

# ALGUNAS IDEAS SOBRE EL REFUERZO DE FIRMES (\*)

Por OLEGARIO LLAMAZARES GOMEZ

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

*El refuerzo de firmes, en su doble aspecto de diagnóstico de necesidades y aplicación de soluciones óptimas, es actualmente uno de los puntos más importantes en la conservación y acondicionamiento de las redes de carreteras.*

*A tal tema dedica nuestro habitual colaborador, Sr. Llamazares, este trabajo, en el que informa sobre los métodos de dimensionamiento y las nuevas soluciones para reforzar la sección estructural de los pavimentos flexibles.*

## 1. EL REFUERZO Y LAS CARGAS POR EJE

La adaptación de la infraestructura vial al tráfico que debe soportar, con sus características de frecuencia, velocidad y cargas, es una necesidad imperativa de nuestro tiempo, que debe llevarse a cabo en plazo y forma adecuados, para evitar graves perjuicios en el aspecto económico-funcional.

El problema de adaptación o reconversión se plantea igualmente en cualquier sector del desarrollo con la importancia que se deriva de la actual aceleración del proceso tecnológico y las mutaciones e incrementos de demanda a que éste da lugar.

Recordamos en este punto el certero aviso de Louis Armand — el famoso ingeniero politécnico francés — expuesto en su libro más conocido en España (\*\*). *No es la técnica lo que representa un verdadero peligro para la civilización sino la inercia de las estructuras.*

Sin entrar en el complejo campo de la carretera y en su adaptación al tráfico con las necesidades, más o menos localizadas, de mejora de características geométricas, complementos de señalización, ampliación y refuerzo de obras de fábrica, etc., dedicaremos el presente trabajo al refuerzo de las secciones estructurales de los firmes flexibles. Corresponden a este tipo la casi totalidad de las calzadas de la red estatal, ya que de sus 80.000 kilómetros sólo 665 tienen pavimento de hormigón hidráulico.

La necesidad de refuerzo de nuestros firmes se ha agudizado en los últimos años por la explotación abusiva del parque de vehículos pesados, cuyas cargas por eje superan en muchos casos los generosos límites que fija la legislación vigente.

En efecto, actualmente más de un 20 por 100 de los camiones que circulan por nuestras carreteras llevan ejes con cargas que superan el máximo legal de 13 toneladas, llegando hasta 23 toneladas. En cuanto a los ejes *tándem*, con ruedas

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la redacción de esta Revista hasta el 30 de junio de 1972.

(\*\*) L. Armand: *Plaidoyer pour l'avenir*. Editions Calmahn-Levy, París, 1961. Recomendamos también la lectura de otros dos títulos de este autor: *Simple propos* y *Le pari européen*. Libraire Artheme Fayard, París, 1968.

gemelas, la proporción de los que infringen la ley es aún mayor — del orden de un 50 por 100 — llegando a cargas de 31 toneladas (\*).

Teniendo en cuenta que el coste del transporte — al considerar sólo los gastos imputables al material móvil — se reduce con el aumento de peso de los vehículos y tratando de llegar a la normalización que requiere la interdependencia transnacional del mercado, la Comunidad Económica Europea ha propuesto la adopción del eje de 13 toneladas para 1974.

Pero esto no pasa de ser una tentativa con problemático éxito por el daño que se va comprobando causan estos ejes pesados, lo que se irá notando cada vez más por el efecto acumulativo en el que son importantes los fenómenos de fatiga debidos a la repetición de los ciclos de carga.

Gran parte de las redes nacionales tienen secciones estructurales insuficientes para soportar, en períodos económicos el eje de 13 toneladas. La calidad y el espesor de los refuerzos que exigirían es discutible que — en muchos casos — sea rentable, y por ello últimamente se ha manifestado una tendencia, también en España, a reducir las cargas axiles admisibles, de lo cual lógicamente participan los ingenieros que tienen a su cargo la construcción y conservación de carreteras y conocen, por tanto, los gastos debidos al efecto destructivo de las grandes cargas.

Pero volvamos a nuestro tema del refuerzo de firmes y dejemos el de las cargas, que fue ampliamente tratado en un reciente coloquio, a cuyas ponencias remitimos al lector interesado [1]. Que quede como idea introductiva de este trabajo la necesidad de refuerzo de la infraestructura vial, debida a las grandes cargas que soporta.

## 2. NECESIDAD Y CRITERIOS DE REFUERZO

En el proyecto de refuerzo de una calzada en servicio se pueden distinguir tres puntos esenciales:

- Elección del momento óptimo para aplicar el refuerzo.
- Elección entre las alternativas posibles.
- Dimensionamiento de espesores.

Para elegir el momento óptimo de refuerzo, o sea, cuando la estructura del firme está agotando su capacidad portante frente al tráfico que soporta, se pueden aplicar dos criterios:

- La auscultación deflectométrica.
- La estimación del PSI, o *índice de servicio*.

### 2.1. Las deflexiones como índice resistente.

Corresponde el primer criterio apuntado, que es hasta ahora el único que se ha empleado en España, al análisis de las deformaciones verticales bajo el peso de un eje-patrón que suele ser el máximo admisible según la legislación vigente. En España, por ejemplo, el de 13 toneladas que fija el decreto 1.216/1967.

---

(\*) Para darse cuenta de la crítica situación española recordaremos que las máximas cargas autorizadas en el mundo — y respetadas en el extranjero — son: eje simple, 13 toneladas, en Francia, Bélgica, Luxemburgo y España. Eje tándem, 21 toneladas, sólo en Francia y España.

La deformación vertical instantánea o *deflexión* elástica, es un índice global de la estabilidad del pavimento, que debe complementarse con otros datos específicos del tramo que se ausculta: naturaleza del terreno, precipitación pluviométrica, temperaturas extremas, sistema de drenaje, etc. Existe una correlación entre las deflexiones registradas y el tráfico que podrá seguir soportando el tramo en buenas condiciones de vialidad.

Estas deflexiones disminuirán cuando se aplique sobre el pavimento una capa de suficiente rigidez: mezcla asfáltica cerrada, grava-cemento, suelo-cemento, etc.

La humedad de la explanada y capas del firme influyen en la magnitud de la deflexión de modo apreciable. En nuestro clima el máximo absoluto corresponde a la primavera, en que puede llegarse a valores de 1,5 a 2 veces la media del verano-otoño. Esta circunstancia debe ser tenida en cuenta a la hora de fijar la magnitud de la deflexión que sirve de base al cálculo de espesores.

El ideal sería llevar a cabo las campañas de auscultación en los meses de abril y mayo, pero esto no es posible por la gran demanda de estudios y la insuficiencia de aparatos de medida disponibles.

A partir de las deflexiones obtenidas en la auscultación del tramo que se pretende reforzar, se calculan los espesores de refuerzo. Las series de valores de las deflexiones se tratan estadísticamente para la determinación de magnitudes características correspondientes a una *tramificación* por la que, con la aproximación posible, se establezcan diferentes tramos en los que aplicar distintos espesores, según la *deflexión característica*, con criterios de seguridad y economía.

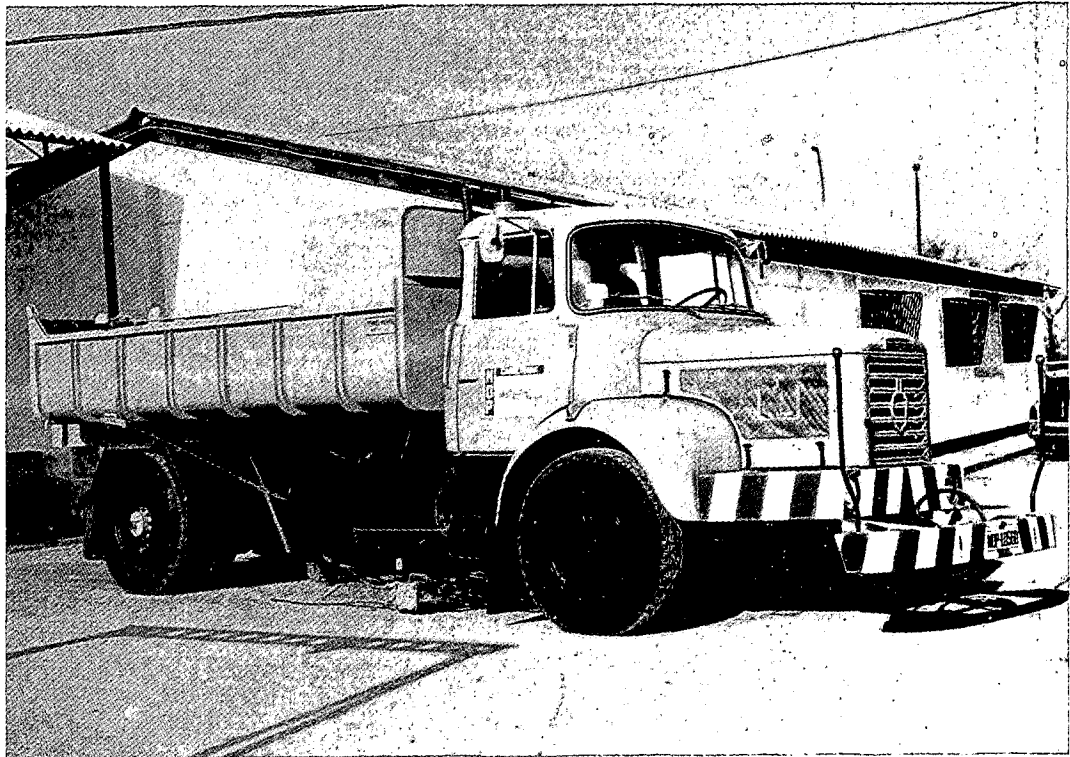


Fig. 1.— La capacidad portante de un firme en servicio se determina por la deflexión. La fotografía muestra un camión dotado con el deflectógrafo automático Lacroix.

En los métodos de refuerzo hoy en uso se calculan los espesores, a partir de esa deflexión, según distintos ábacos o fórmulas, que se adaptan a las condiciones del país que las propone, pero que en realidad son ajustes derivados del método de Hveem, y sobre todo de los resultados del ensayo AASHO.

No es nuestra intención extendernos demasiado sobre la técnica de proyecto de refuerzos, cuyos métodos son conocidos por los ingenieros españoles y han sido objeto de normas y publicaciones en nuestro país [2], [3] y [4].

La aplicación de la viga Benkelmann y de otros deflectómetros o deflectógrafos cuenta con largos períodos de experiencia en los países desarrollados. Por ejemplo, el profesor Hveem, antes citado, estudió el tema hace veinte años [5] estableciendo índices de tráfico y ábacos de dimensionado; recordemos también el método francés Colas, cuya correlación con la teoría racional de Jeuffroy-Bachelez es válida en los entornos que comprenden las máximas deflexiones admisibles y los espesores normales de capas de refuerzo [6].

En España los dimensionamientos de refuerzo en las vías principales se determinan generalmente a partir de las deflexiones determinadas por el deflectógrafo Lacroix-L.C.P.C. Hasta ahora la División de Materiales de la Dirección General de Carreteras ha llevado a cabo varias campañas de deflectometría en los itinerarios REDIA y se proseguirán a mayor ritmo, ya que pronto se dispondrá de dos equipos más, en total tres camiones con deflectógrafo, con los que se podrá al mismo tiempo que auscultar las carreteras de estabilidad precaria, al objeto de establecer órdenes de prioridad en los trabajos de refuerzo, comprobar la resistencia adicional que se consiguió en los pavimentos reforzados.

## 2.2. El "índice de servicio".

Para apreciar el estado del firme, llegando en lo posible a una apreciación visual basada en estimaciones y medidas sencillas (utilización de cinta métrica y reglas) se puede emplear el concepto de *índice de servicio* o PSI — *Present Serviceability Index* — definido en el ensayo AASHO, que viene dado por la fórmula:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log (1 + \overline{SV}) - 0,01 \sqrt{\overline{C} + \overline{P}} - 1,38 \overline{RD}^2,$$

con la siguiente notación:

$\overline{RD}$  = *Rut Depth* = profundidad de rodadura.

$\overline{C} + \overline{P}$  = *Cracking and Patching* = medida de la extensión de las zonas fisuradas y de reparaciones (bacheo).

$\overline{SV}$  = *Slope Variance* = variación de la pendiente medida en las huellas por donde van las ruedas.

La clasificación cifrada es la siguiente:

ESTADO DEL FIRME	Valor del PSI
Estado ideal .....	5
Estado de un firme nuevo bien construido .....	4 a 4,5
Estado que requiere una reparación .....	2,5
Estado que requiere una reconstrucción .....	1,5

Lo que requerirá más cuidado es la medida de la variación de pendientes medias, lo que se puede hacer con regla de 4 metros. No obstante, un técnico auxiliar experimentado, con los datos de la inspección visual y estas medidas sencillas podrá estimar el índice en primera aproximación, o como solución de emergencia sin perjuicio de que si es preciso se mida con mayor detalle posteriormente. El *rugosímetro* es un aparato adecuado para medir las irregularidades longitudinales en las franjas por las que pasan las ruedas. Cada vez se emplea más el *roughness indicator* aparato de patente americana que marcha a 32 Km/h y da una gráfica de la rugosidad; que integra por tramos, utilizándose los valores acumulados para definir el *índice de servicio* por una fórmula binómica.

### 3. DIMENSIONAMIENTO DEL REFUERZO

Fuera de los casos límites en que por mala calidad de la base y pavimento, o la excesiva plasticidad del suelo de la explanada, con la consiguiente contaminación de las capas superiores, hubiera que proyectar y construir la sección estructural *ex novo*, el problema se resolverá por la aplicación de nuevas capas complementarias que totalicen —habida cuenta de los coeficientes empíricos de equivalencia— el espesor de refuerzo dimensionado.

Los métodos de dimensionamiento se pueden clasificar en tres grupos:

1. Métodos resultantes de la extensión al caso de refuerzo de los métodos de proyecto de firmas nuevos (AASHO, The Asphalt Institute, método ruso de Ivanoff, etc.) (7).
2. Métodos basados en la auscultación deflectométrica (Colas, Desvignes).
3. Métodos basados en criterios empírico-rationales (Jeuffroy y Bachelez).

Nos referimos al método francés de Desvignes, que es el único que no hemos visto tratado en la literatura en español de la especialidad, y que en consecuencia presentará una mayor novedad para el lector.

Se basa este método en la frecuencia del tráfico pesado, en la auscultación deflectométrica y en ensayos de trabajo de las mezclas asfálticas.

En este método se han considerado tanto los conceptos teóricos de Ivanoff como los resultados de largas series de experiencias llevadas a cabo en Estados Unidos y Canadá. A partir de hipótesis y magnitudes se ha llegado a la conclusión que ya habíamos apuntado antes: existe una relación claramente definida entre la vida útil de un firme y su deflexión superficial medida en primavera. Otra relación liga las deflexiones medidas en un punto del firme, antes y después del refuerzo, con el espesor de la capa con que se ha reforzado; se define por la expresión matemática de esa relación la *potencia de refuerzo* de una mezcla, concepto que hemos expuesto en un anterior trabajo (8).

La expresión de la primera relación citada es la siguiente:

$$N \times d^{3,25} = K,$$

con la siguiente notación:

$N$  = número de pasadas del eje-patrón de 13 toneladas.

$d$  = deflexión medida en primavera, en milímetros.

$K$  = constante con un valor tal que para  $10^6$  pasadas la deflexión será 1,2.

A partir de esta fórmula se ha construido el ábaco de Desvignes, que en función del número de pasadas del eje-patrón y de la deflexión registrada en primavera da el espesor de refuerzo necesario.

### DIMENSIONAMIENTO DEL REFUERZO-ABACO DE DESVIGNES

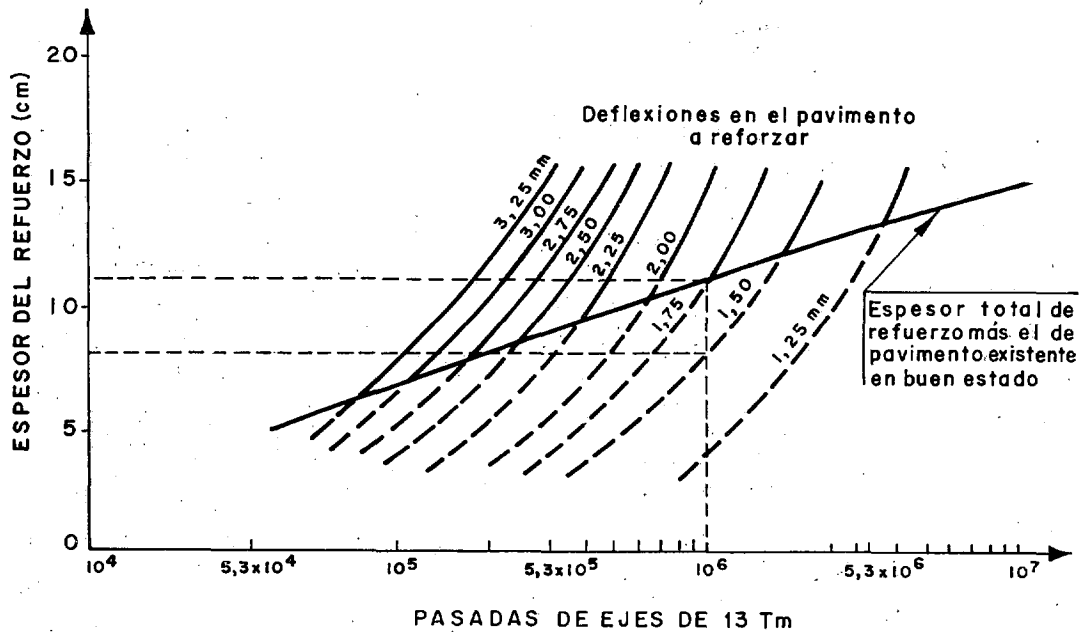


Figura 2.

En este ábaco se obtienen dos valores:

- Espesor del refuerzo (familia de curvas).
- Espesor del refuerzo computando la capa superior asfáltica que se considera en buen estado, caracterizada por ensayos normalizados de fatiga.

Definidos, teniendo en cuenta ambos casos, los espesores de la capa nueva a aplicar se tomarán con criterio conservador, el mayor valor de éstos.

En el ejemplo que se muestra sobre el ábaco, los datos de partida son:

- Número de ejes de 13 toneladas que va a soportar el tramo (se considerará la reducción a éste por las relaciones de equivalencia de los otros ejes),  $10^6$ .
- Deflexión primaveral antes del refuerzo, 1,50 mm.

Se obtiene un espesor de refuerzo de 8 cm y un espesor de refuerzo más espesor de mezcla asfáltica *in situ*, en buen estado, de 11,5 centímetros.

Como procedimiento sencillo de dimensionado incluimos a continuación el cuadro de la Instrucción francesa para refuerzo con capas asfálticas que si no tiene la precisión de los otros métodos —principalmente por su estimación simplista del tráfico— puede ser válido para tramos que necesiten espesores inferiores a 15 cm. Las mezclas que se apliquen deben ser como mínimo del tipo III de nuestro Pliego de Prescripciones Técnicas.

Las deflexiones se miden en centésimas de milímetros. Según se indica en el cuadro, a partir de ciertas deflexiones, deben estudiarse muy especialmente las condiciones del tramo: drenaje, estado de la base y explanada, etc. En los refuerzos superiores a 15 cm procede un estudio comparativo considerando una capa inferior más económica que generalmente en nuestro país será de grava-cemento.

Por la indiscriminación del tráfico pesado en la intensidad media, éste debe ser un factor a ponderar por el ingeniero proyectista. Por ejemplo, cuando la intensidad estimada esté cerca del límite superior del grupo de la clasificación puede tomarse el espesor correspondiente al otro grupo. Es un criterio conservador lógico, recomendado para España por nuestra elevada proporción de vehículos pesados.

#### DIMENSIONAMIENTO DE REFUERZOS

IMD Deflexión (0,01 mm)	1.500	1.500 a 3.000	3.000 a 6.000	6.000
100-125	—	—	—	10 cm
125-150	—	—	8 cm	10 cm
150-200	—	8 cm	10 cm	15 cm
200-250	8 cm	10 cm	15 cm	Estudio especial.
250-300	10 cm	15 cm	Estudio especial.	Estudio especial.
300-325	15 cm	Estudio especial.	Estudio especial.	Estudio especial.

El mínimo espesor de refuerzo se ha fijado en 8 cm para que la nueva capa aumente la capacidad portante del firme por *efecto-losa*.

#### 4. REPARTO DE ESPESORES

Para definir el proyecto de refuerzo de una sección estructural de insuficiente capacidad portante, además del valor absoluto o virtual de su magnitud será preciso distribuir éste en una o más capas según el espesor. El tema ha sido tratado recientemente con motivo del estudio de la mejora de algunos tramos deteriorados de REDIA (9) a causa de las abusivas cargas por eje de que hablamos al principio de este trabajo.

El problema del reparto de espesores, dentro de unos límites técnicos de seguridad de comportamiento de la sección reforzada es un problema económico.

En el caso que el espesor obtenido en el cálculo sea inferior a 10 cm, se recomienda disponer una capa única con las características de calidad que se exigen a las capas de rodadura, o sea, tamaño máximo del árido inferior a 18 mm, coeficiente de Los Angeles menor que 25, coeficiente de pulido acelerado superior a 0,45 (10) betún de penetración 60/80, o excepcionalmente 40/60 en zonas cálidas, y *filler* totalmente de aportación (cemento, polvo de caliza dura).

Si el espesor de refuerzo está comprendido entre 10 y 15 cm, habrá que emplear dos capas. La tendencia actual es que la capa superior o de rodadura tenga 5 ó 6 cm — o sea, algo mayor que la de las normas españolas — y la inferior, complementaria de la magnitud del cálculo, con características de capa intermedia, tamaño máximo de 25 mm, coeficiente de Los Angeles inferior a 30 y *filler* y ligante como en el caso anterior.

En caso de refuerzos de mayor espesor se pueden establecer tres capas asfálticas, la inferior con características de capa de base, mezcla del tipo II, con árido de hasta 37,5 mm. Solución más económica, que debe considerarse para estos grandes espesores, es la de base de grava-cemento de 15 a 20 cm, con revestimiento asfáltico de 5 a 7 cm, e incluso doble tratamiento superficial si la IMD del tramo fuere inferior a 1.500 vehículos (\*). El árido de la grava-cemento deberá tener un coeficiente de Los Angeles inferior a 40 y una elevada proporción de cáscaras de fractura que favorezca la resistencia por rozamiento interno. La fracción fina debe ser poco plástica. En los últimos años ha habido una marcada tendencia a bajas plasticidades. Con una fracción fina más plástica se requiere una mayor dosificación de cemento, lo que además del mayor coste de la unidad de obra presenta problemas de falta de uniformidad en la distribución del conglomerante y de mayor fisuración.

A los efectos de comparación de soluciones en el reparto del espesor de cálculo recordamos los coeficientes de equivalencia del Instituto del Asfalto:

- 1 cm de mezcla asfáltica equivale a 2 cm de capa granular.
- 1 cm de mezcla asfáltica equivale a 1,50 cm de grava-cemento.

## 5. REFUERZOS ARMADOS

Entre las ideas sobre el refuerzo de firmes flexibles es oportuno citar las capas asfálticas armadas con mallazo de poliéster, que permite reducir el espesor.

Se destina este armado a mejorar la resistencia a la tracción y flexión, a la fluencia y a los fenómenos de fatiga por la repetición de las cargas.

Los estudios experimentales llevados a cabo, principalmente en Holanda, mediante ensayos tecnológicos — probetas de idéntica mezcla, unas armadas y otras sin armar, sometidas al mismo tratamiento mecánico — han mostrado claramente el efecto favorable del armado.

Incluimos un diagrama típico de los obtenidos en los ensayos de tracción, que son los más elocuentes en cuanto a mejora del comportamiento bajo cargas.

---

(\*) La Instrucción francesa de diciembre de 1965, prevé el DTS y los espesores citados, que quizá sean insuficientes por la transmisión de las grietas de retracción de la grava-cemento. Actualmente más que la grava-cemento se emplea en Francia la grava-escoria granulada.



## DIAGRAMA DEL ENSAYO A TRACCION

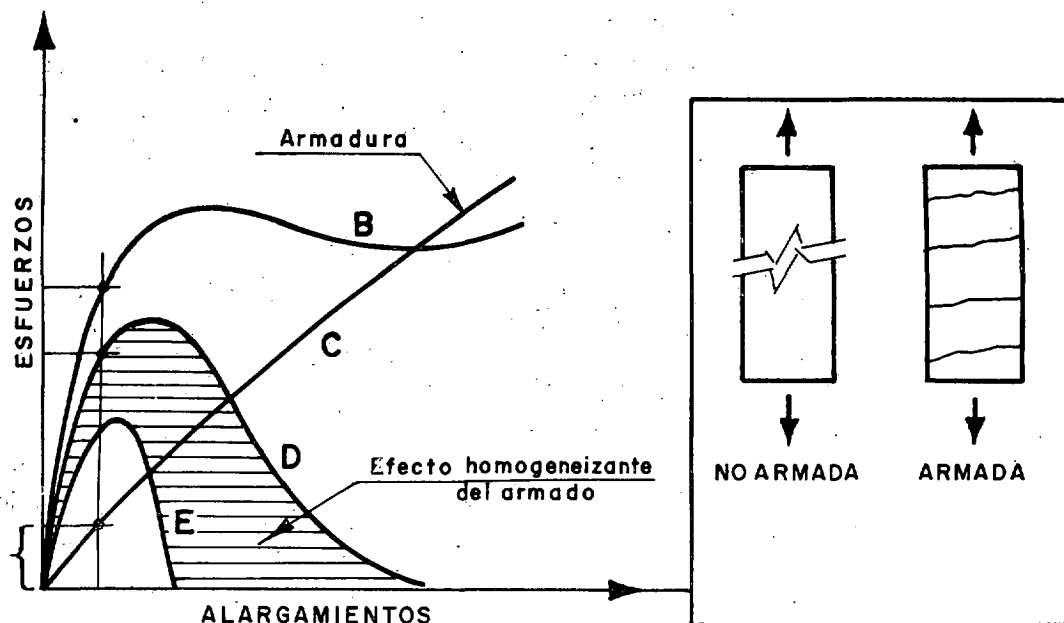


Figura 3.

La curva A corresponde a la probeta no armada y la B a la probeta armada. Vemos que el esfuerzo límite del trabajo en régimen elástico de la pieza, es mucho mayor cuando está armada y en consecuencia también lo es la resistencia a la rotura. Considerando la curva C, que es la que corresponde a la tracción de la armadura, si se suman las ordenadas A y C, la curva D resultante queda por debajo de la B; se explica esto por un efecto del reparto homogeneizante de la armadura, que mejora la calidad propia de la mezcla en su respuesta mecánica, efecto favorable que se suma al de la armadura en la absorción del esfuerzo de tracción.

En el ensayo a flexión se han comprobado efectos beneficiosos debidos a motivos similares de fluencia.

En consecuencia, se ha puesto de manifiesto la aptitud de las capas asfálticas armadas con mallazo de poliéster para el refuerzo de secciones estructurales de insuficiente capacidad portante. Las ventajas principales de estas capas son:

- Mejoran el reparto de las cargas del tráfico sobre la base y explanada.
- Evitan la formación de grietas.
- Permiten con mayor garantía la solución *negro sobre blanco*, o sea, el revestimiento asfáltico de pavimentos de hormigón hidráulico en mal estado.

## 6. CONCLUSION

En las ideas expuestas hemos pretendido poner de manifiesto las posibilidades que hoy existen para el refuerzo de los pavimentos en servicio, cuya sección estructural es ya insuficiente —o lo será en un futuro próximo— para soportar el tráfico, que en los últimos años ha crecido por encima de los límites previsibles.

Los métodos cada vez más perfeccionados, los aparatos de medida, los materiales especiales y las nuevas soluciones constructivas permitirán resolver todos los problemas de refuerzo y establecer programas prioritarios de realización.

El refuerzo debe aplicarse no sólo a los itinerarios principales, sino también a las redes secundarias por la imperativa obligación de conservar el patrimonio vial evitando una demora que lleve a costosísimas reconstrucciones.

El problema ha sido planteado recientemente, en toda su importancia, por el Grupo de Investigación C6, "Conservación de Carreteras" de la Comunidad Económica Europea, y las campañas generales de refuerzo constituyen ya una preocupación dominante en los Departamentos de Carreteras de los países miembros.

Es, pues, una necesidad pensar en un Plan nacional de refuerzos para adaptar la infraestructura al eje máximo, que en definitiva se fije, dentro, naturalmente, de las posibilidades del crédito presupuestario solicitado por múltiples atenciones.

Estas breves notas, complementadas con los trabajos monográficos que hemos seleccionado y que figuran en el adjunto índice de referencias, podrán dar una idea al Ingeniero de Caminos de los problemas de refuerzo de firme y su solución, lo que será labor específica de su quehacer profesional, con ámbito creciente, en la presente década.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. "I Coloquio Nacional de Cargas de Vehículos". Publicación de la Asociación Española de la Carretera. Madrid, 1971.
2. S. ROCCI: "Bases de un método racional para el dimensionamiento de refuerzos de firmes flexibles basado en la medida de la deformación puntual bajo un eje cargado". Dirección General de Carreteras. Madrid, 1965.
3. L. CANOVAS DEL CASTILLO: "Refuerzo de firmes". Curso general de Carreteras. Dirección General de Carreteras. Madrid, 1970.
4. O. LLAMAZARES: "Dimensionado del refuerzo de pavimentos flexibles a partir de las deflexiones determinadas con la viga de Benkelmann". Informes de la Construcción, núm. 180. Madrid, 1966.
5. F. HVEEM: "Pavement deflection and fatigue failure". Bulletin 114 of Highway Research Board, Washington, 1955.
6. M. LEGER: "Propiedades mecánicas de las mezclas". I Cursillo Nacional de Mezclas Bituminosas. Madrid, 1966.
7. K. KUCERA: "Tendencias modernas en el dimensionado de firmes flexibles". Revista de Obras Públicas, febrero 1970.
8. O. LLAMAZARES: "Refuerzo de firmes flexibles con capas de mezcla asfáltica". Revista de Obras Públicas, febrero 1962.
9. E. BALAGUER: "Informe sobre las roderas existentes en pavimentos de mezclas bituminosas en obras de reciente ejecución". Dirección General de Carreteras. División de Materiales. Madrid, 1971.
10. R. SAUTEREY: "Les renforcements en enrobés bitumineux". Revue Construction, núm. 6. Paris, junio 1967.