

DIFICULTADES DE LA REPARACION O TRANSFORMACION DE LOS ANTIGUOS FIRMES DE HORMIGON MOSAICO

Por EDUARDO MOROS FERRER,
Ingeniero de Caminos.

Se trata de un estudio muy completo del tema reseñado en el epígrafe, que constituye un verdadero problema en nuestras carreteras principales, especialmente de la zona de levante, y que el autor afronta con claridad y método para determinar en cada caso si es conveniente la destrucción del viejo firme o la consecución de un refuerzo efectivo del mismo.

Los tramos de más circulación de nuestras principales carreteras, especialmente los próximos a núcleos urbanos importantes y los que atraviesan terrenos llanos de huerta en donde abunda el carro de llanta metálica, están dotados de viejos firmes de hormigón mosaico (1), que en muchos casos llevan construídos más de treinta años.

Sus muchos años de servicio, coincidiendo con el extraordinario aumento de cargas y velocidades que en esta última época han experimentado los vehículos, han provocado la ruina simultánea de casi todos estos viejos pavimentos, creando a la Administración el problema de sustituirlos o reforzarlos en muy corto plazo.

Este problema es triplemente agobiante porque son bastantes los kilómetros de la red de carreteras en que simultáneamente se presenta (2) y, por lo tanto, exige un sacrificio económico importante; porque son precisamente las carreteras de mayor circulación las que lo tienen pendiente y las obras que habrá que realizar constituirán un extraordinario e inevitable trastorno para el transporte, y porque, desde el punto de vista técnico, la elección de una de las soluciones posibles — refuerzo o destrucción y sustitución — es por lo menos desagradable, puesto que el Ingeniero a quien corresponda siempre sentirá decidir la total destrucción, que es costosa, y, sin embargo, no confiará suficientemente en conseguir un refuerzo efectivo del viejo firme, que lo indulte de aquélla.

La necesidad de fijar racionalmente un motivo para desechar definitivamente una u otra de las soluciones apuntadas, ha dado origen a este trabajo. Posteriormente, pensamos dedicar otro al caso con-

(1) Denominamos firme de hormigón mosaico al constituido por cimiento de hormigón en masa, por lo regular de unos 200 Kg. de cemento y 15 cm. de espesor, sobre el que se coloca un revestimiento de adoquín pequeño, de dimensiones superficiales comprendidas entre 7 y 12 cm. y 8 ó 10 cm. de tizón, asentado sobre mortero de cemento de unos 400 Kg. y con las juntas rellenas por lechada de 700 Kg., también de cemento.

(2) Es probable que la cifra de 500 Km. represente con bastante aproximación la longitud de viejos mosaicos de inminente sustitución en los lugares más transitados de nuestra red.

creto de los mosaicos de los kilómetros 33 al 60 de la carretera de Valencia a Barcelona, teniendo en cuenta, además, las circunstancias especiales de circulación y coste que en él concurren.

Estado actual de los firmes de hormigón mosaico.

Después de unos treinta años de servicio, en estos pavimentos se producen grandes baches por hundimiento general del afirmado o por succión de los adoquines. Tanto la capa de rodadura como el cimiento están cuarteados, y en algunos casos, bajo la lluvia, puede apreciarse el chapoteo del agua contenida en las grietas, que los americanos han bautizado con el nombre de *pumping*. Después de la lluvia, en la superficie, suelen aparecer eflorescencias blancuzcas que dan perfecta idea del estado de agrietamiento a que han llegado.

Causas de la destrucción de los pavimentos de hormigón mosaico.

Es indudable que la destrucción de estos pavimentos ha tenido lugar tras muchos años de servicio y en un momento en que las cargas y las velocidades de circulación, y por lo tanto el efecto de impacto, han aumentado considerablemente; pero las verdaderas causas que la han producido hay que buscarlas entre las generales que provocan irremisiblemente la destrucción de todos los firmes rígidos, es decir, *la falta de colaboración entre el terreno subyacente, ya sea éste el terreno natural o un viejo macadam, y el conjunto del firme rígido en sí.*

No hay noticias de que se haya calculado alguna vez el espesor que se debe dar al cimiento de un firme de hormigón mosaico basándose en las características del terreno de fundación y de las cargas que debe soportar; pero estos firmes guardan estrecha relación con los de hormigón usados en autopistas y aeródromos, y en éstos es práctica corriente el determinar experimentalmente el coeficiente de reacción del suelo.

Normalmente se sigue el método de Westergaard, quien supone que la reacción del suelo es proporcional a su deformación en cada punto, y se calculan los esfuerzos en las placas de hormigón considerándolas como vigas flotantes.

Para determinar el coeficiente de reacción del suelo (coeficiente de balasto) se usa una placa circular rígida de 75 cm. de diámetro, perfectamente apoyada sobre el suelo, que se carga rápidamente hasta darle una presión de 0,7 Kg./cm.², y se mide su descenso hasta que la variación del mismo llega a ser inferior

zonas más pisadas que otras, lo que ocurre, realmente, es que bajo los lugares más pisados se apisona más el suelo y desciende, dejando un espacio hueco entre la placa y aquél.

Cuando esto ocurre en grado suficiente, el trabajo de la placa se aparta tanto del estado inicial de flotación, que se rompe. Una vez rota, el agua que penetra por las grietas acelera la deformación del suelo y con ello el proceso de destrucción.

Sin embargo, como la dimensión transversal de las losas suele ser pequeña (unos 3,50 m.), podría

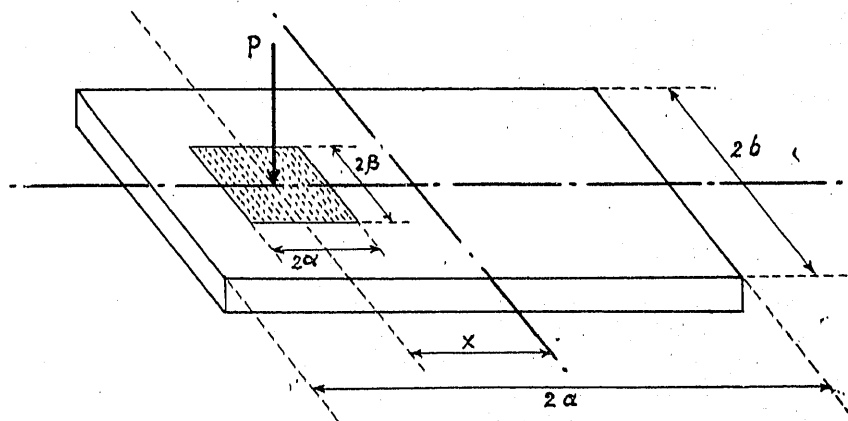


Figura 1.^a

a 0.05 mm. por minuto. El coeficiente de balasto de Westergaard es, por definición,

$$K = \frac{0,7}{d};$$

y viene dado en Kg./cm.³ cuando el descenso d de la placa se mide en cm.

Partiendo de este valor se calculan los máximos esfuerzos en la placa en los casos de carga central, de carga en el borde y de carga en la esquina y se la dimensiona para que sea capaz de soportar estos esfuerzos con un cierto coeficiente de seguridad, que normalmente suele ser 2.

Es interesante hacer notar que se ha valorado la reacción del suelo con un ensayo por el que se le carga una sola vez. Sin embargo, durante el uso, el suelo va a estar sometido a un número de repeticiones que se eleva con el tiempo, y el comportamiento bajo cargas repetidas de éste y del hormigón del firme es esencialmente distinto, pues mientras se puede considerar que el hormigón es relativamente insensible a la repetición de cargas, el suelo va acumulando deformaciones residuales que aumentan gradualmente el coeficiente de balasto de Westergaard.

Este aumento sería beneficioso si fuera homogéneo bajo toda la placa, pero como, por lo regular, existen

dárseles rigidez suficiente para resistir como un forjado apoyado en los bordes.

Efecto de concentración de cargas sobre el suelo producido por una junta.

Lo que no se puede evitar es la diferente transmisión de cargas sobre el suelo en el borde de la losa y en su zona central.

Para poner de manifiesto esta diferencia supongamos, en primer lugar, que tenemos un firme ideal constituido por una serie de losas rectangulares, de longitud $2a$ y anchura $2b$, lo suficientemente pequeñas con relación al espesor para suponer que la rigidez de las mismas es infinita. Supondremos también que cada losa no ejerce sobre las contiguas acción ninguna a través de las juntas.

En estas condiciones, siguiendo la hipótesis de flotación de Westergaard de que la reacción del suelo es proporcional a su deformación vertical, y de que actuamos dentro del campo elástico del mismo, podremos calcular las reacciones aplicando simplemente las leyes de la Estática.

Sea (fig. 1.^a) una carga P correspondiente a un neumático con superficie de contacto rectangular, de dimensiones $2a$ y $2b$, que recorre el eje longitudinal

de la losa y está a una distancia x del centro de la misma.

Si p es la presión del neumático, será:

$$P = 4 \alpha \beta p. \quad [1]$$

Cuando la carga esté centrada ($x = 0$), la presión transmitida al suelo será en todos los puntos:

$$r_m = \frac{\alpha \beta}{ab} p. \quad [2]$$

siempre que sea simultáneamente $\alpha \leq a$, $\beta \leq b$. Si fuera, por el contrario, también simultáneamente, $\alpha \geq a$, $\beta \geq b$, sería:

$$r_m = p. \quad [3]$$

No consideramos los demás casos posibles.

Designaremos por r_b y r_c la reacción del suelo bajo el borde y bajo el centro cuando la carga está en una posición x cualquiera, y por

$$\rho_b = \frac{r_b}{r_m}; \quad \rho_c = \frac{r_c}{r_m}; \quad \xi = \frac{x}{a},$$

las reacciones unitarias y la abscisa unitaria.

Damos en la figura 2.^a las líneas de influencia de las reacciones unitarias del suelo bajo el borde y bajo el centro para distintos valores de la relación $\frac{a}{a}$ y en el cuadro siguiente los valores máximos de ρ_b y de las superficiales S_b y S_c cubiertas por aquellas líneas de influencia, que dan la medida de

$$\int_{\xi_0}^{\xi_1} \rho_b d\xi \text{ y de } \int_{\xi_0}^{\xi_1} \rho_c d\xi.$$

CUADRO I

$\frac{a}{a}$	ρ_b máx.	S_b	S_c	$S_b - S_c$
1	$\frac{4}{3}$	2,90	1,66	1,24
$\frac{3}{2}$	2	3,33	1,44	1,89
3	4	4,27	1,07	3,20
5	$\frac{20}{3}$	5,01	1,07	3,94

Para $\frac{a}{a} \leq 1$ es:

$$\rho_b \text{ máx} = \frac{4}{3}. \quad [4]$$

$$S_b - S_c = 1,24. \quad [5]$$

La concentración de la reacción del suelo bajo el borde está dada directamente por $\rho_b \text{ máx}$, que mide la relación entre la máxima reacción bajo el borde y la reacción con carga centrada, que es la máxima bajo el centro.

Asiento de un suelo bajo cargas repetidas.

El asiento debido a cargas repetidas se suele expresar por la fórmula

$$z = r(A + B \ln N); \quad [6]$$

en donde es:

z = asiento.

r = la presión sobre el suelo.

A y B = coeficientes característicos del suelo.

N = número de repeticiones de la presión r .

$\ln N$ = logaritmo neperiano de N .

Por otra parte, para tiempos pequeños el asiento es proporcional al tiempo de aplicación de la carga, así que tal vez sea más propio poner:

$$z = r t (A' + B' \ln N); \quad [7]$$

en donde t es el tiempo de aplicación de la presión r en cada una de las repeticiones y A' y B' coeficientes característicos del suelo.

En el caso de una carretera, no serán iguales todas las cargas que la pisan ni idéntico el tiempo en que cada carga actúa sobre un determinado lugar, pero siempre se podrá suponer que r o el producto $r t$ tienen un cierto valor medio.

Si la presión r no es uniforme durante el tiempo t , cabe poner:

$$z = r_{\text{máx}} (A + B \ln N); \quad [8]$$

o bien:

$$z = \left(\int_0^t r dt \right) (A' + B' \ln N). \quad [9]$$

Parece ser que [8] es más adecuada en el caso de suelos incoherentes, y [9] cuando la cohesión tiene un valor importante. Este fenómeno es paralelo al del rendimiento de la compactación por cargas dinámicas o estáticas que, como se sabe, depende del grado de cohesión del suelo.

Diferencia de asientos entre puntos situados bajo el borde y bajo el centro de una losa.

Si aplicamos la fórmula [8] a las presiones que antes hemos calculado como reacciones bajo el borde o bajo el centro de una losa rectangular, tendremos:

$$\begin{aligned} z_b &= r_m \rho_b (A + B \ln N); \\ z_c &= r_m (A + B \ln N); \\ d &= z_b - z_c = r_m (\rho_b - 1) (A + B \ln N); \end{aligned} \quad [10]$$

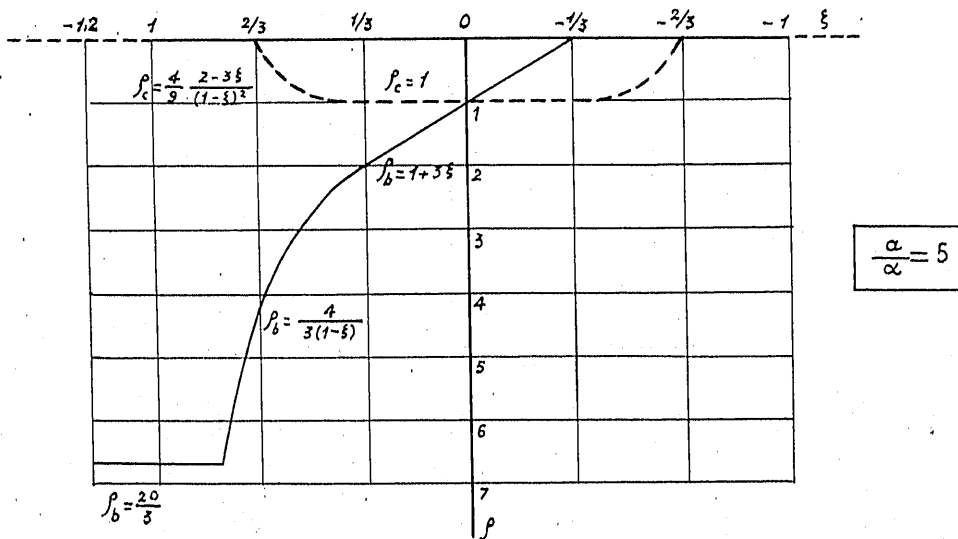
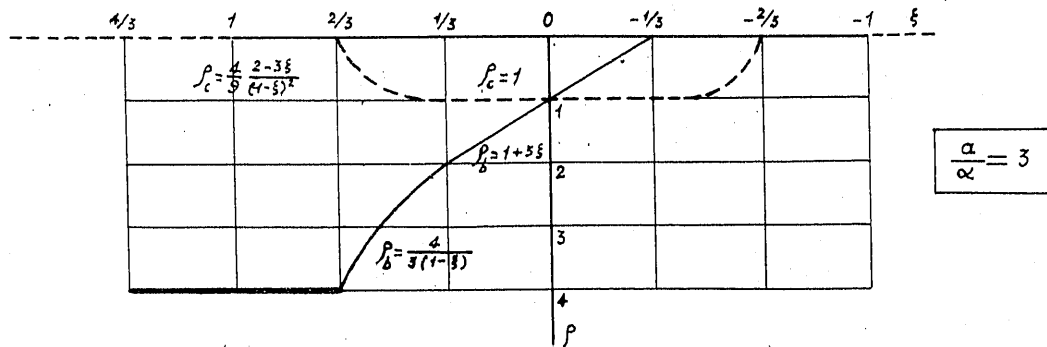
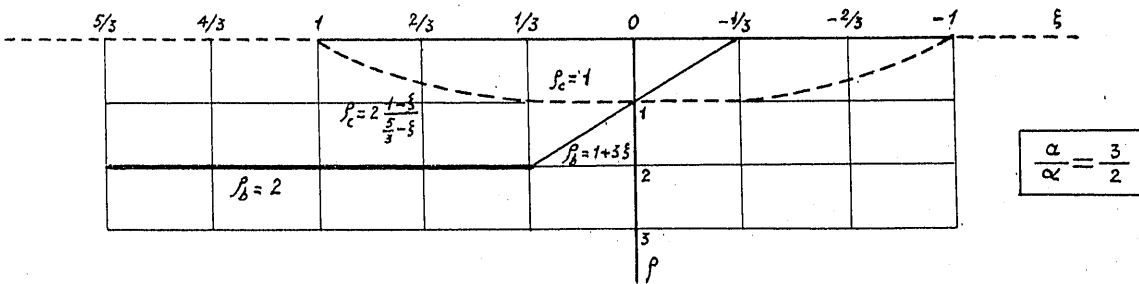
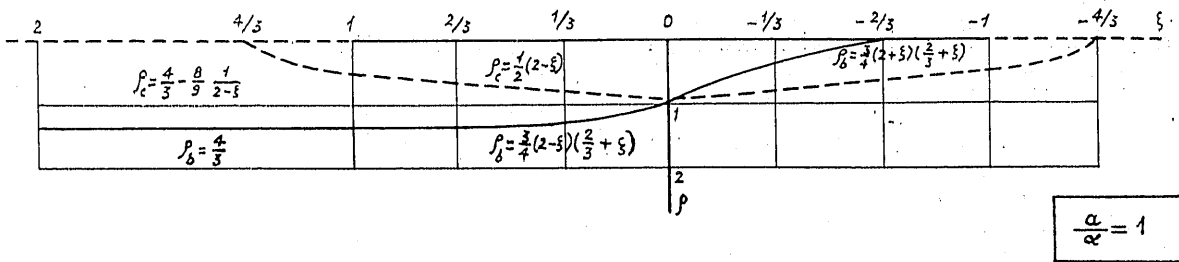


Fig. 2.^a — Líneas de influencia de las reacciones unitarias del suelo bajo el borde, ρ_b , y bajo el centro, ρ_c .

$$\frac{a}{\alpha} (S_b - S_c) \quad (1)$$

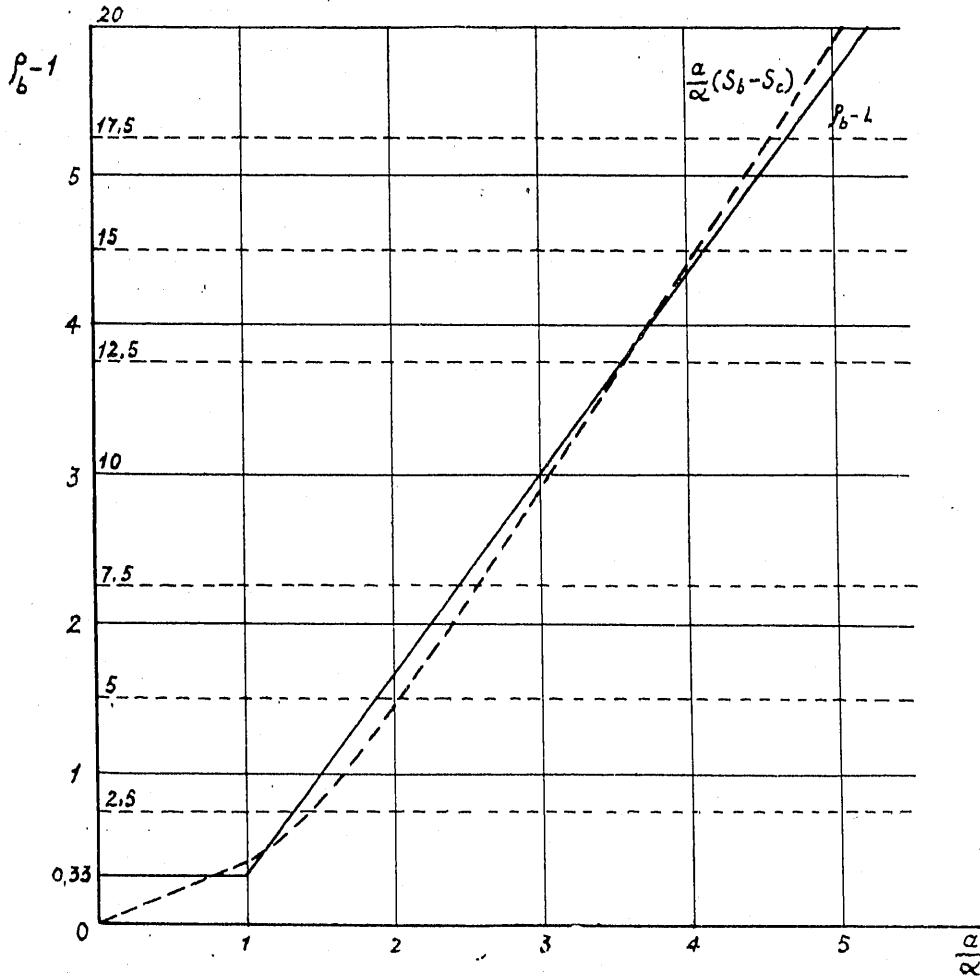


Figura 3.ª

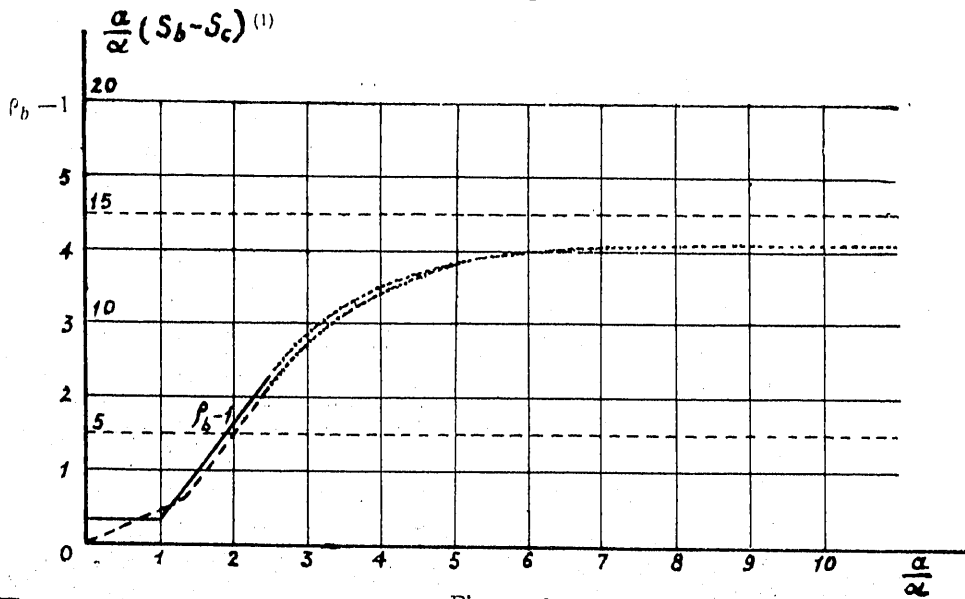


Figura 4.ª

(1) $\frac{a}{\alpha} (S_b - S_c)$ difiere de $\frac{a}{v} (S_b - S_c)$ en la constante $\frac{v}{\alpha}$ que solamente depende del vehículo,

o bien, si se emplea [9]:

$$d = r_m \frac{a}{v} (S_b - S_c) (A' + B' \ln N); \quad [11]$$

en donde v es la velocidad del vehículo, puesto que:

$$\int_0^t r dt = \int_0^t r_m \rho \frac{a}{v} d \xi = r_m \frac{a}{v} \int_{\xi_0}^{\xi_1} \rho d \xi = r_m \frac{a}{v} S.$$

Se ve que tanto [10] como [11] dan valores para la diferencia de asientos d , que crecen indefinidamente sin tender a ningún límite cuando crece N si no se anula alguno de sus factores. Como si existe circulación r_m permanece finito, la anulación de d sólo depende de la del factor $\rho_b - 1$ en [10] y de la del factor $\frac{a}{v} (S_b - S_c)$ en [11].

En la figura 3.^a damos las variaciones de estos factores, deducidas de los valores calculados en el cuadro I y de los de las fórmulas [4] y [5] al variar $\frac{a}{\alpha}$.

Se observa que el factor $\rho_b - 1$ no se anula nunca y que alcanza un valor mínimo $\rho_b - 1 = \frac{1}{3}$ para $\frac{a}{\alpha} \leq 1$, mientras que el factor $\frac{a}{v} (S_b - S_c)$ tiende a cero al mismo tiempo que lo hace a .

Al crecer la relación $\frac{a}{\alpha}$, también lo hacen los dos valores representados, pero cuando dicha relación sea suficientemente grande, como α para neumáticos de 5 Tm. de carga y 5 atm. de presión, no puede ser inferior a 0,20 m. (superficie de contacto de $0,40 \times 0,25$ m.²); a llegará a ser tal, que ya no se podrá mantener la hipótesis de rigidez en la losa.

En una losa normal de carretera de unos 25 cm. de espesor, una carga situada a 1,50 m. del borde actúa prácticamente como si se encontrara en el centro de una placa flotante indefinida. Ello supone que para $\frac{a}{\alpha} \geq 7,5$, los dos valores $\rho_b - 1$ y $\frac{a}{v} (S_b - S_c)$ se mantienen constantes.

Para una losa circular de 50 cm. de radio y 25 cm. de espesor, con una carga de 5 Kg./cm.² uniformemente distribuida en un círculo central de 20 cm. de radio y una reacción también uniforme del suelo en su cara inferior, la flecha en el centro es del orden de la décima parte del asiento del suelo bajo la carga uniforme cuando se supone que el coeficiente de balasto es $K = 20$ Kg./cm.³, lo cual corresponde a suelos muy resistentes, por lo que se puede considerar que una losa en que $\frac{a}{\alpha} \leq 2,5$ es perfectamente rígida, y en ella, los valores de $\rho_b - 1$ y $\frac{a}{v} (S_b - S_c)$ corresponden a los representados en la figura 3.^a.

Tomando en cuenta estas consideraciones, representamos en la figura 4.^a las leyes de variación de los dos factores $\rho_b - 1$ y $\frac{a}{v} (S_b - S_c)$. En ellas marcamos de puntos la parte dibujada a estima correspondiente a valores de $\frac{a}{\alpha} > 2,5$, que para el presente trabajo no tiene interés.

Resulta, por lo tanto, evidente que un firme constituido por losas rectangulares, aun suponiendo que el drenaje del suelo de fundación se halle en unas condiciones ideales para que la humedad no lo perjudique, solamente es estable si la relación $\frac{a}{\alpha}$ es muy pequeña y además es elevada la cohesión del suelo. En este caso, d está expresada por [11] y es prácticamente nula por serlo el factor $\frac{a}{v} (S_b - S_c)$.

Por el contrario, si la relación $\frac{a}{\alpha}$ no es muy pequeña, o aun siéndolo, el suelo de fundación tiene escasa cohesión y es de aplicación [10], el valor d crece sin tender a ningún límite al hacerlo el número N de repetición de cargas. Nunca podrá alcanzarse la estabilidad de un firme en tales condiciones.

Movimiento de giro de los elementos de un firme inestable.

Si suponemos que la relación $\frac{a}{\alpha}$ no es nula, el valor d crece, como hemos visto, sin tender a ningún límite. Por lo tanto, después de un cierto número N de repeticiones, bajo de las juntas, el suelo se habrá despegado de las losas, quedando como muestra la figura 5.^a; pero como el fenómeno es progresivo

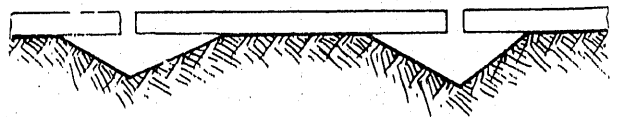


Figura 5.^a

hacia el centro de la losa, cuando N llegue a ser suficientemente elevado, la superficie del suelo de fundación llegará a tener la disposición indicada en la figura 6.^a. Sin embargo, como éste, en general, no tendrá la homogeneidad suficiente para alcanzar esta forma

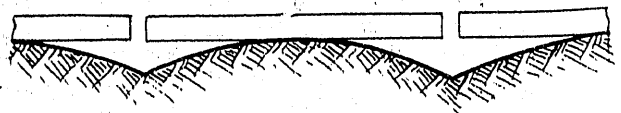


Figura 6.^a

de equilibrio, el estado a que se llegará será el indicado en la figura 7.^a, en que las distintas losas toman inclinaciones diferentes y presentan saltos bruscos en los bordes, es decir, giran sin llegar a estabilizarse en ninguna posición.

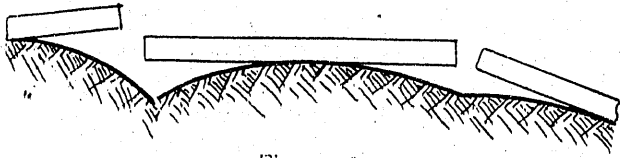


Figura 7.^a

Aplicación de las deducciones anteriores a los firmes rígidos reales.

En los firmes rígidos reales existen, indudablemente, acciones a través de las juntas que atenúan los efectos de que antes hemos tratado. Pero en todos los casos las juntas, ya sean de dilatación, con o sin pasadores, ya sean de construcción, como la de los adoquinados, siempre constituyen líneas de discontinuidad en la masa del firme rígido que en mayor o menor escala concentran presiones sobre el terreno, y el llegar a los resultados antes fijados, es solamente cuestión de un número mayor o menor de paso de vehículos, según sea el grado de coacción a través de la junta.

Iniciado el hueco bajo una de ellas, el firme se agrieta y estas grietas lo dividen en losas más pequeñas, de forma irregular, con coacciones de distintos grados a través de aquéllas. Debido a esto, las irregularidades de un viejo firme tienen gran variedad de formas, pero sus causas son las mismas que en el firme ideal de losas rígidas a que antes nos hemos referido. La única diferencia es que el agua que penetra por las grietas y que plastifica el suelo de fundación agravará los resultados, como también el efecto de impacto que, en general, será mayor bajo el borde que bajo el centro de la losa.

Sistemas usados para aprovechar los firmes rígidos deteriorados por el uso.

En general, se pueden agrupar los procedimientos de reparación de firmes rígidos en dos grupos: 1.º Los métodos de inyección que intentan, principalmente, corregir los desperfectos ocasionados en el cimientado y actuar desde allí para corregir la desnivelación superficial; y 2.º Los que intentan la reparación por tratamientos superficiales de mayor o menor espesor. Pueden, además, emplearse ambos procedimientos combinados (1).

(1) No nos referimos a los bacheos en firmes de adoquín, pues el poderlos realizar supone desperfectos localizados. Cuando un firme falla con uniformidad, requiere un tratamiento general que no se alcanza reparando baches. Todo lo más que se puede conseguir por este procedimiento es me-

1.º *Métodos de inyección.* — Se intenta con ellos rellenar los huecos existentes entre el firme y el suelo de fundación con un material adecuado. Este material suele ser cemento, suelo-cemento o asfalto. El cemento se emplea, sobre todo, en suelos arenosos, y el asfalto, cuando se temen los efectos de la humedad, porque este material, debido a su plasticidad, permite construir bajo las losas, además de rellenar los huecos, una película impermeabilizante. Sin embargo, hasta cierto punto, el efecto consolidador y el impermeabilizador son incompatibles, pues el primero requiere un material de plasticidad por lo menos inferior a la del suelo, y el segundo, la fluidez suficiente para resistir los pequeños movimientos de las losas sin que se agriete la película.

En Norteamérica se ha empleado ampliamente el método de la inyección de asfalto, y se suelen usar betunes soplados de 10 a 45 cm. de penetración, según los lugares. Se ha observado que en las losas tratadas así, disminuyen en proporción notable los casos de agrietamiento.

Este resultado es perfectamente previsible con las fórmulas [10] y [11]. En efecto, supongamos que una diferencia de asientos d_1 produce el primer agrietamiento de una losa. Según se emplee [10] u [11], el número de repeticiones N_1 de cargas necesario para esta diferencia de asientos será:

$$N_1 = e^{\frac{d_1}{B r_m (\rho_b - 1)} - \frac{A}{B}}$$

$$N_1 = e^{\frac{d_1 v}{B' r_m a (S_b - S_c)} - \frac{A'}{B'}}$$

Si cuando está próximo a producirse el agrietamiento se macizan los huecos, para que vuelvan a producirse con el tamaño d_1 se necesitará una diferencia total de asientos $d_2 = 2 d_1$ referida al origen (d_1 macizado más d_1 hueco para producir la primera grieta). Para ello se necesita un número de repeticiones de carga N_2 tal que:

$$N_2 = e^{\frac{2 d_1}{B r_m (\rho_b - 1)} - \frac{A}{B}}$$

o bien:

$$N_2 = e^{\frac{2 d_1 v}{B' r_m a (S_b - S_c)} - \frac{A'}{B'}}$$

pero:

$$N_2 = N_1^2 e^{\frac{A}{B}}$$

o bien:

$$N_2 = N_1^2 e^{\frac{A'}{B'}}$$

jorar, transitoriamente y durante un plazo muy corto, las condiciones de circulación, y aun para ello, hay que ocasionar grandes molestias mientras duran las reparaciones, por no poder entregar inmediatamente al tránsito las superficies tratadas.

y como se supone que N_1 es un número grande y que $\frac{A}{B}$ ó $\frac{A'}{B'}$ son cantidades positivas, siempre resulta que N_2 es mucho mayor que $2N_1$, lo que demuestra que, si para poner en condiciones de agrietamiento una losa, han de pasar N_1 vehículos, una vez inyectada, para volver a estar en las mismas condiciones han de pasar muchos más.

No obstante, el procedimiento de inyección es costoso y parece ser que, para que sea verdaderamente eficaz, requiere que el proceso de agrietamiento no esté muy avanzado, pues si lo está, la corrección de las rasantes exige, además, un tratamiento superficial para conseguir una buena uniformidad.

Para dar idea de los costes, citaremos el caso de las carreteras del Estado núms. 6 y 164 al Este de Waco, en el Condado de McLennan, de Tejas, referido en el número de enero de 1954 de *Asphalt Institute Quarterly*, en donde se saneó con inyecciones de asfalto el cimiento de 162 500 m.² de pavimento de hormigón, practicando 29 201 taladros e inyectando 1 745 000 litros de asfalto. Según esto, el kilómetro de carretera de 7,00 m. de anchura de firme necesitaría unos 1 250 taladros y 75 000 litros de asfalto, con un coste de ejecución que puede calcularse en unas 300 000 ptas./Km. si se hiciera en España. Debemos indicar, además, que en este caso concreto se trató la superficie aplicándole un recubrimiento de hormigón asfáltico de unos 10 cm. de espesor en tres capas superpuestas.

Parece ser, sin embargo, que en otros casos se han realizado correcciones empleando solamente 40 ó 50 000 litros de asfalto por kilómetro. Como es natural, ello dependerá del estado del firme a sanear.

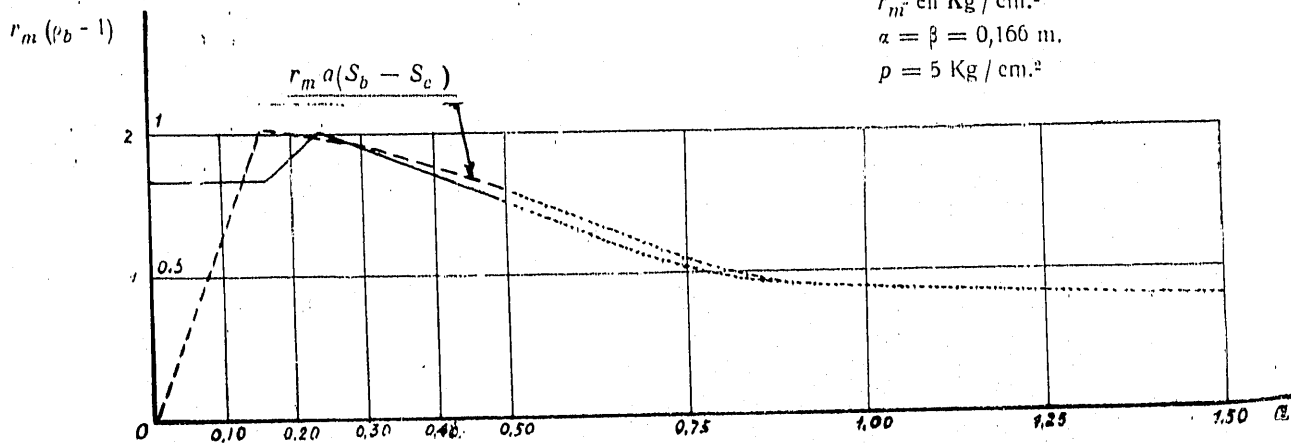


Figura 8.^a

Más económico es emplear suelo-cemento como material de relleno, pues se emplean dosificaciones de 56 Kg. de cemento por metro cúbico, pero la manipulación es complicada y el éxito, por lo visto, incierto. Los taladros se suelen disponer a tresholillo, con una separación de 1,80 m. solamente.

Todos estos métodos de macizado del cemento tienen el inconveniente de no ser aptos para restablecer por sí solos rasantes muy deterioradas, y de emplearse, más bien, como operación previa de saneamiento para extender una nueva capa de rodadura.

2.º *Métodos de revestimiento superficial.* — Su finalidad es devolver a la carretera la rasante primitiva, e incluso mejorarla en algunos casos, superponiendo una nueva capa de rodadura.

El método es muy económico cuando esta capa está formada por dos o tres riegos superficiales y, por razón de la economía, se ha usado profusamente cuando ha habido necesidad de salir del paso con medios exiguos; pero es indudable que si el paso de los vehículos ha movido un firme rígido de 25 ó 30 cm. de espesor, un simple recubrimiento superficial no le añade ninguna fortaleza y se continuará deformando igual que antes.

Si se prodigan las reparaciones superpuestas, existe el peligro de que se rice la superficie por haber un recubrimiento demasiado plástico sobre una superficie excesivamente dura. Debemos recordar que la proximidad de un estrato rígido produce concentración de cargas sobre una capa superior más deformable, y que esta concentración es mayor cuanto menor es la razón del espesor de la capa a la dimensión de la carga aplicada (1).

A veces se ha buscado con los riegos superficiales un efecto impermeabilizador que por sí solo estabilice el suelo de fundación. En todo caso, los resultados que hasta ahora hemos conseguido nosotros son inciertos.

a en m.
 r_m en Kg/cm.²
 $\alpha = \beta = 0,166$ m.
 $\rho = 5$ Kg/cm.²

Desde el punto de vista de la teoría de la concentración de cargas producida por las juntas, el problema se plantea en los siguientes términos:

(1) G. P. Tschebotavioff: *Mecánica del suelo*, pág. 214. Edición de 1958, de Aguilar.

En primer lugar, habrá que considerar la capacidad portante del cimiento — valores de A y B de la fórmula [10], o de A' y B' de la [11] — y además el valor de los factores r_m y $\rho_b - 1$ ó $\frac{a}{v}(S_b - S_c)$, para que, después de un número N determinado de repeticiones de carga, la diferencia de asiento d sea suficientemente pequeña. Esto nos dará idea de la durabilidad de la reparación a realizar.

En la figura 8.^a representamos la variación de los productos $r_m(\rho_b - 1)$ y $r_m a(S_b - S_c)$ cuando lo hace a , teniendo el neumático una presión de 5 kilogramos/cm.² y $33,3 \times 33,3$ cm.² de superficie de contacto.

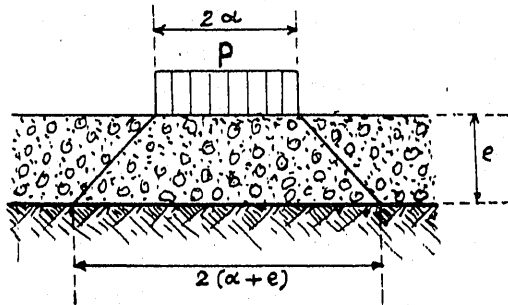
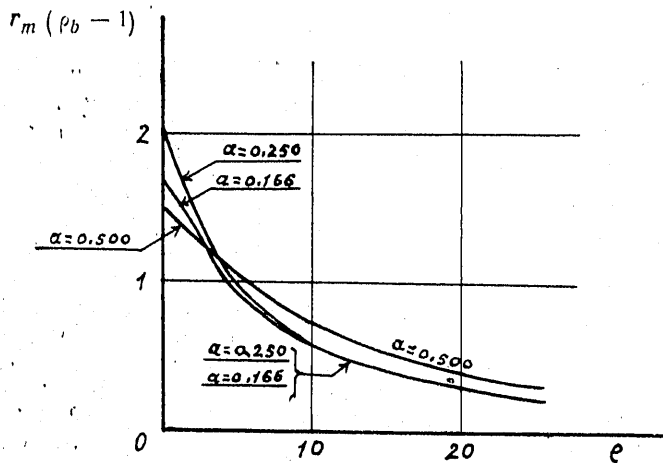


Figura 9.^a

Se ve que, al disminuir la dimensión a de la losa, estas cantidades aumentan al principio para disminuir después. Por lo tanto, cuando un firme empieza a agrietarse, las condiciones de estabilidad del suelo de fun-



r_m en Kg/cm²
 a en m.
 e en cm.
 $\alpha = \beta = 16,66$ cm.
 $P = 5000$ Kg.
 $\rho = 5$ Kg/cm²

Para valores $\alpha < 0,166$ y $e > 5$ es válida la curva $\alpha = 0,166$.

Figura 10.

dación empeoran hasta que la dimensión de las losas es de unos 50 cm., y a partir de este tamaño y a medida que disminuye, empiezan a mejorar. Esta mejora para valores menores de 30 cm., será notable en suelos con cohesión y dudosa en los que no la tienen.

Este efecto concuerda con la imposibilidad, de todos conocida, de compactar e inmovilizar los suelos áridos sin ninguna cohesión y con la posibilidad de hacerlo cuando contienen arcilla en cantidades suficientes. También concuerda con el hecho de ser más estables los suelos constituidos por áridos pequeños que los formados por mampuestos, como los antiguos cimientos Telford.

Si dadas las dimensiones de las losas en que el firme se ha roto, r_m y $\rho_b - 1$ ó bien, $a(S_b - S_c)$, son demasiado grandes para conseguir una durabilidad aceptable, podemos disminuir estos valores superponiendo al firme rígido una capa flexible de espesor e . En efecto (fig. 9.^a), una carga P que incide sobre una superficie $S_1 = 4\alpha\beta$, si adoptamos la hipótesis simplista de que en la capa de espesor e las presiones se reparten según líneas a 45°, la superficie de aplicación debajo de ella será:

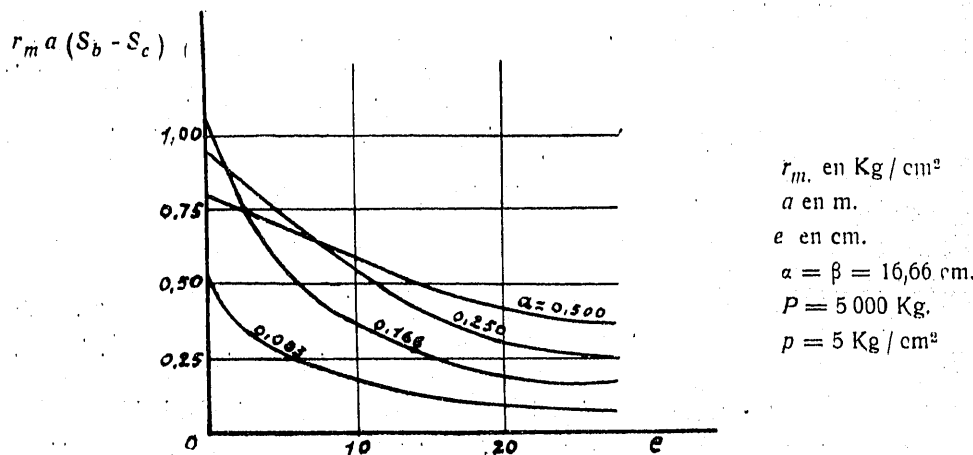
$$S_2 = 4(\alpha + e)(\beta + e).$$

La presión pasará de ser $p_1 = \frac{P}{4\alpha\beta}$ a ser $p_2 = \frac{P}{4(\alpha + e)(\beta + e)}$ y todo ocurrirá como si no existiera la capa de espesor e y las ruedas hubieran aumentado su superficie de contacto en la proporción $\frac{S_2}{S_1}$. En las fórmulas [10] u [11] disminuirán los primeros factores y, por lo tanto, disminuirá el valor de d para un mismo número de repeticiones N .

De ellos resulta que, cuando el viejo firme rígido se asienta en un suelo sin cohesión, el tamaño de sus losas casi no influye en la durabilidad de la reparación y tiene una influencia fundamental el espesor del recubrimiento. Por el contrario, cuando el suelo tiene mucha cohesión, y éste es el caso de los antiguos adoquinados superpuestos a firmes de macadam muy consolidados, influye muchísimo el tamaño de las losas. Cuanto más pequeñas son las losas, más efectivo es el recubrimiento.

Sin embargo, con ella, se ha convertido el primitivo firme de hormigón en un cimiento Telford *sui generis* que, como antes hemos indicado, es muy poco adecuado para repartir cargas, existiendo grave peligro de que las concentre en los lugares en que las grietas de la fragmentación haya quedado en forma propicia para ello.

Al llegar a este punto es preciso pensar si no será más ventajoso convertir el Telford en piedra machacada, que reparta uniformemente las cargas en vez



Para valores $\alpha > 0,166$ los valores de $V_m a (S_b - S_c)$ son proporcionales a los de la curva $\alpha = 0,166$

Figura 11.

Esto explica el método usado en Alemania para rehabilitar los firmes de las autopistas, que consiste en romperlos previamente con una especie de martinete móvil, que descarga sus golpes directamente sobre la losa y dotarlas, después de rellenar bien todas las grietas, de un fuerte recubrimiento de aglomerado asfáltico.

Las curvas de las figs. 10 y 11 sirven para calcular en cada caso si resulta más conveniente romper en trozos menores o recubrir con mayores espesores. (No es necesario que sea todo el recubrimiento de aglomerado asfáltico, como en las autopistas alemanas. Puede reservarse éste para la capa de rodadura y dejar bajo un firme granular más económico.) El problema es puramente económico y depende solamente del precio del centímetro de recubrimiento y del precio de fragmentación de la losa.

El fragmentar la losa en pequeños trozos que conserven todo el espesor tiene, además, la ventaja de hacer desaparecer todos los huecos bajo ella, pues estos pequeños trozos apoyarán bien sobre el suelo de fundación, sin más que pasar una compactadora. La fragmentación es, por lo tanto, un buen sustitutivo del método de inyección.

de concentrarlas. Esto es solamente un problema económico, pues las demás ventajas son claras. Por una parte, que la concentración de cargas es producida por las piezas grandes; por otra, que las interacciones de unas con otras, que coartan aquellas concentraciones, son tanto más efectivas cuanto mayor sea la relación de superficie a volumen de cada pieza y, sobre todo, en el caso que especialmente nos interesa de los viejos adoquinados construídos sobre firmes de piedra partida muy consolidados, que los suelos tienen una capacidad mucho mayor de soportar cargas transmitidas por firmes flexibles. Si en la transmisión se intercala un elemento rígido, la limitación de cargas queda motivada por la condición de que los posibles movimientos del suelo sean inferiores a los admisibles para que la parte rígida, al acompañar aquel movimiento, no rompa el recubrimiento superficial. El recubrimiento flexible superficial queda sujeto a la misma concentración de cargas, por parte del firme rígido intercalado, que el suelo.

Resulta, pues, que un firme rígido más o menos fragmentado, intercalado entre un suelo de buenas condiciones portantes y un firme flexible, no es más que un elemento perturbador que coloca a los otros dos en peores condiciones que si no existiera.

Por lo tanto, lo adecuado es eliminar ese firme rígido intermedio. Únicamente los factores económicos particulares de cada caso pueden justificar que no se haga así.

Para dar una idea, indicaremos que el coste de machaqueo de los 2 000 m.³ de firme rígido que pueden existir en un kilómetro de carretera de 7,00 m. de anchura, será aproximadamente, de 120 000 pesetas, cantidad muy inferior a las 250 ó 300 000 que hemos visto que cuesta la compactación por inyección, lo que permite ventajosamente transformar los restos del firme rígido machacado en una base eficaz.

Cuando el firme rígido sea un hormigón mosaico, caben muchas variantes sobre esta solución de machaqueo. Una de ellas, arrancar y aprovechar los adoquines para otras obras y convertir el cimientó, previamente triturado, ya que en muchos casos los trozos no tendrán resistencia suficiente al desgaste, para constituir la base del firme, en una sub-base drenante de unos 15 cm. de espesor.

Resumen.

Lo que hemos indicado hasta ahora puede resumirse en los siguientes puntos:

1.º Las juntas de un firme rígido, debido a la diferente deformación residual del suelo de fundación bajo ellas y bajo el centro de la losa, provocan irremisiblemente la fragmentación del firme.

2.º La mayor o menor duración de un firme es inversa al valor del factor $r_m (\rho_b - 1)$ en los firmes rígidos sobre suelos incoherentes, y el factor $r_m \frac{a}{v} (S_b - S_c)$ en los firmes rígidos sobre suelos muy coherentes. En los suelos intermedios, el factor característico tendrá un valor también intermedio.

3.º El efecto de concentración de cargas debido a las juntas está irregularmente paliado por las inter-

acciones de las losas contiguas a través de las juntas y ampliado por el efecto de impacto y por la acción plastificante del agua.

4.º El efecto de concentración de cargas producido por las juntas de un firme rígido, juntamente con la ley logarítmica de asiento de un suelo bajo cargas repetidas y la consideración del carácter incoherente o cohesivo de aquél, conduce a resultados que concuerdan con la imposibilidad de estabilizar (impedir el giro de sus elementos) un suelo sin cohesión y la posibilidad de hacerlo con los suelos coherentes con facilidad creciente a medida que disminuye el tamaño de los áridos.

5.º También conduce a resultados concordantes con el hecho de que las losas de hormigón que después de cierto tiempo en uso han sido inyectadas con asfalto, tardan más en agrietarse que las losas nuevas no tratadas, y con el de ser conveniente la fragmentación en pequeños trozos de un firme rígido viejo antes de superponerle un nuevo firme flexible.

6.º Estas concordancias inducen a creer que la teoría del efecto de concentración de cargas de las juntas y la ley logarítmica de asientos, explican bastante bien los fenómenos que tienen lugar en el conjunto firme rígido-suelo de fundación, y que podemos usarla para sacar consecuencias generales, tales como estudiar la relación más conveniente de grado de fragmentación-espesor de recubrimiento, teniendo en cuenta los costes de ejecución.

7.º En general, de este estudio se desprende que la máxima ventaja se obtiene llevando la fragmentación hasta un grado tal que desaparezca el elemento rígido y se cree con sus restos un firme flexible. En cada caso, en vista de los costes, habrá que comprobar si esto es así proyectando un firme flexible, con las normas usuales para ello, o una fragmentación par las figuras 10 u 11, según se trate de suelos incoherentes o coherentes.