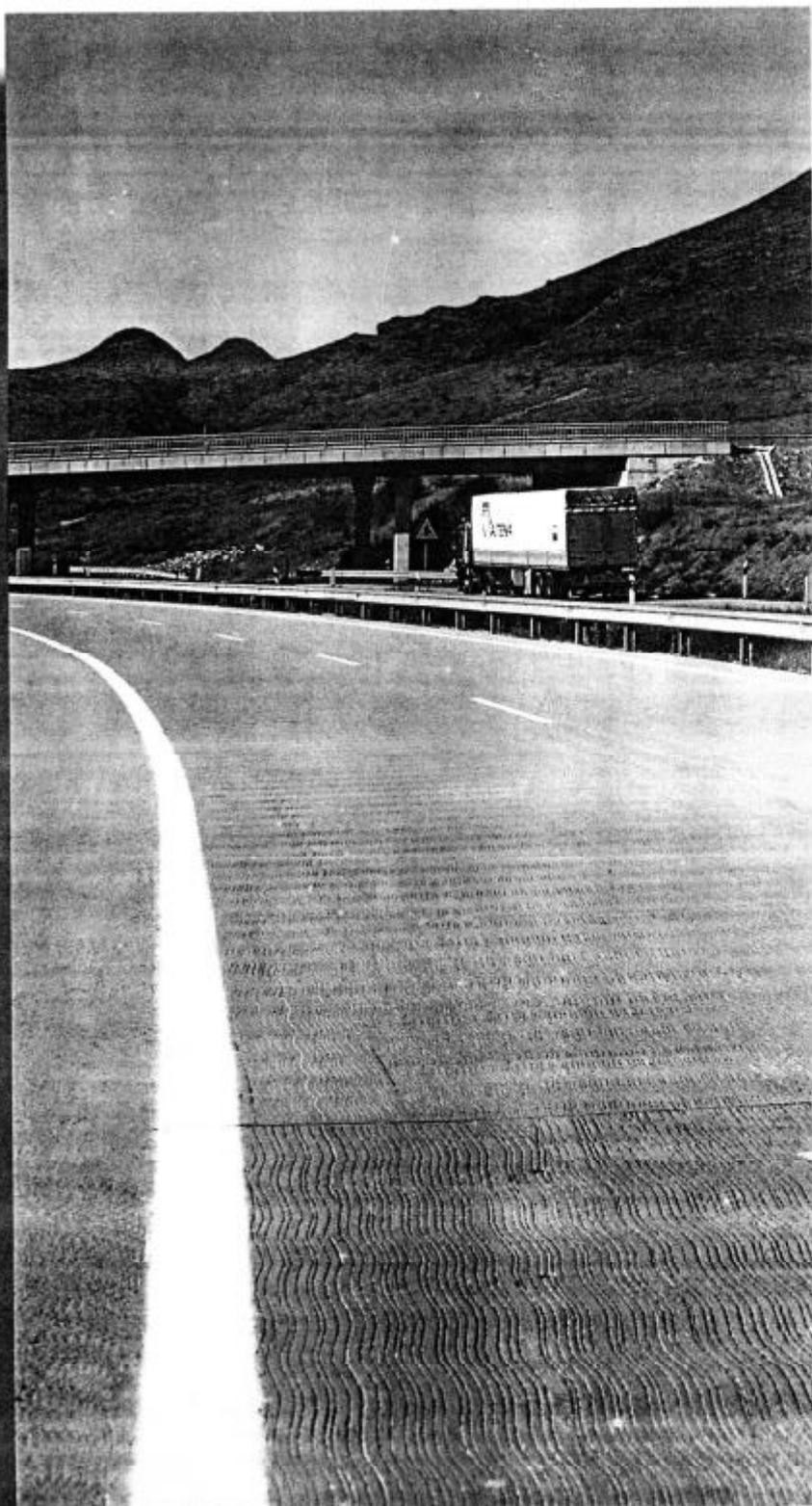


CARRETERAS

4ª EPOCA - NUM. 77 - MAYO-JUNIO 1995 - REVISTA TECNICA DE LA ASOCIACION ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

Especial

**EL CEMENTO Y
LA CARRETERA**





Especial

EL CEMENTO Y LA CARRETERA

DIRECTOR:

Aniceto Zaragoza Ramírez

DIRECTOR EJECUTIVO:

Javier Sasiambarrera San Gil

DIRECTOR TECNICO:

Recaredo Romero Amich

CONSEJO DE REDACCION:

Presidente:

Jaime Gordillo Gracia

Vocales:

Teodoro Abad Ortíz

Luis Ayuso Sánchez

Fernando Catalá Moreno

Gregorio Casas Carrillo

Carlos Cristóbal Pinto

Jesús Díez de Ulzurrun

Pedro Escudero Bernat

Rafael Fernández Gómez

Rafael Fernández Sánchez

José M^o González Cotera

Bias González González

Carlos Jofré Ibañez

Gonzalo F. López Martínez

Carlos Méndez Santos

Pablo Nobell Rodríguez

Víctor Sánchez Blanco

Miguel Angel del Val Melús

EDICION Y PUBLICIDAD:

COMUNICACION Y DISEÑO

Jacometrezo, 15 - 6^o A

☎ (91) 541 94 07

© (91) 541 94 05

28013 Madrid

ASOCIACION ESPAÑOLA

DE LA CARRETERA

Goya, 23 - 4^o Derecha

☎ (91) 577 99 72

© (91) 576 65 22

28001 MADRID

SUSCRIPCION ANUAL:

España: 5.500 Pta (IVA incluido)

Europa: 57 \$

América: 60 \$

IMPRIME:

Gráficas Marte

Depósito Legal: M. 19.439.1975

ISSN: 0212 - 6389

SUMARIO

Coordinador del número especial *El cemento y la carretera*: Carlos Jofré

Editorial 5

La química en el cemento y en el hormigón 6

José Calleja

Estudio experimental y análisis estructural de hormigones porosos para capas de rodadura de pavimentos de hormigón 20

Alejandro Josa, Carlos Jofré, Antonio Aguado

Eberhard Eickschen, Erik Onstenk

El hormigón poroso: un nuevo material para capa de rodadura 37

Jesús Rodríguez Santiago, Luis Oleaga, Guillermo Albrecht

El Suclocemento en Castilla y León. Otras soluciones no contempladas en la instrucción de firmes 51

Luis Alberto Solís Villa, Jesús Díaz Minguela

Reciclado con cemento de firmes existentes 60

Carlos Jofré

El hormigón celular: Características técnicas y aplicaciones 71

Ricardo López Perona

Prefisuración de capas tratadas con cemento 79

Carlos Jofré, Julio Vaquero

Tribuna 97

Conclusiones del XIII Symposium Vyodeal:

"Técnicas medioambientales en carreteras locales"

José Manuel Gállego Estévez

Area de Servicio 102

Congresos de Carreteras 112

Desde el Arcen 117

Luis Blanco Vila

CONSEJO ASESOR

● COMPOSAN, S.A.

● KAO CORPORATION, S.A.

● DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES, S.A.

● PRODUCTOS BITUMINOSOS, S.A. (PROBISA)

● FERROVIAL

● SEÑALIZACIONES POSTIGO, S.A.

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE HORMIGONES POROSOS PARA CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

Alejandro Josa

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica.
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña.

Carlos Jofré

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director Técnico. IECA. Madrid.

Antonio Aguado

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería de la Construcción.
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña.

Eberhard Eickschen

Químico. VDZ, Instituto de Investigación de la Industria Alemana del Cemento. Düsseldorf, Alemania.

Erik Onstenk

Ingeniero Civil. Intron, Instituto de Materiales e Investigación Medioambiental. Holanda.

El continuo incremento de tráfico que se ha producido en Europa durante las últimas décadas, ha conducido a niveles de ruido en las carreteras y a un aumento del número de accidentes que en muchos casos ya no se consideran aceptables. Como resultado de lo anterior, se ha generado un especial interés en desarrollar tipos de pavimentos que reduzcan el ruido generado por el tráfico y mejoren la seguridad. En este contexto, la utilización de capas de rodadura porosas es una solución atractiva ya que presentan un efecto de absorción de ruido, y evitan que el agua permanezca en la superficie del firme, por lo que mejoran la resistencia al deslizamiento y, como consecuencia, la seguridad.

Los hormigones porosos se han utilizado en el pasado en firmes de carreteras aprovechando, fundamentalmente, sus propiedades de drenaje, originadas por la alta porosidad y permeabilidad de los mismos. Este es el caso de su aplicación en arcenes, para mejorar el drenaje y evitar fenómenos de bombeo de finos en pavimentos de

hormigón. Estos hormigones han sido también utilizados en sub-bases y bases de carreteras y aeropuertos. En este caso, el hormigón poroso forma parte de la sección estructural del mismo y se deben tener en cuenta no sólo las características de drenaje del material sino también sus propiedades mecánicas (resistencia, fatiga). Debido a que la porosidad del hormigón tiene efectos contrarios en su permeabilidad y en su resistencia (a mayor porosidad, mayor permeabilidad y mejores propiedades drenantes, y menores resistencias), se debe alcanzar un compromiso entre estos dos parámetros para cumplir los correspondientes requisitos de proyecto. Una aplicación más reciente de los hormigones porosos es su utilización como capa de rodadura de pavimentos rígidos que, en el caso de carreteras, está actualmente en una fase inicial de estudio y experimentación. En esta aplicación los hormigones porosos presentan, al igual que las mezclas bituminosas drenantes, un efecto de reducción del ruido generado por el tráfico, y evacuan rápidamente el agua evitando salpicaduras entre vehículos.

Como consecuencia de todo lo anterior, durante los últimos años se viene llevando a cabo un importante esfuerzo de investigación, tanto en laboratorio como en tramos experimentales de ensayo, a fin de tratar de optimizar las propiedades de los hormigones porosos a utilizar en capas de rodadura y lograr establecer las dosificaciones más adecuadas. Francia, Holanda, Alemania y España son algunos de los países en los que se está llevando a cabo este tipo de estudios.

Ya se ha mencionado que uno de los criterios básicos de diseño de un hormigón poroso es la conjunción de una permeabilidad correcta y de una resistencia a las sollicitaciones de tipo mecánico y ambiental adecuada al fin que se le vaya a dar. En los hormigones porosos para arcenes o bases este compromiso puede resolverse con un contenido de cemento relativamente moderado, no superior a 200 kg/m³. En cambio, cuando el hormigón poroso se emplea como capa de rodadura y está sometido directamente a la acción de los neumáticos de los vehículos, sus características mecánicas, incluyendo también la resistencia al arrancamiento de las partículas de árido, son especialmente críticas, y es más difícil cumplir el compromiso entre permeabilidad y resistencia anteriormente citado. Por ello, es en general necesario utilizar elevados contenidos de cemento, o bien dosis más reducidas del mismo combinadas con determinadas adiciones (usualmente polímeros o humo de sílice), que mejoran la resistencia del hormigón sin reducir su porosidad. Estas adiciones aumentan el coste del pavimento, por lo que, para contrarrestar este efecto, es aconsejable optimizar (reducir lo máximo posible) el espesor de hormigón poroso utilizado. Esto conduce a secciones estructurales compuestas por una subcapa superior porosa delgada (5-8 cm) y una subcapa inferior densa que deben estar adecuadamente adheridas para asegurar un comportamiento global correcto del pavimento. Dichos espesores suelen ser adecuados para las frecuencias de ruido predominantes en carreteras interurbanas; mientras que para zonas urbanas es más aconsejable, desde el punto de vista de absorción sonora, ir a espesores mayores o incluso a capas completas de hormigón poroso. Por otra parte, en refuerzos o repavimentaciones de obras en servicio que por sus características no puedan permanecer cerradas al tráfico mucho

tiempo (por ejemplo, en avenidas urbanas importantes), otro condicionante es la necesidad de obtener una resistencia relativamente elevada a edades tempranas. Finalmente, en carreteras situadas en climas duros, con inviernos rigurosos, el material debe presentar una resistencia adecuada a los fenómenos de hielo-deshielo o a las sales de deshielo, e incluso en ciertos países a los neumáticos de clavos.

Dentro de las dos vías señaladas anteriormente para obtener una resistencia mecánica similar a la de los hormigones densos empleados en pavimentos, las últimas obras francesas se han orientado hacia el empleo de elevados contenidos de cemento (400 kg/m³ o más, con un porcentaje de humo de sílice del 8%). No obstante, hay que indicar que se trata de obras en la ciudad de París, a las que se les había impuesto la condición de que el hormigón poroso pudiera ser abierto al tráfico de autobuses y automóviles en un plazo no superior a 72 horas.

A título comparativo, en la Tabla 1 se dan las dosificaciones y algunos resultados de resistencias y permeabilidades de los hormigones porosos utilizados en distintas obras francesas, tanto en arcenes y bases como en capas de rodadura de vías de tráfico ligero y avenidas urbanas. Como puede verse en la misma, con la dosificación indicada de 400 kg/m³ de cemento se ha obtenido una resistencia a flexotracción a 28 días igual a 4 MPa, es decir, la de un HP-40, que en España se admite incluso para carreteras de tráfico muy pesado.

En Holanda, Alemania y España se ha llevado a cabo conjuntamente un estudio de las propiedades de los hormigones porosos, dentro del proyecto de investigación Brite-Euram BE-3415, titulado "Optimization of the Surface Characteristics of Concrete Roads in Accordance with Environmental Acceptance and Traffic Safety", el cual ha contado con financiación de la Comisión Europea. Los ensayos de laboratorio y los análisis estructurales de dicho estudio fueron realizados por el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Intron (Instituto de materiales e investigación medioambiental, Holanda), la Universidad Politécnica de Cataluña y el Instituto de Investigación de la industria alemana del cemento (VDZ). Las otras entidades que han

Características del Hormigón Poroso	TIPO DE OBRA				
	Arcen	Base	Capa de Rodadura		
			Tráfico Ligero		Tráfico Pesado
	Autopista A1 (1977)	Aeropuerto Charles de Gaulle (1980)	Parking Burdeos (1979)	Carretera CD 44 Marsella (1987)	Avda. de la Porte de Vitry, París ^(a) (1992)
Dosificación por m²:					
• Cemento (kg)	150	200	150	200	400 ^(b)
• Arena (kg)	300	250	300	200	120
• Arido grueso (kg)	1350 ^(c)	1350 ^(c)	700	1700	1360
• Agua (l)	70-100	85	70	85	100
Resistencia a compresión (MPa):					
• a 3 días	—	—	—	—	16
• a 28 días	8	7	9,5	22,5	—
Resistencia a flexión (MPa):					
• a 28 días	—	2,5 ^(d)	—	2,27	4
Porosidad (%)	15	22	23	17	21
Permeabilidad (l/m²/s)	—	19	5,5	—	0,89 m/s

- (a) Se ha considerado como tráfico pesado por existir una parada de autobuses con maniobras de giros, arranques, frenadas, etc.
 (b) Con un 8% de humo de sílice incorporado
 (c) Mezcla a partes iguales de 5/20 y 20/40 mm
 (d) Arido 6/20 mm
 (e) Estimada a partir de la resistencia a tracción indirecta

Tabla 1. Características de los hormigones porosos utilizados en algunas obras francesas.

Intervenido en este proyecto son Hochtief, la Universidad Técnica de Berlín y BAST por parte alemana. Dragados y Geocisa por parte española, y CUR y Cobeton por parte holandesa. Como puede verse, entre las mismas se incluyen tanto instituciones de investigación como empresas constructoras, éstas últimas específicamente encargadas de la realización de los tramos experimentales previstos en el proyecto. Otros temas incluidos en el mismo son el análisis de los mecanismos de generación de ruido y la medida de éste, el estudio de texturas en hormigones densos, la investigación de tratamientos superficiales para reducir el ruido generado por el tráfico, y la evaluación y redacción de un código de buena práctica y unas directrices sobre esta aplicación.

Este artículo incluye parte de los resultados del programa de ensayos de laboratorio llevado a cabo con hormigones porosos. así como un análisis tensional de un pavimento de hormigón compuesto por una subcapa superior de hormigón poroso y una subcapa inferior de hormigón denso. Se adoptaron inicialmente para este material los siguientes requisitos generales a cumplir: propiedades de reducción de ruido y de drenaje similares a las de aglomerados porosos utilizados en capas de rodadura de firmes; adecuada resistencia mecánica y características de superficie (por ejemplo, resistencia al deslizamiento o regularidad superficial); durabilidad suficiente (adecuada adherencia entre las capas de hormigón poroso y denso, resistencia a ciclos hielo-deshielo y comportamiento a fatiga aceptables, etc.);

construcción factible mediante técnicas actualmente disponibles; y coste competitivo respecto a materiales alternativos, incluyendo no solo la construcción sino también el mantenimiento.

PROGRAMA DE LABORATORIO

El objetivo principal del programa de laboratorio fué la determinación de dosificaciones adecuadas de hormigón poroso en relación con los requisitos iniciales citados en el anterior apartado, así como el estudio del comportamiento de los hormigones resultantes de las mismas. Debido a que se consideró especialmente importante que la aplicación de estas dosificaciones fuese posible en casos reales, se decidió llevar a cabo tres estudios paralelos, uno en cada uno de los países involucrados en el proyecto, adaptados a las condiciones particulares de los mismos (tamaños de áridos disponibles, tipos de áridos y cementos habituales, etc.).

En estos ensayos se siguió la alternativa de combinar contenidos moderados de cemento con la incorporación de polímeros. Por medio de éstos se pretendía no sólo mejorar la resistencia mecánica, sino también la durabilidad frente a fenómenos de hielo-deshielo o ataques de sales.

Se emplearon en el conjunto de los ensayos nueve polímeros diferentes: cuatro acrílicos puros, dos de estireno/butadieno, un acrílico/estireno, un butilacrílico/estireno y un epoxi emulsifica-

do. Una parte del estudio consistió en evaluar la influencia de los mismos en algunas características de los hormigones porosos. Se ha tratado de resumir dicha influencia mediante una escala que va de 1 (mejor) a 5 (peor). Los valores estimados en cada caso se resumen en la Tabla 2.

Como puede verse en la misma, polímeros de una misma familia (acrílicos puros) pueden presentar ligeras diferencias en cuanto a su influencia en algunas de las características.

La optimización inicial de las dosificaciones incluyó el estudio de los siguientes aspectos: trabajabilidad; resistencia a la compresión, a la flexotracción y a la tracción indirecta; porosidad accesible; permeabilidad; resistencia a ciclos hielo-deshielo; y resistencia al deslizamiento. Una vez determinadas tres dosificaciones óptimas, una por país, se estudiaron con ellas los siguientes aspectos: evolución de la resistencia con el tiempo; resistencia a la tracción directa; módulo de elasticidad; comportamiento a fatiga; propiedades de absorción de ruido; estructura de la matriz del hormigón; permeabilidad y efecto sobre ella de la colmatación; efecto de sales de deshielo; adherencia entre hormigón poroso y hormigón denso; resistencia a rayos ultravioleta (sólo con dosificaciones con polímero); y efecto de la humedad (sólo con dosificaciones con polímero).

Para la fabricación del hormigón poroso se utilizó una amasadora de eje vertical, con un tiempo de amasado de 1,5 minutos tras la incorporación de

Clave	Naturaleza del polímero	Efecto en la trabajabilidad	Efecto en la adherencia árido-mortero	Resistencia a radiaciones ultravioleta	Sensibilidad a la temperatura	Precio
A	Butilacrílico/estireno	2	1		3	1
B	Acrílico puro	2	2		3	2
C	Acrílico puro					
D	Epoxi emulsificado	1	4	4	1	5
E	Acrílico puro	2	1		3	1
F	Estireno/butadieno					1
G	Acrílico/estireno	1	1	4	4	1
H	Acrílico puro	1	1	1	5	1
I	Estireno/butadieno	1	1	1	2	1

Tabla 2. Influencia de algunos polímeros en las propiedades de los hormigones porosos.

todos los materiales. La compactación de las probetas (cúbicas, cilíndricas o prismáticas, según el caso) se llevó a cabo mediante vibración (mesa vibrante en Alemania y Holanda y martillo vibrante en España). El curado de las dosificaciones sin polímero se realizó el primer día en el molde a 20°C, seguido de un almacenamiento durante seis días a 20°C en ambiente saturado de agua, y, posteriormente, a 20°C y el 65% de humedad relativa (Alemania y Holanda). En España, las dosificaciones se mantuvieron el primer día en el molde a 20°C y fueron posteriormente almacenadas a 20°C y el 95% de humedad relativa. Respecto a las dosificaciones con polímero, fueron curadas el primer día en el molde a 20°C evitando su desecación, y fueron posteriormente almacenadas a 20°C y el 65% de humedad relativa (Alemania y Holanda) o a 20°C y el 50% de humedad relativa (España). Las distintas dosificaciones utilizadas estuvieron compuestas por 1.400 a 1.500 kg de árido grueso, 75 a 175 kg de árido fino, 200 a 350 kg de cemento y 50 a 100 l de agua. Para conseguir una porosidad suficientemente alta en el hormigón se utilizó una curva granulométrica discontinua de los áridos. Se

emplearon tanto áridos calizos como áridos silíceos, aunque estos últimos solamente se utilizaron como árido grueso con objeto de asegurar una suficiente resistencia al pulimento superficial por efecto del tráfico, que en este caso actúa directamente sobre dicha fracción y no sobre la fina como ocurre con hormigones densos.

En la Tabla 3 se dan algunas informaciones sobre los hormigones ensayados en España. Se han incluido en la misma los resultados de las pruebas de resistencia al arrancamiento mediante el ensayo cántabro, utilizado habitualmente con los aglomerados drenantes. En estos últimos se consideran aceptables pérdidas por debajo del 30%. En el caso de los hormigones porosos todavía no ha sido posible establecer con precisión un valor límite.

Para definir la trabajabilidad del hormigón se utilizó el ensayo de compactación de Walz (ISO 4111). Como es sabido, en dicho ensayo se mide el descenso de una masa de hormigón contenida en un recipiente prismático de medidas interiores 200 mm x 200 mm x 400 mm, al ser sometida a una compactación mediante mesa vibrante o

Características del Hormigón Poroso	Tipo de polímero					
	Sin polímero	Acrílico puro 1	Acrílico puro 2	Acrílico estireno	Epoxi emulsionable	Estireno/butadieno
Dosificación por m³:						
• Cemento V-35 (kg)	325	250	250	250	250	250
• Arena 0/5 mm (kg)	175	150	150	150	150	150
• Árido grueso 5/12 mm (kg)	1400	1400	1400	1400	1400	1400
• Agua (l)	110	25	80	80	80	80
• Polímero sólido (kg)	—	80	25	25	25	10
Resistencia a compresión (MPa) a 28 días	11,4	14,7	9,7	7,4	15,4	17,2
Resistencia a tracción indirecta (MPa) a 28 días	1,8	2,2	2,0	1,1	1,9	2,4
Densidad seca (kg/m³)	1900	1890	1770	1850	1900	1950
Porosidad (%)	24	21	30	20	18	13
Permeabilidad (cm/s)	1,01	1,12	2,50	0,79	0,66	0,63
Pérdida de ensayo cántabro (%)	24,8	19,2	29,2	80,3	24,4	20,5

Tabla 3: Características de algunos hormigones porosos ensayados en España (Proyecto Brite/Euram BE-3415).

algún otro método. Si s es el descenso medio, en mm, de la cara superior del hormigón una vez compactado, se define el factor de compactación v mediante la fórmula

$$v = \frac{400}{400-s}$$

En base a experiencias holandesas anteriores, se fijó un valor inicial de $1,2 \pm 0,02$ para dicho parámetro. Este valor proporciona trabajabilidades adecuadas para la extensión del hormigón con pavimentadoras de encofrados deslizantes, aunque se debe utilizar un valor mayor si la extensión se realiza, por ejemplo, mediante extendedoras de aglomerado asfáltico. De acuerdo con el estudio llevado a cabo, la trabajabilidad del hormigón cambia con mayor rapidez cuando se utilizan polímeros, lo que significa que se reduce el tiempo disponible para el transporte y extensión del hormigón en comparación con dosificaciones que no incluyan polímero, especialmente con altas temperaturas y altos contenidos de polímero. También es importante el tipo de polímero utilizado, tal y como muestran los resultados de la Tabla 4.

INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA DE LOS ARIDOS

La Figura 1 muestra el efecto del tamaño de los áridos en la resistencia a compresión del hormi-

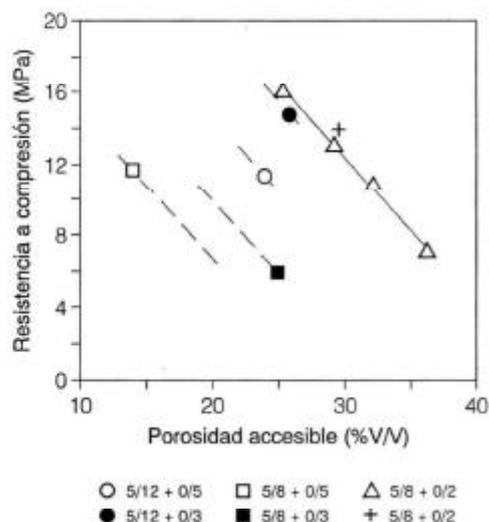


Figura 1: Relación entre la resistencia a compresión simple y la porosidad para diferentes granulometrías de los áridos (dosificaciones sin polímero).

gón (se obtuvieron resultados similares para la resistencia a la tracción indirecta). En el caso de dosificaciones con áridos 5/8 y 0/2 mm (triángulos en la figura), se obtuvo una relación aproximadamente lineal entre la porosidad y la resistencia a compresión (línea continua) en los rangos de dichas variables ensayados. Esta relación lineal fué adoptada como válida para los resultados obtenidos con otros tamaños de árido (líneas discontinuas). Esta figura muestra claramente cómo

Contenido de polímero (%) ^(a)	Naturaleza	Factor de compactación (ISO 4111)								
		8°C			21°C			33°C		
		5 min	35 min	65 min	5 min	35 min	65 min	5 min	35 min	65 min
5	Acrílico puro B	1,18	1,25	1,25	1,19	1,22	1,23	1,19	1,21	1,22
5	Butacrílico/estirolo A	1,18	1,23	1,26	1,20	1,28	1,30	1,19	1,21	1,22
5	Acrílico puro E	1,19	1,23	1,25	1,20	1,24	1,27	1,19	1,20	1,22
10	Butacrílico/estirolo A	1,19	1,21	1,22	1,20	1,22	1,25	1,19	1,28	1,29
10	Acrílico puro B	1,20	1,26	1,27	1,20	1,22	1,24	1,28	1,28	1,25
10	Acrílico puro E	1,16	1,20	1,21	1,22	1,24	1,25	1,20	1,26	1,29
10	Estireno/butadieno I	1,20	1,22	1,22	1,20	1,22	1,23	1,20	1,24	1,25

(a) Porcentaje de polímero (materia sólida) sobre peso de cemento.

Tabla 4: Influencia del tipo de polímero en la trabajabilidad de los hormigones porosos.

el aumento de porosidad tiene un efecto de reducción de la resistencia, por lo que es necesario alcanzar un compromiso entre dichas variables si se especifican valores mínimos de ambas como requisitos.

Para estudiar la influencia de la granulometría de los áridos es conveniente, en particular, diferenciar los resultados correspondientes a los áridos gruesos y a los áridos finos utilizados. Tanto para el árido 5/12 como para el 5/8, resistencia y porosidad aumentan cuando disminuye el tamaño máximo del árido fino (0/2, 0/3 y 0/5; de forma más apreciable en el caso del 5/8). Esto puede explicarse considerando que cuanto más discontinua es la curva granulométrica conjunta (por ejemplo 0/2+5/8 en relación a 0/5+5/8) mayor es la estabilidad de la estructura del esqueleto mineral (mayor número de contactos de partículas gruesas para igualdad de porosidad) y viceversa. En el caso de tamaños discontinuos se puede compactar más enérgicamente la muestra manteniendo una porosidad alta, mientras que en el caso de tamaños continuos una compactación muy enérgica cierra la estructura y, consecuentemente, reduce más la porosidad. En cuanto a los áridos finos, resistencia y porosidad aumentan cuando el tamaño máximo del árido grueso así mismo aumenta. Esta tendencia es similar a la que se produce en hormigones convencionales.

Como resumen de este apartado se puede indicar que se ha confirmado la tendencia de reducción de resistencia que produce el aumento de porosidad, y se puede concluir que se obtienen mejores resultados de la relación resistencia-porosidad con áridos con granulometrías discontinuas (tamaño máximo del árido fino menor que el tamaño mínimo del árido grueso), así como con mayores tamaños máximos del árido grueso.

INFLUENCIA DE LAS ADICIONES

Se ha mencionado ya con anterioridad que una de las vías para incrementar la resistencia de los hormigones porosos cuando van a ser utilizados como capa de rodadura de firmes en el empleo de adiciones. En el programa experimental llevado a cabo se incluyó el estudio del efecto sobre dichos materiales de varios tipos de polímeros,

de humo de sílice y de cuatro tipos de superplastificantes. En el caso de los polímeros, se escogieron inicialmente nueve tipos diferentes con objeto de analizar su influencia en las resistencias y seleccionar el más apropiado. Todas las dosificaciones utilizadas fueron idénticas, con un 10% de polímero (sólidos) sobre peso de cemento, a excepción del tipo específico utilizado. Se estudió con estas dosificaciones la resistencia a compresión simple, a flexotracción y a tracción indirecta. La Figura 2 muestra los resultados obtenidos (porosidad y resistencia) en el caso de los ensayos a compresión simple. El efecto de cada polímero en el material no puede interpretarse adecuadamente a partir de esta figura si no se tiene en cuenta la variación de la resistencia con la porosidad para los diferentes tamaños de árido empleados (Figura 1). Por ello, se ha incluido la relación lineal definida en el apartado anterior entre resistencia y porosidad (líneas discontinuas). De estos resultados puede deducirse que los mejores resultados en cuanto a resistencias se obtienen con los polímeros A (butacrílico/estireno), C (acrílico puro), E (acrílico puro), F (estireno/butadieno) y H (acrílico puro), mientras que los peores se obtienen con el polímero G

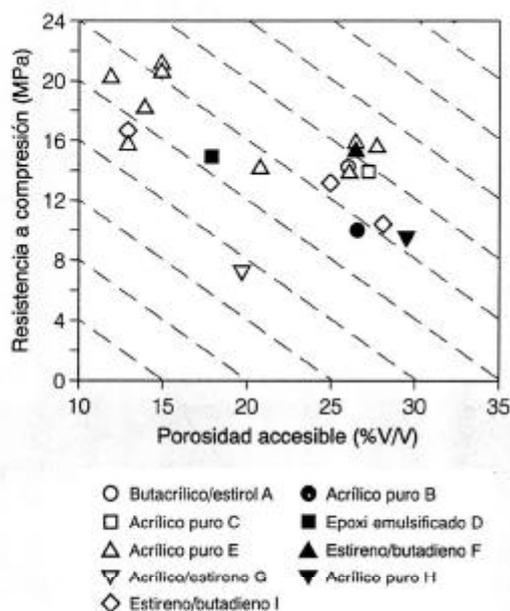


Figura 2: Efecto de diferentes tipos de polímero en la resistencia a compresión simple.

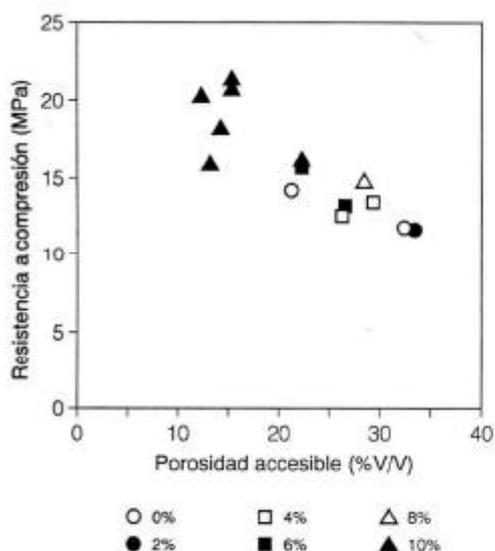


Figura 3: Efecto del contenido de polímero en la resistencia a compresión simple (polímero acrílico puro E: áridos 0/5 y 5/12).

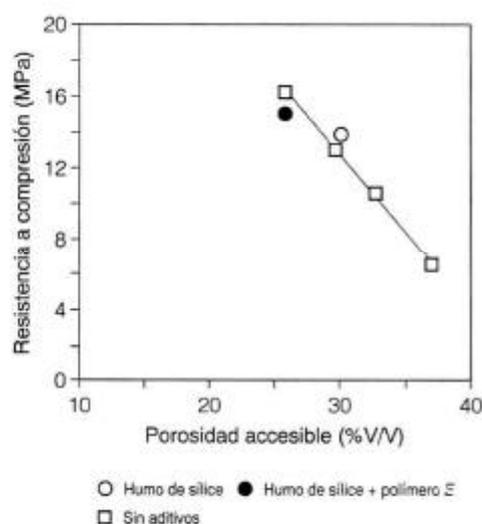


Figura 4: Efecto de la adición de humo de sílice en la resistencia a compresión simple (áridos 0/2 y 5/8).

(acrílico/estireno). Los polímeros B (acrílico puro), D (epoxi emulsificado) e I (estireno/butadieno) proporcionan resultados intermedios.

Se estudió, adicionalmente, la influencia del contenido de polímero en las resistencias a compresión y a tracción indirecta, utilizando para ello el polímero E (acrílico puro). En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos en el caso de la resistencia a compresión. De la misma puede deducirse que el contenido de polímero tiene muy poca influencia en la resistencia a compresión alcanzada (análoga conclusión se obtuvo en el caso de la resistencia a tracción indirecta). Consecuentemente, la adición de polímero incrementa la resistencia a flexotracción del hormigón, pero no afecta significativamente a las resistencias a compresión y a tracción indirecta.

Adicionalmente, se ensayaron dos dosificaciones para estudiar el efecto de la adición de humo de sílice. Una de ellas únicamente contenía dicha adición, y la otra contenía también un 10% de polímero (sólidos) sobre peso de cemento. La Figura 4 presenta las resistencias a compresión

simple obtenidas en este caso. Como puede observarse en ella, el humo de sílice no tiene un efecto significativo en este caso, conclusión que también se obtuvo para las resistencias a flexotracción y a tracción indirecta.

Un aspecto adicional a tener en cuenta es que la adición de polímero reduce la cantidad de agua necesaria para cumplir los requisitos relativos a la trabajabilidad del hormigón. En el caso de utilizar un 10% de polímero (sólidos) sobre peso de cemento, dicha reducción es suficiente. Sin embargo, si sólo se utiliza un 5%, es necesario añadir más agua, con los efectos negativos que ello tiene en la resistencia y en la durabilidad. Por ello, deben añadirse en este caso aditivos plastificantes para reducir adicionalmente la cantidad de agua necesaria.

En el programa experimental llevado a cabo se estudió el efecto en las resistencias de la adición de superplastificantes, para lo que se utilizaron 4 tipos diferentes en una dosificación con el 5% de polímero (sólidos) del tipo E (acrílico puro). La Figura 5 muestra los resultados de las resisten-

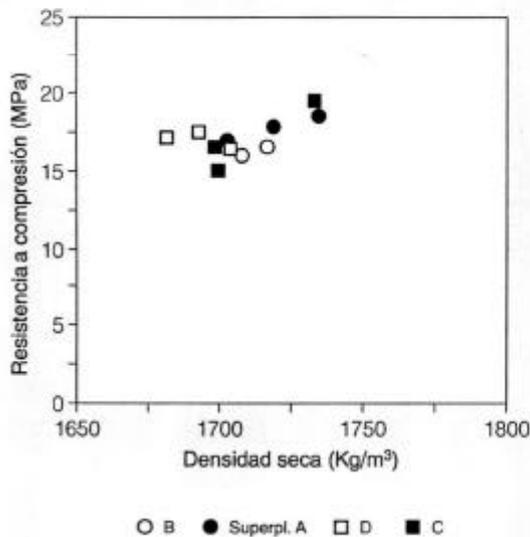


Figura 5: Efecto de la utilización de diferentes tipos de superplastificantes en la resistencia a compresión simple (polímero acrílico puro E; áridos 0/1 y 4/0).

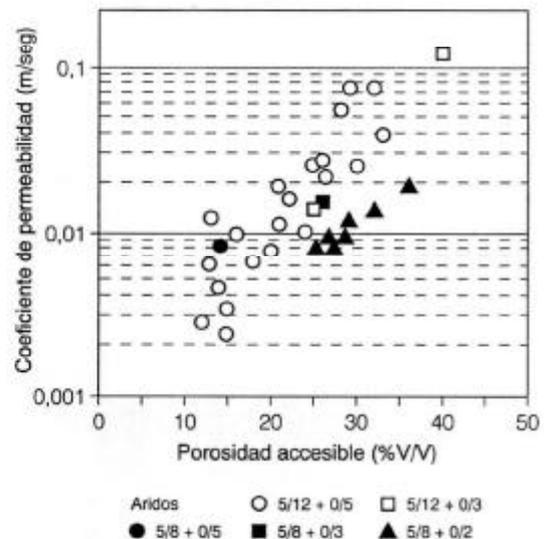


Figura 6: Relación entre porosidad y permeabilidad para diferentes granulometrías de los áridos.

cias a compresión simple obtenidas en este caso, en relación con la densidad seca de las muestras (se obtuvieron resultados análogos para las resistencias a flexotracción). Se puede observar en dicha figura que el tipo de superplastificante utilizado no tiene una influencia significativa en las resistencias obtenidas.

PROPIEDADES HIDRAULICAS Y MECANICAS

En este apartado se resumen los principales parámetros hidráulicos y mecánicos determinados en el programa de ensayos llevado a cabo. Se obtuvo una permeabilidad de aproximadamente 0,01 m/seg para una porosidad del 25% (ver Figura 6). Se puede observar en esta figura que la permeabilidad viene especialmente condicionada por la granulometría del árido fino utilizado (0/2, 0/3, 0/5), y no por la del árido grueso (5/8, 5/12). Esto puede estar causado por el incremento de la distancia entre las partículas de árido grueso cuando las del árido fino no encajan en los poros generados por aquéllas, lo que pro-

duce unos poros con mayor continuidad. Adicionalmente, la cantidad de mortero tiene también una influencia importante en la permeabilidad.

Los resultados de algunas experiencias previas en Holanda indicaban que se necesita al menos una porosidad del 25% para alcanzar una reducción de ruido similar a la de materiales porosos alternativos. Por otro lado, se ha podido observar en los resultados anteriormente expuestos, que porosidad y resistencia están directamente relacionados. De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos, las máximas resistencias a compresión simple, flexotracción y tracción indirecta que se pueden alcanzar con una porosidad del 25% son, respectivamente y de forma aproximada, 18 MPa, 4 MPa y 2 MPa. Dependiendo de los requisitos estructurales necesarios en cada caso, se deberá utilizar una proporción diferente de polímero (10%, 5%, 0%). Al respecto cabe recordar que la significativa influencia del polímero en el coste del hormigón hace imprescindible la optimización de su dosificación.

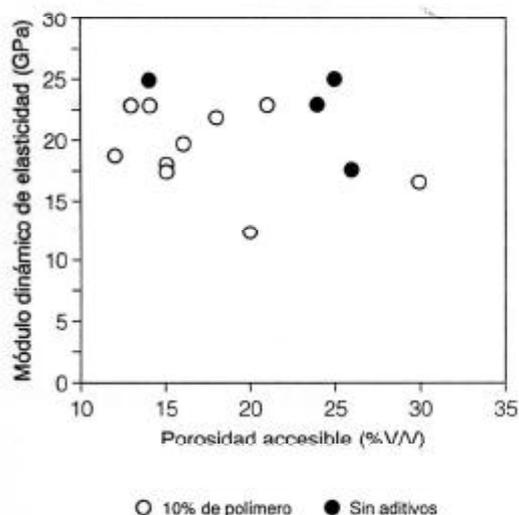


Figura 7: Efecto del polímero en el módulo dinámico de elasticidad (polímero tipo E; áridos 0/5 y 5/12).

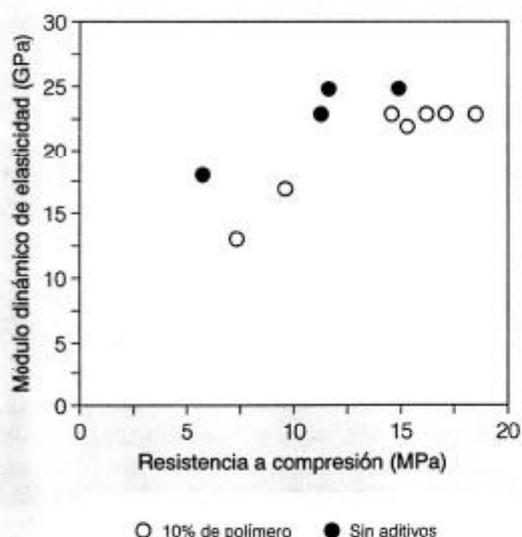


Figura 8: Efecto del polímero y de la resistencia a compresión simple en el módulo dinámico de elasticidad (polímero acrílico puro E; áridos 0/5 y 5/12).

Se midió el módulo de elasticidad dinámico del hormigón poroso mediante ultrasonidos, adoptando para el cálculo un coeficiente de Poisson de 0.20. Las Figuras 7 y 8 muestran, respectivamente, la influencia de la porosidad y de la resistencia a compresión en el módulo de elasticidad dinámico. De acuerdo con estos resultados, la adición de polímero reduce el módulo de elasticidad. Para una porosidad del 25%, dicho módulo es del orden de 20.000 a 25.000 MPa.

DURABILIDAD

La durabilidad del hormigón poroso se estudió a través de la resistencia a ciclos hielo-deshielo; del desgaste superficial y la resistencia al arrancamiento de partículas de árido (impactos mecánicos); y de la resistencia a ciclos de humedecimiento y secado. Los ciclos hielo-deshielo tienen una gran importancia en la degradación de los pavimentos en países con clima frío y, particularmente, cuando se utilizan sales de deshielo. Como en este caso el hormigón poroso está situado en la capa de rodadura del pavimento, está sometido a las condiciones más críticas. Se utilizaron varios tipos de polímero para estudiar cuál de ellos proporcionaba los mejores resultados respecto a la durabilidad.

En Holanda las muestras a ensayar se obtuvieron a partir de probetas cúbicas, mediante la extracción a los 14 días de su fabricación de testigos cilíndricos de 10 cm de diámetro, y tras serrar las caras superior e inferior. Las probetas fueron después almacenadas a 20°C y el 65% de humedad relativa. A los 28 días de su fabricación se limpiaron las probetas y se eliminaron todas las partículas que hubiesen podido quedar sueltas. En Alemania se fabricaron probetas cúbicas de 10 cm de arista que se almacenaron a 20°C y 65% de humedad relativa, y se ensayaron a los 28 días de su fabricación. Antes de someter a las probetas a los ciclos de hielo-deshielo, se colocaron las mismas en una solución de agua con el 3% de cloruro sódico durante 24 horas, tras lo cual se las dejó drenar durante media hora. Cada ciclo de hielo-deshielo estuvo compuesto por las siguientes fases: a) congelación a -20°C durante 16 horas con el 95% de humedad relativa; b) deshielo a 20°C durante 7,5 horas en agua con el 3% de cloruro sódico; y c) drenaje durante media

Polímero	Número de ciclos para el 10% de pérdida de peso	
	5% de polímero (materia sólida)	10% de polímero (materia sólida)
Butilacrílico/estireol A	41	54
Acrílico puro B	— (a)	33
Acrílico puro C	36	54
Acrílico puro E	50	60
Estireno/butadieno F	42	47
Estireno/butadieno I	39	26

(a) No medido

Tabla 5: Resistencia a ciclos de hielo-deshielo.

hora. Se determinó la pérdida de peso de las probetas tras cada décimo ciclo de hielo-deshielo, recogiendo las partículas sueltas, secándolas y pesándolas. Se ensayaron cinco probetas para cada dosificación. No se pudo determinar la resistencia a compresión final de las probetas debido a la notable degradación de las mismas durante el ensayo.

La Tabla 5 muestra para diferentes tipos de polímeros y para dos dosificaciones diferentes de los mismos (5% y 10%), el número de ciclos necesarios para llegar a una pérdida de peso del 10%. Esta tabla permite comparar el efecto de cada uno de los polímeros ensayados y de su dosificación. Los resultados muestran que en general la resistencia a ciclos hielo-deshielo aumenta cuando el contenido de polímero así mismo aumenta. Por otro lado, el tipo de polímero es fundamental. De acuerdo con los resultados de la Tabla 5, los polímeros A (butilacrílico/estireol), C (acrílico puro), E (acrílico puro) y F (estireno/butadieno) proporcionan un mejor comportamiento del hormigón poroso que los polímeros B (acrílico puro) o I (estireno/butadieno).

Además del procedimiento estándar de ensayo descrito (congelación en aire y descongelación bajo agua), se realizaron también ensayos sobre probetas de hormigón poroso manteniendo 1 cm de su parte inferior sumergida en una solución de agua con el 3% de cloruro sódico. Con este procedimiento se intentó adaptar el ensayo a las condiciones que se pueden producir en la prácti-

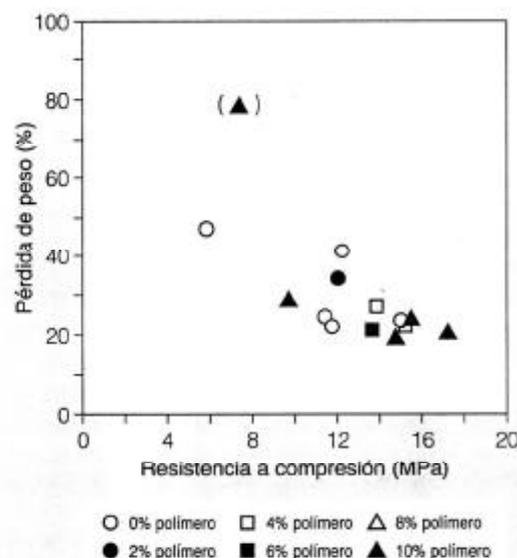


Figura 9: Efecto del contenido de polímero en la pérdida de peso en el ensayo Cántabro tras 300 ciclos (polímero acrílico puro E; áridos 0/5 y 5/12).

ca ya que, en una situación real, la zona inferior de la capa de rodadura porosa podrá quedar saturada durante un cierto período de tiempo tras llover. En estas condiciones, y en climas fríos con temperaturas bajo cero por las noches y sobre cero durante el día, la capa de rodadura de hormigón poroso saturada en un cierto espesor, quedará sometida a ciclos de hielo-deshielo diarios

que podrán degradarla significativamente. Con este procedimiento de ensayo se alcanzó el 10% de pérdida de peso con un menor número de ciclos que en el anterior, por lo que resultó ser más crítico que él. De acuerdo con los resultados obtenidos, el polímero E (acrílico puro) proporciona una mayor resistencia a ciclos hielo-deshielo que los polímeros C (acrílico puro) o F (estireno/butadieno), y la incorporación de humo de sílice mejora adicionalmente la misma.

Con objeto de evaluar la resistencia del hormigón poroso al arrancamiento de partículas de árido (a través de la resistencia a impactos mecánicos), se utilizó el ensayo cántabro. La Figura 9 muestra los resultados obtenidos con varias probetas de hormigón poroso tras ser sometidas a 300 ciclos en dicho ensayo. La interpretación de los resultados en el caso de este material no se ha estudiado suficientemente todavía, pero proporciona una estimación cualitativa de la cohesión de las partículas de árido en el hormigón y, consecuentemente, de su resistencia al arrancamiento, que es suficiente a efectos comparativos entre distintas dosificaciones. Se obtuvo, en particular, una correcta correlación entre la pérdida de peso de las probetas y su resistencia a la compresión simple inicial. En el caso de aglomerados porosos se fija un valor límite a efectos prácticos del 30% de pérdida de peso, pero este límite no ha sido aún contrastado para el caso de hormigones porosos. De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 9, este criterio para aglomerados porosos se cumpliría para una resistencia a compresión simple del orden de 10 MPa. Por otro lado, en dicha figura puede observarse que la adición de polímeros no tiene un efecto significativo en la pérdida de peso obtenida.

Dado que los polímeros, y consecuentemente el hormigón poroso, pueden degradarse cuando son sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, se realizaron varios ensayos para estudiar este fenómeno. Se sometió para ello a varias probetas prismáticas de hormigón poroso a dichos ciclos, consistentes en su almacenamiento bajo agua durante dos días seguido de secado al aire a 20°C y el 65% de humedad relativa durante 12 días. Tras un número dado de ciclos, se determinó la resistencia a flexotracción de tres probetas y se comparó con la de tres probetas de referencia que estuvieron continuamente

almacenadas a 20°C y el 65% de humedad relativa. No se observó ninguna variación en la resistencia de las probetas tras aplicar cinco de dichos ciclos.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural que se describe en este apartado fué llevado a cabo con objeto de evaluar la contribución de una capa de rodadura de hormigón poroso a la capacidad portante del pavimento de un tramo de prueba construido en el denominado eje del Culebro, el cual forma parte de la futura autovía M-50 de circunvalación de Madrid. Dicho tramo fué realizado dentro del proyecto Brite-Euram citado anteriormente.

La sección estructural originalmente proyectada era la 125 de la Instrucción 6.1 y 2 -IC, compuesta por 8 cm de mezcla bituminosa, 22 cm de hormigón compactado con rodillo y 20 cm de suelocemento. Si se supone adherencia completa entre la capa de aglomerado asfáltico y la de hormigón compactado con rodillo, la situación más desfavorable en cuanto al estado tensional inducido por el tráfico se produce en ésta última. Como se ha mencionado en los apartados anteriores, en los hormigones porosos para capa de rodadura estudiado en este proyecto se habían incorporado polímeros para mejorar sus características resistentes, lo que incrementaba significativamente su coste. Por ello, al plantearse la sustitución de la sección original por otra con una capa de rodadura de hormigón poroso, se consideró necesario reducir al máximo posible el espesor de la misma. Como consecuencia, el pavimento seleccionado estuvo compuesto por un espesor mínimo de hormigón poroso compatible con el proceso constructivo (5 cm), y un espesor máximo de hormigón compactado con rodillo que pudiese ser adecuadamente compactado en obra (25 cm). De esta forma, la sección estructural finalmente adoptada estuvo compuesta por 5 cm de hormigón poroso, 25 cm de hormigón compactado con rodillo y 20 cm de suelocemento.

Una vez definidas las dos secciones estructurales alternativas, el objetivo del estudio fué comprobar si el estado tensional inducido por las cargas de tráfico en la capa más crítica, que es la de hormigón compactado, era similar en ambas. Por otra

parte, a fin de evaluar la equivalencia estructural de la capa de rodadura de hormigón poroso en comparación con otra de mezcla bituminosa, se analizaron las tensiones provocadas por las mismas cargas en la sección estructural 025 de la Instrucción, compuesta por 8 cm de mezcla bituminosa, 25 cm de hormigón compactado y 20 cm de suelocemento; es decir, que la única diferencia de la sección adoptada en el tramo del eje del Culebro con respecto a esta última es la sustitución de los 8 cm de aglomerado por 5 cm de hormigón poroso. Para ello se utilizó un programa de ordenador, basado en un modelo multicapa elástico. Como es sabido, los modelos multicapa suponen que las diferentes capas del firme son indefinidas horizontalmente. Consecuentemente, con este tipo de modelos no es posible estimar tensiones y deformaciones cerca de las juntas o de las esquinas de losa, aunque sí permiten la evaluación de las que se producen en el centro de las mismas. Si estas tensiones y deformaciones en el centro de las losas son similares en dos secciones estructurales de firme diferentes, y las juntas (o grietas) están a distancias similares, es razonable suponer que las tensiones y deformaciones cerca de las juntas o de las esquinas de las losas serán también análogas en ambos casos.

En el análisis multicapa llevado a cabo, se adoptaron los siguientes valores para los parámetros elásticos de los materiales (respectivamente en cada caso módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson): mezcla bituminosa, 6.000 MPa, 0,35; hormigón compactado con rodillo, 30.000 MPa, 0,2; suelocemento, 7.000 MPa, 0,2; y explanada, 100 MPa, 0,4. Respecto al hormigón poroso, los resultados experimentales previamente descritos y en particular los obtenidos en la Universidad Politécnica de Cataluña ensayando el material que iba a ser utilizado en la obra, proporcionaron para el módulo de elasticidad un rango de variación entre 17.200 y 25.100 MPa, suponiendo un coeficiente de Poisson de 0,2; y un rango de variación entre 14.200 y 20.700 MPa, en el supuesto de un coeficiente de Poisson de 0,3. En ambas hipótesis, se descartaron algunos resultados muy bajos. Se seleccionaron finalmente para este material las siguientes parejas de valores (respectivamente en cada caso módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson): a) 17.500 MPa, 0,2; b) 25.000 MPa, 0,2; c) 15.000 MPa, 0,3; y d) 20.000 MPa, 0,3.

En relación al tipo de contacto entre capas se adoptaron, como hipótesis razonables en este caso, adherencia perfecta entre la de aglomerado asfáltico y la de hormigón compactado con rodillo; entre esta última y la de hormigón poroso; y entre la de suelocemento y la explanada. Respecto al contacto entre la capa de hormigón compactado con rodillo y la de suelocemento, se realizó el cálculo suponiendo, alternativamente, adherencia perfecta y no adherencia, y se tomó como resultado final la media de los valores obtenidos de acuerdo con ambas hipótesis.

En todos los casos se consideró que los firmes estaban solicitados por dos ruedas gemelas, cada una de ellas con huella circular de 12,5 cm de radio. Se supuso que los centros de dichas huellas estaban separados 37,5 cm y que la presión de inflado de los neumáticos era igual a 0,662 MPa. Estos valores equivalen a una carga total de 65.000 N, que es la mitad de la carga máxima por eje simple de 13 t permitida por la legislación española. La Tabla 6 permite comparar los valores máximos de las tracciones obtenidas en cada caso en la capa de hormigón compactado con rodillo. De acuerdo con estos resultados, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- la sección estructural adoptada en el tramo de ensayo del eje del Culebro tiene una capacidad de soporte superior a la propuesta inicialmente, puesto que las tensiones en la capa más crítica se reducen apreciablemente;
- a efectos también de capacidad de soporte, 5 cm de hormigón poroso pueden considerarse equivalentes a 8 cm de mezcla bituminosa.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un estudio experimental de hormigones porosos para su utilización como capa de rodadura de pavimentos de hormigón, así como el análisis de una sección estructural con este tipo de capa de rodadura. Del estudio experimental se han obtenido las siguientes conclusiones:

- la trabajabilidad de los hormigones porosos modificados con polímero se reduce durante la primera hora tras el amasado en mayor medida

Sección estructural	Contacto hormigón compactado-suelocemento		Valor medio adherido-no adherido	% valor menor
	Adherido	No adherido		
Sección 125: 8 cm MB + 22 cm HC + 20 cm SC	0'418	0'987	0'703	111
Sección 025: 8 cm MB + 25 cm HC + 20 cm SC	0'397	0'867	0'632	100
Sección eje Culebro: 5 cm HP + 25 cm HC + 20 cm SC				
Parámetros elásticos del hormigón poroso:				
E = 17.500 v = 0,2	0'415	0'888	0'652	103
E = 25.000 v = 0,2	0'407	0'853	0'634	100
E = 15.000 v = 0,3	0'412	0'888	0'650	102
E = 20.000 v = 0,3	0'407	0'861	0'634	100

MB = mezcla bituminosa; HP = hormigón poroso; HC = hormigón compactado; SC = suelo-cemento

Tabla 6: Tracciones máximas en la capa de hormigón compactado (MPa).

que los hormigones sin polímero. Esta reducción depende del tipo y contenido de polímero y de la temperatura;

- para la misma granulometría del árido grueso, la resistencia y la porosidad aumentan cuando disminuye el tamaño máximo del árido fino. En cuanto a los áridos finos, la resistencia y la porosidad aumentan cuando el tamaño máximo del árido grueso así mismo aumenta. Por otro lado, se ha comprobado la que existe una relación, inversamente proporcional, entre la resistencia y porosidad.
- el tipo de polímero afecta a la resistencia del hormigón poroso. La adición de polímero incrementa la resistencia a flexotracción y no afecta significativamente a la resistencia a compresión simple. Por su parte, el módulo dinámico de elasticidad disminuye al incorporar un polímero. En relación a la resistencia a ciclos hielo-deshielo, el tipo de polímero utilizado influye sensiblemente, y es necesaria la adición de, al menos, un 5% de polímero (sólidos) sobre peso de cemento para obtener un comportamiento aceptable. Adicionalmente, la adición de polímeros no parece mejorar la resistencia al arrancamiento de partículas (impactos mecánicos). Respecto a la adición de humo de sílice, ésta no tiene un efecto significativo sobre las propie-

dades resistentes del hormigón poroso, aunque mejora su resistencia a ciclos hielo-deshielo:

- en hormigones porosos con un contenido de huecos del 25% es posible una resistencia máxima a la compresión simple del orden de 18 MPa y una resistencia a la tracción indirecta del orden de 2 MPa. Si se añade un polímero, la resistencia a flexotracción puede ser incrementada hasta aproximadamente 4 MPa. El módulo dinámico de elasticidad es del orden de 20.000 a 25.000 MPa.
- la permeabilidad del hormigón poroso está afectada, entre otros factores, por la granulometría del árido fino.

Respecto al análisis estructural llevado a cabo, se han estudiado las tensiones inducidas por el tráfico en una sección con base de hormigón compactado con rodillo en la que se sustituyeron 8 cm de aglomerado asfáltico por 5 cm de hormigón poroso. En la comparación realizada entre ambas se han obtenido unos valores de las tensiones muy similares, por lo que ambas capas pueden considerarse equivalentes desde el punto de vista de capacidad de soporte en las tensiones inducidas en la capa de base. El método utilizado permite proyectar pavimentos con una capa de rodadura de hormigón poroso y

compararlos con otras secciones estructurales actualmente utilizadas en los distintos países.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su reconocimiento por la financiación recibida de la Comisión Europea a través del proyecto Brite-Euram BE-3415.

BIBLIOGRAFIA

- Ames, W.H., 1985. Concrete Pavement Design and Rehabilitation in California. Third Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue Univ., abril, pág. 253-265.
- Eerland, D.W., Grob, Th.S. y Onstenk, H.J.C.M., 1990. Developments in noise reduction of concrete roads in the Netherlands. 6º Simposio Internacional sobre Carreteras de Hormigón. Cembureau, Madrid, vol. AIII, pág. 55-64.
- Eerland, D.W., Onstenk, H.J.C.M. y Ubachs, W.G.M., 1991. Betonwegdekken met verminderde geluidsemissie. Informe nº 90510 para CUR. Intron, Holanda. Abril.
- Esgleas, F., Guyot, L., Pipien, G. y Beaumont, J., 1992. Chaussées poreuses urbaines. Bilan et perspectives de la recherche. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, nº 692, enero, pág. 1-5.
- Jasienski, A., 1984. L'usage du béton poreux en bandes d'arrêt d'urgence (B.A.U.). Technique Routière, 1, pág. 6-15.
- Jofré, C., 1993. Hormigones porosos. Cemento-Hormigón, agosto, pág. 992-1014.
- Kellersman, G.H. y Smits, F., 1989. An experiment with porous concrete top layer on J.C.P. Fourth Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue Univ., abril, pág. 615-624.
- Mathis, M.D., 1989. Permeable base design and construction. Fourth Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue Univ., abril, pág. 663-670.
- MOPU, 1989. Instrucción 6.1 y 2-IC. Secciones de firme. Madrid.
- Nissoux, J.L., 1985. Bilan de l'expérience française pour le drainage des chaussées neuves. Bulletin de liaison des laboratoires de Ponts et Chaussées, nº 139, septiembre-octubre, ref. 2991, pág. 39-43.
- Onstenk, H.J.C.M., 1991. Porous concrete - Test section Texel. Informe nº 91185 para CUR. Informe provisional del subgrupo de trabajo 3.3 (proyecto Brite Euram BE-3415). Intron, Holanda. Septiembre.
- Onstenk, E., Aguado, A., Eickschen, E. y Josa, A., 1993. Laboratory study of porous concrete for its use as top-layer of concrete pavements. Fifth Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue Univ., abril, vol. 2, pág. 125-139.
- Pipien, G., Christory, J.P., Combelles, F. y Raimbault, G., 1992. Routes à structures poreuses. Où en est-on?. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 694, marzo, pág. 1-8.
- Raimbault, G., Balades, J.D. y Faure-Soulem, A., 1985. Quatre expérimentations françaises de chaussées poreuses. Bulletin de liaison des laboratoires de Ponts et Chaussées, nº 137, mayo-junio, ref. 2994, pág. 43-55.
- Raimbault, G., Nissoux, J.L. y Barbe, B., 1982. Les chaussées poreuses. Une technique nouvelle pour l'assainissement urbain. Bulletin de liaison des laboratoires de Ponts et Chaussées, nº 117, enero-febrero, ref. 2637, pág. 21-31.
- Rosell, J.J., Aguado, A. y Dolz, J., 1987. From theory to practice of porous cement concrete. 1st Int. Congress, R.I.L.E.M., De la Science des matériaux au génie des matériaux de construction. Paris. Chapman and Hall, vol. 1, pág. 218-225.
- Rosell, J.J., Aguado, A. y Josa A., 1990. Porous Concrete for Urban Pavements. 6º Simposio Internacional sobre Carreteras de Hormigón. Cembureau, Madrid, vol. AIII, pág. 87-95. ■