

panorámica actual de los pavimentos de hormigón en los Estados Unidos

RAFAEL FERNANDEZ SANCHEZ y CARLOS JOFRE IBAÑEZ
Ingenieros de Caminos

514 - 67

sinopsis

Se incluyen en el presente artículo las novedades más interesantes en el campo de los pavimentos de hormigón en Estados Unidos, recogidas en un viaje realizado por un grupo de ingenieros españoles con motivo de la primera Conferencia Internacional sobre el Proyecto de Pavimentos de Hormigón, celebrada en la Universidad de Purdue (Indiana). El viaje se completó con una serie de visitas técnicas, entre las que merecen destacarse las efectuadas a la Portland Cement Association, al Laboratorio de Carreteras de California y a diversas autopistas, tanto construidas como en ejecución, en dicho Estado. Como es sabido, California ha desarrollado una técnica propia de firmes rígidos que ha sido aplicada en algunas recientes realizaciones españolas.

Durante el mes de febrero de 1977 se celebró en la Universidad de Purdue (Indiana) la Primera Conferencia Internacional sobre el Proyecto de Pavimentos de Hormigón. De su importancia pueden dar una idea tanto el número de participantes —cerca de 350 procedentes de 18 países— como los textos de las comunicaciones presentadas, que ocupan un volumen de más de 600 páginas. La representación española estuvo compuesta por seis ingenieros: dos de la Dirección General de Carreteras, dos de Dragados y Construcciones, S. A., y otros dos del Instituto Eduardo Torroja.

Después de la Conferencia dicho grupo realizó una visita a las instalaciones de la Portland Cement Association, en Skokie (Illinois), donde tuvo lugar asimismo una jornada de trabajo sobre algunos temas de construcción no tratados específicamente en la Conferencia de Purdue. El viaje se completó con varias reuniones de trabajo con ingenieros del Departamento de Carreteras de California, y una serie de visitas técnicas al Laboratorio de Carreteras de dicho Estado y a diferentes autopistas, tanto construidas como en ejecución. California ha desarrollado una técnica propia en el campo de los pavimentos de hormigón, que ha sido aplicada en algunas recientes realizaciones españolas, como las autopistas Sevilla-Cádiz y Tarragona-Valencia.

En el presente artículo se pretenden resumir las novedades más interesantes recogidas en dicho viaje. Los autores quieren agradecer aquí la valiosa colaboración del resto de los miembros del grupo español, tanto en la redacción del texto como en el material gráfico, e igualmente a los ingenieros del Departamento de Carreteras de California, y en especial a Mr. James H. Woodstrom, las inestimables facilidades prestadas en las visitas y reuniones técnicas realizadas en dicho Estado.

1. HORMIGON FRENTE A ASFALTO. TIPOS Y COSTES. ZONAS CLIMATICAS

Actualmente, en Estados Unidos poseen firme rígido el 60 % de las carreteras interestatales, las cuales soportan la mayoría del tráfico pesado; y ello, a pesar de que el betún asfáltico en USA es más barato que en España, mientras que el cemento es más caro, según se observa en la siguiente tabla (*) (considerando 1 dólar = 70 ptas.):

| | USA (Ptas.) | ESPAÑA (Ptas.) |
|--------------------------|----------------|-------------------|
| t betún alféltico | 5.000 | 7.000 |
| t cemento | 3.000 | 1.700 |

Otro dato a considerar es que ya en el año 1971, antes de la crisis de la energía y el alza de los productos petrolíferos, las carreteras de hormigón resultaban más económicas en USA para tráfico pesado. En algunos Estados, por ejemplo California, se recurre siempre al hormigón en tráfico pesado, en los que resulta económicamente justificado; y en algunas otras circunstancias, por ejemplo cuando hay una capa freática alta también se utiliza pavimento rígido. No obstante, se recomienda el flexible si existe posibilidad de asientos diferenciales, aunque ésta es una precaución que parece innecesaria dado el comportamiento de los firmes rígidos en algunas zonas mineras inglesas (1).

(*) Los precios del betún alféltico y del cemento en USA han sido obtenidos como media de una serie de precios en diferentes Estados indicados en «Engineering News Record», 10 de febrero de 1977.

Otra razón a favor de la construcción de pavimentos de hormigón es que, en las carreteras interestatales americanas, el 90 % de su coste de construcción es financiado con fondos federales, y el 10 % restante por el propio Estado. Sin embargo, la conservación corre a cargo del Estado en su totalidad, por lo que lógicamente procuran escoger pavimentos que requieran poco mantenimiento, como es el caso de los firmes rígidos bien contruidos. No es fácil dar cifras, pero en una encuesta realizada por la P.C.A. (2) se obtuvieron unos costes acumulados, a lo largo de los diez primeros años de vida del pavimento, que oscilaban entre el 1,3 % y el 7,5 % del coste inicial de construcción.

A la vista de los anteriores datos parece lógico pensar que en España deban utilizarse más los pavimentos de hormigón, al menos en autopistas y carreteras principales, dado que:

- los tráficoes españoles, medidos en ejes equivalentes, son más pesados que los americanos;
- el cemento es más barato en España;
- el betún asfáltico es más caro en España.

No se debe olvidar tampoco que mientras que el cemento es un producto nacional, los betunes asfálticos utilizados en carreteras no suelen ser subproductos de refinería, sino que, en general, requieren importaciones especiales.

Finalmente, debe pensarse en el importante valor residual de los pavimentos de hormigón, bien para soportar un refuerzo o bien para ser reciclado, sirviendo como «cantera» in situ para la obtención de áridos, cada vez más escasos. El tema del reciclaje de pavimentos está siendo objeto de un interés cada vez mayor, habiéndose dedicado a él una de las conferencias de Purdue (3). En Francia ha tenido una reciente aplicación en la reconstrucción de la autopista de Orly.

Actualmente se utilizan en USA los cuatro tipos de pavimentos rígidos:

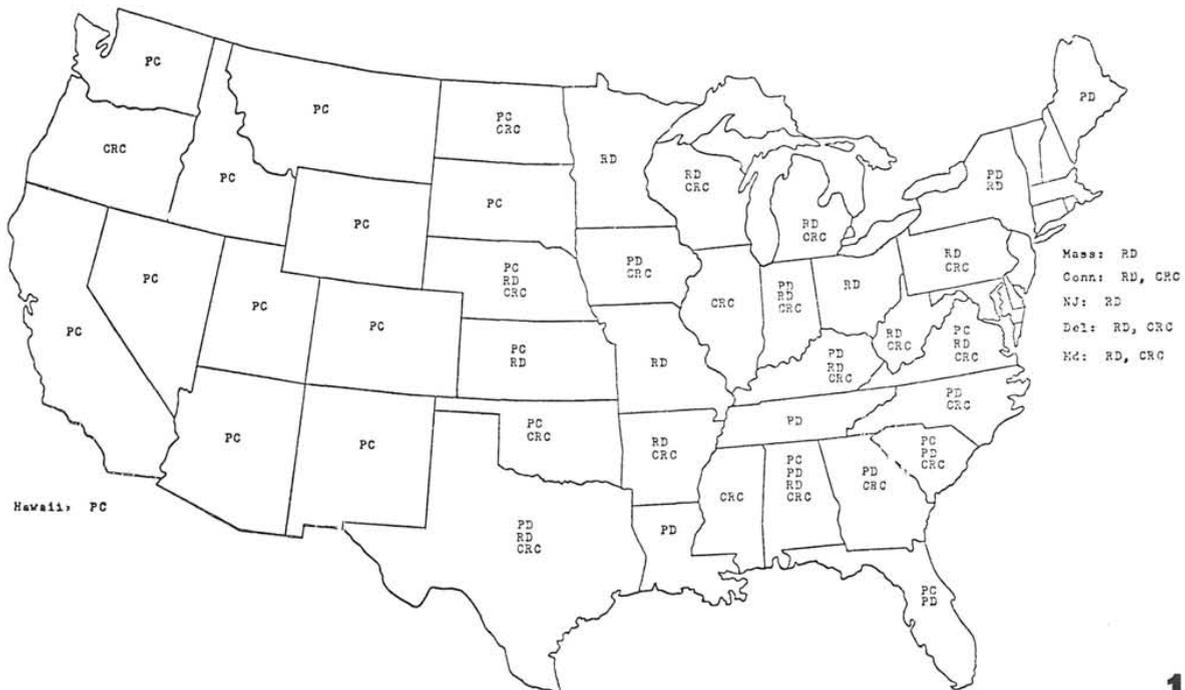
- pavimento en masa sin pasadores (PC);
- pavimento en masa con pasadores en las juntas (PD);
- pavimento armado con juntas y pasadores (RD);
- pavimento armado continuo (CRC).

No disponemos de datos sobre porcentajes relativos de cada uno de estos tipos, pero sí puede indicarse que (2), en las autopistas interestatales o en otras carreteras importantes (fig. 1), el PC es utilizado en 20 Estados; el PD, en 13; el RD, en 21, y el CRC, en 23.

Es de destacar que el pavimento en masa sin pasadores se usa en 9 de los 10 Estados comprendidos dentro de la zona con clima más similar al español, y más concretamente al mediterráneo (veranos calurosos e inviernos templados) (fig. 2). En 7 de ellos es el único tipo utilizado.

Analizando las estadísticas sobre pavimentos rígidos en USA durante los últimos años, se puede observar:

- un descenso en el empleo del pavimento armado con juntas y pasadores (RD), que en 1960 (4) era utilizado en 36 Estados; en 1969 (5), en 30, y en 1975 (2), en 21.
- igualmente, una estabilización en el empleo del pavimento armado continuo (CRC), pues en 1960 sólo había 86 km de calzada de 2 carriles construidos, la mayoría con fines experimentales, en 8 Estados; en 1969 ya había más de 10.000 km, siendo utilizado en 20 Estados, y en abril de 1972 está cifra subía a más de 16.000 km con 23 Estados con más de 65 km (40 millas) construidos (6). Sin embargo, en 1975, aunque no disponemos de la cifra de kilómetros pavimentados, seguía siendo empleado con una cierta regularidad en 23 Estados (2). Algunas posibles causas de dicha estabilización se analizan en el apartado 7.

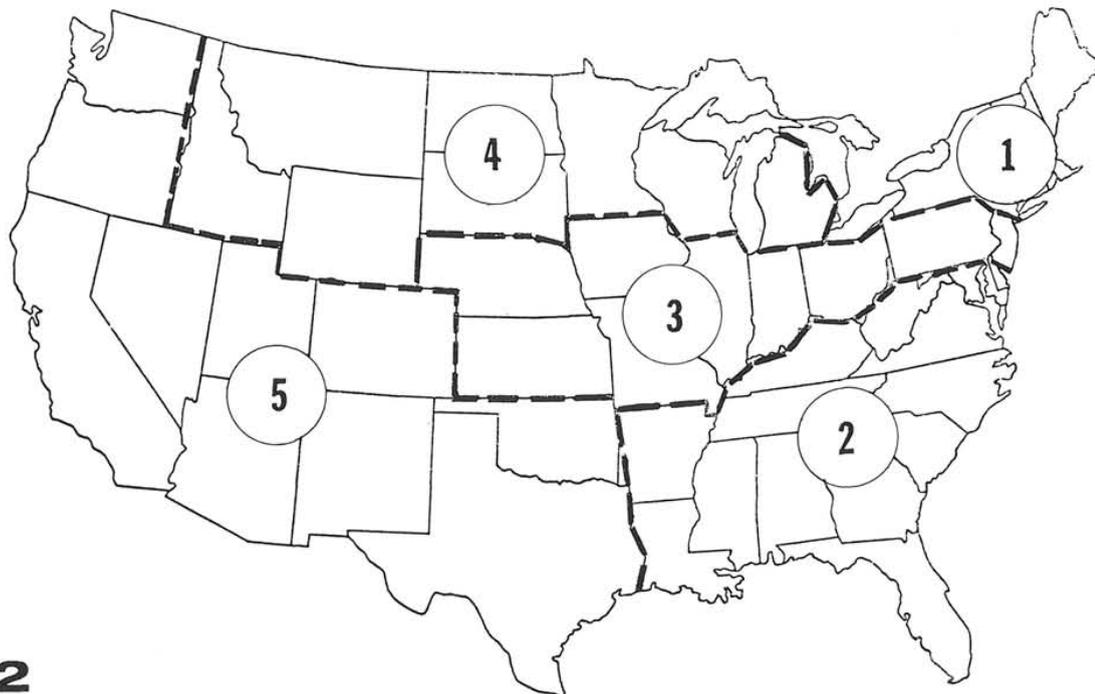


PC = Hormigón en masa sin pasadores.
PD = Hormigón en masa con pasadores.

RD = Hormigón armado con juntas y pasadores.
CRC = Hormigón con armadura continua.

Tipos de pavimentos rígidos utilizados en los diferentes Estados en USA.

1



2

- Zona 1. Inviernos húmedos y fríos. Veranos secos y calurosos.
- Zona 2. Inviernos templados. Veranos largos, húmedos y calurosos.
- Zona 3. Inviernos fríos. Veranos calurosos.
- Zona 4. Inviernos fríos. Veranos cortos y templados.
- Zona 5. Inviernos templados. Veranos calurosos.

División de Estados Unidos en zonas climáticas

En cuanto a los costes de construcción de los diferentes tipos de pavimentos rígidos, estadísticas realizadas por la P.C.A. (2), han arrojado los siguientes valores medios.

| | Ptas./m ² | % PC |
|---|----------------------|--------|
| Pavimento en masa sin pasadores de 22,5 cm (9") de espesor. | 657 | 100,00 |
| Pavimento en masa con pasadores de 22,5 cm (9") de espesor. | 800 | 118,75 |
| Pavimento armado con juntas de 22,5 cm (9") de espesor | 860 | 127,75 |
| Pavimento armado continuo sin armadura transversal de 22,5 cm (9") | 1.000 | 149,00 |
| Pavimento armado continuo con armadura transversal de 22,5 cm (9") | 1.040 | 154,50 |
| Pavimento armado continuo sin armadura transversal de 20 cm (8") | 917 | 136,00 |
| Pavimento armado continuo con armadura transversal de 20 cm (8") | 932 | 138,25 |

Otros costes obtenidos han sido los siguientes:

| | Ptas./m ² | % PC |
|---|----------------------|-------|
| Base granular de 15 cm (6") ... | 160 | 23,75 |
| Base tratada con cemento de 15 cm (6") | 230 | 34,25 |
| Base bituminosa de 15 cm (6"). | 323 | 48,00 |

Estos costes no son totalmente aplicables a España, pero pueden servir como orientación.

De las cifras anteriores se deduce que en Estados Unidos la armadura tradicional incrementa el coste del pavimento en un 25-30 %; y la armadura continua en un 35-40 % en pavimento de 20 cm (8"). El coste del acero en armaduras fluctúa mucho según los diferentes Estados, pero puede estimarse como media de abril de 1977 unos 15 \$/cwt (*), es decir, 20,5 ptas./kg. Hay que notar igualmente que la mayoría de los Estados utilizaban en los pavimentos armados continuos una cuantía del 0,6 %, pero actualmente empieza a considerarse que dicho porcentaje debería subirse al 0,7 %, y que el espesor del pavimento debería ser igual al del pavimento en masa.

(*) El precio del acero en armaduras en USA ha sido obtenido como media de una serie de precios en diferentes estados indicados en «Engineering News Record», 14 de abril de 1977.

2. NORMAS ESPAÑOLAS FRENTE AL ESTADO ACTUAL DE OTRAS NORMAS

Del examen de los pavimentos utilizados en USA se deduce que las actuales Normas españolas (Instrucción 6.2-IC) (7) están en línea con las tendencias más modernas en los diferentes aspectos de espesores, tipos recomendados, problemas que pueden presentar los arceles, sellado de juntas, etc. Quizá habría que prestar mayor atención en dicha Instrucción o en la de drenaje a la división pluviométrica de España. En la actualidad y a falta de datos mejores se han considerado dos zonas: una con más de 800 mm de precipitación total anual, y otra con menos de 800 mm. Sin embargo, cara al comportamiento del pavimento, más que la intensidad total interesa la frecuencia, pues los daños se originan por lluvias continuadas, que puedan empujar el firme y el terreno, sin evaporarse rápidamente.

3. TENDENCIAS ACTUALES

Período de proyecto. La mayoría de los Estados usan un período de proyecto de 20 años (2), siendo escasos los que utilizan períodos mayores (por ejemplo: Washington, 25; Indiana, 30; Minnesota, 35; Montana, 40). No obstante, hay que destacar que según la opinión de algunos ingenieros, con sólo aumentar ligeramente, en 1 pulgada, el espesor del pavimento, podría duplicarse su vida de servicio; opinión que se ve reforzada por las fórmulas deducidas del ensayo AASHO (8). Estas consideraciones se traducen en una tendencia actual al aumento de espesores, sobre todo en los carriles destinados al tráfico pesado (en autopista de cuatro carriles en cada dirección, los camiones circulan por los dos carriles exteriores, por su superior relación potencia-peso frente a los utilizados en España). Independientemente de su superior durabilidad, el incremento de espesor lleva consigo una ventaja adicional, como es la posibilidad de corregir el escalonamiento («faulting») de las losas en las juntas mediante cepillado («grinding»), con mayores garantías de que la losa no reducirá excesivamente su capacidad estructural.

Unida a las ventajas anteriores está la de mayor rigidez de la losa, al ser más gruesa, lo que lleva consigo un menor batido en las juntas al paso de las cargas y, en consecuencia, una menor posibilidad de arrastre de finos hacia la losa aguas arriba del tráfico, causa del escalonamiento.

Esta última razón ha llevado a considerar la utilización del método «full-depth» en pavimentos rígidos, disponiendo directamente sobre la explanada una losa de hormigón de gran espesor (35 a 40 cm), sin interposición de capa de base. En ocasiones, los contratistas estadounidenses prefieren colocar, por el mismo precio, una losa de hormigón de 35 cm (14") en vez de una losa de 25 cm (10") sobre una capa de base estabilizada con cemento de 10 cm (4"), debido a la mayor facilidad de puesta en obra de aquella (9). En Francia, el interés por esta técnica se ha traducido en la construcción de una serie de tramos experimentales (10).

Barras de unión («tie bars») en juntas longitudinales. Las opiniones son contradictorias. Según los expertos de la P.C.A., dado que al poder colocarse mecánicamente su repercusión es solamente de 2,5 ptas./m² (3 cent/sq · yd), merece la pena el utilizarlas para que las juntas longitudinales no se abran excesivamente. Otros ingenieros, por ejemplo los de California, no las consideran necesarias, pues las juntas longitudinales no son zonas conflictivas, al ser atravesadas por el tráfico relativamente pocas veces, y la mayoría de ellas por vehículos ligeros. En general se suelen disponer, con excepciones como la apuntada de California.

Escalonamiento o «faulting» de las juntas.

Este es uno de los problemas fundamentales de los pavimentos de hormigón en masa sin pasadores, utilizados en 20 Estados, como ya se indicó. Así, en California, un 25 % de los pavimentos rígidos presentan escalonamiento moderado o severo (fig. 3). Es preciso notar que la frontera entre el escalonamiento admisible e inadmisibles varía según se trate de USA o de Europa, por las mejores suspensiones de los coches americanos. Como cifras medias, podría indicarse que en USA se considera admisible un escalonamiento de 2,35 mm (3/32"), e inadmisibles uno de 4,7 mm (6/32"). Packard (11) sugiere como límite 3,2 mm (1/8"). Sin embargo, es probable que en España 2 mm resulten excesivos.

Para evitar la aparición del «faulting» se han intentado varias medidas. La primera de ellas es la colocación de pasadores («dowels») en las juntas, lo cual tiene muchos detractores, que destacan entre otras las siguientes razones en contra:

- Para un correcto funcionamiento de los pasadores, éstos deben ser resistentes a la corrosión y cumplir unas condiciones de alineación muy precisas. En caso contrario, los perjuicios que pueden provocar al pavimento al coartar el libre movimiento de las losas superan sus teóricas ventajas.
- Económicamente, los pasadores equivalen a unos 4-5 cm. La opinión de muchos ingenieros, como los del Departamento de Carreteras de California y los de la constructora de maquinaria CMI, es que por ese coste más vale incrementar el espesor de la losa en dicha cuantía, con lo cual se aumenta su rigidez, y recurrir al cepillado («grinding») en el caso de aparición de escalonamiento.
- Todavía no hay ningún sistema a punto para la colocación de pasadores en el hormigón fresco compatible con las pavimentadoras de encofrados deslizantes («slip-form pavers»). Por otra parte, el tener que disponer los pasadores sobre cunas apoyadas en la base disminuye mucho el rendimiento de dichas máquinas, no sólo por la necesidad de colocar cuidadosamente unas amasadas previas sobre las cunas, sino también por tener que efectuar la alimentación de hormigón lateralmente.



3

Escalonamiento de juntas.

Todo este conjunto de factores a favor y en contra de los pasadores lleva consigo el que todavía esté sin respuesta clara la cuestión, repetida varias veces en la Conferencia de Purdue: «to dowel or not to dowel?».

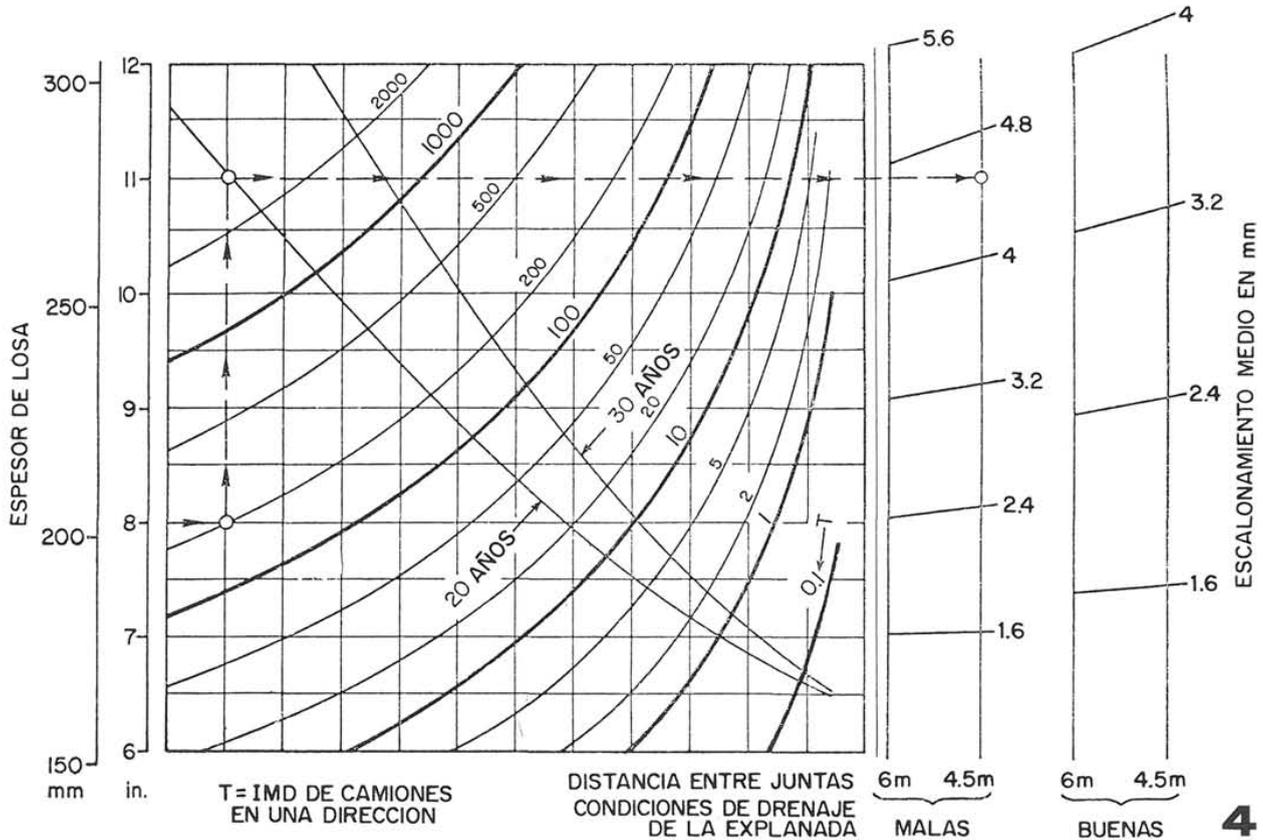
En el caso de inclinarse por la colocación de pasadores, tampoco está totalmente resuelto el problema de cuándo son necesarios y cuándo no. En un intento de afinar la conocida regla de la P.C.A.: «cuando la IMD de camiones sea superior a 300 en ambas direcciones», Packard (11) ha presentado un método en el que se correlacionan, mediante ecuaciones y ábacos (fig. 4), el escalonamiento medio, no sólo con dicha IMD de camiones, sino también con el tipo de base (granular o estabilizada), las condiciones de drenaje del suelo (buenas o malas), la vida de servicio o período de proyecto del pavimento, el espesor de éste y la distancia entre juntas. El método tiene limitaciones importantes, como son el haber sido obtenido por correlaciones con

pavimentos de espesor máximo de 25 cm (10"), con lo que para espesores superiores es una extrapolación; el no contemplar otros dispositivos que pueden ayudar también a la no aparición del escalonamiento, tales como las bases de hormigón pobre u otras no erosionables, los arcenes de hormigón, etc.; ni, finalmente, el no considerar la influencia de las cargas por eje superiores a las americanas. Sin embargo, para las condiciones normales estadounidenses, los resultados obtenidos con el modelo parecen bastante ajustados a la realidad.

Otras medidas adoptadas para evitar el escalonamiento son:

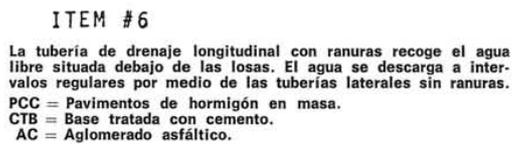
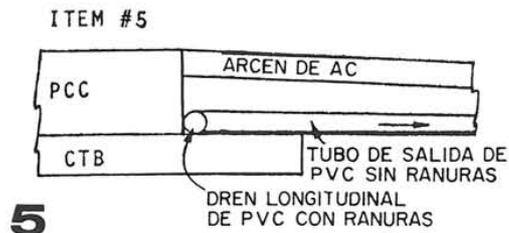
- La utilización de arcenes drenantes, contruidos, por ejemplo, con grava-cemento sin finos o con aglomerados abiertos. Tanto esta medida como la siguiente obedecen, en parte, a la comprobación de que un 70 % de los finos sueltos bajo las losas proceden de los arcenes.

Abaco de Packard para calcular el escalonamiento en las juntas (bases estabilizadas).



- La utilización de arcenes de hormigón, no erosionables, y que incluso pueden ser construidos al mismo tiempo que el pavimento, en una sola pasada de la pavimentadora. Generalmente se disponen barras de unión para evitar una excesiva abertura en la junta pavimento-arcén.
- La utilización de drenes longitudinales, apoyados en la base y adyacentes a las losas de hormigón para evitar el almacenamiento de agua debajo de éstas (fig. 5). En California se han utilizado normalmente tuberías de PVC de 37,5 milímetros (1 1/2") de diámetro con ranuras abarcando su mitad inferior a intervalos regulares (fig. 6). El agua recogida se elimina cada 30-60 m mediante tuberías laterales también de PVC, pero sin ranuras (fig. 6). El coste del sistema, una vez instalado, se estima en unas 350 ptas./m (1,5 \$/ft).

Los resultados obtenidos parecen muy favorables, pues se han medido caudales evacuados por una sola salida de hasta 380 litros/hora (110 gal/hora), de lo que es buena prueba las erosiones notadas en el terreno (fig. 7); y lo que es más importante, una vez que la lluvia ha cesado el agua deja de fluir por las salidas al cabo de poco tiempo (1/2 hora-2 horas); con ello se minimiza el período en el que el agua está saturando el firme, arcenes y terreno, que es lo que realmente causa perjuicios.



Esquema de drenaje utilizado en California



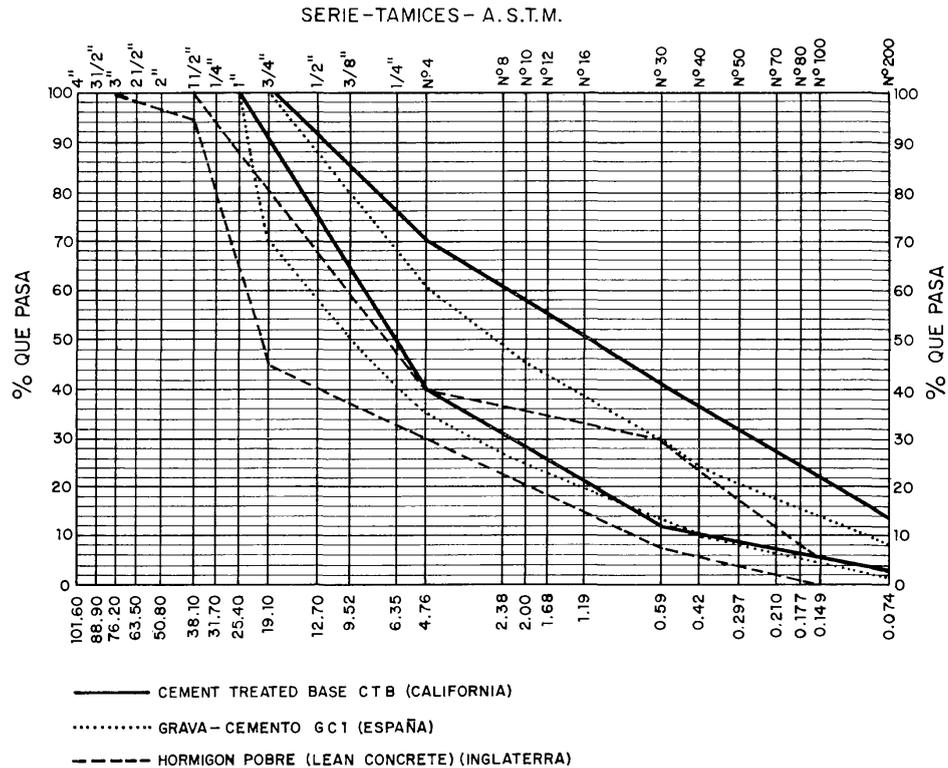
6 Tuberías de drenaje y de desagüe utilizadas en California.



7 Erosiones producidas por el desagüe de un drenaje.

8

Husos granulométricos del hormigón pobre (lean concrete) inglés, la grava-cemento española y la cement-treated base (CTB) californiana.



- El sobrecancho de 75 cm (2,5 ft) utilizado en Texas para alejar las cargas del borde, medida que ha sido recogida también en las Normas francesas y españolas.
- La utilización de bases no erosionables, principalmente de hormigón pobre (lean-concrete) o de «econocrete». Las bases tratadas con cemento (CTB) utilizadas en California no han dado resultados totalmente satisfactorios, al menos en lo que se refiere a resistencia superficial (12). Incluso al levantar algunas losas se ha visto que la base había perdido el cemento, quedando los áridos sueltos. Una de las causas de esta baja resistencia parece radicar en el perfilado final de la superficie, que además elimina un 15-17 % de la grava-cemento o la CTB; y otra, en su bajo contenido en cemento. Hay que destacar, no obstante, que la calidad de las CTB construidas hace algunos años en California es bastante inferior a la de las gravas-cemento utilizadas actualmente en las autopistas españolas, y por otra parte, la operación de refino se realiza en California generalmente después de haber transcurrido más de 3 horas desde la incorporación del agua a la mezcla; es decir, cuando el material está fraguando o ya ha fraguado, lo cual se traduce en una disminución de la resistencia superficial. Por el contrario, en España, la grava-cemento se refina antes del comienzo del fraguado.

La erosión de las bases origina un doble problema: por una parte es una fuente de finos bajo el pavimento, y por otra provoca el descalzamiento de las losas. Por estas causas se tiende actualmente a la utilización en ellas de materiales más resistentes, tales como:

- El econocrete, hormigón con áridos de baja calidad y bajo contenido de cemento.
- El hormigón pobre o lean-concrete, con un contenido de cemento entre el 7 y el 10 %, es decir, aproximadamente el doble que el de las CTB; una relación agua/cemento muy alta, del orden de 2, a fin de conseguir una consistencia plástica; y áridos de calidad comparable a los utilizados en las CTB. Aparte de su superior resistencia a la abrasión (en ensayos realizados sobre testigos se ha llegado a obtener con el hormigón pobre pérdidas cuatro veces inferiores a las de las CTB), el hormigón pobre presenta otras ventajas adicionales, como las siguientes:
 - la no necesidad de ninguna terminación final, por su consistencia plástica; es decir, una puesta en obra menos complicada y menos perjudicial para la base;
 - los áridos que utiliza (fig. 8), con tamaños máximos de 37,5 milímetros (1 1/2"), son más parecidos a los del hormigón del pavimento que los de las CTB;

- permite disminuir el espesor de las bases, aproximadamente una pulgada, con respecto al de las CTB, por su superior resistencia in situ (aunque no en laboratorio);
- en su fabricación puede utilizarse el mismo equipo que para el hormigón del pavimento, lo que no ocurre con las CTB;
- la homogeneidad obtenida en obra en las resistencias de los hormigones pobres es muy superior a la de las CTB.

Por todas estas razones, tanto en California como en Francia, se está considerando la posibilidad de sustituir, respectivamente, las CTB y las gravas-cemento por el hormigón pobre, el cual empezó a utilizarse en Inglaterra hace más de treinta años. Hasta el momento en California se han construido dos tramos experimentales, con una longitud total de 8 km (12), mientras que en Francia se ha utilizado en la reconstrucción de la autopista de Orly.

Sellado de juntas. Tanto en zonas lluviosas como no lluviosas, hay tendencia a sellar las juntas a nivel de proyecto; pero en las no lluviosas no se suelen sellar en el momento de la construcción, aunque sí 2 ó 3 años después, cuando ya están totalmente abiertas. Se procura sellar en invierno, para evitar despegues del material sellante respecto a las losas. Incluso en zonas en las que se sella inicialmente, se considera conveniente resellar a nivel de mantenimiento a los 3 ó 4 años. El objetivo perseguido con estos sellados es doble: por una parte se intenta reducir en lo posible la entrada de agua por las juntas, puesto que el hacerlas totalmente impermeables se considera un óptimo prácticamente imposible de alcanzar; y por otra, se impide la introducción de cuerpos extraños en ellas, causa de futuros desperfectos.

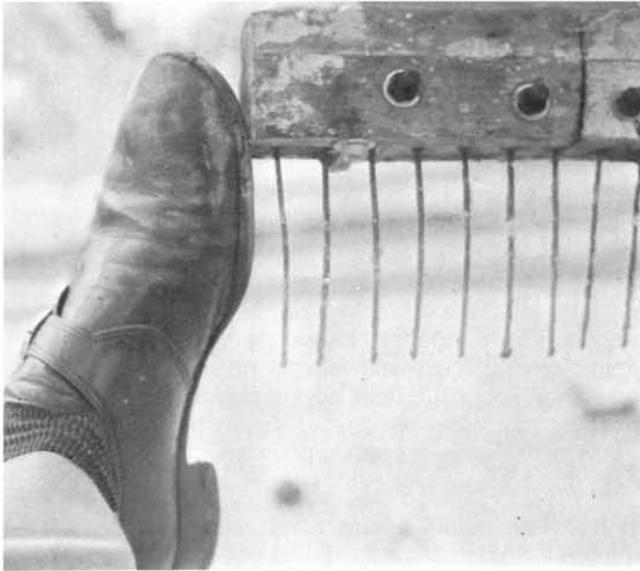
También con objeto de minimizar la entrada de agua bajo las losas, en ocasiones se sellan no sólo las propias juntas del pavimento, sino también la junta pavimento-arcén exterior (fig. 9). Algunos Departamentos de Carreteras estatales, como el de Georgia, consideran que se debe prestar más atención a esta última, aunque todavía no se conoce un sellante totalmente eficaz (13).

Textura superficial. En opinión de la Federal Highway Administration y de muchos Departamentos estatales, los acabados conseguidos mediante arrastre de arpilleras o similares no son en general adecuados para carreteras con velocidades de proyecto iguales o superiores a 65 km/h (40 millas por hora) (14). Los acabados con cepillo proporcionan inicialmente unas buenas características antiderrapantes, pero en general no son duraderos. Por ello se recomienda la textura profunda obtenida con flejes metálicos (metal tines) (fig. 10) como el método más práctico y de confianza para obtener un pavimento de hormigón seguro; es decir, se sigue la tendencia europea hacia texturas profundas. Se considera eficaz el uso de flejes de 0,8 mm (0,03") de espesor, 2 mm (0,08") de ancho y longitud comprendida entre 100 y 150 mm (4 a 6"), produciendo surcos de 5 mm (3/16") de profundidad. Se recomienda una separación media entre surcos de 13 mm (1/2"), más eficaz que una separación mitad, como se ha podido comprobar. Por la propia flexibilidad de los flejes, el

Junta arcén-pavimento sellada.

9





Flejes metálicos utilizados para dar textura al pavimento.

10



Aspecto del pavimento con la textura longitudinal obtenida mediante el uso de flejes metálicos.

11

Otro aspecto de la textura longitudinal y de la profundidad de serrado de la junta transversal.

12



espaciamiento entre surcos es lo suficientemente irregular como para disminuir notablemente la producción de ruido, a menos que la separación media no sea demasiado grande. Por ello se aconseja que ésta no sea superior a 13 mm (1/2").

Sigue sin haber una tendencia clara entre textura longitudinal o transversal, por las ventajas que presenta cada uno de dichos tipos. La textura transversal disminuye las distancias de frenado y mejora las características de drenaje del pavimento, con lo cual se reducen los reflejos en éste y las proyecciones de agua sobre los vehículos. Por el contrario, la textura longitudinal (figuras 11 y 12) es más fácil de ejecutar, sobre todo con slip-forms; mejora el coeficiente de rozamiento transversal, con lo cual es más seguro el movimiento de los vehículos en las curvas; es más duradera y origina menos ruido.

Conservación nula (zero maintenance).

Durante los últimos años se están tratando de poner a punto métodos para proyectar pavimentos que requieran una conservación nula a lo largo de la vida de servicio considerada. Se entiende por conservación nula el que no deban realizarse operaciones tales como reparaciones de juntas y grietas, reemplazamiento de losas, cepillados («grinding»), bacheos y refuerzos. Lógicamente, donde más interés presenta este concepto es en zonas urbanas y suburbanas.

En la Conferencia de Purdue se presentó un procedimiento para obtener pavimentos de hormigón en masa con juntas y conservación nula (15). El espesor se calcula mediante dos sistemas: uno de ellos basado en conceptos de fatiga similares a los del método de la P.C.A., a fin de asegurar al pavimento una capacidad estructural adecuada que impida la aparición de grietas; y el otro basado en el índice de servicio, análogamente al método AASHTO, con objeto de evitar escalonamientos en las juntas. Se escoge el máximo de los dos espesores obtenidos. Se dan también algunos detalles de juntas, recomendándose el uso de pasadores en casi todos los tipos de climas. Sin embargo, es preciso notar que los espesores que se obtienen son demasiado elevados; por ejemplo, para una autopista que deba soportar 30 millones de ejes de 8,16 t (18 kips) en 20 años en el carril de proyecto (que equivale a $4,2 \cdot 10^6$ ejes de 13 t, es decir, casi el límite inferior de

la categoría de tráfico T1 de la Instrucción 6.2-IC) se llega a un espesor de 33 cm (13"), frente a los 23-21 cm indicados en dicha Instrucción.

En resumen, el concepto de «zero maintenance» es un óptimo al que se tiende, pero que todavía no está conseguido en la práctica, sobre todo pensando en las actuales condiciones españolas.

4. MAQUINARIA

Las tendencias actuales de protección del medio ambiente se traducen en la colocación de colectores de polvo en plantas de machaqueo y hormigoneras, para evitar la contaminación. Esta preocupación se refleja también en las modernas plantas asfálticas de tambor mezclador o «masa turbulenta» (Turbulent Mass), una de cuyas ventajas es precisamente la menor emisión de polvo originada por este sistema especial de mezcla de los áridos y el ligante.

La recesión económica ha traído consigo que cada vez haya menos obras y de volumen igualmente menor. Esto se ha traducido en una disminución del tamaño de las plantas de hormigonado y de las máquinas de puesta en obra, lo que al mismo tiempo aumenta su flexibilidad. Así, la CMI Corporation ha desarrollado la pavimentadora Super-200, para anchos del orden de un carril.

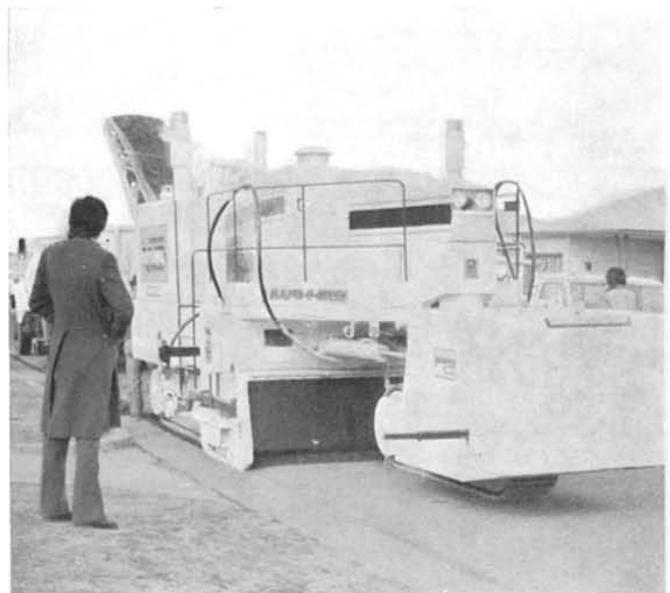
Sin duda, la novedad más interesante en maquinaria de carreteras de que tenemos noticias es la Roto-Mill (fig. 13), también de CMI, que puede realizar una triple función:

- reperfilado del firme;
- escarificar un trozo de éste, dejándolo listo para un refuerzo;
- darle textura, regenerando sus cualidades antideslizantes.

En esencia, la máquina somete el firme a la acción de un rodillo que lleva engastadas una serie de púas o dientes de widia (figura 14), dispuestas según dos hélices. El material resultante es recogido en una bandeja situada a continuación del rodillo, y de ahí es descargada por medio de una cinta transportadora (fig. 15) a los camiones que lo retiran del firme (fig. 16).

La máquina Roto-Mill se mueve apoyándose sobre tres orugas, una delantera y dos traseras, y está provista de palpadores (figura 17) que permiten su guiado siguiendo un hilo, cuando interesa una alineación precisa. Si lo que se busca es simplemente rebajar el firme hasta un nivel prefijado por una superficie adyacente, dicho nivel se mantiene por medio de un patín provisto de sensores que apoya en dicha superficie.

La Roto-Mill puede actuar tanto sobre pavimentos rígidos como flexibles, por lo que se suministran tres tipos de dientes: para hormigón de cemento; para aglomerado asfáltico; y mixtos, para ambas clases de firmes. Dado el gran peso de la máquina (unas 66.000 libras; es decir, unas 30 t), puede actuar sin patinar sobre cualquier tipo de pavimento, sin disminuir el espesor arrancado en el caso de encontrar zonas con mayor resistencia. En el caso de los aglomerados asfálticos, no precisa calentar el firme, lo cual es una gran ventaja frente a algunas máquinas de otras marcas que realizan funciones parecidas. La duración de cada una de las púas puede estimarse entre 24 y 30 horas de servicio, y su coste en USA actualmente es de unos 4 dólares por púa. Es posible que fabricadas en España por la propia constructora que vaya a utilizarlas, este coste disminuya notablemente. No obstante, para tratar de reducir este elevado gasto que suponen los dientes, se está tratando de bajar el número total de dientes de los 225 que lleva ahora a 135.

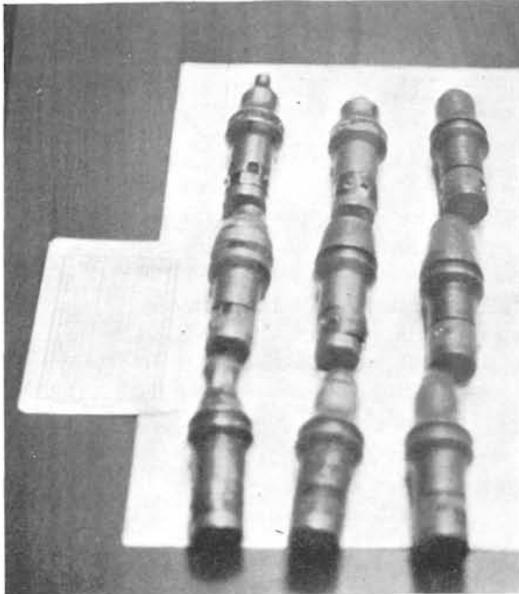


13 Vista delantera de la Roto-Mill.

15



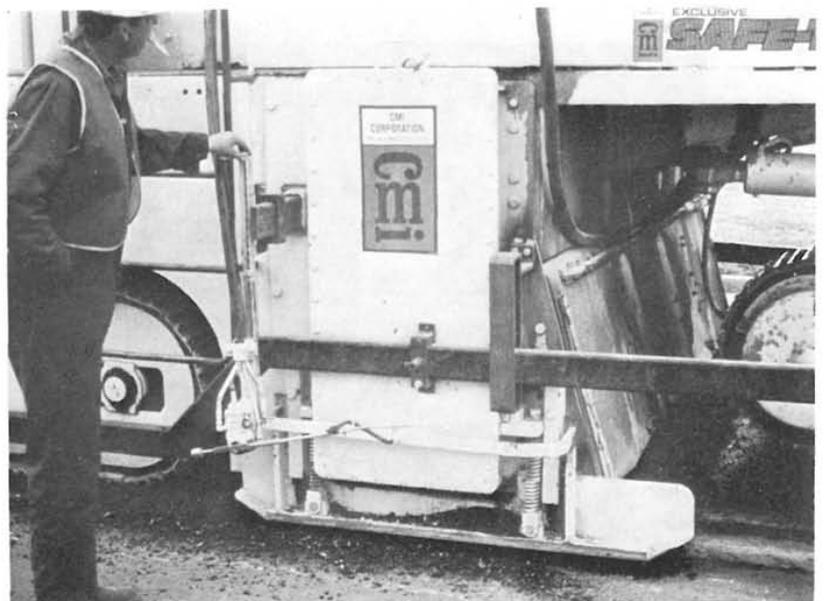
Vista trasera de la Roto-Mill.



14

Dientes de widia utilizados en la Roto-Mill.

16



Descarga en camiones del material obtenido al escarificar el pavimento con la Roto-Mill.

17

Elementos de guiado de la Roto-Mill.



Los rendimientos son también muy superiores a los de otros modelos existentes. Como cifras medias pueden adoptarse 10 m/min en aglomerado asfáltico, levantando una capa de 3 cm de espesor y 3 m/min en hormigón hidráulico, también en capa de 3 cm. La máxima profundidad que puede levantar con buen rendimiento en una pasada es 5 cm (2"). La superficie resultante (figs. 18 y 19) presenta unas cualidades antiderrapantes satisfactorias. Actualmente el ancho de trabajo de la máquina es de 2,8 m (9"), a fin de ocupar un solo carril y poder dejar el resto libre a la circulación. Se está intentando reducir este ancho hasta 2 m.

Dado que el cilindro escarificador está rodeado por otros elementos de la máquina, la producción de polvo es mínima. El material de desecho puede utilizarse directamente como árido, bien para capas de base en el caso de aglomerado asfáltico, o incluso para pavimentos, si se trata de un firme rígido.



18

Aspecto de la textura obtenida con la Roto-Mill.



19

Otro aspecto de la textura obtenida con la Roto-Mill.

El coste de la máquina es de unos 300.000 dólares, y el rendimiento teórico estimado es de 1 millón de yardas cuadradas al año (800.000 m²), es decir, unos 100 km de calzada de dos carriles. Adoptando un rendimiento práctico entre el 50 y el 75 % del anterior, resulta un coste de unas 15 pesetas por metro cuadrado y pulgada de espesor.

Otra novedad interesante, también desarrollada por la CMI, es el trailer Power Fold, que puede abatirse y quedar a ras del terreno, con lo que la maquinaria puede cargarse sobre él por sus propios medios, sin necesidad de grúa. Unos gatos hidráulicos de gran potencia incorporados al trailer elevan éste luego a su nivel de transporte, pudiendo ya engancharse al camión o tractor que lo remolca.

5. RECICLADO DE PAVIMENTOS. ECONOCRETE

Cada día es mayor la escasez de áridos con calidad suficiente para ser empleados en las diferentes capas de un firme. En muchas ocasiones, el principal componente del precio que hay que pagar por los áridos es el de su transporte, superior incluso al coste del árido en sí en el lugar de extracción.

Por ello, se viene prestando gran atención a la utilización de áridos que podríamos llamar no tradicionales, y que puede plasmarse en dos conceptos:

- el reciclado de pavimentos, aprovechando materiales procedentes de la demolición del firme que se va a reponer;
- el empleo en capas de base del econocrete, hormigón con áridos locales de baja calidad. Lógicamente, en la composición del econocrete pueden también intervenir materiales procedentes del reciclado de pavimentos.

Como ventaja adicional del reciclado de pavimentos puede señalarse que en zonas urbanas muchas veces es un problema el encontrar vertederos para el material resultante de la demolición de los firmes.

Tratados con cemento, los áridos procedentes de firmes asfálticos, solos o combinados con áridos procedentes de firmes rígidos, se han utilizado con éxito en capas de base. Para su utilización en firmes rígidos se utilizan áridos procedentes igualmente de firmes rígidos.

El concepto de «econocrete» se ha desarrollado para permitir la utilización de áridos de baja calidad, por ejemplo, calizas pulimentables, que no cumplen las especificaciones corrientes para áridos. En realidad, no se trata de ninguna innovación, sino que lo que se ha hecho es volver a prestar atención al viejo concepto del pavimento en dos capas, utilizando áridos de peor calidad en la capa inferior, sistema con el que, por ejemplo, fue construido el primer firme rígido de USA en Bellefontaine (Ohio), en el año 1893. El econocrete es un desarrollo de la idea anterior, para permitir el empleo de estos áridos de baja calidad no sólo como segunda capa del pavimento, sino también en bases, arceles e incluso en pavimentos de una sola capa destinados a recibir bajos volúmenes de tráfico.

6. UTILIZACION DEL HORMIGON REFORZADO CON FIBRAS EN PAVIMENTOS

Una serie de propiedades de los hormigones reforzados con fibras hacen en teoría muy atractiva su aplicación en la construcción de pavimentos. Entre dichas propiedades pueden citarse las siguientes:

- el incremento de la resistencia a flexotracción;
- las fibras dificultan el crecimiento de las microfisuras en el hormigón, actuando en forma similar a las barras de unión y, por tanto, restringen la propagación de las grietas;
- los hormigones reforzados con fibras parecen presentar una resistencia a la fatiga muy superior a la de los hormigones en masa.

Sin embargo, todas estas ventajas en la práctica suelen verse contrarrestadas por factores tales como la baja trabajabilidad del material, lo que lleva muchas veces consigo la adición de más agua, disminuyendo así el posible aumento de resistencias; las dificultades en la dispersión de las fibras en la mezcla, sin que se apelotonen, y el coste del material en sí, del orden del doble que el del hormigón en masa, al que hay que sumar el encarecimiento derivado de su peor manejabilidad. Por estas razones, tanto la opinión de la P.C.A. (16) como la de la Federal Highway Administration (17), es que como material para construcción de pavimentos, el hormigón reforzado con fibras no puede aplicarse indiscriminadamente, sino sólo en especiales circunstancias, haciendo un estudio económico previo. A escala real, las aplicaciones más importantes han sido dos refuerzos de pavimentos de aeropuertos:

- el de Reno, de 7,5 cm (3") de espesor y 18.400 m² (23.000 sq · yd) de extensión, construido en 1975;
- el de Las Vegas, de 15 cm (6") de espesor y 48.000 m² (60.000 sq · yd) de extensión, construido en 1976.

Dado el corto tiempo transcurrido desde su ejecución, todavía es pronto para opinar sobre su comportamiento a largo plazo, pero los resultados hasta el momento parecen ser satisfactorios.

7. PAVIMENTOS ARMADOS CONTINUOS. PAVIMENTOS PRETENSADOS

La utilización de estos dos tipos de pavimentos, que presentan, al menos en teoría, unos costes de conservación muy bajos si están adecuadamente construidos, sigue tropezando con el problema de su alto costo inicial. Ya vimos que de las encuestas de la P.C.A. (2) se deduce que un pavimento armado continuo de 20 cm (8") de espesor sin armadura transversal, viene a costar, como media, casi un 40 % más que un pavimento en masa sin pasadores de 22,5 cm (9"). No se indica la cuantía de armadura longitudinal, pero es muy probable que ésta sea del 0,6 %, que es la utilizada en 18 de los 23 Estados que manejan dicho tipo de pavimento. Como se verá más tarde, en opinión de algunos ingenieros, deberían subirse tanto el espesor como la cuantía de armadura del pavimento, con lo que los costes de construcción se incrementarían todavía más.

En cuanto a los pavimentos pretensados, su utilización no ha sido, con mucho, tan generalizada como para poder deducir unos costes medios. Por otro parte, parecen permitir mayores economías en el caso de ser utilizados en aeropuertos, en los que la variedad de cargas que pueden presentarse y la reducción de espesores que permiten obtener son mucho mayores que en carreteras. Por ello hay que estudiar cada caso en particular.

Hay que destacar, sin embargo, que aunque el comportamiento de los pavimentos armados continuos en USA ha sido en general bueno, no parece que los fallos que se han originado en ellos y, por consiguiente, los costes de conservación hayan sido tan reducidos como sería de esperar. Es cierto que las encuestas de la P.C.A. (2), los P.S.R. (Present Serviceability Rating) obtenidos para cada uno de los tipos de pavimento analizados han sido los siguientes:

- pavimentos en masa sin pasadores (PCP): 2,3 a 4,6, la mayoría entre 3,5 y 4,2;
- pavimentos en masa con pasadores (PCP): 3,8 a 4,2;
- pavimentos armados con juntas y pasadores (RCP): 3,2 a 4,6;
- pavimentos armados continuos (CRCP): 3,9 a 4,6;

es decir, estos últimos han sido los que han arrojado mejores resultados, pero, sin embargo, en el 45 % de los CRCP se observaron grietas demasiado próximas («cluster cracking»), que a la larga puede degenerar en roturas por punzonamiento («punch-outs»). El 25 % de los pavimentos mostraban ya grietas en forma de piel de cocodrilo («alligator cracks») y «punchouts». También se observa bombeo de finos («pumping») y grietas diagonales («Y-cracking»).

En ocasiones se han notado asimismo desconchados en las grietas y roturas por pandeo («blowups»).

La mayoría de estos fallos pueden atribuirse a:

- Fallos en la compactación de la explanada. En un estudio realizado en Indiana (18), el 76 % de los pavimentos tenían una explanada con compactación por debajo de la mínima especificada. Estos fallos son más importantes si se disponen sobre ellos bases granulares sin tratar, pues la compactación que se puede alcanzar en ellas depende de la obtenida en la explanada.

- Fallos en la capa de base: bien por un inadecuado espesor o compactación de las bases tratadas, o bien, en el caso de bases sin tratar (las únicas utilizadas en 5 Estados y permitidas en otros 3), por falta de compactación y baja permeabilidad.
- Fallos en el propio hormigón: los hormigones de baja densidad han originado pavimentos de peor comportamiento. Una mala vibración y compactación del hormigón (por ejemplo, en las juntas de construcción) suele dar lugar a la aparición de «punchouts». También se encontró que cuanto más bajo era el módulo de elasticidad, peor era el comportamiento del pavimento.

La opinión de algunos ingenieros americanos es que los métodos actuales de proyecto de pavimentos armados continuos no son adecuados para proporcionar un firme con suficiente capacidad estructural, y proponen que el espesor del pavimento sea el mismo que el del pavimento en masa con juntas que tenga que resistir el mismo tráfico (18). Otros, sin embargo, consideran que los métodos actuales (por ejemplo el método de la guía AASHTO), admitiendo una reducción del espesor sí son correctos (19) y (20). Quizás sea un dato a considerar el que los primeros han partido del estudio del comportamiento de pavimentos situados en su mayoría sobre bases sin tratar; mientras que los segundos lo han hecho en pavimentos dispuestos sobre bases estabilizadas. El comportamiento de los pavimentos armados continuos belgas de 20 cm de espesor, situados sobre 6 cm de aglomerado denso y 20 cm de hormigón pobre, también ha sido bueno (21).

En consecuencia, puede deducirse que los pavimentos armados continuos, al igual que los otros tipos de pavimentos rígidos, no son en absoluto insensibles a las condiciones de la base. Por tanto, de querer utilizarse bases sin estabilizar, no hay que descuidar las condiciones de compactación, y hay que procurar por otro lado que su permeabilidad sea lo más alta posible, para evitar disminuciones en la capacidad portante de dicha base.

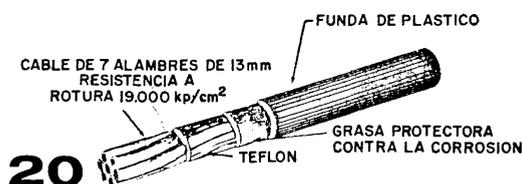
Como recomendación adicional, el hormigón debe cumplir unas condiciones de resistencia mínimas [Faiz y Yoder (18) indican $31,5 \text{ kp/cm}^2$ (450 psi) a tracción indirecta]; y un módulo de elasticidad lo más elevado posible, por ejemplo $3,5\text{-}4,2 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$ ($5\text{-}6 \cdot 10^6 \text{ psi}$) (módulo dinámico), a fin de reducir las deflexiones al mínimo.

Parecen, sin embargo, bastante simplistas los actuales métodos de cálculo de la cuantía de armadura longitudinal; McCullough (19) ha propuesto un método basado en el cálculo simultáneo de un índice de desconchados en las grietas, y un índice del incremento de deflexiones a lo largo de la vida del pavimento. Quizá este método sea, por el contrario, demasiado sofisticado, pues hace intervenir 29 variables, cantidad excesiva para un procedimiento práctico. Es curioso observar que mientras Faiz y Yoder proponen elevar la cuantía de armaduras del 0,6 % al 0,7 % (18), al menos para las variaciones de temperatura del Estado de Indiana (unos 35° a 40° C anuales), en Bélgica se piense reducir en los próximos tramos de autopista dicho porcentaje de 0,85 % a 0,67 %; es decir, ambos se sitúan alrededor de 0,7 % (21). Recordemos aquí las fuertes diferencias entre los hormigones belgas y los americanos, como posible explicación de los diferentes esquemas de fisuración de los pavimentos en ambos países. La separación media entre fisuras en firmes belgas con cuantías de 0,85 % es de 1 m, y en los americanos de 2,3 m, con cuantías de 0,7 %. Es decir, que los belgas proponen 0,7 % para una mejor distribución de las fisuras, y los ingenieros del Estado de Indiana para resistir sus variaciones de temperatura.

Sin embargo, cuando las condiciones de apoyo son buenas, los pavimentos armados continuos han dado un excelente resultado; no es de extrañar por ello su éxito en la construcción de refuerzos de pavimentos.

Después de unos años de «letargo», se ha vuelto a considerar la utilización de pavimentos pretensados. Hay que tener en cuenta que el incremento de los pesos de los aviones, bien de carga o militares, supone espesores cada vez mayores de pavimentos. Así, el peso del bombardero B-70 se prevé que ascenderá a 310.000 kp (700.000 lb) con trenes de aterrizaje de 150.000 kp (325.000 lb) y presiones de inflado por encima de los 21 kp/cm^2 (300 psi). Estas cargas requerirán pavimentos de hormigón en masa de 75 cm (30") de espesor con las dificultades de curado, serrado de juntas, etc., que llevan consigo. De ahí que la solución del pavimento pretensado, de 6" a 9" de espesor, parezca muy interesante.

En la actualidad se están realizando investigaciones para reducir el rozamiento de los cables de pretensado con el hormigón, por ejemplo utilizando fundas de teflon engrasadas (fig. 20), a fin de disminuir las pérdidas de pretensado y poder espaciar lo más posible los anclajes (22).



20 Cables envueltos en fundas de teflon engrasadas, utilizados en pavimentos pretensados.

Puede señalarse que en un aeropuerto brasileño se han construido recientemente 635.000 m², utilizando el sistema Dywidag (23); y más de 500.000 m² en el aeropuerto de Schiphol, en Amsterdam (24). Por el contrario, en las carreteras americanas no se han construido, desde 1970, más que 128.000 m² (160.000 yd²), que equivalen a unos 17-18 km de calzada de dos carriles, con un espesor de 15 cm (6") (25). Hay que tener en cuenta que el tamaño de las piezas de anclaje condiciona el espesor mínimo de los pavimentos pretensados. Por ello, las reducciones de espesor que se obtienen son mucho más notables en aeropuertos que en carreteras; y por otra parte, los pavimentos de aeropuertos presentan menos problemas de curvaturas. De ahí que su utilización resulte más atractiva en aeropuertos que en carreteras.

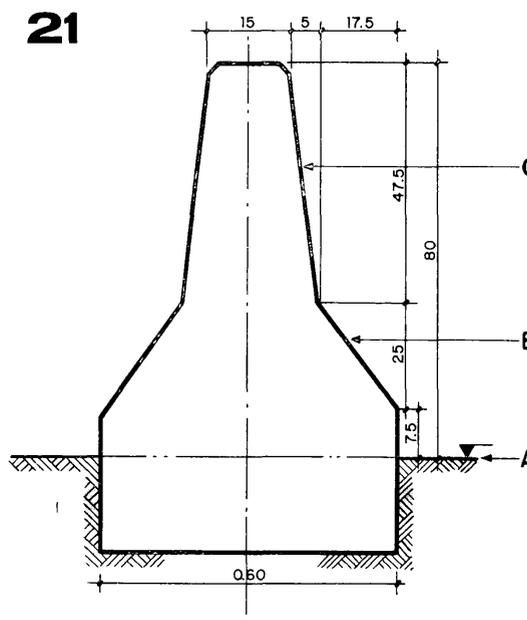
8. BARRERAS DE SEGURIDAD EN HORMIGON

Está tomando actualmente gran auge el empleo de barreras de seguridad en hormigón, del tipo conocido como New Jersey, por ser dicho Estado el primero que empezó a utilizarlas en su forma actual en el año 1955. Hasta 1969 sólo se habían dispuesto 320 km (200 millas) en el citado Estado; en 1974 dicha cifra había subido a más de 1.600 km (1.000 millas) (26). En la actualidad, solamente en el Estado de Oregón se colocan más de 160 km (100 millas) anuales.

El perfil básico de dicho tipo de barrera (figura 21) consiste en:

- una parte vertical inferior de 7,5 cm (3"), que efectúa el contacto inicial con las ruedas de los vehículos;
- una parte inclinada de 25 cm (10") de altura, que permite al vehículo ascender;
- otra parte, casi vertical, que redirige las ruedas y endereza la trayectoria del vehículo. Normalmente, la altura total de la barrera es de 81 cm (32"), suficiente para impedir que el vehículo salte por encima de ella; pero en ocasiones, para que sirvan al mismo tiempo con pantallas antideslumbrantes, se les ha dado alturas mayores de 1,3 a 1,5 m (50" a 60").

La principal ventaja de este diseño es que, con ángulos pequeños de incidencia del vehículo, que son los más frecuentes, todo el impacto es absorbido por las ruedas y la suspensión del vehículo, sin causar desperfectos a éste, que a su vez es redirigido a la carretera. Por otra parte, los daños que sufre la barrera son también muy pequeños.



- La llanta choca con este bordillo, el vehículo se frena y endereza.
- Talud de 55°, donde el vehículo trepa, disipándose la energía del impacto a través de las ruedas y la suspensión, no de la carrocería.
- Al alcanzar las ruedas esta cara superior, casi vertical, el vehículo es frenado aún más y reencauzado hacia su trocha.

Perfil de la barrera New Jersey

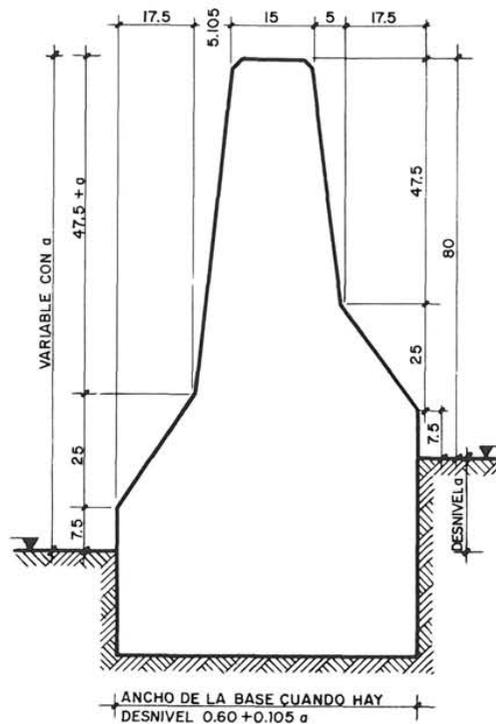
Las barreras pueden ser simétricas, repitiendo a cada lado el perfil anterior, o bien, cuando separan dos calzadas con un ligero desnivel entre ambas, el perfil correspondiente a la que se halla a nivel inferior sigue esencialmente los principios básicos del perfil New Jersey, que es el que se dispone en la calzada superior (fig. 22). Los diseños completamente asimétricos, con un lado reproduciendo dicho perfil y el otro generalmente vertical, suelen utilizarse con medianas anchas o bien cuando hay que disponer en el centro de la calzada otros servicios, por ejemplo conductos de cables, plantaciones, etc. En estos casos suelen combinarse dos elementos. También se usan estos elementos asimétricos para otros fines, por ejemplo en la base de los muros de contención de taludes, etc.

Las barreras pueden ser prefabricadas (figura 23) o ejecutadas in situ. En el primer caso suelen llevar una ligera armadura, para resistir los esfuerzos de montaje. Las segundas suelen ser en masa, y tienen la gran ventaja de que puede construirse con pavimentadoras de encofrado deslizante; generalmente, los diferentes modelos de maquinaria existente permiten cambiar la placa conformadora y fabricar también bordillos, cunetas, etc.

En las barreras in situ se disponen juntas de contracción serradas o en fresco, cada 6-9 m (20-30 ft); en las prefabricadas, cada 3-6 m (10-20 ft).

Un inconveniente de este tipo de barreras es su coste; en California resultan un 10 % más caras que el tipo bionda (flexible); sin embargo, hay que recordar que en USA el acero es algo más barato que en España, mientras que el cemento es considerablemente más caro. Por ello es de esperar que en España los costes de ambos tipos se igualarían bastante.

Finalmente, no hay que olvidar que una de las claves del éxito de la barrera New Jersey radica en dejar espacio suficiente entre el borde del pavimento y ella, de forma que el conductor se sienta protegido y no más bien amenazado por su presencia, como ocurre al estar situada demasiado cerca de la calzada (caso de la salida de Madrid hacia Andalucía).



Perfil New Jersey asimétrico utilizado para separar calzadas a distinto nivel. **22**

Barrera New Jersey prefabricada.

23



9. RESTAURACION DE LA CALIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO. REFUERZOS

En la restauración de la calidad superficial se utilizan fundamentalmente dos métodos:

- el ranurado («grooving»), para la regeneración de las características antideslizantes, formando una serie de surcos sobre el pavimento endurecido;
- el cepillado («grinding»), para eliminar irregularidades superficiales, e incluso para la supresión del «faulting» en las juntas escalonadas.

Lógicamente, el pavimento resultante del «grinding» debe poseer unas características antideslizantes suficientes, por lo que en realidad no puede hablarse exclusivamente de «grinding», sino de «grinding» combinado con «grooving». La American Concrete Paving Association recomienda (27) que los surcos tengan un ancho comprendido entre 2,75 y 2,50 mm (0,110" y 0,080"), estén espaciados entre sus centros aproximadamente unos 19 mm (3/4") y su profundidad oscile entre 3 y 6 mm (1/8" y 1/4"). Esta última depende de la dureza de los áridos, a fin de asegurar una adecuada vida de servicio al tratamiento, garantizando la no aparición del hidrop laneo («aquaplaning») durante un período prolongado.

Generalmente, el ranurado y el cepillado se realizan en sentido longitudinal; no obstante, el realizarlo en sentido transversal puede tener interés en circunstancias especiales, como en intersecciones, etc.

Cuando se intenta corregir el escalonamiento («faulting») con un cepillado («grinding»), no debe olvidarse que hay que procurar eliminar también las causas que han provocado dicho escalonamiento, a fin de no tener que repetir el tratamiento al cabo de un cierto tiempo (lo cual trae consigo sucesivas disminuciones del espesor de las losas en sus zonas más críticas, los bordes). Se recomienda realizar el «grinding» con una pendiente longitudinal del orden de 1/120 (27); es decir, por ejemplo, para corregir un «faulting» de 1,25 mm (1/20") debe rebajarse progresivamente el espesor del pavimento en una longitud de 15 cm (0,5 ft).

Tanto el ranurado («grooving») como el cepillado («grinding») se vienen realizando con máquinas provistas de una serie de discos abrasivos en batería; pero no hay que olvidar las posibilidades en este sentido de la Roto-Mill (figs. 18 y 19), de la cual ya se ha hablado extensamente con anterioridad.

En lo referente al tema de refuerzos de pavimentos de hormigón, se está llevando a cabo actualmente una campaña de seguimiento de una serie de refuerzos realizados con hormigón armado continuo, el primero de los cuales fue construido en Texas en el año 1959. En la actualidad hay más de 28 tramos, con 2 millones de metros cuadrados en servicio. De estos 28 tramos, 23 de ellos son sometidos a inspecciones periódicas por un Comité ad-hoc en el que intervienen la Portland Cement Association, la American Concrete Paving Association, los Associated Reinforcing Bar Producers y el Wire Reinforcement Institute (28).

Los refuerzos («overlays») con armadura continua presentan algunas importantes ventajas sobre otros tipos de refuerzos, entre las que se pueden destacar:

- no hay que hacer coincidir juntas con las del pavimento subyacente;
- no es crítica la reflexión de grietas, al permanecer éstas cosidas por la armadura;
- como en todo pavimento armado continuo, la regularidad superficial se mejora, al no haber juntas;
- buen funcionamiento, con conservación mínima y economías a largo plazo.

Los overlays, como se sabe, pueden tener adherencia parcial al pavimento original («partially bonded») o estar completamente separados de ella («unbonded») mediante una capa de nivelación. Esta parece ser muy beneficiosa para los overlays con armadura continua, y de ahí que de los 23 tramos estudiados, 21 dispusiesen de dicha capa. Entre las mejoras que con ella se obtienen podemos citar las siguientes:

- Permite controlar mejor el espesor del refuerzo; al ser uniforme éste, la distribución de tensiones y con ello de grietas es más regular. Por otra parte, impide que se produzcan acúñamientos en las zonas hundidas o con escalonamientos pronunciados del pavimento original.
- Disminuye la aparición de grietas por reflexión.

Para facilitar la aplicación de las anteriores fórmulas se ha construido una serie de ábacos, dos de los cuales pueden verse en la figura 25.

Como cuantía de armadura longitudinal suele colocarse la misma que en los pavimentos armados continuos normales, la cual suele estar muchas veces basada en la experiencia. De ahí que sea frecuente, como hemos indicado, el valor 0,6 %, que es el utilizado en muchos estados.

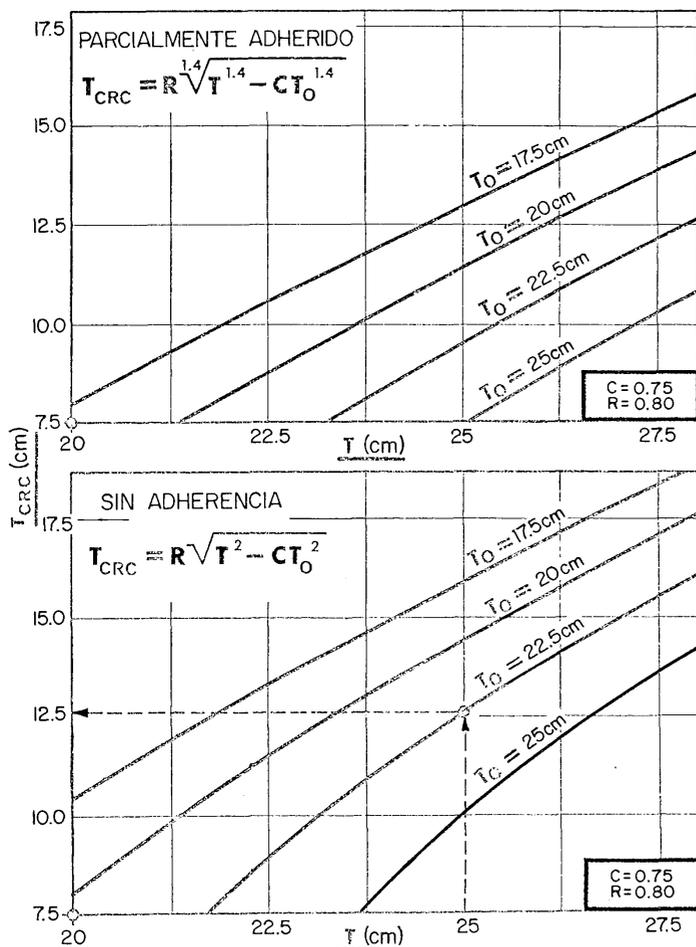
En resumen: los refuerzos con hormigón armado continuo, alguno de ellos con cerca de 20 años de funcionamiento, parecen ser una excelente solución, siempre que, como los pavimentos armados continuos normales, se ejecuten correctamente y se cuiden las condiciones de drenaje.

Una novedad interesante, de la que ya hemos hablado anteriormente, es la de los refuerzos con hormigones armados con fibras; pero todavía no se posee la suficiente experiencia para poder juzgar su comportamiento.

10. OTROS DETALLES INTERESANTES

Llamaron la atención en California la colocación de captafaros (fig. 26) sobre los bordes del pavimento, unidos a éste mediante resina epoxi, así como la utilización de elementos metálicos para la delimitación de carriles de circulación.

Para protección de taludes, se sigue disponiendo en California un bordillo asfáltico en el extremo del arcén, con sumideros cada cierta distancia a fin de evacuar las aguas procedentes del firme.



25

T_0 = Espesor del pavimento existente.
 T = Espesor teórico de pavimento en una capa necesario para soportar el tráfico.
 T_{CRC} = Espesor del refuerzo con armadura continua.

Abacos para el cálculo del espesor de refuerzo con armadura continua

- Proporciona una plataforma uniforme de trabajo, y su buena nivelación permite una colocación más segura de las armaduras.
- Se pueden modificar fácilmente las pendientes del pavimento original.
- Permite reforzar pavimentos que por su estado no admitirían un refuerzo adherido («partially bonded») a ellos.

No obstante, el disponer la capa de nivelación presenta también algunas desventajas, como son:

- Aumento de los costes. Por otra parte, generalmente la ejecución de dicha capa debe ser subcontratada.
- Aumento del plazo de construcción.
- A igualdad del resto de las condiciones, el espesor del refuerzo en sí es superior al del colocado directamente («partially bonded») sobre el pavimento antiguo. En ocasiones, este superior espesor, unido al de la capa de nivelación, puede originar problemas de gálibos.
- Se requiere igualmente más espesor de arcén.

El comportamiento de los distintos tramos inspeccionados ha sido: excelente, en 15 de ellos; bueno, en 4; bueno a regular, en 1; regular a malo, en 1; y malo, en 2. En estos dos últimos, las condiciones de drenaje eran malas; es decir, de nuevo aparece el drenaje como elemento fundamental en el comportamiento del pavimento.

Normalmente el espesor del refuerzo ha sido de 15 cm (6"), y con un porcentaje de armadura longitudinal entre el 0,45 y el 1 %, aunque el valor más corriente es el 0,6 %. En la figura 24 puede verse la sección transversal de un pavimento con refuerzo dotado de armadura continua, en

el que los arcenes forman parte del propio refuerzo.

Los métodos actuales de cálculo de espesores T_R de refuerzos en masa siguen aplicando las conocidas fórmulas:

$$T_R = \sqrt[1,4]{T^{1,4} - C \cdot T_0^{1,4}}$$

(parcialmente adherido)

$$T_R = \sqrt{T^2 - C \cdot T_0^2}$$

(sin adherencia)

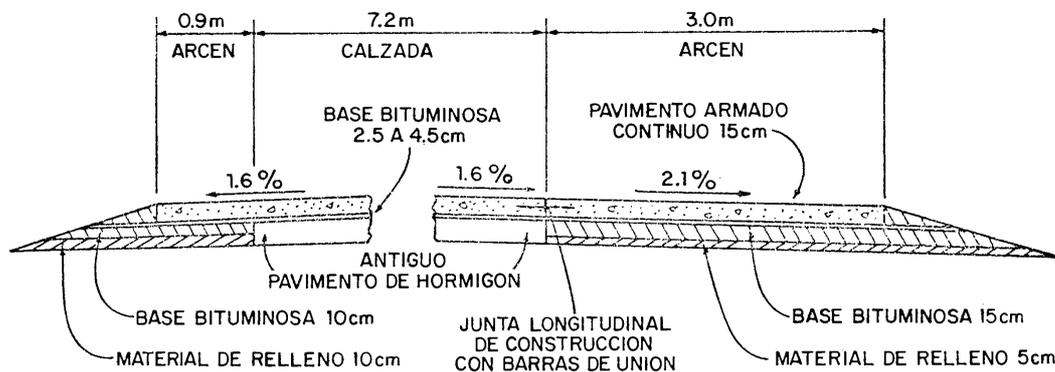
en donde:

T = espesor necesario para un pavimento de una sola capa soportando el tráfico de la carretera, calculado según los métodos usuales (PCA, AASHO);

T_0 = espesor del pavimento primitivo;

C = coeficiente indicador del estado del pavimento primitivo, variando su valor desde 1 en pavimento en buenas condiciones estructurales a 0,35 en pavimentos muy agrietados y en malas condiciones estructurales. Estas cifras se adoptan cuando las condiciones de drenaje de dicho pavimento son muy buenas. De no ser así, hay que disminuir dichos valores, pudiendo alcanzar la reducción 0,30 puntos con malas condiciones de drenaje.

Una vez calculado el espesor del refuerzo en masa, para obtener el del armado continuo, se admite una disminución del 20 % en pavimentos de carreteras, y del 10 %-20 % en aeropuertos (20).



Esquema de refuerzo con armadura continua utilizado en una carretera de North Dakota. Los arcenes, en este caso, forman parte del propio refuerzo.



Captafaros pegado con resina epoxi al pavimento y elementos metálicos para delimitación de carriles.

También se han visto en California numerosos refuerzos asfálticos de 5 cm (2") de espesor, sobre antiguos pavimentos rígidos. Lógicamente, dado su pequeño espesor, están completamente agrietados; pero por las características de las suspensiones de los coches americanos, no resulta incómodo el circular sobre ellos.

11. RECOMENDACIONES FINALES PARA SU APLICACION A LAS ULTIMAS REALIZACIONES ESPAÑOLAS

Dado el porcentaje de escalonamiento observado en las autopistas americanas, con un tráfico menos pesado que el de las españolas, escalonamiento originado fundamentalmente por los finos procedentes del arcén, se debería intentar no disponer arcenes granulares sin tratar en las próximas realizaciones; o al menos, disponer una barrera de finos (por ejemplo, un bordillo de grava-cemento porosa) y un adecuado sistema de drenaje en los arcenes. Estas últimas medidas podrían adoptarse, sin mucho esfuerzo, en los arcenes existentes.

También parece conveniente abandonar el sistema de terminación con cepillo por un acabado más profundo, ejecutado, por ejemplo, con flejes.

En cuanto a la autopista de Asturias, dada su elevada cuantía de armadura, convendría seguir muy atentamente la evolución de su esquema de fisuración; se trata de un caso intermedio con características respondiendo en parte a las de los pavimentos belgas y en parte a las de los americanos, por lo que dicho esquema de fisuración es probable que sea también intermedio entre los de ambos tipos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) LAKE, J. R.: «Factors affecting the choice of road pavements», rapport D3 del 2.º Simposio Europeo sobre Pavimentos de Hormigón, Berna, 1973, págs. 355-364.
- (2) NUSSBAUM, P. J., y LOKKEN, E. C.: «Design and construction of concrete pavements», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, págs. 19-71.
- (3) BERGREN, J. V., y BRITSON, R. A.: «Portland cement concrete utilizing recycled pavements», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, págs. 469-485.
- (4) «A CHARTED SUMMARY OF CONCRETE ROAD PAVEMENT STANDARDS USED BY STATE HIGHWAY DEPARTMENTS 1960», Portland Cement Association, Chicago (Illinois), 1960.
- (5) «A CHARTED SUMMARY OF CONCRETE HIGHWAY PAVEMENT PRACTICES IN THE UNITED STATES AND CANADA 1969», Portland Cement Association, Skokie (Illinois), 1969.
- (6) «CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENTS», NCHRP Synthesis of Highway Practice N.º 16, Highway Research Board, Washington, 1973.
- (7) DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS Y CAMINOS VECINALES: «Firmes rígidos. Instrucción de Carreteras. Norma 6.2-IC», Ministerio de Obras Públicas, Madrid, 1975.
- (8) «AASHO interim guide for design of pavement structures 1972», American Association of State Highway Officials, Washington, 1972.
- (9) RAY, G. K.: Conferencia dada en la reunión del Comité Técnico de Carreteras de Hormigón de la AIPCR celebrada en México, octubre de 1975. Citado en el Bulletin de l'AIPCR, número 222-III-1976, París, 1976.
- (10) RAY, M.: «Recent developments in the design of rigid pavements in France. Study of performance of old pavements and consequences drawn for new highway construction», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, págs. 265-277.
- (11) PACKARD, R. G.: «Design considerations for control of joint faulting of undoweled pavements», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, págs. 121-136.

- (12) WOODSTROM, J. H.: «Improved base design for Portland cement concrete pavements», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, págs. 337-347.
- (13) THORNTON, J. B.: «Investigation into the performance of rigid pavement joints and sealants», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, págs. 435-446.
- (14) «Texturing of concrete pavements and bridge decks», FHWA Notice N 5080.59, Federal Highway Administration, Washington, 1976.
- (15) DARTER, M. I., y BARENBERG, E. J.: «Zeromaintenance design for plain jointed concrete pavements», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, páginas 565-600.
- (16) HANNA, A. N.: «Steel fiber reinforced concrete properties and resurfacing applications», Portland Cement Association, Research and Development Bulletin RD 049.01 P. Skokie (Illinois), 1977.
- (17) PARKER, F., y RICE, J. L.: «Steel fibrous concrete for airport pavements», Proceedings Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, pág. 541-555.
- (18) FAIZ, A., y YODER, E. J.: «Performance of continuously reinforced concrete pavements in Indiana», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, páginas 301-318.
- (19) McCULLOUGH, B. F.: «Design procedure for CRCP based on laboratory and field observations», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, págs. 149-156.
- (20) RENNERT, K. H.: «Design criteria for continuously reinforced concrete overlay based on performance», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, páginas 447-467.
- (21) DE CHAMPS, Y.; DE PAEPE, R., y DUTRON, P.: «Belgian experience with continuously reinforced concrete pavements», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, págs. 319-334.
- (22) LOVE, G. D.: «Innovations en matière de revêtements en béton de ciment aux Etats-Unis», La Technique Routière, núm. 4, 1976, Bruselas, 1975, págs. 35-51.
- (23) KOCH, O. G.; CHEBRAT, W. K., y DE GASPARRE, G.: «Concepts for the selection of pavements for runways, taxiways, and aprons of large size airports», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, págs. 229-244.
- (24) KELLERSMANN, G. H.: «A new sandwich construction method for prestressed concrete airfield pavements», rapport B-8 del 2.º Simposio Europeo sobre Pavimentos de Hormigón, Berna, 1973, págs. 191-201.
- (25) FRIBERG, B. F.: «Prestressed pavements, theory into practice», Proceedings, Conferencia Internacional sobre Proyecto de Pavimentos de Hormigón, Universidad de Purdue, 1977, págs. 157-173.
- (26) LOKKEN, E. C.: «Concrete safety barrier design», Proceedings of the ASCE, Transportation Engineering Journal, vol. 100, núm. TE 1, febrero 1974, págs. 151-168.
- (27) «Guideline for re-texturing and restoring surface profile in existing Portland cement concrete highway pavements», American Concrete Paving Association, Technical Bulletin núm. 22, Oak Brook (Illinois), 1976.
- (28) AD HOC COMMITTEE FOR CONCRETE OVERLAYS: «Continuously reinforced concrete overlays, 1975, condition survey», Portland Cement Association, publicación SR 180.01 P, Skokie (Illinois), 1976.

résumé

Panorama actuel des revêtements en béton aux Etats-Unis

Rafael Fernández Sánchez et Carlos Jofré Ibáñez, ingénieur des Ponts et Chaussées

Dans cet article, les auteurs font allusion aux nouveautés les plus intéressantes dans le domaine des revêtements en béton aux Etats-Unis, recueillies au cours d'un voyage fait par un groupe d'ingénieurs espagnols à l'occasion de la première Conférence Internationale sur le Projet de Revêtements en Béton, tenue à l'Université de Purdue (Indiana). Le voyage a été complété par une série de visites techniques, parmi lesquelles sont à signaler les visites rendues à la Portland Cement Association, au Laboratoire des Routes de la Californie et à diverses autoroutes, déjà construites ou en cours de construction dans cet Etat. Il est bien connu que la Californie a développé une technique propre de revêtements rigides qui a été appliquée à quelques réalisations espagnoles récentes.

summary

Present-day panorama of concrete pavements in the United States

Rafael Fernández Sánchez and Carlos Jofré Ibáñez, Civil Engineers

This article includes the most interesting developments in the field of concrete pavements in the United States, gathered during a trip by a group of Spanish engineers on the occasion of the first International Congress on Concrete Pavement Projects, held at Purdue University (Indiana). The trip was completed with a series of technical visits, among which those to the Portland Cement Association, the California Highways Laboratory and several highways, both in use as well as under construction, in that State, deserve special mention. As is well known, California has developed its own technique for hard roadbeds which has been applied in some recent works in Spain.

zusammenfassung

Aktuelles panorama der Betonfuss Boeden in den Vereinigten Staaten

Rafael Fernández Sánchez und Carlos Jofré Ibáñez, Bauingenieure

In diesem Artikel sind die interessantesten Neurungen auf dem Gebiet der Betonfussböden in den Vereinigten Staaten enthalten, die von einer spanischen Gruppe von Ingenieuren auf einer Reise im Zusammenhang mit der ersten Internationalen Konferenz über das Projekt der Betonböden zusammengefasst wurden, welche in der Universität in Purdue (Indiana) veranstaltet wurde. Zur Reise gehörten verschiedene technische Besuche, von denen besonders die Besuche bei der Portland Cement Association, im Laboratorium der Landstrassen Kaliforniens und die Besuche verschiedener Autobahnen im Bau oder schon fertiggestellt hervorzuheben sind. Es ist bekannt, dass Kalifornien eine besondere Technik entwickelt hat, die sich auf starre Fahrbahndecken bezieht und kürzlich aus in Spanien bei verschiedenen Bauten angewendet wurde.