

# SOBRE LA METODOLOGIA DEL CALCULO DE FIRMES FLEXIBLES

Por Olegario LLAMAZARES  
GOMEZ

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

*Expone el autor la situación actual de los métodos de cálculo de firmes que se han ido perfeccionando progresivamente a base de estudios empíricos y racionales de su comportamiento bajo las cargas, considerando asimismo la influencia de temperatura y humedad; con tal perfeccionamiento se trata de llegar a secciones estrictas que se aproximen a la solución óptima en el aspecto económico-funcional, obteniendo firmes que se conserven en buen estado durante un largo período, con costes que se aproximen al mínimo, lo que es importante dada la influencia del afirmado en el presupuesto de las obras de carreteras y autopistas.*

## 1. INTRODUCCION

Los métodos de dimensionamiento de firmes han sido objeto de un progresivo perfeccionamiento en los últimos años y continúa la investigación hacia soluciones más estrictas para lo que se conjuga el análisis matemático del sistema multicapa que constituye la sección estructural y los resultados experimentales obtenidos en las pistas de ensayo y en la observación sistemática de tramos de carreteras en servicio.

Se trata con ello de acercarse a la seguridad y a la economía, tema doblemente importante, tanto por la calidad y duración que requieren los pavimentos de las carreteras y autopistas como por el carácter de obra lineal que éstas tienen, en la que un ahorro justificado en la sección del firme puede reducir considerablemente la inversión presupuestaria de la obra en cuestión.

Pero no puede ignorarse que la investigación exhaustiva de la sección óptima de un firme es, desde el punto de vista estadístico y desde el punto de vista económico, una labor ardua y compleja, ya que son muchos los datos de partida que precisan las hipótesis de proyecto, si quieren aproximarse a la realidad; tales datos varían notablemente de un país o de una región a otra por circunstancias geotécnicas, de tráfico y clima. Dentro de un mismo emplazamiento de trazado y del tipo de firme que en él se adopte hay que considerar una amplia variación de circunstancias como son los cambios estacionales

higrotérmicos, la posible falta de homogeneidad del suelo de la explanada y las modificaciones que sufra el material granular bajo los fenómenos de atricción que pueden producirse por el efecto del tráfico pesado.

El estudio requiere una amplia casuística motivada por la variación factorial de elementos de diversa índole que influyen en el comportamiento del firme durante su período de servicio. Tal casuística debe ser contemplada en lo posible por los métodos de cálculo de espesores: los empíricos o semiempíricos basados sobre ensayos y los racionales que estudian las capas considerando sus características elásticas o viscoelásticas de acuerdo con las hipótesis de Boussinesq y su desarrollo por Burmister.

La complejidad de la metodología ha ido creciendo a medida que se ha avanzado en el conocimiento de causas y efectos: 1) comportamiento reológico de las capas asfálticas; 2) investigación de los fenómenos de fatiga por repetición de las cargas; 3) coeficientes de equivalencia de espesores de las capas dependientes de su calidad y en particular de su cohesión.

Se trata de concretar asimismo todo lo posible en lo que respecta a la prognosis de tráfico, en este caso en el **axle-load spectra** o estimación y clasificación de las cargas durante el período de servicio que se le asigna al tramo que se proyecta. En cuanto a los condicionantes del estado tensional se ha avanzado notablemente en la de-

terminación de módulos de elasticidad y otros índices representativos de la resistencia a las deformaciones elásticas y viscoelásticas.

## 2. EL PROYECTO DE FIRMES FLEXIBLES

En los firmes de carretera integrados por las capas de pavimento, base y sub-base se producen, bajo el efecto de las cargas del tráfico, tensiones y deformaciones y la respuesta mecánica a este fenómeno, o sea la magnitud y dirección de tales tensiones y deformaciones dependen de la calidad de las respectivas capas, condicionada por su situación en la sección.

En el proyecto de la sección estructural como en el de cualquier otra pieza sometida al efecto de las cargas deben considerarse 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

## SOBRE LA METODOLOGIA DEL CALCULO DE FIRMES FLEXIBLES

de la sección y explanada (influencias de temperatura, humedad, etcétera);

— criterios de comportamiento o **índice de servicio** que se fijan para el pavimento.

En consecuencia hay que recurrir a supuestos y simplificaciones que permitan llegar a soluciones válidas. Tales supuestos básicos, las simplificaciones en el planteamiento del problema y los resultados que a partir de ambos se obtienen deben ser controlados en obra para que puedan aceptarse con suficiente grado de fiabilidad y constituyan soluciones de aproximación aceptables 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 sollicitaciones 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 de tecnología vial más avanzada 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 todo caso el propósito de un método o sistema analítico de dimensionamiento de firmes es proyectar a partir de los datos disponibles una sección que se mantenga con el **índice de servicio**

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

La complejidad del problema llevó a investigadores y proyectistas a establecer sistemas operativos que empezaron a utilizarse en los Estados Unidos a finales de la década de los 60; en ellos las variables de entrada se pueden clasificar en ocho grupos: 1) caracteres de identificación de suelos y materiales; 2) factores climáticos; 3) nivel de servicio en el tramo, dependiente 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 y 8) programas de control y varios.

Para el dimensionamiento de un firme se parte de una intensidad de tráfico previsible, unas 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 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 en su efecto destructivo 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 fijan las prescripciones técnicas particulares de la obra.

(\*) **Present Serviceability**, Index índice cifrado del estado de un pavimento que se definió para estimaciones del AASHO Test.

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 20 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 centímetros de la explanada, el CBR empleado en el cálculo de espesores se reducirá del 50 al 30 % 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 trata 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.

### 3. LA CATALOGACION DE SECCIONES ESTRUCTURALES

No es difícil llegar al convencimiento de que los ábacos y curvas de los métodos empíricos y semi-empíricos en uso, no ofrecen una

## SOBRE LA METODOLOGIA DEL CALCULO DE FIRMES FLEXIBLES

garantía suficiente para afinar en la adopción de secciones estrictas por una serie de concausas que ya han sido comentadas; en efecto, hay notables variaciones y discrepancias en cuanto a datos de tráfico —con la dificultad de estimar la distribución probable de ejes, con sus cargas, que vayan a utilizar el carril en el período considerado— características de suelos y materiales, climatología, etc., entre los ensayos en pista que sirvieron de base al método en cuestión y las condiciones peculiares del tramo cuyo firme se proyecta.

También el concepto de **equivalencia de espesores** por el que hay que pasar para definir la composición de la sección, a partir del espesor virtual obtenido, presenta amplios límites de variación a partir de los tipos de ligantes y áridos empleados: forma, granulometría y rugosidad de éstos, penetración, dosificación y susceptibilidad térmica en los betunes. En todo caso cabe decir que hoy este concepto se acepta de modo muy matizado en los diferentes países y en el fondo por razones de comodidad de cálculo, en espera de mejores métodos.

Existe, pues, cierta falta de exactitud en la metodología disponible que abona el empleo de un catálogo de secciones estructurales que por tales consideraciones fue adoptado primero en Alemania y Francia. Esta normalización se presentó en el XIV Congreso de la AIPCR (Praga, 1971), con una gran acogida y ha sido adoptada en diversos países entre ellos en Inglaterra complementando a la conocida **Road Note n.º 29** del Road Research Laboratory a través de instrucciones dirigidas a los Servicios que recomiendan determinadas secciones dentro de las que el proyectista podría obtener aplicando las curvas de dimensionamiento de la citada Nota.

La nueva Instrucción de la Dirección General de Carreteras(\*) también se ha hecho en forma de catálogo que brinda una gama de posibles soluciones entre las que se elegirá la más adecuada en base a

(\*) Firmes flexibles. Norma 6.1. IC aprobada por Orden Ministerial de 12 de marzo de 1976.

consideraciones técnicas y económicas sobre el caso en cuestión. Los factores de dimensionamiento son el tipo de tráfico y la capacidad portante de la explanada. No se consideran condiciones climáticas ya que el efecto-helada se supone puede producirse en zonas a más de 1.500 metros de altitud, lo que será muy poco corriente para carreteras de nuestro país; en caso de que el proyecto correspondiera a una de estas zonas deberá realizarse el correspondiente estudio que, sobre todo en carreteras de tráfico ligero o medio, puede ser determinante del espesor de la sección. Se ha considerado que la superficie de la explanada está como mínimo a 60 centímetros de la capa freática; para ello cuando sea preciso se elevará la rasante, se profundizarán las cunetas y/o se establecerá el necesario sistema de subdrenaje.

En la Norma se parte de que los materiales y mezclas que se empleen en las secciones dimensionadas se adapten al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes.

Señalamos otra de las ventajas de la catalogación que es la de facilitar el análisis económico comparativo entre las posibles alternativas considerando los materiales locales o yacimientos de cierta proximidad. Esta facilidad persiste para la comparación con los firmes rígidos —preceptiva para tramos de autopistas o carreteras de tráfico pesado de más de 10 kilómetros de longitud— ya que el catálogo de

éstos (Norma 6.2 IC) parte de los mismos factores representativos de tráfico y explanada.

El catálogo de referencia nos parece suficiente para la elección de la sección y por ahora —mientras no se llegue a un mayor perfeccionamiento de los métodos— no merece la pena que el proyectista actúe por su cuenta en estudios de excesiva profundidad y cálculos de pretendido rigor, cuando hay que aplicar dudosos coeficientes de equivalencia y ábacos en un empirismo que no puede recoger la amplia casuística del problema.

En la normalización del catálogo figuran tres grupos de secciones que se definen por el tipo de base:

- A. con base granular
- B. con base bituminosa
- C. con base de grava-cemento

En las secciones A se emplearán siempre sub-bases también granulares. En las de base bituminosa o de grava-cemento pueden emplearse indistintamente sub-bases estabilizadas o granulares; en cuanto a estas últimas para los tramos de tráfico más pesado se exigirá zahorra artificial o sea de machaqueo en su totalidad.

No nos detendremos en la definición de los factores de dimensionamiento limitándonos simplemente a indicar que se prevén cuatro categorías de tráfico definidas por el número acumulado de ejes equivalentes al eje patrón de 13 toneladas, máximo autorizado por nuestro Código.

Categorías de tráfico	Designación	Número acumulado de ejes
T 1	Pesado	$4 \cdot 10^6 - 10^7$
T 2	Medio alto	$8 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^6$
T 3	Medio bajo	$8 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^5$
T 4	Ligero	$10^4 - 8 \cdot 10^4$

El número de ejes se refiere al que se estima pasará por un carril en el período de proyecto que será de 20 años salvo indicación en contrario de la Orden de Estudio.

En la explanada se consideran tres categorías definidas por un índice CBR creciente, con los intervalos siguientes: entre 5 y 10, entre 10 y 20 y mayor de 20.

En el proceso operativo en que

se basó el dimensionamiento de secciones del catálogo español se tuvo en cuenta la citada **Road Norte n.º 29** y los métodos del Instituto del Asfalto, AASHO y Shell, considerando asimismo la experiencia nacional en el proyecto de firmes en los últimos 20 años, que es el período en que se han dimensionado las secciones por consideraciones mecánicas utilizando la evolucionante

## SOBRE LA METODOLOGIA DEL CALCULO DE FIRMES FLEXIBLES

metodología puesta a punto en los países más avanzados.

Las secciones obtenidas fueron objeto de revisión introduciéndose algunas correcciones en las que daban resultados más desfavorables para el conjunto de los métodos de comprobación. Por último se hizo una comprobación sistemática por un equipo de alumnos de la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos de Madrid, bajo la dirección del profesor Krämer en la que se incluyó un proceso de comprobación por ordenador de acuerdo con el modelo elástico Chevron 5L que considera los fenómenos de fatiga por repetición de las cargas. En la conferencia de Carlos Mora cuya referencia figura a pie de página (\*) se incluye un estado comparativo de los resultados de las diversas secciones estructurales del catálogo.

### 4. ESTUDIO COMPLEMENTARIO SOBRE EL ESTADO TENSIONAL

Si bien las secciones propuestas en el catálogo español son aparentemente equivalentes como respuesta a unas condiciones de tráfico y capacidad portante de la explanada, cabe un análisis de optimización entre ellas a la hora de decidir la que se vaya a adoptar para el proyecto en cuestión.

Ayudar a este análisis selectivo es el propósito del interesante estudio realizado por la Dirección General de Carreteras (\*\*), cuyo objeto es estimar las tensiones y deformaciones máximas que se producen en las secciones consideradas cuando pasa el eje de patrón de 13 toneladas. Asimismo se estudia la fatiga de las distintas capas antes enumeradas y en la explanada de apoyo. Veamos las hipótesis de cálculo.

La estructura de la sección se ha

(\*) C.MORA TORRES, **Estructuras de firmes flexibles en calzada y arcén.** Ciclo de conferencias sobre la nueva normativa española de firmes de carreteras. Madrid, 1976.

(\*\*) KRAEMER, S y MARTINEZ DE ARAGON, A. **Análisis de tensiones y deformaciones y estudio de la fatiga de las secciones estructurales de firmes flexibles de la Norma 6.1. IC.** Madrid, 1977.

E 1			E 2		E 3		
C-111 	C-112 	C-113 	C-121 	C-122 	C-131 	C-132 	T 1
C-211 	C-212 		C-221 	C-222 	C-231 		T 2
C-311 	C-312 		C-321 	C-322 	C-331 		T 3
C-411 	C-412 		C-421 	C-422 	C-431 	C-432 	T 4

El catálogo de secciones estructurales se ha adoptado en muchos países por su facilidad de empleo y su suficiente aproximación, en general. En la Norma española se parte de cuatro categorías de tráfico (T) y tres de explanada (E); la elección de la sección se hace con ayuda de cuadros de doble entrada como el que reproducimos, que corresponde al Grupo C —secciones con base de gravacemento—.

asimilado a un sistema multicapa constituido por materiales homogéneos, elásticos e isótropos, solicitados por una carga vertical de 6,5 t que es la mitad de la del eje patrón y una presión de contacto de la rueda de 9 kp/cm<sup>2</sup> que es la máxima autorizada; se supone para el círculo de aplicación de la carga un radio de 15,2 centímetros. Se ha prescindido de las tensiones tangenciales que pueden producirse por frenado, aceleración o movimiento en las curvas, lo que tendrá muy poca importancia sobre todo en las carreteras en campo abierto y solo afecta a la capa de rodadura cuya calidad ya se prevé de acuerdo con la intensidad de tráfico.

Se han calculado las secciones para circunstancias climáticas extremas bajo rueda sencilla y ruedas gemelas. Los valores calculados son las tensiones vertical y radial, la deformación acumulada en el eje de simetría (caso de ruedas gеме-

las) y las deformaciones unitarias vertical y radial.

Una de las mayores dificultades con que se tropieza en el estudio del estado tensional del sólido multicapa es la adopción del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson para las distintas capas.

Por lo que se refiere a la explanada el módulo se puede relacionar con su índice CBR mediante la expresión:

$$E = 100 \text{ CBR kp/cm}^2$$

Para los tres tipos de explanada que se consideran E1, E2, y E3, los módulos son 500, 1.000 y 2.000 kilopondios por centímetro cuadrado correspondiendo el último a explanadas estabilizadas con cemento o explanadas naturales con CBR superior a 20. El coeficiente de Poisson puede variar entre 0,5 y 0,3 según la cohesión del suelo.

En cuanto a los materiales tratados con cemento, las tensiones a que pueden verse sometidas las ca-

## SOBRE LA METODOLOGIA DEL CALCULO DE FIRMES FLEXIBLES

pas bajo cargas muy pesadas frecuentemente superan el 50 % de la tensión de rotura y en consecuencia no es correcta la hipótesis de elasticidad lineal. En la cara inferior se producen elevados esfuerzos de flexotracción con microfisuración en una primera fase, que modifica el estado tensional, produciéndose después mayores deformaciones por tracción. Por esta circunstancia se adoptan valores reducidos del módulo de elasticidad y los que se manejan en el cálculo son diferentes según el tipo de tráfico a que va a estar sometida la sección. Para el suelo-cemento, por esta consideración el valor máximo es 15.000 kilopondios por centímetro cuadrado (tráfico ligero) y 4.000 kp/cm<sup>2</sup> (tráfico pesado).

Las capas de grava-cemento presentan mucho mayor rigidez tanto por el propio conglomerante, como por la naturaleza del árido y su imbricación, pudiendo equipararse al **lean concrete** u hormigón pobre de las normas inglesas, utilizado también en España en las autopistas del Norte. Teniendo en cuenta la reducción antes apuntada se toman módulos de 80.000, 40.000 y 10.000 kp/cm<sup>2</sup> teniendo en cuenta por un lado la capa en que se apoya —que puede permitir en menor o mayor flexotracción según su rigidez— y el efecto protector del revestimiento bituminoso que va a llevar encima.

En las capas bituminosas lo más temible son las deformaciones termoplásticas que como antes decíamos se producen en los días cálidos del verano, bajo la lenta aplicación de las cargas de los ejes pesados. Esto ha obligado a unas mezclas más rígidas con árido cuidadosamente especificado, en naturaleza y forma, betunes más duros y correcta relación **filler**-betún. Evidentemente en el estado tensional influye el gradiente térmico pero no se puede tener en cuenta para el cálculo por la complicación que introduciría la subdivisión en capas.

Si bien se han llevado a cabo con gran rigor, diversas investigaciones sobre las mezclas bituminosas respecto a su respuesta en función de los materiales y fórmulas de trabajo, solo puede asignarse de

modo aproximado módulos de elasticidad a los distintos tipos de mezclas.

La temperatura reduce considerablemente el módulo y en consecuencia deben tomarse para el cálculo tensional valores de 10.000 kilopondios por centímetro cuadrado en invierno; esto para las capas de rodadura e intermedia. En las capas de base más aisladas de los efectos térmicos estos valores pasan a 20.000 y 100.000 kp/cm<sup>2</sup>.

Los tratamientos superficiales no se consideran, a efectos de cálculo, como capa asfáltica sino como incorporada a la base incrementando el espesor de ésta en 2,5 centímetros; tan pequeña es su aportación a la capacidad portante de la sección estructural que la hipótesis es correcta.

Se significa el interés del estudio de la fatiga, fenómeno producido por la repetición de las cargas del tráfico, considerando las deformaciones radiales de tracción en la cara inferior de las capas asfálticas y las tensiones radiales de tracción en la cara inferior de las capas estabilizadas con cemento.

Asimismo existe un efecto acumulativo de pequeñas deformaciones irreversibles en la explanada que pueden reflejarse en la capa de rodadura, dando lugar a roderas diferentes a las que antes citábamos causadas por la termoplasticidad de las mezclas bituminosas.

En el trabajo que comentamos se llega a unas conclusiones respecto a las secciones propuestas con la Norma 6.1. de la Instrucción de Carreteras.

De acuerdo con los resultados del cálculo de tensiones y deformaciones y el estudio de la fatiga se llega a la consecuencia de que dos de las secciones estructurales están infradimensionadas, 14 superdimensionadas y las restantes 49 están correctamente dimensionadas para la explanada y el tráfico supuesto, o bien ligeramente infra o superdimensionadas. Estos resultados son en general satisfactorios y confirman la validez del catálogo.

Las secciones infradimensionadas tienen base granular o bituminosa y un espesor de revestimiento bituminoso aparentemente insuficiente para la categoría de tráfico a

que corresponden. Las secciones superdimensionadas tienen base de grava-cemento o bituminosa con sub-base de suelo-cemento y ponen de manifiesto la elevada capacidad portante de estas sub-bases; algunas de estas secciones son recomendables para su empleo con tráficos muy pesados que se salen de los límites considerados en el catálogo.

Los resultados obtenidos en este estudio del estado tensional constituyen una valiosa información complementaria sobre las características resistentes de las secciones y permiten la comparación estructural entre secciones equivalentes. Sin embargo, no debe olvidarse que se trata de un análisis fundamentalmente cualitativo, por lo que una manipulación de detalle de los valores numéricos obtenidos puede conducir a conclusiones erróneas. Tanto el modelo elástico de cálculo como la sollicitación y los parámetros elásticos medios elegidos para definir las distintas capas tienen limitaciones evidentes respecto a la realidad de cada caso concreto.

### 5. LA IV CONFERENCIA INTERNACIONAL DE ANN ARBOR

La primera conferencia internacional sobre el proyecto estructural de pavimentos asfálticos, celebrada en la Universidad del Estado de Michigan (Ann Arbor). En 1962 se convocó a modo de foro mundial en el que se discutieran los conceptos de las secciones en cuanto a sus exigencias portantes, la respuesta mecánica del sólido multicapa y todos los factores determinantes de su comportamiento.

Posteriormente el análisis del cúmulo de datos procedentes del ensayo AASHO y de otros tramos experimentales, así como el avance en el proceso de cálculo de los métodos de base racional, brindaron a los especialistas una amplia gama de temas de discusión que aconsejó celebrar una segunda conferencia que tuvo lugar en la misma sede universitaria cinco años después.

Las conclusiones de estas Conferencias fueron por un lado poner énfasis en proseguir el estudio teó-

## SOBRE LA METODOLOGIA DEL CALCULO DE FIRMES FLEXIBLES

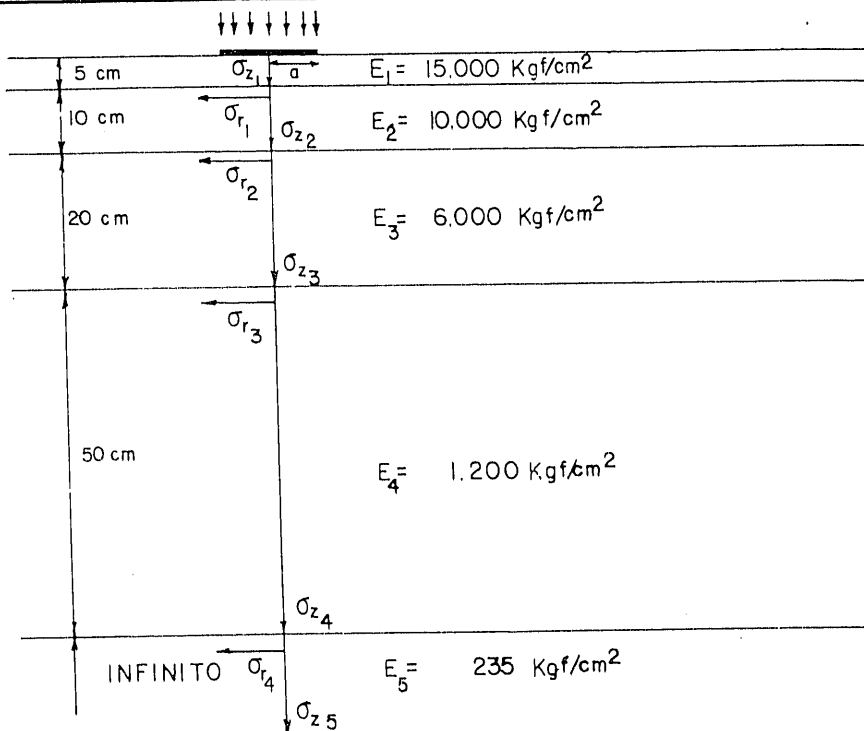
rico del estado tensional del firme y señalar la urgente necesidad de establecer correlaciones entre los resultados deducidos de la teoría y los comportamientos de las correspondientes secciones en la práctica. Los puntos a considerar comprendían el espesor del firme, los criterios de su composición en capas de diversas características físicas y los costes correspondientes con vistas al análisis económico y a la optimización de la sección.

A los efectos de informar sobre estos trabajos de correlación de la metodología empírica se celebró en Londres, en 1972, la 3.<sup>a</sup> Conferencia en la que pese a la profusión de ponencias y comunicaciones presentadas no se llegó a una coordinación satisfactoria.

Se mantiene la periodicidad de estas reuniones y nos referimos en el presente epígrafe a la celebrada en Ann Arbor en agosto de 1977, en la que además de llevar a cabo un resumen ordenado de las tres conferencias anteriores se incorporan los resultados de nuevas investigaciones presentándose los métodos de dimensionamiento más importantes en su última versión.

Uno de los métodos que ha sido objeto de mayor perfeccionamiento en los últimos 15 años es el de la Sociedad Shell constituido originalmente por las curvas de proyecto de 1963; este método ha sido progresivamente ampliado incorporando nuevos parámetros que se han considerado decisivos para una mayor exactitud en el dimensionamiento. El método se basa en un modelo en el que la sección estructural del firme se considera como un sistema multicapa donde las capas, que se suponen homogéneas e isotrópicas, trabajan en régimen de elasticidad lineal y se definen por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson. Se parte de unos supuestos sobre las deformaciones máximas admisibles en la explanada y capas integrantes del firme para que puedan resistir un número determinado de aplicaciones de la carga. Se fijan unos valores máximos para la deformación por flexión en las capas asfálticas y deformación vertical en la explanada.

Para la aplicación del método



Sección calculada por el método ruso del Prof. Ivanoff, basado en el estudio de tensiones en el sólido multicapa (firme y explanada), en la que figuran los módulos de elasticidad de las distintas capas.

Shell perfeccionado se emplea un programa de ordenador que considera tensiones, deformaciones y desplazamientos, a que dan lugar las sollicitaciones verticales y horizontales en los diversos puntos de la sección. Los módulos de la explanada y capas granulares se derivan de los resultados del ensayo AASHO y los correspondientes a las capas asfálticas de amplias series de ensayos de laboratorio. Se han definido unas secciones-tipo combinando capas granulares y asfálticas para diferentes condiciones climáticas —que se caracterizan por un coeficiente de temperatura media anual— y capacidad portante de la explanada. El tráfico como en todos los métodos americanos modernos se caracteriza por el número de aplicaciones de ejes reducidos al patrón de 8,2 toneladas (18.000 libras) (\*).

Se presentaron en otras ponencias nuevos métodos que incluyen procedimientos para determinar la

(\*) En la ponencia **The Shell Method** incluida en los **proceedings** de la IV Conferencia Internacional sobre proyecto de pavimentos asfálticos Ann Arbor, 1977, (págs. 39 a 66) figuran las curvas de proyecto, tablas y gráficos auxiliares.

resistencia a la fatiga por la repetición de las cargas y la acumulación de deformaciones permanentes, en todo caso con sugerencias y contrastaciones prácticas indispensables para la transformación funcional de los métodos racionales. Se trata de considerar unos supuestos válidos representativos de los efectos reales y de las circunstancias específicas de los distintos casos que pueden concurrir en un pavimento sujeto a una amplia gama de parámetros y sollicitaciones externas. En la consideración de esta casuística se ha progresado mucho por la posibilidad de controles sistemáticos con ayuda de aparatos de medida de gran precisión. Pueden citarse como ejemplo las campañas realizadas en Italia en los últimos cinco años en el control de las autopistas del IRI, en las que se ha comprobado el comportamiento de las secciones dimensionadas por un método semiempírico que conjugaba las recomendaciones de la AASHO con el método ruso de Ivanoff. Se analizan los parámetros derivados de tráfico y clima, características mecánicas de las distintas capas y módulos de deformación viscoplástica en la base y pavimen-

## SOBRE LA METODOLOGIA DEL CALCULO DE FIRMES FLEXIBLES

to asfálticos, causa de las huellas de la rueda con extrusión lateral. Se relacionan estas deformaciones con el límite de número de pasadas a que pueden empezar a producirse los fenómenos de fatiga con la subsiguiente degradación del firme, a la que contribuye una concentración de tensiones debida a la irregularidad superficial.

El método ruso antes citado ha sido objeto de sucesivos perfeccionamientos con los que se ha tratado de llegar a determinar secciones estrictas en espesor total del firme y calidad de las capas que lo integran. Se consideran cada una de las capas del sistema teniendo en cuenta una deformación máxima por flexión que no llegue a producir el agrietamiento por fatiga; en las capas inferiores y explanada se considera también el esfuerzo cortante.

El estudio de tensiones del sólido multicapa (firme y explanada) se lleva a cabo de acuerdo con la teoría de la elasticidad. Se concede especial importancia al efecto-helada y a la capacidad de drenaje, para evitar en lo posible la imbibición y reducción, a ella debida, de la capacidad portante en la época de deshielo; asimismo se relaciona el nivel freático con la profundidad de penetración del hielo.

El nuevo método considera los siguientes parámetros que inciden en el comportamiento de la sección estructural: 1) intensidad de tráfico por carril en ejes equivalentes, 2) tipo de suelo de la explanada, 3) condiciones climáticas e hidro-

lógicas (se ha hecho una clasificación por zonas geográficas), 4) propiedades de los materiales empleados en las distintas capas y 5) tensiones y deformaciones admisibles.

Incluimos como ejemplo una sección tipo que corresponde a un tráfico de 3.000 ejes equivalentes/día por carril indicando los módulos de las distintas capas:

5 cm de mezcla asfáltica  
8 cm de mezcla asfáltica  
20 cm de grava-cemento  
50 cm de arena  
explanada

E1 15.000 kgf/cm<sup>2</sup>

E2 10.000 kgf/cm<sup>2</sup>

E3 6.000 kgf/cm<sup>2</sup>

E4 1.200 kgf/cm<sup>2</sup>

E5 235 kgf/cm<sup>2</sup>

### 6. CONSIDERACION FINAL

En lo que antecede hemos tratado de exponer el estado de la metodología del cálculo de pavimentos flexibles que se ha ido perfeccionando hacia un dimensionamiento de secciones estrictas sobre análisis empíricos y racionales. Ambos deben conjugarse y el principal valor de estos últimos, que suponen una aproximación teórica de problema, reside en la interpretación y extrapolación de los datos obtenidos por la observación sistemática de firmes en servicio y sobre todo de los grandes ensayos, con su amplia variación factorial.

No puede olvidarse una continuidad que enlaza proyecto, comportamiento y necesidad de conservación. El proyectista de firmes solo cumple parcialmente su función si no ve más allá de un horizonte limitado. En todo caso debe proponer una sección estructural de buen comportamiento bajo las cargas previsibles durante un período de servicio que puede variar entre amplios límites, considerando la importancia del tramo en cuestión y la conveniencia económica de refuerzo periódicos, en orden de evitar una inversión excesiva y poco rentable de primer establecimiento; esto principalmente para las carreteras de tráfico ligero o medio.

Hay una información básica, a la que nos hemos referido, de la que debe partir el proyectista para el dimensionamiento y composición de la sección considerando la optimización en el aspecto económico-funcional. Los catálogos que actualmente se usan pueden ser suficientes en algunos casos y en otros complementarse con un estudio del estado tensional para profundizar en el análisis selectivo entre soluciones aparentemente equivalentes.

En todo caso los métodos de cálculo siguen progresando y es preciso estar atento a sus modificaciones de perfectibilidad por lo que puedan suponer para la duración en buen estado de los pavimentos y el ahorro en sus costes lo que, como decíamos al principio, tiene un gran peso en el presupuesto de las obras de carreteras.