

EL DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES FLEXIBLES EN LA MODERNA TECNICA DE CARRETERAS

Por OLEGARIO LLAMAZARES GOMEZ

Ingeniero de Caminos.

De gran interés consideramos la exposición que hace el autor sobre los métodos en uso para el cálculo de firmes flexibles. Este tema, fundamental en la técnica de carreteras por su importancia en el aspecto técnico y económico, se trata con detalle y claridad considerando los procedimientos científicos y experimentales de mayor aplicación.

1. IMPORTANCIA DEL PROBLEMA

El dimensionamiento de firmes, de modo que los espesores adoptados correspondan con la mayor aproximación posible a las exigencias del tráfico previsto, naturaleza de la explanada y características climáticas del lugar de emplazamiento, puede decirse que es el problema fundamental en el proyecto de carreteras. El capítulo del presupuesto que corresponde al afirmado es, salvo en casos excepcionales, el más importante, y por tanto, el proyectista debe tender a llegar a la solución óptima en el aspecto económico-funcional.

En la carretera, obra lineal con grandes longitudes que exigen grandes desembolsos, el criterio de estimación del coeficiente de seguridad debe ser diferente que en otro tipo de obras, refiriéndonos, claro está, a los firmes en los que el fracaso se limita a fisuraciones o asentos que no entrañan peligro de vidas humanas, como el hundimiento de un puente o la rotura de una presa.

La consideración económica, tan ligada siempre al problema técnico, exige se reduzca al mínimo el coeficiente de seguridad adoptado en el cálculo de firmes, y de aquí la importancia de disponer de métodos de precisión que aseguren la suficiencia de los espesores con un pequeño margen de garantía.

La revisión y mejora de métodos de cálculo de firmes es una gran preocupación que ha ido apareciendo en todos los países con el incremento del tráfico y hoy existe con carácter dominante en todos los Departamentos de Carreteras. La cooperación internacional, signo de la época en que vivimos, en lo que se refiere a las técnicas de paz, favorece el desarrollo de los procesos teóricos y experimentales, y recientemente, por acuerdo tomado en el Congreso de Río de Janeiro, se ha creado un Comité Técnico Permanente, encargado de registrar y coordinar los resultados que se obtengan en los diversos países sobre el comportamiento de los tramos de nueva construcción y estudiar los métodos de cálculo que se aplican para su dimensionamiento.

Los métodos de cálculo en uso son de diversos tipos, cubriendo una gama de rigor y garantía que

va desde el empirismo simplista al cálculo racional, beneficiándose entre ambos extremos de los resultados que se han ido obteniendo en los ensayos de laboratorio, en las pistas de experimentación y en las carreteras en servicio.

Así se ha llegado a métodos semiempíricos o semiexperimentales; tanto éstos como los puramente empíricos, tienen sus aplicaciones específicas cada vez más definidas, dependiendo de que se trate de un dimensionamiento previo en primera aproximación, del espesor definitivo a establecer en obra o de la mayor o menor importancia de ésta.

El espesor de un firme para un tráfico dado depende de la resistencia de la explanada que va a soportarlo, lo que a su vez es función de la naturaleza del suelo y de su grado de compactación. Con menor trascendencia intervienen las características climáticas: el efecto del hielo podrá preocupar en nuestro país en contadísimos casos, y en cuanto a la humedad, ya se parte en el cálculo de unas condiciones desfavorables, las cuales no deben sobrepasarse gracias a un adecuado sistema de drenaje.

Esta concepción del dimensionamiento, algo simplista por ser exclusivamente cuantitativa, ha variado después del ensayo WASHO, donde se apreció el llamado *efecto-losa*, en las capas que por su estructura tienen una cohesión que les permite soportar tracciones.

Con el descubrimiento de este fenómeno, el espesor total de un firme flexible ha perdido su carácter de magnitud intangible. Estas capas de alta cohesión pueden computarse en el espesor del firme por un virtual superior al puramente geométrico, interviniendo, por tanto, una estimación cualitativa que el método de California y los métodos empíricos no habían considerado, al menos con un criterio claro y bien fundamentado.

Únicamente en el método del estabilómetro de Hveem se había introducido ya el coeficiente de cohesión, con objeto de prever las propiedades favorables para el reparto de cargas de las bases de suelocemento y los revestimientos de hormigón asfáltico, en los que el módulo de elasticidad es superior al de las capas de macadam y zahorra

El empleo cada vez más frecuente de pavimentos y bases de alta calidad en las que se produce el efecto-losa, permitiendo con ello la reducción de espesores, induce a una apreciación cuantitativa lo más exacta posible de este efecto, lo que invalida por tanto, en cierto modo, a los métodos clásicos.

Surge, por tanto, la necesidad de nuevos procedimientos que se vayan adaptando más a los actuales conocimientos de las propiedades mecánicas de pavimentos y suelos, sobre los que cada año que pasa se tiene una información más completa, a pesar de la gran complejidad del problema (distribución de tensiones en un sólido multicapa, fenómenos de fatiga, influencia de la humedad, etc.), gracias a la esforzada labor de investigación en la carretera y en el laboratorio que se está llevando a cabo en los países desarrollados.

Dos distintas tendencias se manifiestan actualmente en el mundo ante el problema que en este trabajo consideramos; tendencias que en cierto modo responden a una cultura, a unos medios y a una organización general de la técnica, peculiares de los países que los propugnan.

En Europa, principalmente con las escuelas francesa y rusa, se tiende a los métodos deductivos que desarrollan racionalmente hipótesis aproximadas del fenómeno real, habiéndose creado una disciplina de gran rigor científico, como es la *Mecánica de la Carretera*.

En América, la orientación actual es hacia los métodos inductivos apoyados sobre la estimación de propiedades reales, para lo que disponen de un gran lujo de medios con aparatos de medida perfeccionadísimos y muy completos, y tramos de ensayo donde registran el comportamiento de firmes de diferentes tipos y espesores. Ello permite establecer correlaciones que sirvan para mejorar los métodos experimentales.

Después de esta exposición previa, pasaremos revista a los más caracterizados métodos de dimensionamiento de firmes, refiriéndonos en el presente trabajo a los denominados flexibles, o sea aquellos en que no existe una discontinuidad marcada en la rigidez de las distintas capas que los integran.

2. CALCULO RACIONAL DE FIRMES

2.1. Antecedentes del problema.

Los métodos científicos que determinan el espesor del firme a través del estudio racional del régimen de tensiones y deformaciones en un sólido multicapa, se han perfeccionado considerablemente en los últimos años.

Un firme flexible está integrado por varias capas superpuestas, prácticamente sin resistencia a la tracción — salvo en los revestimientos de hormigón asfáltico y en algunos tipos de base (de suelo-cemento,

de escoria de horno alto) que pueden equipararse a losas de hormigón pobre —, a través de las cuales se transmiten las cargas del tráfico a la explanada. Las capas superiores deben ser más resistentes y menos deformables que las inferiores, y el fracaso por agrietamiento o rotura de cualquiera de ellas o por hundimiento del terreno subyacente sobreviene cuando las deformaciones elásticas o plásticas pasan de un valor crítico.

Estos son los principios para el estudio racional de los firmes flexibles, para el que hasta la fecha se han propuesto varios esquemas elásticos de su estructura, que por una serie de causas bien conocidas: la falta de homogeneidad y de isotropía, la variación de rigidez en las distintas capas, la deformación plástica que produce la acumulación de las cargas repetidas, etcétera, no ofrecen más que una correlación aproximada con el problema real de una calzada en servicio. La primera hipótesis considerada fué la de Boussinesq [1], que admite que el firme y el terreno subyacente constituyen un medio elástico indefinido.

La experiencia ha confirmado, en muchos casos, que en los firmes integrados por capas de poca cohesión, la ley de reparto de tensiones y deformaciones se adapta sensiblemente a la hipótesis citada. No obstante, el macizo firme-explanada presenta una gran heterogeneidad, llegando a una diferencia en los módulos de elasticidad, cuyo valor puede ser cien veces superior en la capa de revestimiento que en el terreno natural de apoyo. Este es el caso que se presenta cuando se establece una capa de rodadura con pavimentos asfálticos de alta calidad que influye notablemente en el reparto de tensiones, reduciendo la influencia de éstas sobre las capas inferiores respecto a la ley que correspondería a un sólido homogéneo sin cohesión y teniéndose así la justificación teórica del ya mencionado efecto-losa que permite reducir el espesor del firme.

Posteriormente a la hipótesis de Boussinesq, dió a conocer Burmister [2] su teoría, cuyo esquema considera dos sólidos elásticos: una capa de espesor finito que se apoya sobre un macizo semi-infinito.

Una variante de este esquema elástico es la solución propuesta por Hogg, que supone que la capa superior trabaja como placa rígida y, por tanto, no tiene aplicación para el cálculo de firmes flexibles.

Estos métodos científicos exigen complicados y laboriosos procesos de cálculo de escaso interés para el ingeniero de carreteras; quédese esto para el investigador, del que el técnico espera un método lo más perfeccionado posible que permita que un firme de carretera pueda calcularse como una viga o un arco.

2.2. El sistema tricapa de Jeuffroy y Bachelez.

Basándose en la hipótesis de Burmister, los ingenieros franceses Jeuffroy y Bachelez propusieron, en 1955, su método de cálculo racional de pavimentos,

desarrollado sobre un esquema tricapa, para el que consideran la siguiente constitución: el revestimiento, el cemento (integrado por base y sub-base) y el terreno subyacente, de espesor infinito. La teoría supone un contacto perfecto entre las dos capas inferiores. Entre el revestimiento y el cemento se supone no hay rozamiento y se considera únicamente la flexión de la capa superior.

En resumen, la teoría sobre la que informamos parte de los siguientes supuestos:

Que el revestimiento es de hormigón asfáltico, con la cohesión suficiente para que pueda trabajar como placa.

Que las tres capas que constituyen el firme trabajan en régimen elástico y que el cemento y la explanada están en contacto perfecto, transmitiéndose a ésta todas las tensiones y conservándose idénticas en ambas capas todas las deformaciones producidas. Asimismo se supone el contacto perfecto de revestimiento y cemento; no obstante, no se tiene en cuenta más que la flexión de la placa, prescindiendo de otras tracciones que se impongan al revestimiento.

Que la carga de la rueda se reparte uniformemente sobre la superficie de contacto, que se considera circular.

Que a los efectos de rigidez, la segunda capa o cemento se considera como un sólido único, aunque de hecho está integrada por otras capas, al menos base y sub-base, de diferente módulo de elasticidad, adoptándose un valor medio para éste.

Este esquema elástico es el que da una idea más precisa del reparto de tensiones y deformaciones en un firme de carretera, y así se ha confirmado por la estrecha correlación entre los valores obtenidos por la aplicación del método que comentamos y los datos experimentales que se obtuvieron en el ensayo WASHO [3]. En efecto, las diferencias apreciadas entre los valores de las flechas medidas en las pistas experimentales y las de las obtenidas en el cálculo, no son superiores a la dispersión de resultados entre las propias medidas del ensayo.

La determinación de las tensiones se lleva a cabo en este método con ayuda de ábaco, para cuya utilización se parte de unos parámetros característicos del firme en estudio y de la carga actuante. Las ordenadas corresponden al espesor relativo del cemento, o sea referido al radio de la superficie circular de apoyo de la carga, y las abscisas son función del espesor relativo del revestimiento asfáltico y de la relación de rigideces de éste y del cemento.

La expresión de estos dos parámetros, con la notación que se indica en el esquema de la figura 1.ª, es la siguiente:

$$\alpha = \frac{h_2}{r} \quad \beta = \frac{h_1}{r} \sqrt[3]{\frac{E_1}{6 E_2}}$$

La rigidez relativa entre cemento y explanada intervienen en la elección del ábaco a emplear. Las

dos familias de curvas de los ábacos dan unos coeficientes C_1 y C_3 , que determinan las tensiones en el revestimiento y en la explanada por unas fórmulas en que intervienen las rigideces y la presión del inflado de la rueda, y cuyas expresiones son:

$$C_1 = \frac{c_1 q}{a} \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{2/3} \quad C_2 = c_2 q.$$

Para más detalles sobre la aplicación de este método, recomendamos al lector el trabajo citado, en el que figuran los ábacos y un análisis comparativo

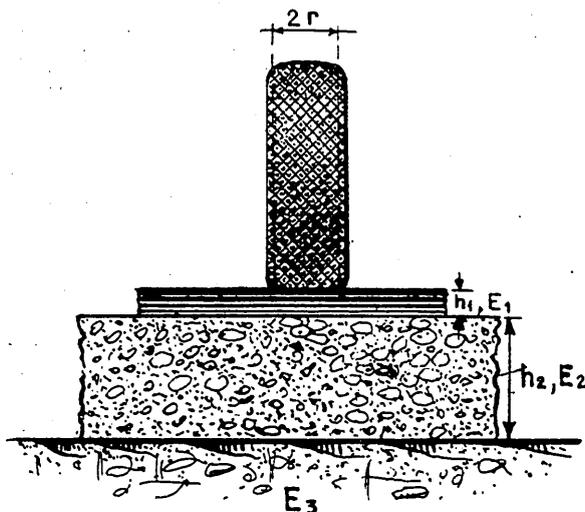


Fig. 1.ª — Esquema del firme y notaciones en el sistema tricapa de Jeuffroy y Bachelez.

de los resultados teóricos y experimentales. Hacemos notar también el interés de la aplicación de este método para el estudio del refuerzo de un firme en servicio, combinando espesores de base y pavimento, para cuyas capas se eligen los módulos de elasticidad convenientes, a fin de obtener el total a suplementar con la solución más económica.

2.3. Los métodos rusos.

El cálculo matemático de los firmes de carretera se ha estudiado en Rusia con muy especial interés durante los últimos veinte años, habiendo llegado a un método muy completo [4], debido al Prof. Ivanof, que según nuestra información se está utilizando por los ingenieros soviéticos con gran profusión y buenos resultados prácticos.

Se basa este método en un análisis teórico de tensiones y deformaciones, determinándose la resistencia del firme por la deformación máxima admisible debida a los efectos del tráfico. Para el estudio del reparto de tensiones, se emplean unas relaciones del tipo de las de Boussinesq.

Se toma como deformación máxima admisible aquella a partir de la cual cuando aumenta la carga actuante se produce el agrietado del firme, o aunque esto no ocurra, deja de ser lineal la relación

$$\frac{\text{carga}}{\text{deformación}}$$

Para el cálculo se sustituye el conjunto de capas del firme de diferentes módulos de elasticidad por un sólido homogéneo, de *módulo de elasticidad equivalente*. Se determina este módulo con ayuda de ábacos. Para conseguir buen resultado en obra, es fundamental que el módulo equivalente que resulte para el conjunto de las capas establecidas esté de acuerdo con el que exige el cálculo. Además, la variación gradual de la rigidez en las distintas capas (pavimento, bases, sub-bases, suelo mejorado y suelo natural), debe responder al estado de tensiones que en ellas se producen, para que todas estas capas presenten suficiente resistencia a los deformaciones. aun en los casos más desfavorables de tráfico, humedad y temperatura, que deben ser estimadas con suficiente previsión.

Como en el método francés a que se refiere el anterior epígrafe, el dimensionamiento del firme se decidirá por un tanteo de soluciones, ya que caben diversas variantes agrupando capas de distinto espesor y calidad, con resistencia análoga en el conjunto, y el problema técnico queda como siempre subordinado al económico, en función de costes, distancias de transporte y materiales disponibles.

El método de Ivanof no es puramente racional, ya que precisa el empleo de unos coeficientes experimentales de corrección para la adaptación de los resultados teóricos a los obtenidos en la realidad, disponiendo de tablas de coeficientes de deformación, que se han deducido por correlación de los valores del cálculo con mediciones efectuadas en tramos en servicio.

Este método sigue en vías de perfeccionamiento con tendencia a reducir la parte de empirismo que en la actualidad tiene. El mayor escollo a vencer es la estimación concreta y sistemática de los módulos de elasticidad de las distintas capas integrantes del firme y del módulo equivalente que corresponde al macizo conjunto. El Instituto de la Carretera de Moscú ha fijado una serie de módulos-tipo para su empleo en el cálculo de espesores, partiendo de la naturaleza de los materiales que forman las capas y de las condiciones de humedad previsibles para el tramo en cuestión.

Otro método ruso más moderno que el que acabamos de comentar es el debido al ingeniero Kogan. El cálculo se desarrolla sobre un esquema bicapa: una capa superior elástica en contacto perfecto con un medio elástico de espesor infinito, cuyo módulo de elasticidad varía de un modo continuo con la profundidad.

La solución propuesta por Kogan presenta, espe-

cialmente, un gran interés porque puede servir como complemento al método de Jeuffroy y Bachelez, siendo válido éste para la explanada y parte inferior del firme y aplicándose el otro a la parte superior.

3. EL CALCULO EMPIRICO

En el dimensionamiento de firmes de carretera se han empleado con gran profusión métodos empíricos que, aunque no ofrecen un buen grado de aproximación en las soluciones que brindan, tienen la ventaja de ser simples y rápidos.

En estos métodos se caracterizan los suelos por una serie de ensayos que se limitan a registrar características puramente físicas; con éstas se define un parámetro, único valor representativo de la resistencia del suelo en la correspondiente fórmula de dimensionamiento.

Citaremos entre estos métodos el del *índice de grupo*, muy difundido en América y Europa; y el del *factor de carga*, empleado principalmente en Francia, que es su país de origen.

3.1. El método del índice de grupo.

No vamos a repetir la esencia ni el proceso operatorio de tan conocido método, limitándonos a remitir al lector interesado a un trabajo nuestro [5], en que se expone con suficiente claridad la fórmula que determina este índice y el gráfico que consideramos más útil y práctico para el dimensionamiento del firme.

En este gráfico, el espesor de la sub-base se obtiene en función del índice de grupo de la explanada y el resto del afirmado, excepto una capa de base de 10 cm. fija para todos los casos, depende del volumen diario de tráfico, quedando especificado también cuál es la capa de rodadura propiamente dicha, o sea de revestimiento asfáltico.

El espesor de la sub-base en función del índice de grupo, responde a una ley continua que puede representarse por la ecuación:

$$e = 2,750 I - 0,062 I^2$$

Para tener en cuenta la resistencia o módulo de elasticidad de las capas, se recomienda que si se aumenta el espesor resultante para la capa superior (base-pavimento), puede reducirse en el doble el espesor obtenido para la sub-base.

La sencillez de este método ya es causa suficiente para que sólo pueda concedérsele un carácter de aproximación. En primer lugar, el método da por sentado unas condiciones muy favorables en obra de compactación y drenaje, que quizá en muchos casos no se cumplen. Otras consideraciones a tener en cuenta son que el método está adaptado al clima de California

— que puede equipararse en España a Andalucía y toda la costa mediterránea —, pero fuera de estas zonas el proyectista debe pensar en una corrección; así como en otra por lo referente al eje de 12 toneladas que autoriza nuestro Código de Circulación, superior al de 9 toneladas, máxima carga tolerada en los USA.

En lo que respecta ya al método en sí, constituye un fallo en su rigor la simplista apreciación de la capacidad resistente del suelo, que se basa solamente en tres variables características, y además, una de las cuales, la granulometría, se fija exclusivamente por el porcentaje de la muestra que pasa por el tamiz 200, lo cual es bastante poco, pues el comportamiento que un suelo debe a la composición granulométrica y a la forma de las partículas, es mucho más complejo que lo que este criterio tan esquemático del método que comentamos supone. Vemos por ello que el método del índice de grupo debe aplicarse con gran prudencia y ya su propio autor recomienda que se tengan en cuenta las condiciones especiales de cada caso y que sean debidamente contrastadas en la experiencia del proyectista.

Por este carácter de método de primera aproximación esta indicado para el estudio de anteproyectos o proyectos susceptibles de modificación a la hora que se termina la explanada. Tiene, sin embargo, la ventaja de su sencillez y del reducido coste de los ensayos de laboratorio que precisa. Principalmente es útil en el estudio de proyectos, pues permite llegar a una clasificación de los suelos afectados por la traza y reducir con ello el número de ensayos mecánicos para determinar su resistencia, que son bastante más lentos y costosos. En una carretera importante no debe nunca el proyectista contentarse con los espesores que resultan del índice de grupo, que no tienen la suficiente garantía y que en el mejor de los casos, suponiendo que no hubiera fallos, conducirían a un notable incremento de coste de la obra, pues por los estudios comparativos llevados a cabo con el CBR, resulta que aquélla espesores superiores con un aumento del orden de 12 a 15 cm., aunque no se ha llegado a una correlación clara y definida entre ambos índices.

Así, pues, éste es un ensayo de fase inicial, pero después de ejecutado el movimiento de tierras, cuando el Ingeniero tiene ante sí la explanada terminada, debe proceder al ensayo CBR, pongamos por caso, como más asequible, y decidir el espesor definitivo del afirmado.

Puede pasarse únicamente sin estos ensayos complementarios de mayor garantía en caso de carreteras de baja IMD, en las que se puede obtener un aumento notable de la seguridad sin gastos suplementarios excesivos con relación al coste de los ensayos que serían necesarios para apreciar en su justo valor la resistencia del suelo y permitir con ello una reducción del coeficiente de seguridad.

3.2. El método del factor de carga.

El método del factor de carga que se debe a Peltier [6], Director del Laboratorio Central de Ponts et Chaussées, tiene gran afinidad con el método del índice de grupo, pues como éste, parte exclusivamente de los caracteres de identificación del suelo de la explanada. El *factor de carga* o índice representativo de la resistencia del suelo es un parámetro que para los suelos finos (en los que un 66 por 100 pasa por el tamiz 40) pretende identificarse con el CBR, y puede sustituir a éste en las fórmulas y ábacos que determina el espesor del afirmado.

Este método, que dimos a conocer en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS [5], tiene su origen en el análisis estadístico de un gran número de ensayos CBR, llevados a cabo en el Laboratorio antes citado, durante un período de doce años. En todos estos ensayos se determinaban las características de identificación del suelo: análisis granulométrico de la muestra, límite líquido e índice de plasticidad y también, aunque sólo eventualmente, el equivalente de arena.

Como resultado se obtuvo para los suelos finos una correlación, traducida en una fórmula que figura en los trabajos arriba referidos. La fórmula es sólo aplicable a los suelos finos, o sea, los que tienen más de un 66 por 100 de suelo-mortero. Tampoco la fórmula es válida más que si el valor obtenido para el factor de carga, $F = \text{CBR}$, es inferior a 20. Se trató de generalizar la fórmula para suelos más gruesos, de CBR superior a 20, pero se obtuvo una correlación mucho peor. Por otra parte, la generalización que se intentaba tiene poca utilidad práctica, ya que se trata de suelos de buena calidad, sin problemas. En vista se utiliza cada vez con más profusión, pero reduciendo de ello, la última conclusión fué limitar el empleo del método al caso de suelos finos y con un $\text{CBR} < 20$.

Debe hacerse también la indicación que la fórmula sólo es válida para suelos compactados a más del 95 por 100 del Proctor modificado. Para suelos en los que la densidad está comprendida entre el 90 y el 95 por 100 de ese valor máximo, el valor del factor de carga debe reducirse aproximadamente a la mitad.

Por la sencillez del método y por las variables características que intervienen en el cálculo de este índice resistente, ya se adivina que adolece de todos los defectos apuntados al comentar el método del índice de grupo. En Francia, el método del *factor de carga* dose exclusivamente a los siguientes casos:

Sobre las carreteras secundarias y caminos departamentales, en los que se calcula únicamente la resistencia de la explanada por este método del factor de carga, sin que se haga el CBR, ni ningún otro ensayo complementario.

Por la conocida dispersión del ensayo CBR éste sólo se hace en pocos puntos, pero en cada uno de ellos se repite varias veces, para obtener la media. En el caso de las carreteras con gran IMD, de las autopis-

tas y de las pistas de vuelo. En estos casos el factor de carga sirve de ensayo previo para obtener una clasificación de suelos de la zona a explanar. Esta clasificación permite generalmente distinguir diversas categorías de suelo; se toman varias muestras en las zonas que se consideran más representativas y se hace en cada una de ellas cinco o seis ensayos CBR. Gracias al método del factor de carga pueden ahorrarse muchos ensayos CBR sobre muestras tomadas al azar; lo resuelven ahora los franceses con una decena de ensayos sobre muestras tomadas en puntos elegidos.

El factor de carga se utiliza también en Francia a modo de control de la correcta ejecución de los ensayos CBR llevados a cabo en los laboratorios regionales.

En los casos en que en el Laboratorio Central se advierte una diferencia apreciable entre los índices CBR y el factor de carga, se ordena una cuidadosa repetición de aquéllos, en la mayor parte de los casos se descubre que el laboratorio en cuestión no ha operado bien. En algunos casos se comprobó que los ensayos se habían hecho correctamente, pero se trataba de un suelo de características especiales ante el que había que ponerse en guardia y tomar precauciones suplementarias. Este papel de detector de errores y anomalías del método de Peltier ha dado gran juego en Francia, según nos informa su propio autor.

Como el *índice de grupo*, este método, sin gran rigor ni garantía, tiene el mérito de la brevedad y la sencillez y puede tener aplicación en España en una primera aproximación para reducir y controlar ensayos más completos, sobre suelos finos, en los que está específicamente indicado. Nuestros suelos son bastante identificables a los franceses, y en el país vecino el método que comentamos se viene aplicando desde hace varios años con éxito, dentro de las reservas más arriba apuntadas.

4. LOS MÉTODOS EXPERIMENTALES

Consideramos como métodos experimentales de dimensionamiento de firmes aquellos que se basan en ensayos mecánicos de deformación o rotura, sobre muestras de suelo, en el laboratorio o *in situ*, para estimar la resistencia de la explanada.

Evidentemente, por utilizar estos métodos tales ensayos son más dignos de confianza y ofrecen una mayor aproximación que los puramente empíricos. Claro que puede objetarse también sobre la diferencia existente entre las sollicitaciones y deformaciones que actúan y se producen en el ensayo y el fenómeno real de un firme sometido a las cargas del tráfico.

Pero en todos los ensayos tiene que haber mucho de convencional y con ellos no se puede pretender reproducir el comportamiento del sólido explanada-firme que con su ayuda se desea estudiar. Lo que verdaderamente interesa es que con el ensayo se con-

sigue poner en juego, de un modo más o menos directo, las características resistentes de un suelo, o sea, principalmente su deformabilidad y su resistencia a la rotura.

Se han propuesto muchos métodos experimentales para el cálculo rápido del orden de magnitud del espesor de firmes flexibles, casi todos ellos desarrollados en los Estados Unidos durante los últimos veinte años. Nos referiremos aquí a los más clásicos y conocidos: el ensayo CBR, del estabilómetro de Hveem y el de las placas de carga.

4.1. El ensayo CBR.

Este ensayo, iniciado por el Ingeniero americano Porter en 1930, se ha utilizado mucho en España y su proceso operativo para las dos variantes, en el la-

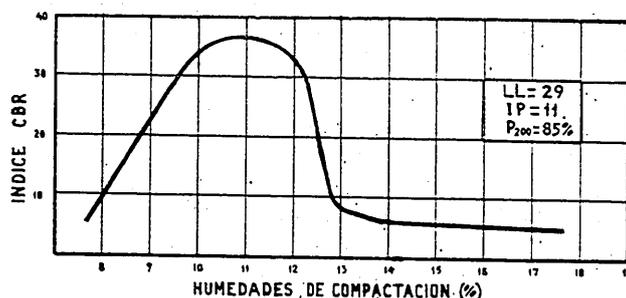


Fig. 2.ª — Variación del índice resistente CBR con la humedad de compactación, en un suelo limoso.

boratorio e *in situ*, está perfectamente definido en las Normas, NLT 111/58 y NLT 112/58 del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, por lo que no necesitan aclaración.

Tampoco vamos a comentar en el presente trabajo las censuras clásicas del método que versan sobre la dificultad de imbibición de la probeta en suelos arcillosos muy finos, o el efecto de punzonamiento del ensayo, tan diferente de la sollicitación del tráfico y que en suelos poco coherentes lleva a un dimensionamiento por exceso. Pero sí vamos a detenernos sobre el fenómeno de dispersión a que está sujeto este ensayo de California y por el que puede parecer en principio de escaso interés práctico.

De los resultados experimentales dados a conocer por el ingeniero francés Allais [7], se deduce una gran variación del índice resistente para pequeñas oscilaciones de la humedad por encima de la óptima. Fijaremos ideas refiriéndonos a un suelo concreto ensayado en el Laboratorio des Ponts et Chaussées de París. Se trata de un suelo limoso cuyas características de identificación constan en la figura 2.ª, donde se dibuja la curva que relaciona humedades e índice CBR.

La irregularidad que acusa esta curva es bastante

elocuente, distinguiéndose claramente en ella cuatro partes:

Corresponde la primera a humedades muy inferiores a la óptima (se ha operado con el Proctor modificado). Es una rama ascendente en la que el CBR crece rápidamente y con continuidad cuando aumenta la humedad.

La segunda parte cubre la zona en torno a la humedad óptima, hasta aproximadamente medio punto más allá de ésta; en esta parte el CBR presenta muy poca variación.

Sin embargo, en la tercera parte se presenta la rama descendente y hay una caída casi vertical del índice resistente que pasa de 30 a 9 cuando la humedad sólo aumentó del 12,5 al 13 por 100.

En la cuarta parte el valor del CBR decrece muy lentamente.

El fenómeno que se pone de manifiesto en la tercera parte de la curva, o sea el rápido descenso del índice CBR, en las proximidades del óptimo Proctor, por un pequeño aumento de la humedad en la probeta, es una explicación de la dispersión de resultados del ensayo. En efecto, las variaciones debidas a la imperfecta homogeneidad y las inevitables irregularidades en la humedad y densidad de las distintas probetas, pueden traducirse en amplias variaciones del índice CBR, máxime si se tiene en cuenta que se opera en la zona de rápido descenso de este índice.

Claro que esta circunstancia no es privativa del ensayo CBR y se ha manifestado con similares características en probetas sometidas a ensayos de compresión y de deformación. Asimismo el fenómeno ha sido detectado por experiencias americanas [8] en el ensayo del estabilómetro de Hveem, donde se aprecia también un gran descenso en el valor "R" a partir de humedades ligeramente superiores a la óptima. Pero estas experiencias han ido más lejos al poner de manifiesto que este descenso es bastante más rápido cuando la compactación se hace con efecto de choque como en el procedimiento Proctor que cuando se hace por presión estática. Esto es sintomático, y como veremos más adelante, supone una ventaja para el comportamiento del suelo en obra respecto a los ensayos de laboratorio.

En efecto, la dispersión del CBR en el laboratorio es un hecho cierto y convendría comprobar hasta qué punto se mantiene esta dispersión si el ensayo se realiza *in situ* sobre la explanada que corresponde al suelo ensayado. El método del CBR se ha estudiado comparando el índice de ensayo con el comportamiento de tramos experimentales o de carreteras en servicio, pero también es muy interesante y puede brindarse como objetivo de laboratorio, estudiar la correlación del ensayo en probeta y en obra, llegando a la comparación de una larga serie de resultados con el debido control y garantía que pueda mejorar este método.

Entretanto y para paliar la dispersión del ensayo, la tendencia actual, especialmente para el dimensionamiento de firmes en carreteras de gran tráfico, es operar sobre una amplia serie de muestras de suelo: unas con humedades variables y energía constante, otras con la humedad óptima y con energías variables. Del conjunto de resultados y con un criterio lo más

Tráfico de más de 4.500 vehículos comerciales/día.

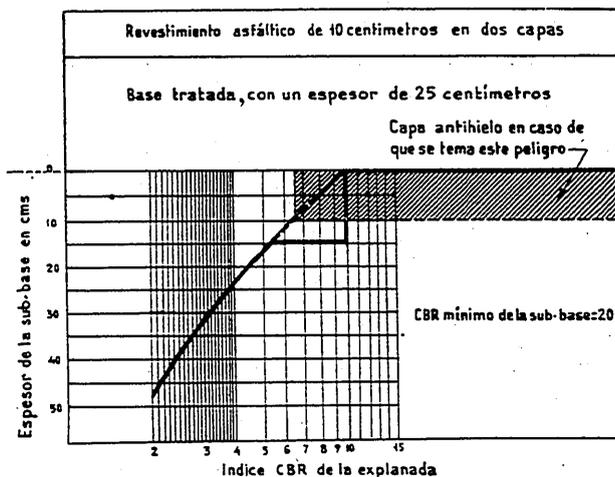


Fig. 3.^a — Abacos del Road Research Laboratory para dimensionamiento de firmes en función del índice CBR.

racional posible, el proyectista debe elegir el índice CBR, base del cálculo del espesor.

En este sentido se han orientado las recientes recomendaciones francesas — coinciden también con este criterio las últimas normas inglesas y americanas — aún sometidas a discusión que, en síntesis, prescriben lo siguiente:

El ensayo CBR debe realizarse sobre las ocho o nueve probetas que han servido para determinar la curva Proctor. La mitad de estas probetas se ensayarán después de veinticuatro horas de conservación a humedad constante, y los resultados obtenidos se compararán con otras que se hagan sobre muestras tomadas de la explanada. El resto de las probetas se ensayarán después de conservadas en la forma que se fije, que puede ser la imbibición de cuatro días.

Los ensayos se deberán realizar con dos distintas energías de compactación y mejor tres si fuera posible.

Debe tenderse a hacer la imbibición en dos fases: la primera por capilaridad ascendente y la segunda por inmersión. La primera podría mejorarse creando un vacío parcial por encima de la probeta. Esto introducirá complicaciones en el ensayo, pero se llegará a una homogeneidad en la humedad final de las probetas y se reducirán considerablemente la dispersión de los resultados.

Con relación a esta dispersión, como ya antes se

apuntó, es mucho menos marcada en obra que en laboratorio, por lo que el ensayo CBR no debe conceputarse tan malo como algunos de sus detractores pretenden. Esta diferencia de comportamiento respecto a las variaciones de humedad se ha justificado por el distinto procedimiento de compactación en el la-

Tráfico comprendido entre 1 500 y 4 500 vehículos comerciales/día

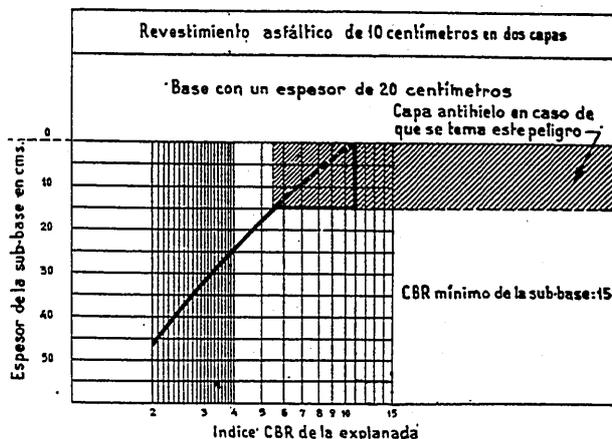


Fig. 4.ª — Abacos del Road Research Laboratory para dimensionamiento de firmes en función del índice CBR.

boratorio con golpes de pisón sobre la muestra encerrada en un molde de rigidez prácticamente infinita respecto a la del suelo, y en obra por la presión del compactador que afecta a mayor o menor volumen de suelo, según su grado de deformabilidad.

En la actualidad, el ensayo CBR sigue siendo todavía el más usado y ha ido evolucionando hacia una mayor perfección y adaptación a las circunstancias especiales de cada país. Sólo en los Estados Unidos hay 14 variantes del método, y también las naciones europeas han introducido interesantes modificaciones en el proceso de ensayo, datos de partida para el cálculo del espesor y ábacos determinantes de éste.

Traemos como ejemplo a este trabajo, por su indudable interés, las recomendaciones del Road Research Laboratory [9] recientemente publicadas para orientación del ingeniero proyectista de firmes, y que han sido fruto de una larga experiencia de laboratorio y ensayos en verdadera magnitud, con estrecha colaboración de los organismos relacionados en Inglaterra con la construcción y conservación de la red de carreteras. Estas recomendaciones están sujetas a revisión, en tanto no se obtengan conclusiones definitivas de algunos tramos de ensayo que siguen bajo observación.

A los efectos de dimensionamiento consideran estas recomendaciones el firme integrado del siguiente modo:

Revestimiento superficial. — En general, integrado por "capa intermedia" y capa de rodadura.

Base. — Independiente de la explanada y oscilando entre 15 y 25 cm., según el tráfico.

Sub-base. — Dependiente del CBR de la explanada y considerando dentro de ella una capa anti-hielo donde las condiciones atmosféricas y la naturaleza del suelo lo aconsejen.

El tráfico se estima considerando el número de vehículos comerciales (*) que circulan en ambas direcciones durante veinticuatro horas. Se elige la media semanal y en caso de que se disponga sólo de aforos de dieciséis horas, se incrementan éstos en un 6 por 100, si es que el tráfico nocturno es escaso; en caso contrario debe tenderse al aforo durante las veinticuatro horas.

A los efectos del proyecto el tráfico se divide en cuatro categorías:

- 1.ª Con más de 4.500 vehículos comerciales
- 2.ª Entre 4.500 y 1.500 vehículos comerciales.
- 3.ª Entre 1.500 y 450 vehículos comerciales.
- 4.ª Entre 450 y 150 vehículos comerciales.

Sobre el tráfico actual debe hacerse un cálculo del incremento para un plazo de veinte años, estimando el crecimiento anual en los años anteriores y las posibles incidencias que puedan influir en el desarrollo de la zona a servir, de modo que el Ingeniero adopte un índice para aplicar la fórmula de interés compuesto, obteniendo el tráfico previsible, que es el que determina la *Carta de proyecto* que hay que elegir.

El espesor de la sub-base se determinará en una

Tráfico comprendido entre 450 y 1 500 vehículos comerciales/día.

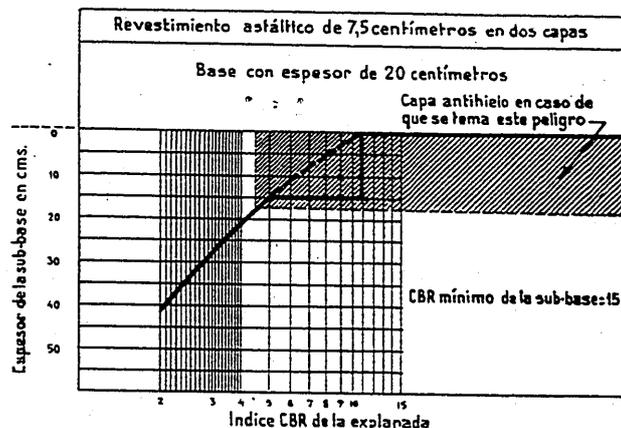


Fig. 5.ª — Abacos del Road Research Laboratory para dimensionamiento de firmes en función del índice CBR.

de las adjuntas cartas (se han pasado a unidades métricas), la que le corresponda por el tráfico de cálculo que se ha estimado. Para un CBR que resulte superior a 10 ó 15 (según la carta que por el tráfico co-

(*) La norma del Road Research Laboratory considera como vehículos comerciales a aquellos cuya tara es superior a treinta hundredweight (30 cwt): $30 \times 112 = 3.360$ libras, aproximadamente 1,5 toneladas.

respuesta), puede prescindirse de la sub-base, pero en el caso que haya de establecerla se fija en 15 centímetros su espesor mínimo. También se prevén más exigencias en cuanto al CBR de la sub-base, cuyo valor mínimo es de 20 para la primera categoría, tráfico pesado, y de 15 para las restantes.

En caso de que haya que considerar el peligro de heladas, el espesor de la sub-base debe ser tal que complete con la base y capa de superficie un total de 45 cm. sobre la explanada, como mínimo, aunque por efecto de resistencia mecánica fuera preciso menos. A juicio del Ingeniero, basado en la experiencia local de un ciclo de más de diez inviernos, puede reducirse este espesor.

El espesor de la base es fijo para cada una de las cuatro categorías de tráfico: 25, 20, 20 y 15 centímetros, respectivamente. Estas bases deben ser forzosamente estabilizadas con cemento, betún o alquitrán para la categoría núm. 1. En las demás puede admitirse también las de macadam o zahorra.

El revestimiento superficial que se recomienda para cada categoría de tráfico es el que se indica en el cuadro adjunto:

Capas bituminosas para revestimiento superficial.

REVESTIMIENTO	Carta n.º 1 (más de 4 500 vehículos comerciales/día)	Carta n.º 2 (Entre 1 500 y 4 500)	Carta n.º 3 (Entre 450 y 1 500)	Carta n.º 4 (Entre 150 y 450)
Capa intermedia . .	6 cm.	6 cm.	5 cm.	(Capa única)
Capa de rodadura . .	4 cm.	4 cm.	2,5 cm.	—
<i>Total</i> . .	10 cm.	10 cm.	7,5 cm.	5 cm.

Respecto al empleo del ensayo CBR para la revisión de otros métodos de dimensionamiento, informaremos someramente de una interesante campaña llevada a cabo en el Estado de Florida [10] en los tres años últimos, para conseguir una correlación entre espesores de afirmado, capacidad resistente de la explanada y comportamiento de la carretera. Se operó sobre tramos cuidadosamente seleccionados con diez años de servicio, en los que se estimó su estado de conservación lo más objetivamente posible, asignándoles un número (*índice de estado*) definido por una fórmula determinada en función de los porcentajes de zonas más o menos agrietadas o deformadas en la zona de estudio. Para mayor objetividad se fijaron muestras tipos de agrietado y magnitudes de deformación, correspondiendo a cada una de ellas un peso en la fórmula, con lo que el índice obtenido podrá considerarse como representativo.

Como resultado de esta estimación del comportamiento y de las mediciones y ensayos mecánicos llevados a cabo en obra y en el laboratorio, se llegó a las conclusiones siguientes:

No se pudo establecer una correlación entre el estado del firme y los valores del antiguo método empírico de Florida, basado en una experiencia más generalizada que concreta, de los Ingenieros de este Estado.

Sin embargo, el método CBR mostró una buena correlación para las cargas autorizadas y el volumen de tráfico correspondiente al tramo.

Como consecuencia de esta correlación y basándose en el *índice de estado*, al que se fijó un límite mínimo representativo de un comportamiento aceptable, se dedujeron unas curvas para dimensionamiento de espesores por el método CBR, considerando diferentes intensidades de tráfico, algunas de las cuales se incluyen en la publicación de referencia.

4.2. El método de Hveem.

En 1948, cuando el ensayo CBR llevaba casi veinte años de aplicación y ni éste ni otros muchos métodos experimentales se consideraban satisfactorios por los ingenieros americanos, el Prof. Hveem, del Departamento de Carreteras de California, hizo el

Tráfico comprendido entre 150 y 450 vehículos comerciales/día

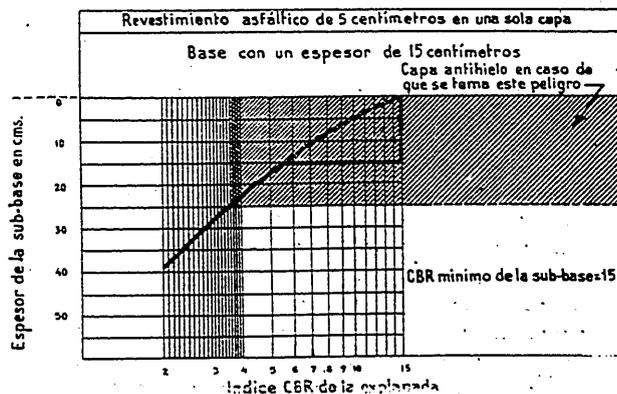


Fig. 6.ª — Abacos del Road Research Laboratory para dimensionamiento de firmes en función del índice CBR.

primer intento de incluir en una fórmula el efecto de la repetición de las cargas y las características resistentes diferenciales de las distintas capas integrantes del afirmado [11].

La base experimental del método es el ensayo del estabilómetro, y tanto por ciertas ventajas de éste, así que más adelante nos referiremos, como por una estimación más concreta de las causas que intervienen en el fenómeno real, se llegó a una fórmula más aproximada que las anteriores; se hacían intervenir en ella factores numéricos y valores relativos de las sollicitaciones y elementos resistentes que juegan en el comportamiento del firme. El método se aplicó con éxito durante varios años.

No obstante, la experiencia obtenida con la fórmula de Hveem al relacionar los valores que con ella se obtuvieron para el espesor de los diversos tramos de firme, con el comportamiento de éstos bajo el tráfico, puso de manifiesto que era necesario una revisión. La fórmula original daba valores satisfactorios para las carreteras de tráfico medio, pero no sucedía esto en los casos de tráfico pesado o ligero, dimensionando con muy poco margen de seguridad en los

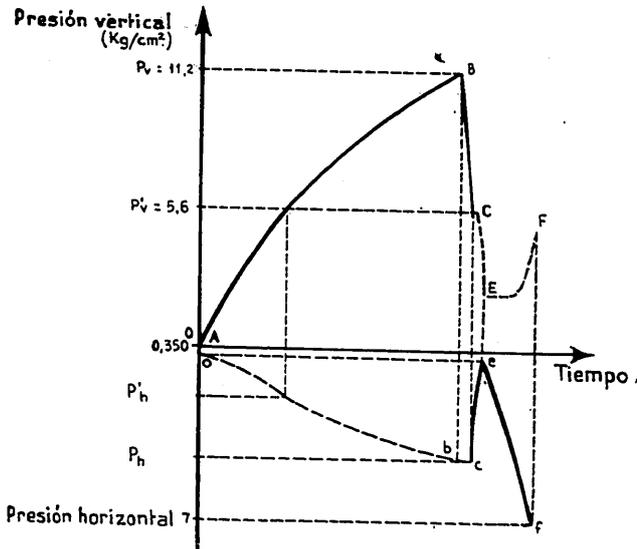


Fig. 7.ª — Curvas representativas de la evolución de las presiones en el ensayo del estabilómetro de Hveem.

primeros y por exceso en los segundos. Se comprobó también el efecto destructivo de la repetición de las cargas y la menor influencia de éstas cuando existía un revestimiento asfáltico del orden de 10 cm. de espesor. La revisión del método ha versado principalmente, hasta ahora, sobre la estimación del tráfico previsible, y siguen los estudios para la apreciación de la influencia del efecto-losa, sobre el que se espera conocer las enseñanzas del ensayo ASSHO, cuyos resultados se están estudiando.

Refiriéndonos al ensayo del estabilómetro, indicaremos las ventajas que presenta su ejecución, como es la del procedimiento empleado en la compactación de la muestra, no por choque, sino por presión y, por tanto, más próximo al apisonado en obra, muy interesante, ya que en una compactación, además de la densidad final, influye el proceso para llegar a ésta. También, como en el CBR, en este ensayo se hace intervenir la resistencia a la rotura y la deformabilidad del suelo; pero estas dos características intervienen separadamente, al menos en apariencia, y sólo se combinan en el cálculo del resultado del ensayo. Recordemos en esencia el ensayo y la evolución durante éste de las presiones vertical y horizontal, que definen su resultado.

El suelo a ensayar se coloca en un aparato que

lleva un tubo de doble pared, la interior de goma y la exterior metálica. Entre las dos paredes se interpone un líquido que recibe la presión lateral, producida por la presión vertical que se aplica a la probeta.

En la figura 7.ª se representa la variación de las dos presiones a través del proceso del ensayo. En la primera fase, las presiones vertical y lateral evolucionan, respectivamente, según las curvas AB y ab. Por encima de un cierto valor de la presión vertical, una parte de ésta se transmite horizontalmente, primero por el efecto de Poisson y después por la rotura plástica de la probeta. Se produce entonces la dilatación lateral de la membrana.

En una segunda fase, la carga vertical se reduce lo más rápidamente posible a la mitad (partes BC y bc de las curvas), lo que provoca una disminución más o menos sensible de la presión horizontal, según que se deba a rotura o solamente al efecto Poisson. Después, la presión horizontal se reduce a un mínimo, lo que lleva consigo una notable reducción de la presión vertical, principalmente por la rotura de la probeta, que empuja sobre la membrana de contorno (partes CE y ce). Por último, la probeta se deforma lateralmente, hasta llegar a una presión lateral de 7 Kg./cm.²; en esta fase aumenta la presión vertical. La deformación horizontal D que sufre la probeta en esta última fase, y que es característica a la vez de la deformación y de la rotura, interviene en la fórmula del índice resistente del método o "valor R", cuya expresión es:

$$R = 100 - \frac{100}{\frac{2,5}{D} \left(\frac{P_v}{P_h} - 1 \right) + 1}$$

La fórmula original para definir el espesor del firme, tiene la siguiente expresión:

$$C = K \frac{(P \sqrt{a} \log. r) (P_h / P_v - 0,10)}{\sqrt[5]{C}}$$

siendo:

- K, parámetro que se fija en 0,02, englobando el coeficiente de seguridad.
- P, presión de inflado de la rueda.
- a, área de apoyo de la misma.
- r, número de repetición de la carga.
- C, resistencia a la tracción del firme, determinado con el cohesímetro y tomando el valor medio entre los de las distintas capas.

En la revisión de la fórmula, como consecuencia de posteriores estudios de correlación, se introdujo el concepto de índice de tráfico, I, valor representativo de éste; la expresión de la fórmula se redujo a:

$$C = \frac{K I (90 - R)}{\sqrt[5]{C}}$$

siendo K un parámetro en el que está implícita la presión de inflado, y que pasado a unidades métricas para el espesor en centímetros, le corresponde el valor 0,241 para $P = 5 \text{ Kg./cm.}^2$.

El índice de tráfico pretende representar el efecto acumulativo (*) del que va a circular por la carretera que se proyecta, y en su determinación intervienen unas constantes que también han sido objeto de revisión por la evolución de los tipos de vehículos. No entramos en detalle del cálculo del índice, puesto que ya lo hemos hecho en un trabajo [12] publicado en esta REVISTA.

Dadas las diferencias en el proceso de ejecución y condiciones a que se somete la muestra en los dos ensayos citados se ve claramente que en ellos se hacen intervenir de modo distinto las dos principales características mecánicas del suelo: la deformabilidad y la resistencia a la rotura. De aquí la dificultad de establecer una correlación entre el índice CBR y el valor R . Se cita por Hveem [11], como exponente concreto de lo antes apuntado, el ensayo de una muestra de arena a la que se fueron añadiendo proporciones crecientes de arcilla. Mientras el CBR aumentaba, el valor R disminuía: en el ensayo de California se apreciaba una estabilización de la muestra con el binder arcilloso, mientras que en el estabilómetro dominaba el efecto resistente de la granulometría más gruesa.

4.3. Efectos y estimación de la resiliencia.

En la visita que hicimos en el año 1957 al Departamento de Carreteras de California, tuvimos ocasión de ver el ensayo del *resiliómetro*, aparato con el que se pretende complementar el método de Hveem, y que está destinado a registrar el movimiento ascendente de recuperación del suelo — *resiliencia* — cuando cesa el efecto de la carga, muy interesante por la influencia que tiene en la rotura de pavimentos.

Nuestras últimas noticias es que este ensayo no ha progresado mucho, pero sigue en vías de experimentación, y ya han logrado establecerse algunas relaciones entre los resultados obtenidos con el *resiliómetro* y las deflexiones admisibles en la calzada; desde luego, lo que se ha puesto claramente de manifiesto es el aumento de la resiliencia de un suelo cuando se aumenta su contenido de humedad. Esto puede justificar la rotura, o por lo menos colaborar decisivamente en ella, de algunos tramos de nuestras carreteras en los años húmedos, y de ello podemos citar

(*) En el efecto destructivo, del tráfico influye notablemente la frecuencia de las cargas. Para una circulación muy intensa es muy reducido el ciclo de aplicación, y a una sollicitación sucede rápidamente otra, sin que dé tiempo a la recuperación. Responde a esta consideración una de las conclusiones del Congreso de Río, donde a propuesta de la Delegación española, se ha recomendado la posibilidad de operar con un índice de tráfico dependiente de la intensidad horaria.

como caso concreto, por bien observado, ciertos trozos del Puerto de Manzanal, en la CN. VI de Madrid a La Coruña.

En la figura 8.^a puede verse una curva humedad-resiliencia para varios tipos de suelos, que debemos a la cortesía de M. Hveem. La resiliencia se expresa en centímetros cúbicos, como lo acusa el aparato por ascenso en un tubo graduado de un líquido al que

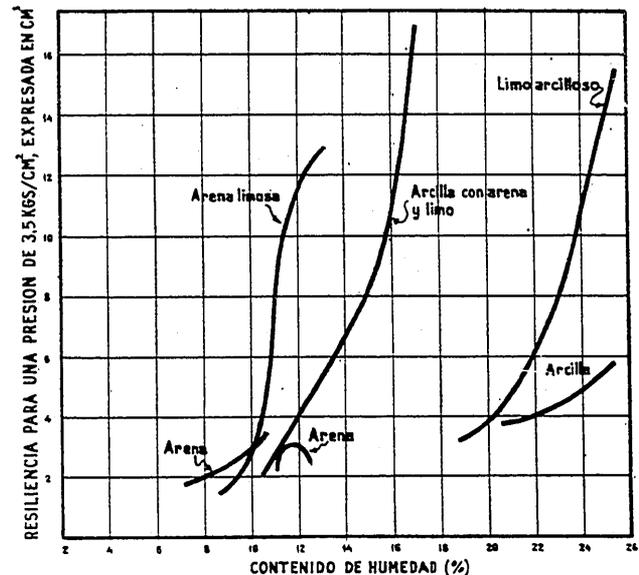


Fig. 8.^a—Variaciones de la resiliencia con el contenido de humedad, para diferentes tipos de suelo que han sido registrados en el ensayo del resiliómetro.

hace subir el movimiento de recuperación de la muestra cuando cesa de actuar la carga-tipo a que se la somete en el ensayo, que suele ser de 50 libras por pulgada cuadrada, o sea $3,5 \text{ Kg./cm.}^2$.

4.4. Las placas de carga.

El método de las placas de carga del Departamento de Construcción de la Marina americana tiene por fundamento el criterio empírico de que un firme puede soportar, en buenas condiciones de estabilidad, un tráfico indefinido, siempre que las deformaciones máximas que produzcan las cargas de éste sean inferiores a 5 mm.

Este ensayo es el que presenta una mayor aproximación con las condiciones reales de un firme en servicio, sobre todo si puede llevarse a cabo con la máxima humedad previsible. La carga que actúa sobre la placa y la superficie de apoyo, pueden ser idénticas a las de la rueda. Otra ventaja es que permite controlar el suelo de la explanada en un espesor mucho mayor que los pocos centímetros que intervienen en el ensayo CBR; también puede aplicarse a suelos con alto porcentaje de elementos gruesos.

Frente a las ventajas apuntadas, presenta el inconveniente de exigir un montaje complicado y costoso. No obstante, en los últimos años se ha observado una tendencia a la utilización de este ensayo de carga, y podemos citar concretamente el caso de Suiza, donde se está empleando con gran profusión. Y es de esperar que su aplicación se extienda considerablemente en un futuro próximo, ya que podrá prescindirse de los pesados dispositivos estáticos actuales, gracias a los ya avanzados estudio y experimentación de los generadores de flexión, que permiten aplicar cargas dinámicas sobre placas, de modo mucho más sencillo y rápido, sin que, por otra parte, introduzcan grandes problemas en la interpretación de los resultados.

5. CONCLUSION

Hemos pretendido en esta exposición pasar revista a los métodos más empleados hoy para el dimensionamiento de firmes flexibles, indicando sus campos de aplicación, sus evoluciones y la esperanza de su perfeccionamiento, gracias al incesante trabajo de ingenieros y matemáticos, a los modernos dispositivos de medida y a los ambiciosos experimentos en verdadera magnitud que han exigido ingentes inversiones. Pero la importancia del problema y la economía que representa todo avance en su solución, lo merece y lo paga sobradamente.

En España se abre ahora ante el Ingeniero de Caminos la gran perspectiva del Plan General de Carreteras en el que deberá proyectar, con soluciones óptimas de economía y seguridad, muchos firmes, tanto de primer establecimiento como de refuerzo de los ya existentes. El dimensionamiento de firmes cobra por tal circunstancia especial valor a la hora presente, por lo que deberemos profundizar en su estudio, aprovechando la oportunidad que va a darnos el contacto con la realidad.

Por lo que para ello pueda tener de orientación previa, que informe a los menos iniciados o siembre inquietudes en los especialistas de esta moderna técnica de carreteras, tan diferente de la tradicional, hemos preparado el presente trabajo, que podrá ser ampliado con la bibliografía de referencia, interesante pero ínfima porción de lo que sobre este problema concreto se ha publicado en los países desarrollados.

Referencias.

1. R. Vidal Artaza: *Repartición de presiones en terrenos homogéneos y de varias capas. Asientos*. Conferencia núm. 12 del Primer Seminario de Construcción de Carreteras. Madrid, 1961.
2. E. Balaguer: *Espesores*. Conferencia núm. 32 del Primer Seminario de Construcción de Carreteras. Madrid, 1961.
3. Jeuffroy y Bachelez: "Essai d'explication méthodique des expériences WASHO". *Revue Générale des Routes et des Aerodromes*, núm. 308. París, septiempo de 1957, págs. 51 a 69.
4. "Teoría de la resistencia de los firmes flexibles. Método del Instituto de Estudios Científicos de la Carretera de Moscú". *Boletín* núm. 17 del Laboratorio del Transporte. Madrid, noviembre 1960, páginas 1 a 24.
5. O. Llamazares: "Los métodos empíricos para la determinación del espesor de firmes flexibles". *Revista de Obras Públicas*, agosto de 1958, págs. 480 a 484.
6. R. Peltier: "Evaluation de la portance des sols de fondation des chaussées souples". *Revue Générale des Routes et des Aerodromes*, núm. 278. París, marzo de 1955, págs. 59 a 74.
7. P. H. Allais: "A propos de l'évaluation et du contrôle de la portance du sol de fondation d'une chaussée souple". *Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées*. Publication n° 60-5. París, enero de 1960, págs. 3 a 19.
8. Seod, Lundgren y Chan: "Effect of compaction method on stability and swell pressure of soils". *Boletín* núm. 93 del Highway Ressearch Board, 1955, págs. 33 a 48.
9. "A guide to the structural design of flexible and rigid pavements for new roads". *Road Note* número 29 del Road Research Laboratory. Londres, septiembre de 1960, págs. 1 a 12.
10. W. H. Zimpfer: "A tentative flexible pavement design method for Florida". *Boletín* 269 del Highway Research Board, 1960, págs. 16 a 34.
11. F. N. Hveem: *Idcas and current problems in pavement design*. Seminar in Asphalt Paving Technology. University of Berkeley, 1957.
12. O. Llamazares: "Refuerzo de firmes flexibles". *Revista de Obras Públicas*, abril de 1960, págs. 254 a 265.