

TENDENCIAS ACTUALES EN EL DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES FLEXIBLES(*)

Por OLEGARIO LLAMAZARES GOMEZ

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos.

Volviendo a un tema que ya trató en anteriores trabajos publicados en estas páginas, el autor informa sobre la metodología actual de cálculo de firmes flexibles, perfeccionada en los últimos años por procesos empíricos y racionales, con los que se trata de llegar a dimensionamiento de secciones estrictas que mantengan las requeridas condiciones de funcionalidad en cuanto a resistencia y buenas condiciones de rodadura, sin llegar, por espesor excesivo o inadecuada composición de la sección estructural, a soluciones costosas que encarezcan las obras de autopistas y carreteras de tráfico pesado en las que el afirmado es un capítulo muy importante del presupuesto.

COLEGIO INGENIEROS DE CAMINOS
BIBLIOTECA

1. Antecedentes.

El cálculo estructural de los firmes de carreteras, o sea, el dimensionamiento integrado y por capas de su sección resistente, es relativamente reciente en Europa.

En los Estados Unidos, siempre en la vanguardia de la tecnología vial, el estudio de fórmulas y métodos de cálculo de firmes constituyó una inquietud de las Divisiones de Carreteras desde principios de nuestro siglo (**). La aplicación de los métodos americanos se inició en Europa en los años de la posguerra, en que fue preciso ampliar y reconstruir la infraestructura viaria del continente seriamente danada, y en todo caso incapaz para servir las necesidades de transporte de un imperativo desarrollo.

En nuestro país está ya bien entrada la década de los cincuenta cuando se empieza a

sentir la necesidad de un dimensionamiento específico para cada tramo en relación con sus previsibles intensidades de tráfico y las características geotécnicas del terreno por donde se desarrolla su trazado.

Hasta entonces, la Instrucción española prescribía espesores de firme con un carácter generalizado y geométrico sin contemplar la casuística mecánica de las solicitaciones o de otras circunstancias externas. Estos espesores se fijaban en 22 ó 25 cm. Sólo para los tramos de mayor tráfico se adoptaban capas de rodadura de aglomerado asfáltico o *tarmacadán*, adoquinado o empedrado concertado; en el resto la solución era siempre el macadán ordinario con tratamiento superficial.

Los métodos que empezamos a emplear eran los simplistas que entonces se utilizaban en el mundo, con base absolutamente empírica, o sea, los bien conocidos CBR y del *Índice de grupo*. En los tramos de menor importancia se empleó también el método de Peltier, basado en el *factor de portancia* de la explanada, índice de muy variable aproximación y, en consecuencia, de escasa fiabilidad.

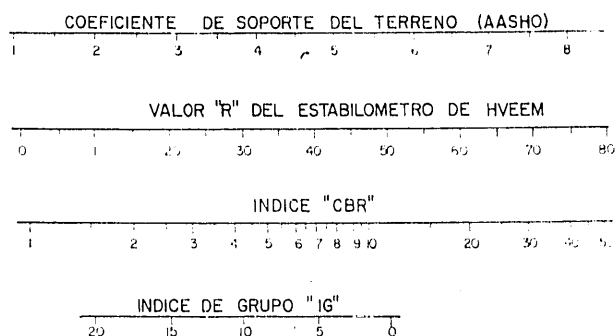
Simultáneamente con el proyecto de secciones estructurales *ex novo* y en mayor proporción que éstas, era preciso dimensionar el refuerzo de firmes existentes de insuficiente capacidad para soportar el tráfico creciente. Los métodos de refuerzo más generalizados se basan en la auscultación por deflectografía, utilizando aparatos que miden la deformación superficial del pavimento bajo una carga nor-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 15 de julio de 1975.

(**) Se registra como primer antecedente la llamada *regla de Massachusetts*, definida en 1901 por la Massachusetts Highway Commission. El espesor se obtenía por

la fórmula $t = \sqrt[0.5]{\frac{P}{q}}$, con la siguiente notación: t , espesor en pulgadas; P , carga por rueda en libras, y q , capacidad portante de la explanada en libras por pulgada cuadrada. A través de cuarenta años esta regla fue sujeta a diversas modificaciones, tanto en la expresión de la fórmula como en el método de obtención del valor representativo de la capacidad portante. Un gran avance en los métodos de cálculo tuvo lugar con las curvas del CBR, publicadas en 1942.

malizada. Esta deformación elástica o *deflexión* es un índice resistente del firme, para cuya medida se han utilizado aparatos progresivamente perfeccionados desde la viga Benkelman al deflectógrafo Lacroix; registra este último, en gráfico continuo, la deflexión a lo largo del tramo que se proyecta reforzar, por el que se pasa un camión con carga axial y velocidad normalizada al que se acopla el aparato medidor.



Este gráfico de correlación de índices portantes, que se utilizan en distintos métodos de dimensionamiento de espesores de firmes, sólo tiene un valor orientativo dadas las grandes dispersiones que puedan presentarse según los diferentes tipos de suelo de la explanada. En primer lugar hay que tener en cuenta qué diferentes son los ensayos para determinar la resistencia del suelo y, por ejemplo, en el caso del *índice de grupo* no responden a una prueba de carga o penetración, sino que se define en función de los caracteres de identificación del suelo determinados en laboratorio.

Un tratamiento estadístico de las deflexiones registradas permite llegar a unos valores característicos, que son variables de entrada en los ábacos, que para los correspondientes tráficos del tramo en cuestión —en prognosis para el período de proyecto que se fije— dan el espesor del refuerzo necesario. Este es el sistema que se ha empleado para el estudio del refuerzo de los itinerarios del Plan REDIA y del Plan REFOR de la red complementaria.

2. Bases del proyecto estructural.

El proyecto estructural de firmes se sigue apoyando singularmente en técnicas empíricas derivadas de los resultados de un ya largo período de ensayos a escala natural, cuyo ejemplo más representativo y eficaz, por la longitud de los tramos y diversidad de las variantes contempladas, ha sido el *AASHO Road Test* realizado en el estado de Illinois (Estados Unidos), cuyo período de experimentación finalizó en noviembre de 1960.

Pero a pesar de la gran amplitud de este ensayo no se pudo superar su carácter localista, y una de las conclusiones más importantes fue la de que los resultados obtenidos —relación entre la magnitud y repetición de las cargas del tráfico artificial programado y el comportamiento de las distintas secciones resistentes— dependen, en gran medida, de las condiciones ambientales, o sea, de las características geotécnicas y climáticas del lugar de emplazamiento.

Una de las preocupaciones dominantes en la investigación de métodos de proyecto estructural de firmes ha sido desde entonces la de establecer correlaciones de los resultados del ensayo AASHO para otras condiciones ambientales de los tramos a estudiar, a los efectos de llegar a una mayor aproximación en la metodología de dimensionamiento.

Como consecuencia de ello se llegó a considerar el problema en toda su gran complejidad y a establecer lo que se llamaron necesidades operativas que éste llevaba consigo, que pueden concretarse en principio, sin ánimo de exhaustividad, en las siguientes:

- Desarrollo y puesta a punto de aparatos rápidos y eficaces de auscultación y medida.
- Explotación adecuada de las largas series de datos obtenidos.
- Comprobación en carreteras en servicio.
- Consideraciones extraestructurales, o al menos no específicamente estructurales (rentabilidad a largo plazo, motivaciones estratégicas, comodidad del usuario, etcétera).

La labor en este campo de los laboratorios y Departamentos de investigación de los países de tecnología más avanzada ha cristalizado en unos sistemas operativos que contemplan los siguientes factores esenciales: características físicas de los materiales, técnicas constructivas, condiciones de conservación e incidencia económica del coste global construcción-explotación, todo ello dentro de un contexto de adecuación a los condicionantes específicos del tramo, cuyo firme se proyecta (*).

(*) El número de variables implicadas en los factores descritos es muy grande; a título informativo, citaré el programa de ordenador de la A.A.S.H.O. *Interim Guide for Design of Flexible Pavements*, en el que interviene de 60 a 100 variables según el caso.

3 Metodología empírica y racional.

Como en otras ocasiones he indicado, en tanto a la metodología de dimensionamiento de firmes se ha producido un fenómeno curioso, que es el de la división en dos escuelas: la que se podría calificar de puramente empírica, ya que se basa en la explotación de las largas series de datos procedentes de los ensayos WASHO, AASHO y otros posteriores, y la escuela racional basada en los estudios matemáticos de Burmister, Ivanoff, Krivisky y Jeuffroy-Bachelez. De los métodos en uso algunos han mantenido su aspecto empírico como el de Shook y Finn, y otros han tratado de conjuntar, con más o menos fortuna, criterios teóricos y empíricos, como sucede con el método Shell o el del Laboratorio de Ponts et Chaussées, de París.

Los firmes de carreteras y autopistas, como conjunto pavimento-base-subbase, son estructuras tridimensionales, en las que se producen, bajo el efecto de las cargas, tensiones y deformaciones en todas las direcciones. La respuesta mecánica a este fenómeno, o sea, la magnitud de tales tensiones y deformaciones, depende de las propiedades de los materiales y del proceso constructivo, o sea, de las características resistentes que este confiera a las capas, singularmente la compactación.

En consecuencia, un firme flexible responde a las cargas aplicadas en forma análoga a cualquier otro elemento estructural, y, por tanto, su dimensionamiento podría abordarse por los clásicos procedimientos de cálculo de las piezas o estructuras en el que se consideran las siguientes fases:

- Concepción de la estructura con adaptación a sus exigencias funcionales.
- Estimación, lo más aproximada posible, de las solicitaciones durante el período de servicio.
- Análisis de tensiones y deformaciones de acuerdo con las propiedades mecánicas de los materiales.
- Comprobación de si tales tensiones y deformaciones son aceptables para las exigencias de la estructura y la garantía de su comportamiento en el período o duración teórica de servicio asignado al tramo.

— Repetición de las estimaciones y análisis definidos anteriormente para llegar, por aproximaciones sucesivas, a la solución óptima en el aspecto económico-funcional.

No obstante, son bien conocidas las dificultades de la aplicación estricta de esta metodología al cálculo de la sección estructural de un firme, que nacen de la inevitable complejidad del problema:

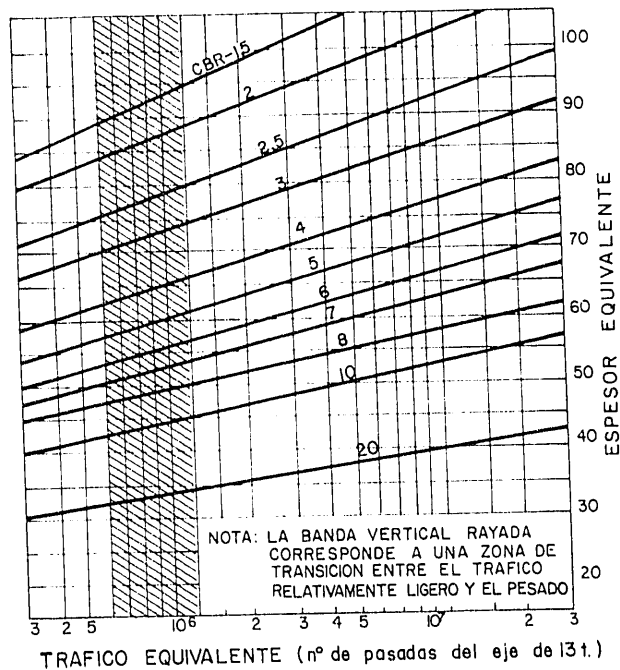
- Dificultad de estimación de la frecuencia y magnitud de las cargas.
- Influencia de las condiciones ambientales del emplazamiento.
- Variaciones en las propiedades mecánicas y reológicas de los materiales y en las capas integrantes de la sección y explanada (influencias de temperatura, humedad, etc.).
- Criterios de comportamiento o *índice de servicio* que se fijen para el pavimento.

En consecuencia, hay que recurrir a supuestos y simplificaciones que permitan llegar a soluciones válidas, dentro de la seguridad y la economía. Tales supuestos básicos, las simplificaciones en el planteamiento del problema y los resultados que a partir de ambos se obtienen, deben ser controlados en el comportamiento de la obra —en tramos de ensayo u observación de carreteras en servicio— para que puedan aceptarse con suficiente grado de fiabilidad y constituyan soluciones de aproximación aceptable en las modernas técnicas de proyecto.

De este modo se han ido desarrollando, como antes indicábamos, métodos cada vez más perfeccionados que estiman con mayor precisión los efectos de las solicitaciones externas y la respuesta mecánica de las capas del firme.

Siguiendo el proceso, y gracias al cúmulo de información de que se va disponiendo en los países desarrollados y al rápido tratamiento de datos que permiten los ordenadores, es indudable que nos acercamos a métodos de mayor garantía en que el empirismo se reduzca todo lo posible, si bien es verdad que no se podrá prescindir del criterio y la experiencia del proyectista que debe juzgar las condiciones específicas que concurren en cada caso.

Al establecer comparaciones entre el dimensionamiento de un firme de carretera y el de un elemento de construcción: viga, arco, pilar, presa, etc., vemos que una diferencia importante radica en que los fallos de cálculo en el firme no tienen las trágicas consecuencias que revisten en los otros elementos citados. Esto tiene una doble ventaja: se pueden reducir los coeficientes de seguridad y se pueden ensayar, sin gran preocupación, los nuevos métodos en vías de servicio público.



En el método francés del Laboratorio Central de Ponts et Chaussées se parte del índice C.B.R. y del tráfico equivalente. Este se obtiene por la conversión de los distintos ejes —clasificados en grupos— que se estima van a pasar durante el período de servicio del tramo al eje patrón de 13 Tm. En este diagrama se obtiene el espesor equivalente de grava, o sea, espesor virtual; de acuerdo con él se proyectará la sección estructural correspondiente, teniendo en cuenta los índices de equivalencia de las distintas capas que la integran para llegar a una solución óptima en el aspecto económico-funcional.

La investigación exhaustiva de la solución óptima de un firme flexible es, desde el punto de vista estadístico y desde el punto de vista económico, una labor ardua y compleja, ya que son múltiples los datos de partida, y éstos varían notablemente de las condiciones de un país a otro por circunstancias geológicas, climáticas y de tráfico. El examen de los criterios de proyecto de firmes requiere una gran atención en la comparación sistemática de los re-

sultados obtenidos en cada país; en primer lugar, debe observarse que algunos datos, tales como las intensidades medias —diarias u horarias— de tráfico, así como la composición de éste, la naturaleza y capacidad portante de la explanada y las características mecánicas de las diversas capas que integran el firme, se fijan generalmente de acuerdo con hipótesis que no son exactas y que pueden ser objeto de variaciones sustanciales respecto a las previsiones del proyecto.

Basta pensar en los cambios estacionales de humedad y temperatura, en la falta de homogeneidad de suelos naturales y en las modificaciones que, respecto a las condiciones iniciales de los materiales, pueden tener lugar durante el período de servicio del pavimento en cuestión (variación de la granulometría por fractura, variación de la forma por fenómenos de atrición, etc.).

El conocimiento profundo de una casuística motivada por la variación factorial de elementos que influyen en el estudio y en el comportamiento de la obra es del mayor interés para el perfeccionamiento de investigaciones y procedimientos, y éste es uno de los temas básicos de la investigación que debe examinar métodos y fórmulas decisivas para obtener el mayor partido de su adaptación a las circunstancias reales.

Los métodos de cálculo de las secciones estructurales de un pavimento flexible se dividen en dos amplios grupos:

- Los métodos empíricos o semiempíricos, basados sobre ensayos que definen la naturaleza del suelo de la explanada por un índice portante, sin analizar las características mecánicas de los materiales y considerando de manera estimativa la cohesión de las capas superiores.
- Los métodos racionales que estudian cada una de las capas del firme basándose en las características elásticas o viscoelásticas de los materiales que las integran, según la hipótesis de Boussinesq y su desarrollo por Burmister.

En todo caso, el propósito de un método sistema analítico de dimensionamiento de firmes es proyectar a partir de los datos disponibles una sección que se mantenga con el tiempo

servicio (PSI) (*) requerido para la carretera o autopista en cuestión durante el período de duración teórica previsto y con un mínimo costo global.

La complejidad del problema llevó a investigadores y proyectistas a establecer sistemas operativos computerizados que empezaron a utilizarse en los Estados Unidos a finales de la década de los 60; en ellos las variables *input* o de entrada se pueden clasificar en ocho grupos:

1. Carácteres de identificación de suelos y materiales.
2. Factores ambientales.
3. Nivel de servicio en el tramo, dependiendo de su función.
4. Magnitud y frecuencia de las cargas del tráfico previsible.
5. Limitaciones singulares.
6. Período de proyecto (duración teórica de servicio).
7. Condiciones de conservación.
8. Programas de control y varios.

El perfeccionamiento de la metodología en los últimos años se basa, esencialmente, en la teoría elástica de los sistemas multicapas en cuanto al estado mecánico o relación tensiones-deformaciones, identificación más precisa de las características reológicas de los materiales y de las deformaciones termoplásticas de las mezclas asfálticas, fenómenos de fatiga por repetición de las cargas, anisotropías inducidas por tensiones y temperaturas en las precitadas mezclas, e influencia de la humedad en la capacidad portante de la explanada y capas granulares inferiores.

4 Datos de partida.

Para el dimensionamiento de un firme se parte de una intensidad de tráfico previsible, de las características portantes del suelo de la explanada y un período teórico de servicio.

El análisis de tráfico se ha elevado a la categoría de disciplina importante dentro de las técnicas del proyecto geométrico y estructural

(*) *Present Serviceability Index*, índice cifrado de estado de un pavimento que se definió para estimaciones de A.S.H.O. Test.

de carreteras con los cada vez más completos planes de aforos, conteos automáticos y encuestas de origen y destino. A efectos del dimensionamiento de espesores interesa la intensidad media con su prognosis referida al período de servicio del tramo en cuestión y la clasificación de ejes de los vehículos pesados.

La influencia del tráfico como destructor del firme depende de dos factores: el peso de los ejes y el número de pasadas. En los modernos métodos de dimensionamiento se parte de un índice de tráfico, que se determina agrupando los ejes por distintos pesos y refiriéndoles a un eje patrón de efecto equivalente (*).

La explanada, en desmonte o terraplén, se caracteriza por un *índice resistente* y su grado de compactación será el que fijen las prescripciones técnicas particulares de la obra. Estos índices son diferentes para los distintos métodos: CBR, *valor "R"* del método de Hveem, *coeficiente de soporte "S"* del método AASHO, etcétera. Una idea orientativa de la posible correlación de estos valores figura en el gráfico adjunto.

En cuanto al período teórico de servicio, su duración dependerá del criterio del proyectista. Respecto a los firmes flexibles, de los que nos ocupamos en el presente trabajo, la facilidad de refuerzo permite su adaptación, en dos o más fases, al tráfico creciente. Por ello, no conviene dimensionar por exceso, para evitar inversiones de primer establecimiento que no sean necesarias en una fase relativamente larga. Un período prudente de servicio es el de veinte años (**).

Datos complementarios para el dimensionamiento son el peligro del efecto-helada, la proximidad de la capa freática, la garantía de un drenaje eficaz, etc. Por la proximidad de la capa freática se puede introducir un coeficiente reductor del índice portante. Por ejemplo, en las normas inglesas este coeficiente si la citada capa está a menos de 60 cm de la explanada, el CBR de partida para el cálculo de espesores se

(*) En el método francés del laboratorio central de Ponts et Chaussées el tráfico equivalente se expresa por el número de pasadas del eje de 13 Tm y que, como en nuestro país, es el máximo autorizado.

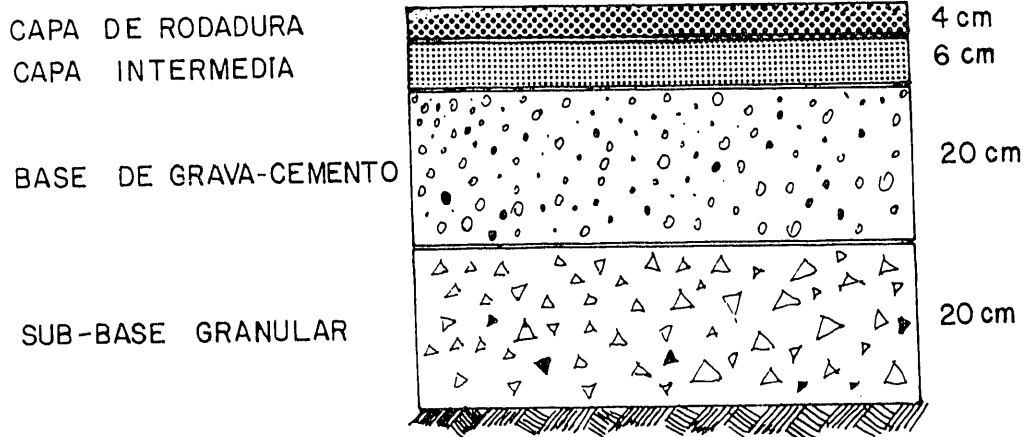
(**) En los estudios que se han realizado utilizando los métodos de actualización de gastos se ha demostrado que es más económico no dimensionar para plazos más largos los firmes flexibles. Para los firmes rígidos se recomiendan períodos de cuarenta años, dado el reducido espesor del suplemento que esto requiere.

reducirá del 50 al 30 por 100 según se trate de arcillas plásticas o arcillas arenosas.

Singular importancia tiene en nuestro país la consideración de la influencia de las temperaturas elevadas en la deformación termoplástica de las capas asfálticas; en estas desfavorables condiciones bastan pocas aplicaciones de grandes cargas para que se formen roderas (*). La presión de inflado o de contacto tiene también una incidencia en el mismo sentido. Se tra-

vado a cabo últimamente se ha puesto de manifiesto una diferencia cada vez más marcada entre los conocimientos de las propiedades de los materiales en las condiciones reales de sollicitación y los métodos en uso para el cálculo de firmes. Existen actualmente varios programas de ordenador que permiten el cálculo de tensiones y deformaciones en cualquier punto de una estructura multicapa. Las hipótesis admitidas sobre el tipo de sollicitación y as

SECCION ESTRUCTURAL TIPO



Explanada de suelo
 seleccionado: C.B.R. > 8 Espesor virtual: 65 cm
 Espesor geométrico: 50 cm
 Índices de equivalencia:

Mezcla asfáltica	2,00
Grava-cemento	1,50
Subbase de zahorra artificial ...	0,75

Secciones de este espesor y composición se han proyectado y construido en algunas de nuestras autopistas. En otros casos se dispone una capa de base asfáltica para aumentar el espesor bituminoso. También es frecuente mejorar con cemento el material de la subbase.

ta más de una extrusión con desplazamiento lateral de la mezcla que de una densificación en la faja de paso de las ruedas. Cada vez tienen más interés los modelos establecidos para estimar la temperatura en un punto del firme a cualquier profundidad. Sin embargo, para su utilización es necesario disponer de datos muy completos tanto de las variables meteorológicas como de las características reológicas del material.

En los estudios de correlación que se han lle-

(*) Al reducirse notablemente el módulo de rigidez de las capas asfálticas del pavimento en los días de temperaturas elevadas, puede llegar a ser inferior que el de las capas de base (caso de las de grava-cemento o grava-escoria), produciéndose el llamado *efecto yunque*.

características elásticas o viscoelásticas de los materiales son cada vez variadas y permiten una mejor adaptación a un caso real. Y sin embargo, los datos de entrada relativos a los módulos de los materiales tienen todavía un carácter sólo aproximado. Es significativo observar cómo los casos estudiados para probar la validez de las teorías elásticas multicapa, en que se comparan favorablemente tensiones y deformaciones medidas y calculadas, han requerido una modificación *a posteriori* de los valores inicialmente supuestos.

Los ensayos convencionales de identificación son inadecuados, pues no están directamente relacionados con los procesos reales de sollicitación o deterioro bajo los efectos de las

capas del tráfico. Hoy se realizan ensayos triaxiales repetidos a diferente frecuencia y temperatura de ensayo, ensayos de flexión y tracción, ensayos de fluencia y relajación, etc. Con ellos se obtienen datos sobre las propiedades elásticas y viscoelásticas de las capas integrantes del firme, pero sobre todo puede estudiarse en primera aproximación la influencia de los diferentes factores que intervienen en estas propiedades.

Los ensayos de laboratorio realizados con mezclas asfálticas han permitido establecer una teoría sobre su resistencia a la fatiga. Los datos obtenidos son todavía muy conservadores, pues no tienen en cuenta el proceso de recuperación del material que tiene lugar entre el paso sucesivo de las cargas de tráfico.

Menos avanzados están aún los estudios sobre la deformación plástica de las mezclas. Junto a los ensayos de laboratorio, tales como los triaxiales o el de la *Wheel-tracking machine*, se utilizan también las pistas de ensayo que tienen cada vez más aplicación para el estudio de secciones estructurales. Son normalmente pistas circulares de varios metros de radio y de ancho superior a un metro sobre las que circulan automáticamente una serie de ruedas, siendo posible variar dentro de ciertos límites la carga y la presión de inflado, y a veces también la temperatura ambiente o la altura de la capa freática. Aun cuando la secuencia de aplicación de las cargas, su velocidad constante y su intensidad única, prefijada, se apartan del caso real, los ensayos en pista permiten obtener de forma acelerada una información valiosa sobre el comportamiento de los firmes. Los ensayos de fatiga mediante pulsadores también son utilizados en este sentido.

Los ensayos para determinar las propiedades de los materiales no se limitan a los laboratorios. Son necesarios también los ensayos *in situ* sobre firmes de carreteras en servicio. Entre los métodos no destructivos se ha generalizado la utilización de la auscultación vibratoria y el estudio de la propagación de ondas superficiales. Para varios tipos de estructuras, la interpretación de las medidas permiten estimar los módulos elásticos y los espesores de las distintas capas. Tienen también aplicación para seguir la evolución de los materiales, estudio de defectos en zonas localizadas y controles *a posteriori*. En todo caso van perfeccionándose, con

las limitaciones antes indicadas, los métodos de dimensionamiento de firmes flexibles.

5. El empleo de modelos.

Las investigaciones realizadas durante los últimos años permiten ya la aplicación de estos métodos con la utilización de hipótesis aproximadas. Los modelos o sistemas elásticos estratificados, adoptados por su simplicidad para explicar el comportamiento del firme, se ha visto que son suficientemente aproximados siempre que se trate de estructuras rígidas (bases asfálticas o estabilizadas con cemento y temperaturas no elevadas), a pesar de que las mezclas asfálticas son un material viscoelástico y los materiales granulares y suelos tienen un comportamiento no lineal. El empleo de modelos más perfectos es todavía difícil de justificar teniendo en cuenta la alterabilidad de los materiales, el coste y duración de los ensayos que exigen, la precisión de alguna hipótesis, etcétera. Pero conviene insistir en que no reflejan el comportamiento de firmes flexibles sometidos a elevadas temperaturas, lo que es una limitación importante en una gran parte de nuestro país y aún más si las cargas de tráfico y las presiones de contacto son elevadas, a lo que se suma desfavorablemente la lenta aplicación de las cargas, cuando suben las rampas nuestros vehículos pesados de baja relación potencia-carga.

Empiezan a utilizarse también los métodos de análisis de sistemas para la gestión de las diferentes actividades relacionadas con los firmes: concepción, proyecto, construcción, conservación, evaluación de su comportamiento e investigación. Se han desarrollado en mayor o menor grado subsistemas estructurales para cada uno de los tres modos de rotura o fallo considerados:

1. Agrietamiento por fatiga asociado a cargas.
2. Deformaciones permanentes asociadas a cargas.
3. Agrietamiento por retracción térmica.

Este enfoque permite un análisis más lógico del dimensionamiento de un firme al poner en evidencia las interrelaciones entre las solicitaciones externas y la respuesta mecánica del

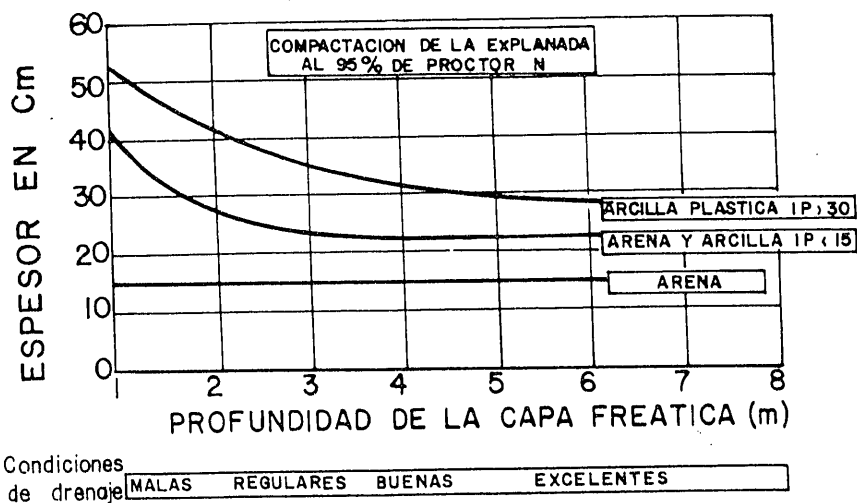
sólido multicapa. Esta metodología es necesaria para aprovechar y coordinar de forma práctica los trabajos teóricos y empíricos realizados hasta el presente, orientar sobre las investigaciones complementarias y llegar finalmente a un método racional, suficientemente amplio para englobar todas las variables, pero sencillo de aplicación mediante el uso de programas de ordenador.

buen comportamiento del firme durante el período de servicio que se le asigne.

Este comportamiento, o sea, las exigencias de estado de la calzada para permitir una rodadura cómoda y segura a las velocidades prescritas para el tramo en cuestión, puede definirse de modo numérico por el índice de servicio a que antes nos referíamos, que para los firmes de alta calidad de autopistas y demás

GRAFICO SIMPLIFICADO DE DIMENSIONAMIENTO

TRAFICO HASTA 150 VEHICULOS PESADOS / DIA



Para dimensionar los firmes de las carreteras secundarias pueden emplearse métodos simplificados, para los que basta una estimación de las características del suelo y de la profundidad de la capa freática. En cuanto al tráfico, se parte de la intensidad media de vehículos pesados. Se toma para ésta un valor máximo, o sea, el que según la prognosis corresponde al final del período de servicio del tramo.

6. Consideración final.

Los métodos de cálculo de firmes y los procesos de caracterización de los datos de partida se han perfeccionado notablemente en los últimos años. Una investigación sistemática bien planeada, y respaldada en algunos países por grandes consignaciones presupuestarias, ha permitido aproximarse a soluciones óptimas en el dimensionamiento de espesores.

Pero el gran crecimiento en el ritmo de construcción de carreteras y autopistas, las también crecientes solicitudes del tráfico y el elevado coste de los firmes exige cada vez soluciones más precisas que nos acerquen a una economía de secciones sin alejarnos de la garantía de un

vías de tráfico pesado debe ser como mínimo de 4,5 y 2,5 en el origen y al final del período asignado al tramo, respectivamente.

El deseado perfeccionamiento de los métodos de cálculo exige que se estimen con mayor precisión los efectos de las sollicitaciones externas y la respuesta mecánica del firme como sólido multicapa. Asimismo, es necesario el perfeccionamiento de los ensayos de determinación de las propiedades elásticas y viscoelásticas de las capas y sus materiales integrantes.

Considerando el aspecto económico del proyecto de firmes, singularmente importante cuando se trata de una obra lineal, debe tenderse a la composición óptima de la sección, o sea, de su distribución en las distintas capas, habiéndose

uenta de los correspondientes coeficientes de equivalencia, de modo que el espesor virtual, que por la aplicación de estos se obtenga, coincida con el que nos haya dado el método empleado para los datos de partida de intensidad de tráfico y capacidad portante de la explanada.

Se recomienda ampliar y mejorar en exactitud estos datos de partida que constituyen la base de aplicación de la metodología vigente y llevar a cabo una auscultación sistemática de los tramos construidos, a los efectos de comprobar la eficacia de los métodos por los que se dimensionó su firme y detectar sus deficiencias o excesos; ambos suponen dispersiones respecto a la sección estricta y, en consecuencia, supondrán también costes adicionales; en el primer caso, por perjuicios al tráfico y gastos prematuros de conservación o reconstrucción y, en el segundo, por un exceso de inversión no justificada en el primer establecimiento.

Una investigación coordinada en la que puedan utilizarse conocimientos y resultados de muchas fuentes, procedentes de un estudio profundo de la teoría elástica de los sólidos multicapas y del empleo de sistemas operativos con programas de ordenador, permitirá definir con más exactitud los métodos de aplicación y las secciones estructurales que con su ayuda se obtengan.

Esperamos que en la IV Conferencia Internacional de Cálculo de Pavimentos Flexibles, que se celebrará en el verano de 1977, se apor-

ten comunicaciones interesantes sobre los avances en este campo de la tecnología de proyecto, que permitirán desarrollar nuevos métodos o perfeccionar los existentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. KUCERA, K.: "Cálculo racional de firmes flexibles". Revista Informes de la Construcción, núm. 514. Instituto Eduardo Torroja. Madrid, 1970.
2. MILLARD, R. S.: "La Road Note 29". Revue général de Routes et Aerodromes, núm. 469. París, octubre 1971.
3. CHANTEREAU, M., y LEGER, Ph.: "Le catalogue des structures types de chaussées de la Direction des Routes". Ibid., núm. 480. París, sept.-oct., 1972.
4. HVEEM, F. N., y SHERMANN, G. S.: "California Method for the structural design of flexible pavements". Segunda conferencia de Ann Arbor, agosto 1967.
5. LLAMAZARES, O.: "Proyecto de firmes flexibles por el método A.A.S.H.O.". REVISTA DE OBRAS PUBLICAS. Madrid, julio 1966.
6. SCRIVNER, F. H.; McFARLAND, W. F., and CAREY, J. R.: "A systems approach to the flexible pavement problems". Texas Transportation Institute, 1968.
7. KRAEMER, C.: "Informe de la Tercera Conferencia Internacional sobre Dimensionamiento de Firmes Bituminosos". Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo. Madrid, octubre 1972.
8. HUDSON, W. R., and McCULLOUGH: "Flexible Pavement Design and Management". Report 139. Highway Research Board. Washington, 1973.

COLEGIO INGENIEROS DE CAMINOS
BIBLIOTECA