

CONSIDERACIONES SOBRE LOS MODERNOS PAVIMENTOS EUROPEOS PARA CARRETERAS Y AEROPUERTOS EN HORMIGON Y HORMIGON PRETENSADO

Por G. DE NAVACERRADA y C. KRAEMER
Ingenieros de Caminos.

Después de exponer los adelantos conseguidos en esta clase de firmes en los distintos países europeos, se refiere el autor a la entusiasta colaboración de todos ellos, que está a punto de intensificarse a propuesta del Director de nuestro Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, y de la que se espera conseguir un tipo de firme más económico que posea muchas de las ventajas de los firmes flexibles, conservando todas las de un firme de hormigón.

1. Estado actual de la técnica europea en la construcción de firmes de hormigón.

De regreso de un viaje de estudios por distintos países europeos, en el que hemos tenido ocasión de cambiar ideas con investigadores, profesores y constructores de carreteras y aeropuertos, así como de visitar varias grandes obras y tramos experimentales, y estando en construcción un tramo de ensayo en las afueras de Madrid, que comprenderá cerca de 4 kilómetros de firme de hormigón, hemos creído de interés dar unas impresiones sobre el desarrollo alcanzado por esta técnica en la actualidad. Sólo tocaremos este tema desde un punto de vista general, ya que la amplitud del mismo y el espacio disponible no permiten otra cosa.

Es muy interesante ver cómo debido a las conocidas ventajas del pavimento de hormigón, entre las que cabe destacar su mayor duración, su adecuación a un tráfico intenso, la permanencia de su acabado superficial, sus favorables condiciones de visibilidad nocturna y sus ventajas económicas de conservación, la mayoría de los países adelantados intensifican cada día más la construcción de carreteras y autopistas de hormigón.

Así, en la República Federal Alemana, desde 1945 hasta ahora, el 80 por 100 de las autopistas construidas llevan firme de hormigón, habiéndose utilizado mucho firme asfáltico para reconstruir rápidamente y bajo la presión del tráfico, sus antiguas autopistas de infraestructura insuficiente. En Suiza, Bélgica y Países Bajos confían el éxito de sus nuevos planes de carreteras y autopistas a ese tipo de firme, que tan buenos resultados ha dado en las obras construidas después de la guerra. En Francia, la llamada Autopista del Sur se ha proyectado en hormigón. En Austria hasta mencionar la nueva autopista Viena-Salburgo. Por último, en los Estados Unidos el 70 por 100 del sistema interestatal se construye en hormigón.

El conocido adagio "una carretera vale lo que vale su cimiento", sigue manteniendo todo su significado

para las carreteras de hormigón. Es una aberración considerar un pavimento de hormigón como si fuera una estructura elevada, aunque ambos estén contruidos con el mismo material. La resistencia del firme está íntimamente ligada a la resistencia de las capas de base, las cuales, por su parte, actúan sobre él oponiéndose a las dilataciones y contracciones que resultan de su constante exposición a la intemperie.

Las carreteras se construyen con hormigones de fabricación cuidada. No haremos el análisis de las especificaciones, solamente diremos que se alcanzan resistencias de tracción a flexión superiores a 70 kilogramos/cm.², con cementos de calidad y hormigones muy secos. La utilización de aircantes es muy discutida, habiendo muchos países que no los usan.

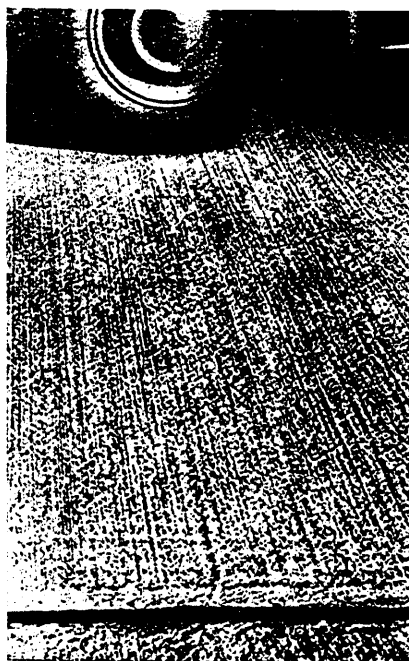
Respecto al curado, el clima es el que impone el procedimiento adecuado. Hay que proteger el hormigón tanto de la desecación durante este período como de la temperatura, que puede imponer deformaciones peligrosas a un hormigón joven. Contra la desecación tienen aplicación los productos de curado, así como la paja, las esteras, la arena, u otro sistema que mantenga la superficie en condiciones de humedad. Contra la temperatura se disponen tiendas, capas de arena con un espesor del orden de 5 cm., o cualquier otro procedimiento adecuado. En nuestras latitudes hemos de prestar a esta doble protección un interés particular.

Aun cuando es conocida la excelente repartición de las cargas que resulta en un pavimento rígido, conviene insistir en que un firme de hormigón necesita apoyarse en una base resistente y homogénea, sin asientos diferenciales que agoten la resistencia a flexión del material. En las grandes autopistas alemanas modernas, sometidas ya a un tráfico intenso y proyectadas mirando al futuro, las losas se apoyan en dos capas de base asfáltica de 8 cm. de espesor total.

La técnica de los firmes de hormigón en lo referente a juntas ha avanzado mucho en los últimos años recogiendo la experiencia de la construcción antigua. De esta forma se ha generalizado la utilización de pa-

sadores (llegándose a diámetros de 22 y 26 mm.) para transmitir las cargas e impedir la desnivelación de las losas. Igualmente ocurre con el empleo de cuchillas vibrantes y sierras, que permiten lograr unos bordes limpios y unas ranuras muy estrechas (5-10 mm.). Hoy día puede afirmarse que el ocupante del vehículo no nota la junta bien realizada, la cual no tiene, desde este punto de vista, ninguna relación con sus antecesoras productoras del "traqueteo".

En los tramos rectos se tiende a suprimir las juntas de dilatación. En muchos casos se espacian 300-400 metros, haciéndolas coincidir con las juntas de trabajo diarias. En la autopista en construcción Frankfurt-



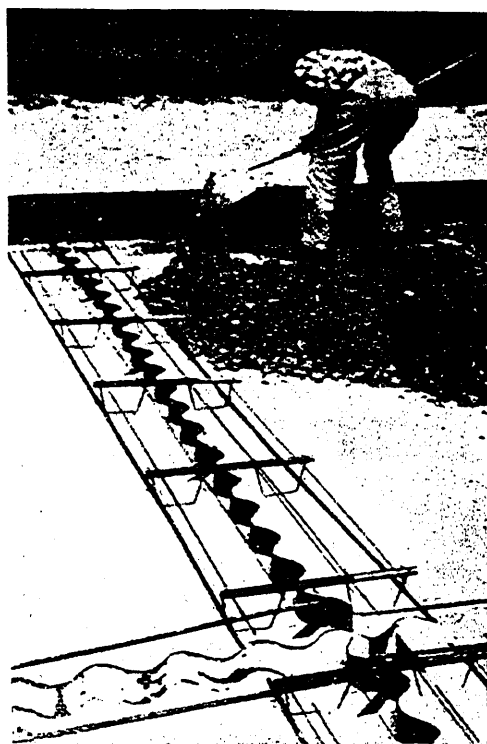
Ejemplo de buen acabado superficial de una moderna carretera de hormigón.

Basilea se disponen juntas de dilatación cada 45 metros, pero se obra así exclusivamente por tradición. En cambio, en la nueva autopista Amberes-Hasselt hay tramos de 2 Km. sin juntas de expansión. También hay diferencias de criterio en cuanto a dejar materiales putrescibles (madera) en las juntas.

El espaciamiento de las juntas de contracción depende del clima y de las características del afirmado que se proyecta. En su construcción se debe provocar la grieta de contracción en la sección fijada, consiguiendo a ambos lados una superficie continua e independizando el tajo de acabado de la junta.

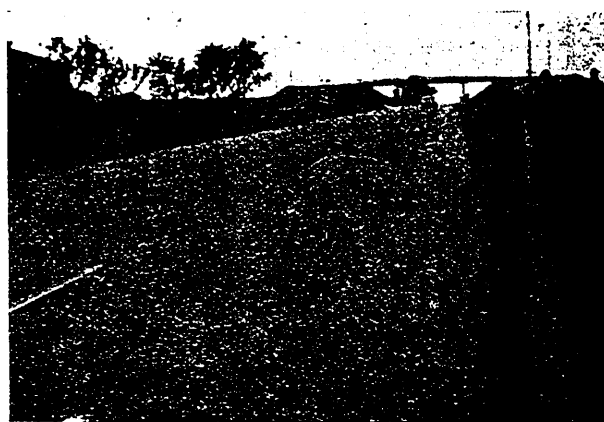
En Holanda introducen en el hormigón fresco un cartón embetunado de 2 mm. de espesor, mediante un cuchillo vibrante, hasta una profundidad de 6 cm. (espesor de firme, 23 cm.). Con ello la grieta queda definida, limitándose después a cortar el cartón que so-

bresale del firme. Este procedimiento tiene la desventaja de no permitir que la terminadora repase la junta,



Construcción de una junta utilizando chapa ondulada de fibrocemento.

una vez hecha ésta. En Suiza, por el contrario, meten totalmente el cartón embetunado, con lo que pueden



Ejemplo de acabado superficial con la terminadora longitudinal. Tramo pretensado de Boudry (Suiza).

terminar la superficie sin obstáculos; más tarde, una vez producida la grieta, sierran con 10 mm. en anchura y 15 mm. de profundidad una ranura que luego

rellenan de un mastic bituminoso, y terminan convenientemente. Ultimamente utilizan también uralita ondulada para limitar la profundidad del serrado y conseguir un engranaje regular entre las dos losas. Con estos procedimientos se consiguen juntas de alta calidad.

Debido a las grandes velocidades de los vehículos actuales, el acabado de la superficie es fundamental. Gracias a la maquinaria moderna se consiguen superficies con irregularidades menores de 3 mm. en 4 metros. Para mejorar la rugosidad de la superficie, se pasa un cepillo transversalmente: en Suiza, en cambio, suelen dejar el dibujo de la terminadora longitudinal. Esta máquina, utilizada en principio con éxito solamente con hormigones fluidos tipo americano, se empieza a aplicar a los hormigones europeos.

La reparación de desperfectos en bordes y esquinas no es hoy un problema: es un trabajo de conservación que se realiza al mismo tiempo que la limpieza de las juntas. La sustitución de un pequeño número de losas se hace mediante losas prefabricadas.

En resumen, con la técnica y maquinaria modernas se consiguen firmes excelentes y duraderos, a un precio de construcción competitivo y de conservación casi nulo, lo que les hace muy interesantes desde el punto de vista de una economía general.

2. Ideas básicas sobre las posibilidades del pretensado de los firmes de hormigón en carreteras y aeropuertos.

El material hormigón tiene algunas limitaciones técnicas en cuanto a su utilización en pavimentos, como son su reducida resistencia a la tracción, la retracción que experimenta en su primera época, una difusividad térmica relativamente pequeña que da lugar a gradientes térmicos importantes, y un coeficiente de dilatación apreciable. La coacción que ejerce la base en que se apoya el firme a los libres movimientos de éste, hace que la retracción y, en general, toda tendencia a una disminución de longitud del hormigón causada por una variación termohigrométrica, se traduzca en unas tracciones perjudiciales. A éstas hay que unir las provocadas por las cargas del tráfico y las tensiones internas debidas al gradiente térmico en el espesor del firme. La superposición de estos efectos influye fundamentalmente en el dimensionado, anotando de paso que un aumento de espesor, favorable para resistir las cargas, trae consigo mayores tracciones por gradiente térmico. Para paliar estos inconvenientes del material, la técnica de aplicación introduce las juntas, adelantándose así a las fisuras que aparecerían al contraerse el firme. Con ello, sin embargo, crea una discontinuidad con consecuencias funcionales (asientos, pumping) y económicas adversas (de proyecto, al tener que calcular con carga en borde o esquina: de ejecución, al dotarlas de pasa-

dores, relleno, etc., y, finalmente, de conservación). En cuanto al mallazo que se incorpora a veces a las losas de hormigón para distanciar las juntas o incluso suprimirlas, no es hasta hoy más que un intento muy caro de repartir en microfisuras los efectos de las tracciones, y cuya utilidad práctica es más que discutible.

En estas condiciones los esfuerzos de la técnica actual se bifurcan, intentando por un lado lograr unas juntas de gran calidad y de construcción sencilla, y por otro suprimirlas acudiendo a la técnica del pretensado, a la que nos referimos a continuación.

En esencia se trata de superponer al estado tensional del firme una compresión mediante la cual lleguemos a anular las tracciones que aparezcan en él, haciendo trabajar el material en condiciones mucho más favorables.

Con ello podemos reducir el espesor del firme al necesario para resistir estas tensiones de compresión, es decir, un espesor mínimo fijado normalmente por razones de construcción. Esta medida tiene sus consecuencias favorables en cuanto a gradiente térmico y a flexibilidad del firme: se adapta mucho mejor a los asientos de la base, admitiendo flechas de varios milímetros sin romperse, lo cual no puede esperarse de un firme de espesor normal. Esto es particularmente interesante con suelos mediocres, y un ejemplo notable lo constituyen las dos pistas pretensadas del aeropuerto de Maison Blanche (Argel), con sus 300 000 m.² y en que la solución pretensada, además de resultar la más económica, ha permitido unos asientos diferenciales de 25 cm. Otra ventaja de los firmes pretensados estriba en su capacidad de admitir cargas superiores a la de proyecto, dotando así al firme de un coeficiente de seguridad adicional. Este factor es muy importante, porque el progreso técnico que lleva naturalmente a grandes cargas de cálculo, está frenado por la enorme inversión de los pavimentos.

Por otra parte, sabido es que la reparación de firmes de hormigón es molesta y cara (sustitución o reconstrucción de losas enteras, y modernamente con el empleo de resinas sintéticas tipo Epoxy). En cambio, en un firme pretensado, las grietas accidentales se mantienen cerradas gracias a la compresión, disminuyendo así las consecuencias de estos puntos débiles, con la ventaja de que pueden efectuarse reparaciones rápidas y de poco coste que borren estas discontinuidades.

Las condiciones económicas del firme de hormigón pretensado dependen, como es lógico, de las particularidades de cada país y de la técnica que se utilice. Con los datos obtenidos hasta ahora en las realizaciones europeas, experimentales en su mayoría, puede estimarse que en una obra bien organizada y de longitud suficiente, el coste del firme de hormigón se reduciría aproximadamente en un 25 por 100, consiguiéndose al mismo tiempo un aumento de calidad.

3. Principales sistemas de pretensado para firmes empleados en la actualidad.

Desde el punto de vista constructivo pueden clasificarse estos sistemas en la siguiente forma:

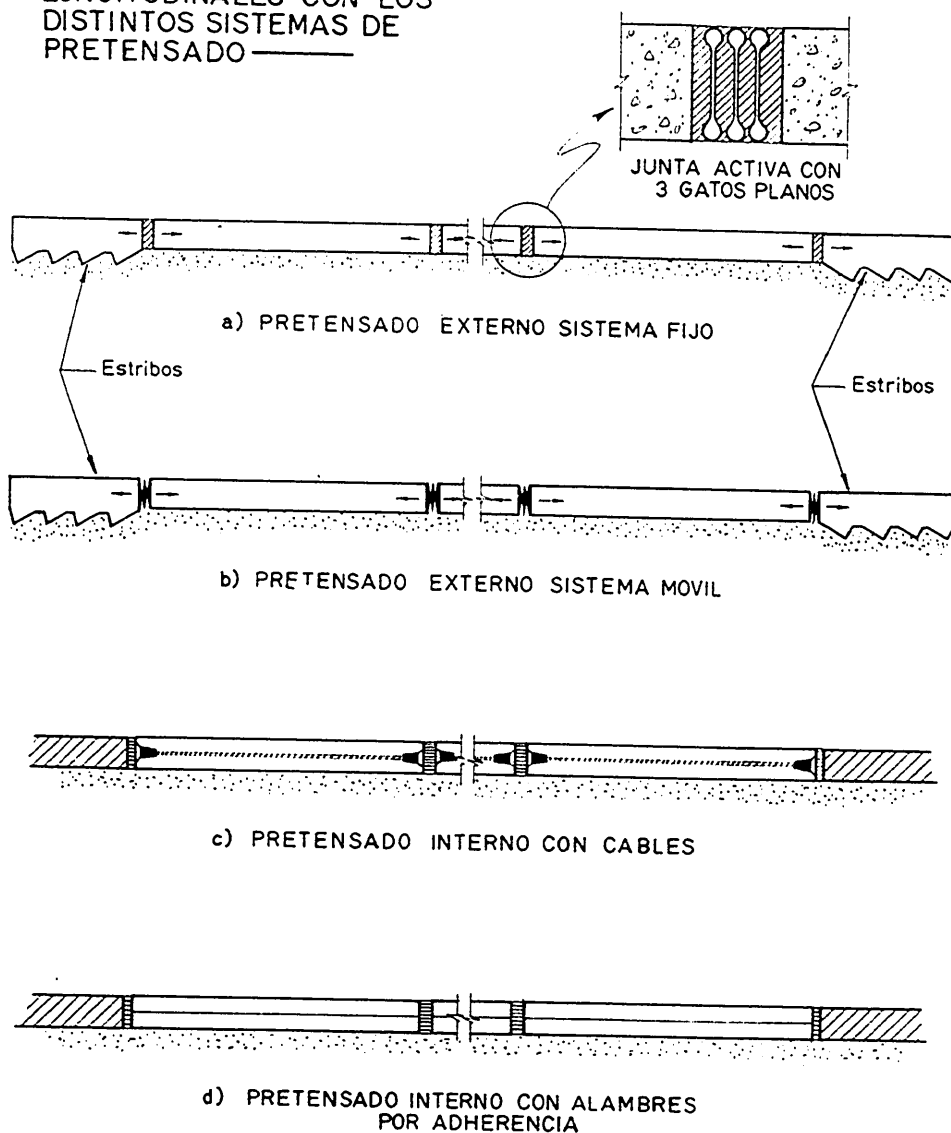
- | | | |
|----------------------------------|---|------------------------------|
| Pretensado longitudinal externo. | { | Sistema móvil. |
| | | Sistema fijo. |
| Pretensado longitudinal interno. | { | Con cables. |
| | | Con alambres por adherencia. |

En el pretensado externo por el sistema fijo se crea la compresión introduciendo unos gatos entre

cada dos losas (junta activa). En el equilibrio colaboran las losas contiguas apoyándose unas en otras sucesivamente hasta llegar a los extremos del tramo, donde se hace preciso disponer unos estribos fijos que den la reacción necesaria. Se denomina "sistema fijo" porque cada una de las losas mantiene su longitud constante después de las operaciones de pretensado.

Los gatos más utilizados son los hidráulicos planos de tipo Freyssinet que, además de ser para este fin el tipo más económico de gatos hidráulicos, tiene la ventaja sobre los mecánicos de dar a conocer fácilmente la presión aplicada. Admiten un recorrido pequeño, pero se pueden colocar varios gatos en serie y también pueden recuperarse para regenerarlos y vol-

ESQUEMA DE LAS SECCIONES LONGITUDINALES CON LOS DISTINTOS SISTEMAS DE PRETENSADO



verlos a emplear, retacando entre tanto los espacios entre gatos para mantener la presión. Dado que con este sistema la longitud de las losas se mantiene constante, la compresión en el hormigón será variable y seguirá las fluctuaciones termohigrométricas. Así, por ejemplo, si consideramos solamente los efectos de la temperatura, la tensión vendrá dada en primera aproximación por:

$$\sigma = E \lambda (t - t_0),$$

siendo:

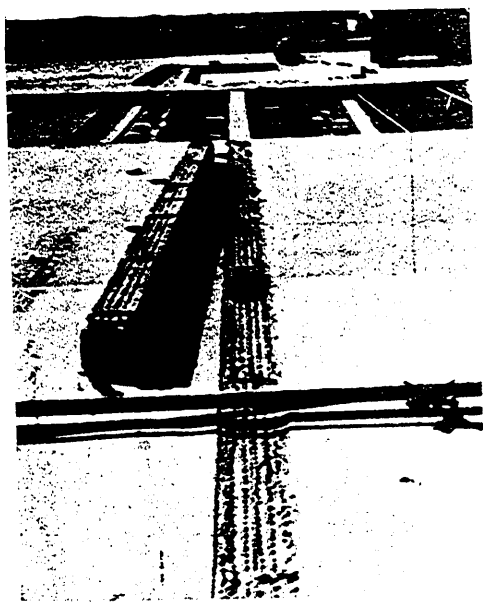
λ = coeficiente de dilatación del hormigón.

E = módulo de elasticidad.

t = temperatura media de la losa en el instante considerado.

t_0 = temperatura media de la losa para la cual desaparece el efecto de pretensado.

Desgraciadamente, el producto λE alcanza valores muy elevados, de forma que a variaciones de tan sólo 10° C. corresponden variaciones de σ de unos 40 Kg./cm.². Si fijamos t_0 (de acuerdo con datos climatológicos locales) de modo que el firme no llegue



Bloque prefabricado de cuatro gatos planos antes de su colocación. En las dos primeras bandas, los gatos están ya instalados. Pista de despegue pretensada de Argel-Maison-Blanche.

nunca a quedarse sin compresión, es posible alcanzar durante el verano compresiones tan elevadas que obliguen a tomar medidas para evitar el pandeo.

Por otra parte, la fluencia hace que la compresión inicial se vaya perdiendo, siendo necesaria la reactivación de las juntas mientras dure aquélla.

Con los espesores que hoy se consideran normales (12 a 15 cm.) y estableciendo juntas activas cada 120 metros, se comprende la economía que puede obtenerse con este sistema, en el que los únicos elementos que gravan el coste son los estribos de los extremos.



Reactivación de una junta activa en Fontenay-Tresigny. Al fondo, un gato plano sin colocar.

Fortunadamente pueden concebirse tipos económicos y muy distanciados entre sí.

Ejemplos en servicio son: el tramo experimental francés de Fontenay-Tresigny (1959), el tramo belga de Zwartberg-Meeuwen del mismo año, el tramo de carretera federal suiza de Boudry (1960), la pista de despegue para aviones a reacción del aeropuerto internacional de Bruselas (1959, proyectada para 200 toneladas), y las dos pistas ya mencionadas del aeropuerto de Argel-Maison Blanche (1954 y 1961).

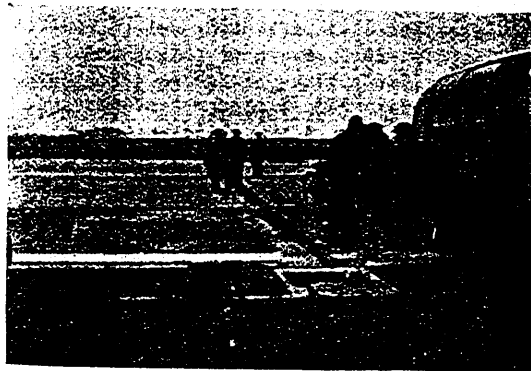
En el pretensado externo por el sistema móvil, las juntas son elásticas. Estas transmiten a las losas una compresión aproximadamente constante, y les permiten variar de longitud. En este caso las oscilaciones termohigrométricas no se traducen en variaciones de compresión, sino de longitud de las losas.

Donde más tipos de juntas elásticas se han ensayado es en Fontenay-Tresigny. El pretensado se da mediante muelles mecánicos o neumáticos. Estos últimos son los que parecen tener más porvenir técnico y económico, hasta el punto de que una de las casas

constructoras está perfeccionando un modelo de junta neumática para su producción comercial.

En el tramo de Boudry (Suiza), proyectado según el sistema fijo, se limitó la presión en los gatos durante el primer año mediante un sistema automático, convirtiendo así temporalmente el sistema fijo en sistema móvil.

El pretensado interno con cables, que tanto éxito



Vista de conjunto de las operaciones de reactivación simultánea de las seis bandas de la pista pretensada del aeropuerto internacional de Bruselas.

tiene en grandes estructuras, presenta, en cambio, en los firmes, una serie de problemas técnicos unidos a un coste elevado. Elegido un espesor mínimo de hormigón, el cable necesario para el pretensado queda



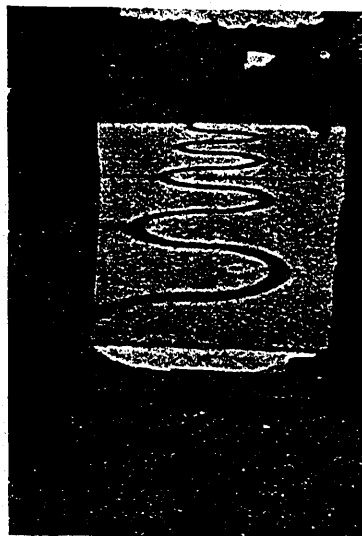
Junta neumática desmontada.

con un recubrimiento insuficiente. El aumento de espesor obliga a un incremento paralelo de la sección de acero para mantener la tensión de compresión fijada. Un firme bien proyectado exige, pues, una cantidad de acero y un espesor de hormigón importantes.

El problema de las pérdidas de tensión por fluencia es en este caso análogo al de las estructuras.

La gran longitud de las losas hace necesario dis-

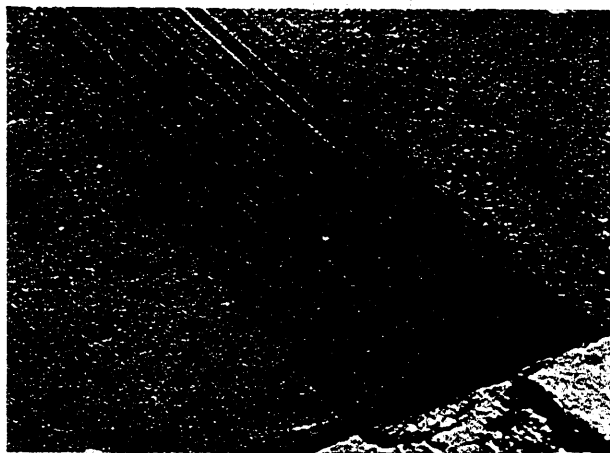
poner entre ellas unas juntas que, estableciendo la necesaria continuidad del firme, admitan variaciones longitudinales de hasta 6 cm. Este sistema de preten-



Junta elástica modelo Jeuffroy. Tramo de Fontenay-Tresigny.

sado interno permite disponer los cables en formas muy diversas e incluso la prefabricación del firme.

En Alemania occidental, Austria y también en los



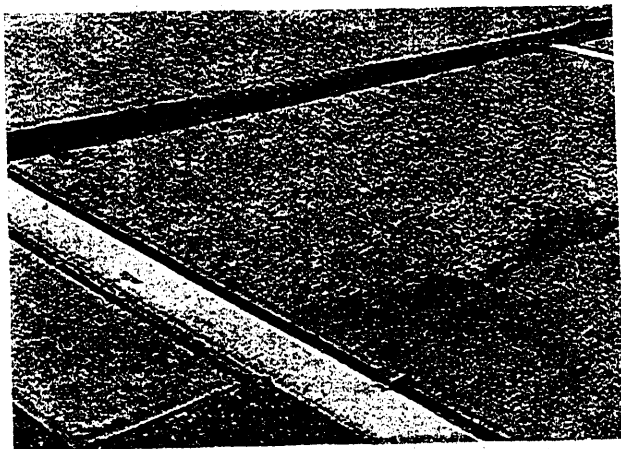
Junta de transición compuesta de placas alternadas de acero y neopreno, utilizada en el tramo pretensado con cables de Dietersheim (Alemania).

Estados Unidos han tenido éxito con este procedimiento solamente en tramos de fuerte cuantía, pero evidentemente la cifra de 7,81 Kg./m.² de acero especial utilizado en el tramo de Dietersheim (Alemania), grava excesivamente el precio unitario del firme.

El pretensado interno con alambres por adherencia tiene todas las ventajas del pretensado con cables

y permite, además, una disminución de espesor y cuantía, resultando, en suma, más económico. Como el tensado previo de los hilos exige unos anclajes provisionales en los extremos, conviene utilizar hilos de la mayor longitud posible.

En la carretera nacional número 4 A, de Holanda, se construyó en 1957 un tramo formado por tres losas experimentales de 100 m. de longitud por unidad. En 1960 se hizo otro tramo de 100 m., tensando los alambres que cubrían toda esta longitud. Una vez endurecido el hormigón, fué serrado en losas de hasta 200 m. de longitud. Como prueba del éxito del sistema piensan construir en breve un tramo con hilos de 2,5 Km. Las curvas horizontales y verticales son, sin embargo, un obstáculo importante para la aplica-



Junta de transición en Fontenay-Tresigny. Obsérvese el hito reflectante.

ción de este sistema. En París está actualmente en construcción otro tramo de este tipo.

Hemos de decir que con cualquiera de estos sistemas se utilizan armaduras transversales de pretensado para suprimir la junta longitudinal en losas delgadas, y también para coser las juntas entre bandas de pista de aeropuerto, para refuerzos locales, etc.

4. Conclusión.

A pesar de las muchas dificultades mencionadas y de otras muchas silenciadas, la realidad es que la técnica del hormigón pretensado ha despertado en todo

el mundo un gran interés y se perfecciona constantemente. Actualmente se puede abordar la resolución de todos los problemas planteados, habiendo un deseo entusiasta de colaborar por parte de todos los países, que ha llevado, a propuesta del Director de nuestro Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, a la creación de la OLER (Organisation Européenne des Laboratoires des Recherches Routières), cuyo estado legal se está acabando de tramitar. Entre tanto, mantenemos contactos personales con los técnicos extranjeros por medio de visitas frecuentes y en las reuniones periódicas del Comité Ejecutivo Mixto de la PIARC (Permanent International Association of Road Congresses). La labor de investigación que se lleva a cabo es muy extensa. Interesa conocer mejor los fenómenos de fluencia y resistencia a los movimientos de las losas, la influencia de la temperatura y la humedad en el estado tensional del firme, etc. La construcción de todo nuevo tramo exige el conocimiento y la experiencia de los tramos anteriores, a los cuales siempre acompaña un plan de experimentación, que incluye mediciones de tensiones, temperaturas, recorridos, deformaciones, asentos, etc., llevados a cabo por grupos especializados que conocen a fondo los problemas viales.

En España también seguimos con vivo interés estos esfuerzos internacionales contando con la colaboración, en todos los escalones, de los técnicos extranjeros. Como decíamos al principio, pronto estará construido el tramo de ensayo español. En él podremos estudiar la técnica de los pavimentos pretensados con nuestros materiales, nuestros medios y nuestro clima. Esta labor se ha iniciado con una serie de losas experimentales en las que se estudian diversos factores que pueden influir en el comportamiento del futuro firme. El tramo de ensayo vendrá a incrementar la gran superficie que hay ya construida en el extranjero y que solamente en los países que hemos visitado (Alemania, Austria, Bélgica, Francia, Gran Bretaña, Holanda y Suiza) supone un total de 125 000 m.² en carreteras y 1 250 000 m.² en aeropuertos.

En resumen, desde el año 1865 en que se hizo el primer pavimento de hormigón, la técnica ha logrado resolver prácticamente los problemas encontrados. Podemos tener la esperanza de que el gran paso inmediato a los pavimentos de hormigón pretensado, conseguirá un tipo de firme más económico que posea muchas de las ventajas de los firmes flexibles, conservando todas las de un firme de hormigón.