCHA se inicia poco después de su construcción y suele estabilizarse a los cuatro o cinco años. Se producen fisuras iniciales que no provocan excesiva tensión en el acero, determinándose por inducción una nueva fisura en el hormigón, aproximadamente antes de que se haya alcanzado el primer límite de elasticidad. En este proceso intervienen tanto los factores climatológicos como la acción del tráfico. La distancia entre fisuras y su abertura son inversamente proporcionales a la cuantía de acero empleada.

Empíricamente se ha comprobado que lo deseable es que la distancia final entre fisuras esté comprendida entre 1 y 3 m (con un óptimo entre 1,5 y 2 m) y que su abertura, en superficie, no sea superior a 0,5 mm, para que se disminuya el riesgo de corrosión. Asimismo, el reparto de fisuras debe ser lo más homogéneo posible. De este modo se asegura la transferencia de cargas a través de la fisura, sin desnivelaciones ni degradación bajo el tráfico.

En las primeras realizaciones, el acero se colocaba en el tercio superior del canto de la losa, no solamente para mantener cerradas las fisuras en su parte superior, sino también pa-



Figura 2. Armaduras longitudinales y armaduras transversales esviadas.



Figura 3. Autopista belga con pavimento armado continuo.

ra servir de "armadura de piel" y oponerse a los desprendimientos del hormigón bajo los efectos de la circulación. Ahora, se prefiere que la armadura quede colocada a la mitad del espesor. Con ello, aparte de disminuir los riesgos de una eventual corrosión, se ha mejorado la regularidad superficial, al suprimirse la "reflexión" de las armaduras en la superficie del pavimento en forma de ligeras ondulaciones, que provocaban molestias a los usuarios. No obstante, en algunas obras americanas se ha dispuesto la armadura en dos capas, situadas respectivamente en el tercio superior e inferior de la losa. Con ello se consigue también una contribución estructural de la armadura, ayudando a resistir los momentos de distinto signo que se producen en el pavimento co-

mo consecuencia principalmente de las cargas de los vehículos y los gradientes de temperatura.

La distancia entre las barras longitudinales es, generalmente, del orden de 15 cm para permitir la colocación del hormigón entre ellas.

Las armaduras transversales se colocan como apoyo de las longitudinales y para mantener su posición relativa. Es frecuente disponerlas con un cierto esviaje, para evitar que caigan en la vertical de las fisuras de retracción, que normalmente son perpendiculares al eje de la calzada (*figura 2*). No obstante, en muchas obras se han utilizado pavimentadoras provistas de guías, que van colocando las armaduras longitudinales en su emplazamiento definitivo a medida que se va efectuando el hormi-



Figura 4. Ejecución del pavimento de la autovía Adra-Albuñol.



Figura 5. Autovía Oviedo-Pola de Siero: armaduras longitudinales colocadas en los bordes de la capa de base.

gonado. En estos casos se suprimen las armaduras transversales.

2. Desarrollo histórico

Para que un pavimento de hormigón armado pueda considerarse como continuo hace falta que tenga una cierta longitud (del orden de los 400 m), de forma que al menos haya una parte central que no se mueva. En este sentido, el primer PCHA se construyó en 1938, en Indiana, Estados Unidos. De 1938 a 1958 esta técnica fue también utilizada en otros Estados, en una larga etapa de 20 años de investigación y puesta a punto. En 1958 ya estaban en servicio 130 km de calzada de dos carriles. A partir de esta fecha se empezaron a utilizar de forma creciente, alcanzando en la ac-

tualidad una longitud equivalente a calzada de dos carriles superior a 50 000 km. Más de 30 Estados han empleado los PCHA, destacando entre ellos Texas e Illinois.

En Europa, el interés por esta técnica se inició hacia 1950, y también duró unos 20 años la etapa de experimentación y puesta a punto. En varios países se construyeron tramos de ensayo (Bélgica, Suiza, Alemania, Gran Bretaña). En 1963, y entre los firmes experimentales de la CN-II en las proximidades de Madrid, se incluyó también una losa armada de 125 m.

Bélgica fue el primer país europeo en la utilización, a gran escala, de los PCHA en autopistas, a partir de 1970, (figura 3). Entre estas obras destaca la autopista Bruselas – Lieja, abierta al

tráfico en 1971 y todavía en servicio, con un comportamiento impecable. Desde dicha fecha, todos los pavimentos de hormigón construidos en la red de autopistas belgas son continuos de hormigón armado.

Después de Bélgica, España fue el segundo país europeo en emplear los PCHA en autopistas, con la construcción en 1975 de 43 km de calzada de dos carriles en la autopista Oviedo-Gijón-Avilés, también conocida como Y asturiana, por su forma en planta. Dicho pavimento se encuentra en la actualidad todavía en perfecto estado, a pesar de las condiciones de tráfico pesado e intenso, lluvias frecuentes y características mediocres de los terrenos por los que discurre la autopista. La conservación que ha requerido ha sido muy reducida, y por ello se ha utilizado también en otras obras en Asturias: la adición de un tercer carril a una de las calzadas de la Y, en una longitud de 5,65 km; la construcción de dos tramos de la Autovía del Cantábrico, entre Oviedo y Pola de Siero, con una longitud total de 26,8 km de calzada de dos carriles; y los nuevos ramales del enlace de Serín, también en la Y. Fuera de Asturias, en diciembre de 2007 se puso en servicio en la provincia de Almería el tramo Adra – Albuñol (figura 4) de la Autovía del Mediterráneo, con una longitud de 10,5 km. En la última revisión de la Norma 5.5.1 – IC sobre Secciones de Firme del Ministerio de Fomento (2003) se prescribe que los pavimentos de hormigón a utilizar en las dos categorías superiores de tráfico (T00 y T0) deben ser armados continuos.

Como un dato interesante de los citados tramos de autovía entre Oviedo y Pola de Siero, hay que mencionar que sus armaduras longitudinales, en lugar de apoyarse sobre soportes y mantenerse unidas mediante armaduras transversales, como es la técnica habitual, se depositaban en los bordes de la base de hormigón magro (figura 5) y luego se iban introduciendo en el hormigón fresco a través de unos tubos de corta longitud (“trompetas”) dispuestos en la parte

delantera de la pavimentadora (figura 6). Ello dejaba un espacio central libre que permitía el paso de los camiones de hormigón hasta una tolva de recepción, y desde ella, por un sistema de cintas y tornillos, llegaba hasta una cinta orientable que era la encargada de distribuir el hormigón delante de la pavimentadora (figura 7). La precisión obtenida con este sistema era suficiente, como se pudo comprobar en las calcatas realizadas; y el comportamiento del tramo ha sido correcto hasta el momento.

En Francia los pavimentos continuos de hormigón armado comenzaron a emplearse a gran escala en 1983. A partir de entonces, la experiencia en dicho país es superior a 300 km de calzada de 2 carriles, de los que una parte importante se ha empleado en autopistas en servicio como refuerzo de toda la calzada o para reconstrucción de los carriles de vehículos pesados. En algunos casos se ha recurrido a la ejecución en dos capas, reservando los áridos de mayor resistencia al desgaste para la capa superior.

Italia ha sido otro país europeo que se ha incorporado a la técnica de los pavimentos continuos de hormigón armado, en este caso desarrollando el denominado pavimento compuesto polifuncional, en el que la losa de hormigón armado continuo se recubre de una capa de rodadura de mezcla bituminosa. El primer tramo utilizando dicha solución se abrió al tráfico en 1988. Se tienen también ejemplos de pavimentos polifuncionales en Francia, Bélgica, Holanda e Inglaterra, entre otros países. Igualmente, en varios tramos de la autopista Bilbao – Behobia se ha añadido un carril exterior con pavimento polifuncional.

Asimismo, en Portugal se han ejecutado distintas obras con pavimentos continuos de hormigón armado a partir de 1988.

Además de las realizaciones de Estados Unidos y Europa, los pavimentos continuos de hormigón armado han sido también utilizados en algunos otros países, como Japón.

Como resumen de lo anterior, pue-



Figura 6. Autovía Oviedo-Pola de Siero: guías en la pavimentadora para posicionamiento de las armaduras longitudinales.



Figura 7. Autovía Oviedo-Pola de Siero: vista de conjunto de equipos para ejecución de pavimento mediante guiado de armaduras.

de decirse que se constata desde hace algunos años un renovado interés en la aplicación de los pavimentos continuos de hormigón armado en el caso de tráfico pesado, como consecuencia de su muy reducida conservación cuando se proyectan y construyen correctamente. La disminución de los costes del usuario puede compensar con creces el sobreprecio introducido por la armadura.

3. Campos de aplicación

Su coste inicial hace que el campo natural de aplicación de los pavimentos continuos de hormigón armado sean los firmes sometidos a tráfico pesado (autopistas y carreteras importantes), si bien en Bélgica y Fran-

cia se tienen algunos ejemplos de su empleo en carreteras secundarias. En principio se utilizaron en firmes de nueva construcción, aunque desde hace algunos años se ha extendido mucho su uso en refuerzos de firmes existentes, así como en la reconstrucción de carriles para vehículos pesados en autopistas. Los pavimentos continuos de hormigón armado se han empleado para reforzar tanto firmes de hormigón como bituminosos, e incluso pavimentos de adoquines.

Los pavimentos continuos de hormigón armado han sido utilizados también en aeropuertos. Constituyen ejemplos notables el aeropuerto de Narita (Tokio) o el refuerzo y alargamiento de la pista de la base francesa de Lorient-Lann-Bihoué.

Otro campo de empleo de los pavimentos continuos de hormigón armado son las carreteras en zonas en donde se prevean asientos diferenciales, puesto que la corta distancia entre las grietas que se forman en el pavimento hace que éste quede dividido en "losas" de pequeña longitud, que pueden acomodarse con facilidad a los movimientos del terreno.

Finalmente, hay que mencionar el uso de los pavimentos continuos de hormigón armado en realizaciones tales como glorietas, túneles y plataformas industriales.

4. Comportamiento a largo plazo de algunas obras con pavimento HAC

4.1 Pavimentos en Illinois (Estados Unidos)

En 1947 se construyó un tramo de ensayo en la carretera US-40 cerca de la ciudad de Vandalia, en el que se emplearon pavimentos de 17,5 y 20 cm de espesor y cuantías del 0,3, 0,5, 0,7 y 1 %. Aunque el tráfico no fue muy elevado (4,3 millones de ejes equivalentes de 18 kips, es decir, de unas 8,2 t, a lo largo de 20 años), algunos de sus resultados fueron de gran importancia para el desarrollo que experimentaron los pavimentos de HAC en dicho Estado, en el que a partir de 1960 han sido los habitualmente utilizados en las autopistas con pavimento de hormigón.

Se han empleado en Illinois distintos espesores y cuantías de armadura, así como varios tipos de subbases. Las principales conclusiones que pueden extraerse del comportamiento de estas obras son las siguientes:

- Una proporción importante de ellas tienen espesores entre 18 y 20 cm y cuantías entre 0,59 y 0,67%. En general se han utilizado armaduras corrugadas. Los espesores de proyecto se han ido aumentando progresivamente, pasando de 25 cm en las autopistas principales en las décadas de los 70 y 80 del pasado siglo a 30, 33 e incluso 36 cm en una autopista de la zona de Chicago (proyectada para

soportar 400 millones de ejes equivalentes de 18 kips, es decir, de unas 8,2 t)

- Se han utilizado diferentes tipos de subbases: granulares, tratadas con cemento y bituminosas. Estas últimas son las que han proporcionado un mejor comportamiento. Ello se atribuye al mayor rozamiento entre el pavimento de hormigón y la subbase, que se traduce en una menor separación entre las fisuras, y al buen soporte que proporcionan. Por ello, actualmente se prescribe en dicho estado como solución normalizada, disponer una subbase bituminosa de 10 cm de espesor bajo los pavimentos de HAC.

- En el mencionado tramo de ensayo de Vandalia la cuantía de armadura fue uno de los factores con mayor influencia en el comportamiento de las distintas soluciones. El porcentaje de fallos disminuyó de forma notable al aumentar dicha cuantía del 0,3 al 0,5 y del 0,5 al 0,7%, mientras que no se observaron diferencias importantes entre los subtramos con el 0,7% y el 1%. En correspondencia con ello, en Illinois se emplearon cuantías entre el 0,59 y el 0,67% en los años 60 y 70; pero se aumentaron al 0,71% en los 80 y al 0,8% en los pavimentos sometidos a tráfico muy elevados a partir de los 90. En la figura 8 puede verse el efecto del espesor y de la cuantía de armadura en el comportamiento de estos tramos. Como se aprecia en ella, la influencia de la armadura disminuye al ir aumentando el espesor del pavimento.

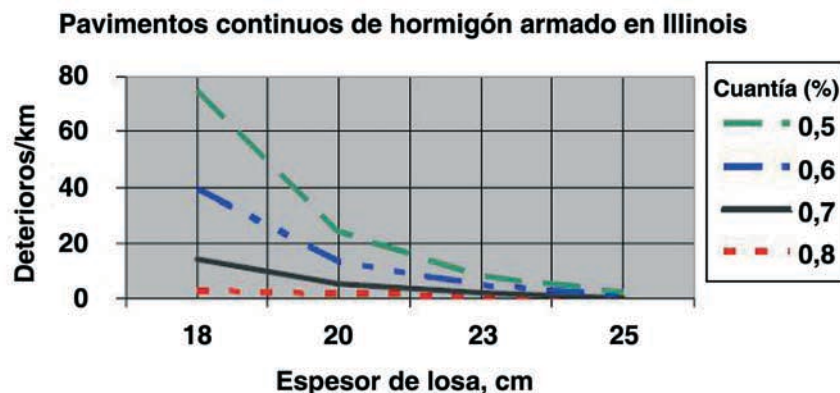


Figura 8. Influencia de algunos parámetros de diseño en el comportamiento de pavimentos armados continuos construidos en EE.UU.

4.2 La autopista Bruselas - Lieja

A finales de la década de los 60, el tramo Bruselas – Lieja era el único en Bélgica que faltaba por construir en la autopista transeuropea E5 (actualmente E40), que conecta Londres con Calais-Jabbeke, Bruselas, Lieja, Colonia, Francfort y Viena hasta Ankara.

Las obras se iniciaron en marzo de 1969, habiéndose abierto el tramo al tráfico en diciembre de 1972. Su longitud total es de 91,5 km. Tiene 2 calzadas con tres carriles cada una de ellas.

Salvo en el acceso a la circunvalación de Bruselas, el firme de la autopista está compuesto por un pavimento de hormigón armado continuo de 20 cm de espesor, sobre una capa intermedia de mezcla bituminosa de 6 cm y una subbase de hormigón magro de 20 cm. Al hormigón del pavimento se le exigió una resistencia característica de 60 MPa medida sobre testigos y una densidad seca aparente de al menos 2300 kg/m. Estos elevados valores se explican por el uso habitual de sales fundentes en invierno en Bélgica y por las dudas que se tenían sobre la eficacia de los aireantes en la época de la construcción de la autopista, por lo que para asegurar un buen comportamiento frente a dichas sales había que recurrir a hormigones muy resistentes y compactos.

La armadura longitudinal tiene una cuantía del 0,85%, y los ejes de las barras están situados a 7 ± 1 cm de la superficie, es decir, por encima del

plano medio del pavimento. Unos pocos meses después de su construcción, la separación media entre fisuras era de 1,5 m. Sin embargo, dichas fisuras no se presentaban generalmente siguiendo un esquema uniforme, sino agrupadas con distancias de varios metros entre grupos, con lo que la separación real entre fisuras era todavía más reducida. En 1989, con motivo de una evaluación llevada a cabo en varios pavimentos de HAC belgas se pudo observar que dicha separación se había incluso reducido, de forma que en algunas zonas el 60% de las fisuras estaban a menos de 40 cm entre sí. No obstante, se trata de fisuras muy finas, que no se han deteriorado con el paso de los vehículos y que no se extienden a la totalidad del espesor del pavimento, como se ha podido comprobar mediante la extracción de testigos.

El tráfico que soporta la autopista es muy elevado. En el tramo más cargado, entre Bruselas y Lovaina, la IMD en 1970 ascendía a 32 500 vehículos, habiendo aumentado en 2000 hasta 112 000, con un 14% de vehículos pesados. A pesar de ello, las operaciones de conservación han sido muy reducidas, si bien algunos tramos se han recubierto con una capa de mezcla bituminosa para reducir el nivel de ruido generado por la textura transversal profunda (1,75 mm, medida con círculo de arena) que se dio al pavimento. Éste se encuentra en buen estado, por lo que no se ha previsto ningún refuerzo. Con ello se estima que la vida de servicio puede alcanzar los 40 ó 50 años.

A pesar de la reducida separación entre fisuras, las roturas por punzonamiento han sido muy escasas. Ello puede atribuirse, entre otras razones, a la presencia de una subbase no erosionable de mezcla bituminosa.

Por el contrario, dichos punzonamientos (*figura 9*) han constituido un problema muy importante en varios tramos de autopista belgas construidos siguiendo los criterios de una Circular publicada en 1980, en la que, para disminuir el coste de las obras y el consumo de productos petrolíferos,



Figura 9. Rotura por punzonamiento.

se adoptaron, entre otras, las siguientes medidas:

- Una disminución de la pendiente transversal de la explanada del 4 al 2%
- Una reducción de la resistencia a compresión exigida al hormigón magro de la subbase
- Una disminución de la cuantía de armadura del 0,85 al 0,67%
- Una reducción del ancho de los carriles de 3,75 a 3,5 m, lo que a su vez se tradujo en una mayor proximidad de las ruedas de los vehículos al borde del pavimento
- Y, lo que se considera lo más importante, la supresión de la capa de mezcla bituminosa entre el hormigón magro y el pavimento de HAC.

Dichos deterioros dieron lugar a que en diciembre de 1991 se publicase una nueva Circular, en la que, como cambios más significativos frente a la de 1980, pueden destacarse los siguientes:

- la obligatoriedad de disponer de nuevo una capa de mezcla bituminosa sobre la subbase de hormigón magro
- El aumento del ancho del pavimento de HAC, que abarca no solamente la calzada sino también el arcén exterior
- El aumento del espesor del pavimento de HAC hasta 23 cm, con una cuantía mínima de armadura del 0,76%.

Desde entonces, éste ha sido el firme con pavimento de HAC empleado en las autopistas belgas de nueva construcción, o en las que se ha utilizado dicho pavimento para la rehabilitación de un firme bituminoso existente. Dos ejemplos de esta última técnica se describen más adelante.

Por su parte, las autopistas en las que, debido al diseño defectuoso antes citado, se habían producido problemas importantes de punzonamiento, se repararon, según los tramos, mediante un refuerzo de HAC de 20 cm de espesor (interponiendo una capa de mezcla bituminosa) o bien abriendo una caja de 43 cm en el pavimento existente, dentro de la cual se extendieron 15 cm de hormigón compactado, 5 cm de mezcla bituminosa y 23 cm de HAC. Dicha caja abarca el carril de vehículos pesados y el arcén. Tanto sobre el HAC nuevo como el que se había conservado del firme existente, se extendió una capa de rodadura de 5 cm de mezcla bituminosa.

4.3 La autopista Oviedo - Gijón - Avilés

Como ya se ha mencionado, dicha autopista, abierta al tráfico a comienzos de 1976, ha tenido un comportamiento excelente. El firme de las calzadas de la misma está compuesto por 20 cm de (*continúa en pág.21*).



Figura 10.- Autopista Bruselas-Ostende: ejecución del pavimento.



Figura 11. Autopista Bruselas-Ostende: firme existente fresado.

subbase granular, 16 cm de gravace-
mento y 22 cm de HAC, con una
cuantía del 0,85%. La armadura de
este último está formada por barras
longitudinales Ø18 separadas 14 cm,
y barras transversales Ø12, a 70 cm
e inclinadas 60°.

Aparte de la reparación de algu-
nos punzonamientos aislados, las
operaciones de conservación se
han limitado al sellado de la junta
entre el pavimento y arcén, a la co-
rrección de algunas deformaciones
provocadas por asentamientos de
la explanada, mediante la elevación
del pavimento con gatos y la in-
yección de lechada para rellenar los
huecos bajo el mismo, y a la me-
jora del drenaje, longitudinal y trans-

versal, en puntos de acumulación
de agua. En conjunto, puede esti-
marse que la repercusión económi-
ca de estas actuaciones a lo largo
de más de 30 años ha sido inferior
al 1% del coste de construcción del
firme.

5. Realizaciones recientes

En el presente artículo se van a
examinar de forma sucinta varias
obras de las que de algunas de sus
características se carece de expe-
riencia en España y que por tanto pue-
den ser de interés:

- El refuerzo de un tramo de la au-
topista Bruselas – Ostende

- La autopista M6 de peaje, en
Birmingham (Reino Unido), con pavi-
mento polifuncional
- Pavimentos adheridos a una sub-
base bituminosa en Francia
- La rehabilitación de la circunva-
lación de Amberes
- Los túneles de Cointe, en Lieja
(Bélgica)
- Diversas gloriets en Bélgica
- Un pavimento combinado para
tranvías y autobuses en Gante (Bél-
gica).

6. Refuerzo de hormigón armado continuo en la autopista Bruselas – Ostende

6.1 Introducción

En la autopista A10 entre Bruse-
las y Ostende se habían producido
numerosos problemas en la mezcla
bituminosa de rodadura. En 2001 se
creó un grupo de trabajo para deci-
dir cómo rehabilitar esta arteria con
un gran volumen de tráfico y anali-
zar los aspectos técnicos y econó-
micos de las obras. Con objeto de
obtener un firme que no precisase
reparaciones frecuentes y en el que
no fuera necesario llevar a cabo ope-
raciones de conservación importan-
tes durante los próximos 40 años, se
optó por una solución en hormigón
armado continuo. Una condición im-
prescindible era que los tres carriles
en ambos sentidos deberían mante-
nerse abiertos al tráfico en todo mo-
mento durante la ejecución de las
obras. Éstas se desarrollaron en dos
fases: en primer lugar se rehabilitó la
calzada en dirección a Ostende, y al
año siguiente la de salida de Bruse-
las.

Dicho PHAC se extendió con un
espesor de 23 cm (figura 10), con su
parte inferior situada dentro de una
caja practicada en el firme existente
en toda la longitud del tramo. La ca-
pa de rodadura bituminosa de este
último se fresó en una profundidad
variable (figura 11), de forma que se
pudiese dar una pendiente transver-
sal del 2,5% al nuevo pavimento sin
variar su espesor.

6.2 Aspectos de organización de la obra

En un día típico, la autopista A10 soporta una IMD de 55 000 vehículos en cada dirección. Debido a este elevado volumen de tráfico y a las largas colas que se formaban en dirección a Bruselas, era impensable desde el punto de vista económico cerrar a la circulación uno de los carriles durante la ejecución de las obras. Por ello, se decidió sustituir la mediana central por una barrera de hormigón y ensanchar la calzada aprovechando la zona que quedaba libre.

A fin de mantener en cada sentido tres carriles (figura 12), éstos se estrecharon durante las obras. El carril derecho tenía como mínimo un ancho de 3 m, mientras que el carril central y el izquierdo se redujeron a 2,5 m. La velocidad máxima se disminuyó a 70 km/h.

Como el arcén se veía afectado por las obras, cada 500 m se dispuso un apartadero, en donde pudieran depositarse vehículos averiados. Estos apartaderos se han conservado después de las obras, a fin de permitir una circulación segura en caso de producirse un accidente.

En la segunda fase, la mediana, consistente en dos barreras con perfil New Jersey en una de las caras, separadas por un espacio intermedio con plantas, se sustituyó por una barrera con perfil New Jersey en las dos caras. Con ello la sección de la calzada se amplió hasta 15,85 m, de forma que en las siguientes fases se pudieron mantener siempre abiertos al tráfico 3 carriles por sentido.

Para separar los tráficos en ambos sentidos se utilizó una barrera prefabricada de hormigón. Los distintos elementos de la misma (longitud: 2 m, peso: 1,7 t) se instalaban con ayuda de una grúa, conectándose unos con otros mediante pasadores metálicos.

Las calzadas se redujeron a un carril únicamente cuando se colocaban nuevas señales durante el cambio de una fase a otra. Para impedir que se produjeran atascos, estos cambios se llevaban a cabo entre las 11 p.m. y

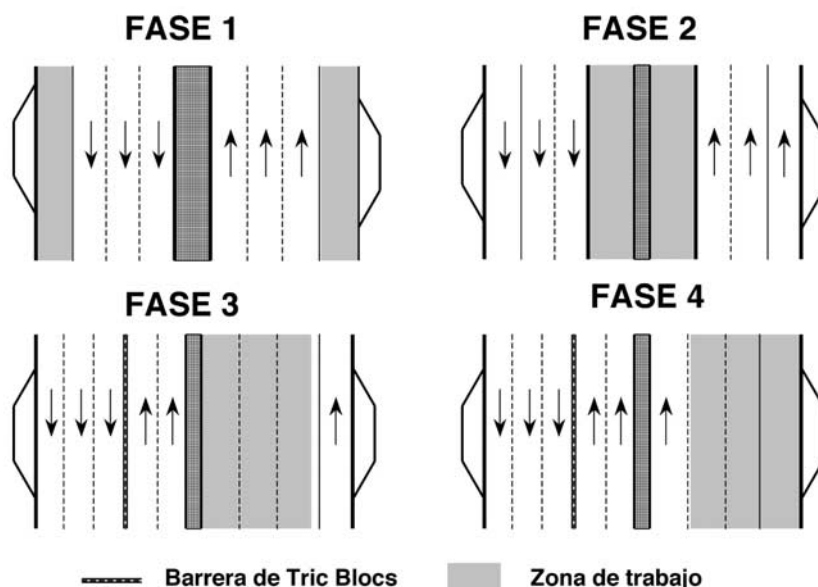


Figura 12. Autopista Bruselas-Ostende: organización del tráfico.



Figura 13. Autopista Bruselas-Ostende: descarga del hormigón.

las 6 a.m.

La forma como se realizaron los desvíos del tráfico durante las obras tuvo una acogida muy positiva. Las colas durante la mañana y al anochecer eran sólo ligeramente superiores a las producidas en circunstancias normales, debido al estrechamiento de los carriles.

6.3 Fórmula de trabajo del hormigón

Como la pendiente transversal de la A-10 era inferior al 2% en algunas

zonas, se decidió modificar tanto el perfil longitudinal como el transversal. Con ello, para construir el nuevo firme se fresó el existente en un espesor variable, con una pendiente transversal del 2,5%.

Dado que en algunos puntos se eliminó en su práctica totalidad la mezcla bituminosa, sobre la superficie escarificada se extendió posteriormente una capa de mezcla bituminosa con un espesor de 5 cm.

La fórmula de trabajo por m³ de hormigón fue la siguiente:

- agua 160 l
- cemento CEM III/A 42,5 N LA 400 kg
- arena de machaqueo 0/5 445 kg
- arena de río 0/2 150 kg
- árido porfídico de machaqueo 4/7 370 kg
- árido porfídico de m 553 kg
- árido porfídico de machaqueo 14/20 370 kg
- plastificante 0,6 kg
- aireante 0,3 kg

Cada una de las fases en las que se dividió la construcción pudo ser abierta al tráfico a los 6 días. La resistencia media a compresión a los 5 días de una serie de 3 testigos alcanzó 50 MPa, con una desviación estándar de 1,6 MPa.

6.4 Construcción del pavimento

Las armaduras longitudinales y transversales se montaron in situ con arreglo a las prescripciones siguientes:

■ diámetros nominales de las armaduras: longitudinal, 20 cm; transversal, 16 mm

■ separación entre armaduras longitudinales: 18 cm; entre transversales: 70 cm

■ distancia entre la cara superior de las armaduras longitudinales y la superficie: 8 cm

En cada uno de los extremos del tramo se dispusieron 8 rastrillos de anclaje, con una separación de 4,8 m, para absorber los movimientos del pavimento. Cada uno de ellos es de hormigón armado, con una altura de 1,1 m y un ancho de 0,6 m.

El hormigón fue fabricado por el contratista en una central móvil situada a 5 km de la obra. Su rendimiento teórico era de 120 m³/h. En la práctica se alcanzaron producciones medias entre 75 y 80 m³/h, lo que suponía una velocidad media de avance de la pavimentadora del orden de 0,7 m³/min.

El hormigón se transportó con 4 semirremolques de 12 m³ de capacidad cada uno y un camión de 4 ejes de 9 m³, los cuales fueron suficien-



Figura 14. Autopista Bruselas-Ostende: lámina de plástico sobre el hormigón fresco para proteger el retardador del fraguado.

tes para asegurar un suministro constante de material. En obra, el hormigón se vertía en una tolva (figura 13), desde la cual una retroexcavadora lo extendía uniformemente delante de la pavimentadora de encofrados deslizantes. Ésta tenía un ancho máximo de trabajo de 10 m. Se extendían dos carriles de una sola pasada, lo que mejoraba la regularidad superficial.

Como un detalle de interés de la obra hay que mencionar que la pavimentadora fue guiada por láser. Esta técnica presenta un interés particular en obras en las que se dispone de un espacio reducido o en las que, como es frecuente en los PCHA, se tiene que recurrir a la alimentación lateral

del hormigón, con los camiones rodando a una distancia reducida del cable de guía en el caso de una pavimentadora convencional.

Inmediatamente después de haber extendido el pavimento, un equipo aplicaba un retardador de fraguado. Este equipo estaba también provisto de dos grandes rodillos que desplegaban una lámina de plástico (figura 14) para proteger la superficie tratada con el retardador. El denudado se llevaba a cabo con un cepillo mecánico (figura 15) entre 18 y 36 horas después de la puesta en obra del hormigón. Una vez denudada la superficie (figura 16), el hormigón se protegía con un producto filmógeno de curado.



Figura 15. Autopista Bruselas-Ostende: eliminación del mortero superficial.

Se completaron 16,6 km de nuevo pavimento en 126 días de calendario, es decir, 24 menos de los 150 especificados en el contrato de las obras. La media de construcción en un turno de 24 horas fue de 10000 m², con un máximo de 850 m² en una hora.

7. La autopista de peaje M6 en Birmingham

7.1 Introducción

La autopista M6, en las proximidades de Birmingham (Reino Unido), es una de las de mayor volumen de tráfico de Europa y, en ocasiones, una de las más congestionadas. Se trata de una vía de comunicación vital, con una gran importancia estratégica a nivel tanto nacional como local. Varios tramos soportaban un volumen de vehículos que excedía en un 100% el de proyecto; y en las horas punta podía costar bastante más de una hora recorrer algunos trayectos que, en circunstancias normales, no llevarían más de 25 minutos. Los itinerarios alternativos soportaban también una circulación muy intensa, especialmente en las horas punta.

Las propuestas para resolver este problema de la segunda ciudad inglesa empezaron a plantearse hace ya en la década de los ochenta del siglo pasado. Se sugirió como solución construir una nueva auto-



Figura 16. Autopista Bruselas-Ostende: detalle del pavimento denudado.

pista, inicialmente con fondos públicos. Finalmente, se decidió que fuese de peaje, lo que constituyó el primer ejemplo de este sistema de financiación en el Reino Unido.

La nueva autopista tiene una longitud de 43 km de doble calzada de 3 carriles. Las obras, que se iniciaron a finales de 2000, incluían asimismo la construcción de 58 nuevos puentes, la remodelación de otros 12 existentes, 36 obras de desagüe bajo las calzadas, 15 muros de contención y 60 pórticos de señalización.

El contrato de las obras fue adjudicado el 29 de septiembre de 2000,

estableciéndose una duración de 40 meses. No obstante, gracias a una adecuada organización, la autopista pudo completarse en diciembre de 2003.

7.2 Los firmes de la autopista

Los firmes de la autopista se proyectaron para soportar un tráfico de 187 millones de ejes equivalentes de 11,5 t a lo largo de una vida de servicio de 40 años.

El hecho de que la autopista atra-



Figura 17 a: Autopista M6 en Birmingham (Reino Unido): Vista de la armadura, soportes e inductores.



Figura 17 b: Autopista M6 en Birmingham (Reino Unido): Pavimento con armadura.



Figuras 18 y 19. Autopista M6: montaje (arriba) y vista (abajo) de la armadura del pavimento.

vesase unos yacimientos de grava y arena tuvo una gran influencia en la elección del firme. En la parte central de la obra, con una longitud de 22 km, el firme está constituido por 23 cm de subbase tratada con cemento, 22 cm de PCHA y una capa de rodadura de 3,5 cm de mezcla bituminosa drenante (figura 17). En el resto del trazado se ha elegido una solución semiflexible constituida por 20 cm de subbase tratada con cemento y 28,5 cm de mezclas bituminosas.

En ambas soluciones, el espesor y la resistencia de la subbase tratada con cemento se eligieron, entre otros

motivos, para poder soportar sin problemas el intenso tráfico de obra.

7.3 Construcción del pavimento armado continuo

La central de fabricación del hormigón tenía una capacidad de 250 m³/h nominales (200 m³/h de producción real máxima y un rendimiento medio de unos 170 m³/h). Estaba situada aproximadamente en la zona central del pavimento.

El hormigón se fabricó con cuatro áridos (0/5, 5/10, 10/20 y 20/40 mm), 370 a 390 kg/m³ de conglomerante y

una relación agua/cemento del orden de 0,39. Incorporaba también un plastificante. Al estar la losa cubierta con una capa de rodadura de mezcla drenante, no se consideró necesario emplear un aireante. Se le exigía al hormigón una resistencia a compresión de 40 MPa en probeta cúbica, habiéndose obtenido un valor medio de 51,6 MPa.

La puesta en obra del hormigón se llevó a cabo con ayuda de una pavimentadora de encofrados deslizantes con una anchura de trabajo de 14,35 m (3 carriles y un arcén). En total se pusieron en obra 135 000 m³ de hormigón.

La primera operación era el montaje y colocación de la armadura metálica continua. Se utilizaba un carro remolcado por una unidad tractora y fabricado expresamente para esta obra (figuras 18 y 19). Tenía una anchura correspondiente a toda la losa y una longitud que le permitía ir añadiendo las barras longitudinales y transversales de la armadura en unos alojamientos dispuestos a modo de plantilla.

En la superficie de la subbase se colocaban también tres molduras longitudinales con forma de diedro, equidistantes. Junto con las cintas flexibles de material sintético que se

introducían en el hormigón fresco en el plano vertical de cada una de ellas, y de las que se hablará más adelante, eran las responsables de formar las tres juntas longitudinales de la losa armada continua.

Para el transporte del hormigón desde la central se utilizó una flota de seis camiones eyectores articulados, cada uno de ellos con una capacidad de 14 m³. Una vez llegados al punto de vertido, los camiones retrocedían hasta acoplarse a un cargador montado lateralmente en la pavimentadora, el cual desplazaba el camión (con una carga total de 34 t entre la unidad tractora y el remolque) a la velocidad del orden de 1 m/min de la pavimentadora. Un operario, que manejaba un dispositivo de control remoto por radio, accionaba la compuerta trasera y el mecanismo hidráulico del eyector para descargar suavemente el hormigón a una cinta transportadora lateral, la cual lo distribuía uniformemente delante de la pavimentadora.

La pavimentadora de encofrados deslizantes (figura 20) se desplazaba sobre cuatro orugas independientes. Llevaba acoplada inmediatamente detrás de las orugas delanteras una cinta alimentadora lateral que abarcaba toda la anchura de trabajo de la pavimentadora. El hormigón era descargado en dicha cinta desde los camiones, y una cuchilla móvil inclinada con respecto al eje de la cinta iba recorriendo ésta y vertiendo el hormigón uniformemente sobre la subbase, sin que en ningún momento fuese necesario detener la pavimentadora. Esta última llevaba incorporadas, entre otros elementos, tres unidades de inserción de cinta en el hormigón fresco para formación de juntas longitudinales (figura 21).

La pavimentadora remolcaba una pasarela de trabajo desde la cual, entre otras labores, se aplicaba un cepillo para crear una textura transversal, a fin de mejorar la unión con la capa de rodadura de mezcla drenante.

El conjunto se complementaba con un carro de curado automotor sobre neumáticos, que extendía una emul-



Figura 20. Autopista M6. Pavimentadora.

sión bituminosa sobre el hormigón fresco.

El rendimiento de la pavimentadora, que consumía 3,08 m³ de hormigón por cada metro de calzada, era del orden de 350 a 400 m diarios de losa, en jornada de trabajo entre las 7 y las 19 horas, lo que suponía de 1078 a 1232 m³ diarios de hormigón. El máximo avance diario superó los 400 m, y el semanal los 2000 m de calzada de tres carriles. La construcción del pavimento armado continuo se inició en septiembre de 2002 y se finalizó en julio de 2003.

8. Pavimentos de HAC adheridos a una subbase bituminosa

En los años noventa del siglo pasado se desarrolló en Francia un nuevo tipo de firme, constituido por:

- una capa de rodadura bituminosa ultradelgada recubierta con un tratamiento superficial;
- un pavimento continuo de hormigón armado;
- una subbase de grava-betún.

En la edición del Catálogo francés de firmes publicada en 1998 se suponía que el HAC no está adherido a la subbase bituminosa. No obstan-

te, un hormigón vertido sobre una mezcla bituminosa suele presentar una buena adherencia con esta última*. El funcionamiento conjunto de estas dos capas supone una notable disminución de las tensiones en el hormigón con respecto a las que se producen en el caso de no haber adherencia, por lo que es posible disminuir el espesor de HAC sin reducir la vida útil del firme.

Una primera, aunque limitada, comprobación del correcto comportamiento de esta solución se realizó dentro del denominado proyecto Fabac, llevado a cabo en Francia, en el que se sometieron a un ensayo de carga acelerado una serie de estructuras de firme con HAC. A la vista de los prometedores resultados obtenidos, la Administración francesa decidió probar dicha solución en dos tramos de ensayo sometidos a un tráfico importante.

El primer tramo fue construido en la autovía RN 141 cerca de Angulema, en la parte central de Francia,

* En muchas vías urbanas con rodadura bituminosa se ha podido observar que una masa de hormigón fresco, caída accidentalmente desde un camión hormigonero, es muy difícil de eliminar, si se deja que el hormigón endurezca.

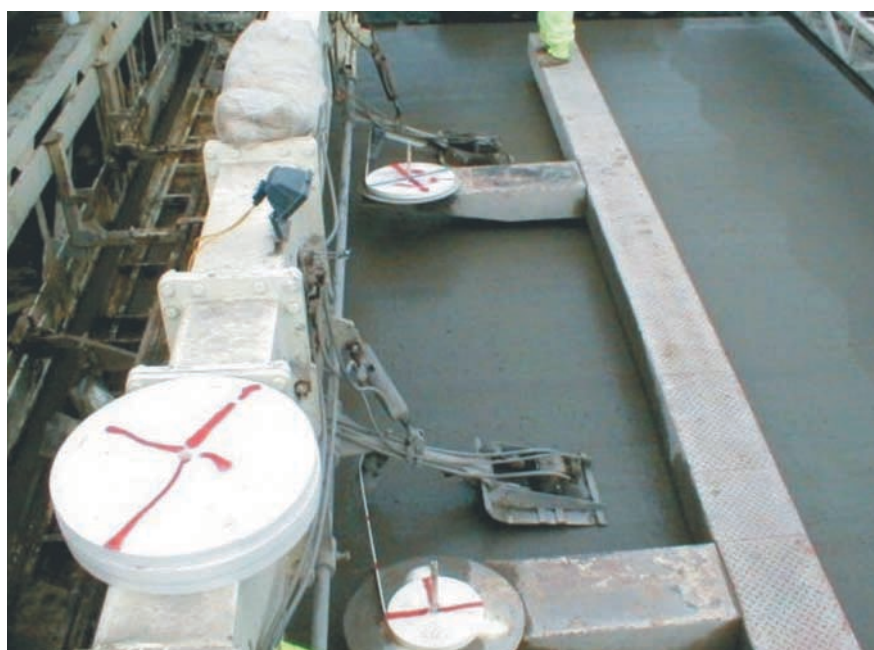


Figura 21. Autopista M6. Dispositivos de inserción de cintas de plástico en el hormigón fresco para formación de las juntas longitudinales.

en el verano de 1998. Para el segundo de ellos, se aprovechó la construcción en septiembre de 2001 de una variante de la RN 4 en el departamento de Moselle, para evitar el paso directo de dicha carretera por las poblaciones de Bebeing y de Imiling, cerca de Nancy. Fue inaugurada en 2002. Hay que indicar que el clima en este segundo tramo es menos riguroso que el del primero, sobre todo en invierno.

Los principales objetivos de dichos tramos son los siguientes:

- obtener el valor del coeficiente de calibración introducido en el método

de proyecto francés de firmes a fin de ajustar los resultados de los cálculos teóricos al comportamiento real de las carreteras;

- evaluar la durabilidad de la adherencia entre el hormigón y la gravabetún durante la vida de servicio del firme;
- determinar el modo de fallo de este tipo de firmes.

En ambos tramos la explanada es como mínimo de categoría PF3 según las prescripciones francesas (módulo de reacción de placa de carga mínimo: 120 MPa), recubierta con un doble tratamiento superficial. Sobre éste

se extendieron un riego de adherencia y una subbase de gravabetún. Después de someter a un granallado esta última, se dispuso una capa de HAC. Ésta, a su vez, se recubrió con una capa de mezcla bituminosa muy fina 0/10 y un tratamiento superficial, con un espesor conjunto de 3 cm.

Tanto en uno como en otro tramo, se ha dispuesto en la mayor parte de su longitud un firme calculado para la vida de servicio de 30 años, más algunos otros tramos dimensionados para una duración bastante más reducida, a fin de que los previsibles fallos empezasen a manifestarse en un plazo razonable. Los espesores dispuestos se indican en las *tablas 1 y 2*.

Después de llevar respectivamente 7 y 4 años en servicio se realizó una evaluación de ambos tramos, los cuales están sometidos a un tráfico muy intenso (del orden de 1600 camiones diarios en el carril más cargado). En general el comportamiento ha sido bastante satisfactorio, incluso en los subtramos de menor espesor.

En el tramo de la RN 141, que en la época en la que fue inspeccionado había soportado un tráfico del orden de $3 \cdot 10^6$ ejes equivalentes de 13 t, el tramo con 8 cm de HAC tuvo que ser reforzado al cabo de un año, por problemas de punzonamientos. Este mal comportamiento fue atribuido, al menos en parte, tanto a problemas constructivos como de drenaje. Por el contrario, el subtramo con 10 cm de HAC no mostraba ningún deterioro estructural. En testigos extraídos del mismo se pudo observar una adherencia muy buena entre el HAC y la grava-betún. ■

Nota de la Redacción

En el número 125 de esta revista, en el artículo “*Aprovechamiento del árido porfídico en las mezclas bituminosas.....*”, en la relación de autores (p. 15), D. Antonio López Juan figura como *Jefe de Laboratorio*. En su lugar debe decir *Técnico Superior de Actividades Técnicas y Profesionales*.

Espesor de HAC (cm)	Longitud	Hipótesis de proyecto (m)
10	150	Interfaz adherida, vida de servicio: 4 años
8	150	Interfaz adherida, vida de servicio: 2 años
16	810	Interfaz adherida, vida de servicio: 30 años
19	830	Interfaz semiadherida, vida de servicio: 30 años
24	455	Interfaz no adherida, vida de servicio: 30 años

Tabla 1. Espesores de HAC dispuestos en el tramo experimental de la RN 141.

Espesor de HAC (cm)	Longitud	Hipótesis de proyecto (m)
10	150	Interfaz adherida, vida de servicio: 4 años
12	140	Interfaz adherida, vida de servicio: 10 años
10	150	Interfaz adherida, vida de servicio: 4 años
16	1480	Interfaz adherida, vida de servicio: 30 años

Tabla 2. Espesores de HAC dispuestos en el tramo experimental de la RN 4.