

La pista de ensayo de firmes del CEDEX: experiencias realizadas

Research undertaken at the CEDEX pavement test track

AURELIO RUIZ RUBIO (*)
RECAREDO ROMERO AMICH (**)
JAVIER PEREZ AYUSO (***)

RESUMEN. En el artículo se describe en primer lugar la pista de ensayos situada en las cercanías de Madrid y propiedad del CEDEX, y que destaca por su forma oval, su capacidad de ensayar seis secciones estructurales a la vez, su productividad de 10^6 cargas/año y vehículo y su elevada automatización. A continuación se exponen los resultados obtenidos en los dos objetivos esenciales que dominan los estudios efectuados: la comparación de secciones de firmes y el tarado de modelos. La comparación entre distintas secciones sometidas al paso controlado de una carga tipo se lleva a cabo estudiando la evolución de los deterioros que se producen con la repetición de cargas, obteniendo finalmente una lista ordenada de las seis secciones según el número de aplicaciones de carga que han soportado hasta el fallo. En el artículo se describen también los trabajos relacionados con el tarado de leyes de fatiga de la mezcla bituminosa y de los suelos de la explanada, y el tarado de un modelo analítico de respuesta, junto con una exposición de los resultados obtenidos.

ABSTRACT. The CEDEX pavement test track located near Madrid is presented in this paper. The test track has an oval shape and 6 different pavements can be tested simultaneously on it. Its productivity is 10^6 loads/year/vehicle and the total automation is one of the main characteristics of its design. The results obtained in the comparison of different pavements and the verification of analytical models are presented. The comparison of different pavements is carried out through the evolution of the deteriorations. A ranking of the pavements is presented as the final result. Some verification tests regarding fatigue laws for asphalt mixes and subgrade soils and response models are present in the paper.

1. INTRODUCCION

Por el contrario a lo que sucede en otras ramas de ingeniería ampliamente estudiadas y con los métodos de dimensionamiento bien consolidados, el proyecto de las firmes de carreteras ha transitado fundamentalmente dentro del terreno del empirismo. Los métodos analíticos han tardado en incorporarse a la técnica y, por lo tanto, se ha venido recurriendo básicamente a materiales y secciones estructurales sobre los que se disponía

de alguna experiencia anterior. Con el crecimiento desmesurado del tráfico en los últimos años, el encarecimiento de los materiales y la aparición también de nuevos materiales y técnicas, el problema ha cobrado otra dimensión y los métodos basados en la experiencia se han encontrado con un vacío difícil de cubrir.

Se ha comprobado que el contenido teórico de los métodos analíticos de dimensionamiento y el apoyo de los ensayos de laboratorio son insufi-

1. INTRODUCTION

Unlike other highly advanced branches of engineering where methods of dimensioning are well developed, road design has basically evolved by empirical means. Analytical methodology has taken a long time to integrate itself into road design techniques and, as a result, there is a recurring tendency to rely basically on materials and pavement structures which have been tried and tested. With the enormous growth in road traffic during recent years, the in-

creased cost of materials and the appearance of new materials and techniques, the problem has acquired a new dimension and challenges are appearing which experience-based methods have difficulty facing up to.

It has been found that the theoretical content of analytical methods of dimensioning with the support of laboratory testing are not sufficient to forecast the life of road pavements with the required precision owing, amongst other reasons, to the fact that it is practically impossi-

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (MOPT).

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (MOPT).

(***) Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (MOPT).

cientos para predecir con una exactitud aceptable la vida de servicio de los firmes de carreteras debido, entre otras razones, a que es prácticamente imposible simular con el modelo teórico o en laboratorio el modo de trabajo de los materiales utilizados, del conjunto de capas o de las cargas aplicadas, contemplando todas las variables.

De aquí ha surgido la necesidad de apoyar este tipo de estudios con otros a escala real, a modo de tarado de los procedimientos anteriores. Evidentemente el tratamiento más directo de estos ensayos a escala real son los tramos de ensayo en carreteras abiertas al tráfico, pero su utilización presenta dos problemas fundamentales: exigen mucho tiempo hasta que puedan obtenerse resultados (en general varios años) y no permiten independizar todas las variables (no puede, por ejemplo, estudiarse la influencia del cambio de carga legal por eje).

Las pistas de ensayo con carga automatizada permiten obtener resultados de forma acelerada y con un control total o casi total de las variables que intervienen en el dimensionamiento de firmes. Actualmente existen más de veinte pistas de ensayo en el mundo, ocho de ellas construidas en el último decenio. Puede decirse que constituyen la herramienta más eficaz de que se dispone actualmente para la verificación de modelos y el estudio del comportamiento mecánico de las carreteras.

2. DESCRIPCION DE LA PISTA DE ENSAYO

La pista de ensayo del CEDEX tiene una configuración oval constituida por dos tramos rectos enlazados por dos tramos curvos (Foto 1). Cada uno de ellos tiene una longitud aproximada de 75 m con

304 m de longitud total. Descontando las zonas de transición entre los tramos rectos y curvos quedan 67 m, en cada tramo recto, para la realización de ensayos de firmes. Como se considera que la longitud mínima para cada ensayo es de 20 m, el número de secciones que pueden ensayarse en la pista es de seis. Las zonas en curva no se utilizan para ensayos de firmes, quedando reservadas para el estudio de materiales de superficie: pinturas, capas de rodadura, etc.

Mientras que los tramos en curva se apoyan en el terreno natural, en los tramos rectos se ha dispuesto un cajón armado, dentro del cual se construyen las secciones. Este sistema permite el aislamiento total de las secciones de ensayo respecto al terreno circundante. También hace posible inundar el terraplén para simular distintas posiciones del nivel freático. Los cajones de hormigón tienen 2,60 m de profundidad, pudiéndose construir terraplenes de 1,25 m como mínimo. La an-

ble to simulate the behaviour of the materials used in a series of courses, or the loads to which they are subjected, by devising theoretical models or through laboratory testing and take into account all the appropriate variables.

The need has therefore arisen to back up studies of this type with additional full-scale methods as a complement to them. The most direct method of carrying out such full-scale tests would clearly be on roads open to traffic, but this procedure has two fundamental drawbacks. Firstly, results take a long time to obtain (normally several years) and, secondly, it does not allow parameters to be independently varied (for example, it would not be possible to study the effect of changing the legal limits of axle weights, etc.).

Test tracks with automated loads enable accelerated results to be obtained with total or almost total control over the variables which affect the dimensioning of pavements. There are currently more than twenty test tracks around the world, eight of which were con-

structed during the last decade. It could be said that they are the most effective tool presently available to verify models and study the mechanical behaviour of pavements.

2. DESCRIPTION OF THE TEST TRACK

The CEDEX test track is oval shaped with two straight sections linked by two curved sections (see Photograph 1). Each straight section is approximately 75 m long and the track has a total circumference of 304 m. Leaving out the transition area between the curved and straight sections, 67 m are available on each straight section for carrying out pavement testing. If the minimum section required for each test is taken as 20 m, six sections are therefore available. The curved sections are not used for pavement testing but are reserved for studying surface materials: paints, wearing courses, etc.

Although the curved sections are laid directly on the natural subgrade, on the straight sections there is a casing of rein-



FOTO 1. Vista general de la pista de ensayo.
PHOTOGRAPH 1. General view of the test track.

chura es de 8 m, lo que permite la construcción con equipos convencionales de carretera.

En el perímetro interior de la zona de ensayo se ha dispuesto una viga de hormigón que sirve de guía al vehículo simulador de tráfico y permite el control de la trayectoria de la carga. La viga de hormigón reposa, en los tramos rectos, sobre galerías subterráneas accesibles, que sirven para albergar las conexiones entre los cables de los sensores, instalados en el firme, y el sistema permanente de adquisición de datos. Se ha dispuesto una estructura que permite cubrir las secciones de ensayo si se desea e instalar difusores de agua para simular la lluvia o cualquier otro dispositivo para controlar las condiciones climáticas.

El vehículo simulador de tráfico tiene dos partes diferenciadas: el carro guía y el de carga. Este último aplica la carga por gravedad. Su peso total (propio más lastre) es de 6,5 t, equivalente a un semieje de 13 t, que es el máximo eje simple permitido en España. Está provisto de un par de ruedas gemelas con neumáticos convencionales y una presión de inflado de 8,5 kg/cm². El carro de carga es tractor y genera el movimiento de todo el vehículo. El motor es eléctrico y toma la corriente de una carrilera situada sobre la viga guía. La velocidad máxima de circulación, en régimen continuo de explotación, es de 50 km/h, con una velocidad media de régimen de 40 km/h. El carro puede moverse transversalmente gracias a un gato hidráulico incorporado al vehículo. El máximo movimiento transversal es de ± 400 mm, lo que produce, teniendo en cuenta el ancho de los neumáticos, una banda rodada de 1,3 m de anchura como máximo. La distribución de las pasadas sigue una curva normal que responde a distribuciones

reales medidas en carretera. En la actualidad se están construyendo otros dos vehículos de forma que se espera que en el año 93 circulen simultáneamente tres vehículos.

La instalación dispone de un sistema automático de gobierno del movimiento del vehículo, ubicado en el centro de control situado en el interior de la pista, y cuyas órdenes se transmiten por radio al vehículo. El sistema automático de adquisición de los datos de la instrumentación posee una capacidad máxima de 300 sensores en cada ensayo, con toma de datos en tiempo real y almacenamiento de los mismos en base de datos.

Es importante señalar que toda la instalación, y especialmente el vehículo y su sistema de gobierno, son prototipos construidos exprofeso y con tecnología española.

3. COMPARACION DE SECCIONES POR DETERIOROS

3.1. DESCRIPCION GENERAL

Uno de los objetivos fundamentales de la pista es comparar distintas secciones estructurales sometidas al paso controlado de una carga tipo. La comparación se lleva a cabo estudiando la evolución de los deterioros que produce en las diferentes secciones la repetición de cargas. Al final del estudio se presenta una lista ordenada de las seis secciones, estudiadas según el número de aplicaciones de carga que han soportado hasta el fallo. En los estudios realizados hasta ahora se han considerado los siguientes deterioros: la fisuración superficial, la pérdida de regularidad superficial y el aumento de las deflexiones.

La pérdida de regularidad superficial transversal, tal y como se evalúa y estudia en la

forced concrete inside which the sections are constructed. This system enables the test sections to be completely isolated from the surrounding ground. It also enables the embankment to be flooded to simulate different groundwater levels. The concrete casings are 2.60 m deep enabling embankments of at least 1.25 m to be constructed. It is 8 m wide and conventional road construction equipment can therefore be used.

A concrete rail has been constructed along the inside perimeter of the track to serve as a guide for the traffic simulation vehicle and to provide control over the path of the load. The concrete rail rests over accessible underground galleries on the straight sections which house the connections for the sensor cables installed in the pavement and the permanent data collection equipment. A structure has been created which enables sections of the track to be covered over if desired and which enables water sprinklers to be installed to simulate rainfall along with other equipment to control climatic conditions.

The traffic simulation vehicle is made up of two parts; the guidance vehicle plus the load assembly. The latter exerts a load through gravity. Its total weight (vehicle plus ballast) is 6.5 t, equivalent to a 13 t half-axle, which is the maximum limit permitted in Spain. It is fitted with a pair of twin wheels with conventional tyres inflated to a pressure of 8.5 kg/cm². The load assembly contains the driving gear and provides the power for the vehicle as a whole. The motor is electric and draws power from a roller path located on the guide rail. The vehicle has a maximum speed in continuous motion of 50 kmph. The vehicle can be moved in a transverse sense by means of a hydraulic jack incorporated into it. The maximum transverse movement is ± 400 mm which,

taking into account the width of the tyres, produces a maximum riding width of 1.3 m. The vehicle passes are distributed following a standard curve in line with the actual distribution measured on the road. A further two vehicles are currently being built and it is hoped that in 1993 there will be three vehicles running simultaneously around the track.

An automatic system has been installed to control the vehicle's movements, located in the control centre in the middle of the track from where instructions are passed to the vehicle by radio. The automatic data collection instrument system is capable of handling up to 300 sensors for each test, with information gathered in real time and stored in the data base.

It should be stressed that the complete installation and, in particular, the vehicle and its control system, are purpose built prototypes utilizing Spanish technology.

3. COMPARISON OF WEAR AMONGST SECTIONS

3.1. GENERAL DESCRIPTION

One of the main objectives of the test track is to make a comparison between different sectional pavement structures subjected to the controlled passage of conventional loads. The comparison is carried out by studying the development of various types of wear which occur in different sections as the load is repeatedly applied. At the end of the test, a list is arranged of the six sections with details of the number of load applications which have taken place before failure occurs. In studies carried out up to the present, the following types of wear have been examined: surface cracking, loss of surface evenness and increase in deflection.

Examination of the loss of transverse surface evenness at

pista de ensayo, se refiere a la superficie inicial, es decir, la que forma la rodadura una vez construida la carretera. La evaluación del deterioro se lleva a cabo de forma directa obteniendo los perfiles transversales del tramo estudiado mediante un perfilómetro que mide geométricamente el perfil en cuestión. Los perfiles de medida se espacian 1 m a lo largo del tramo de ensayo. La comparación de estos perfiles en distintos momentos del ensayo permite estudiar la evolución del deterioro. Se definen varios parámetros para el seguimiento, siendo los más importantes la rodadura máxima y la velocidad del deterioro (diferencia de rodaduras máximas entre ciclos dividida entre el número de ciclos). En alguna aplicación particular se estudian otros parámetros como área de la zona rodada o pendiente del perfil transversal.

En el estudio del deterioro de la regularidad superficial longitudinal se utiliza el Dipstick (Digital Incremental Profiler). El equipo obtiene y almacena automáticamente en memoria la diferencia de cotas entre puntos separados secuencialmente una cierta distancia (normalmente 25 o 30 cm). La interpretación más usual de las medidas del Dipstick se realiza mediante el cálculo del IRI (Índice de Regularidad Internacional). Su cálculo se basa en obtener la media de la pendiente rectificadora del perfil longitudinal filtrado, mediante el modelo denominado de cuarto de coche normalizado, para una velocidad patrón de 80 km/h, y referido a una longitud determinada.

La fisuración superficial en la pista de ensayo se evalúa mediante inspección visual, pintando en toda su longitud las fisuras que aparecen. En cada auscultación se utiliza pintura de un color distinto para poder

distinguir la aparición de grietas en el tiempo. Posteriormente se coloca en la superficie de las secciones una trama metálica. Se realiza entonces una fotografía de la superficie del firme en la que aparezca toda la trama, y por tanto las fisuras de su interior, que se distinguen gracias a la pintura. La referenciación de las grietas se realiza fácilmente, con ayuda de las varillas de la trama. Finalmente el dibujo de las fisuras se digitaliza para su tratamiento posterior. Los parámetros que se calculan en este deterioro son: longitud fisurada, área fisurada y gravedad de fisuración.

Respecto a la pérdida de capacidad de soporte se ha utilizado el equipo del deflectómetro de impacto. Este equipo tiene una gran repetibilidad en las medidas y presenta una gran facilidad de movimiento dentro de la pista siendo posible ubicarlo con gran precisión sobre el punto a medir. El parámetro de análisis es la deflexión media.

3.2. EJEMPLO DEL PRIMER ENSAYO

3.2.1. Descripción del primer ensayo. Las secciones del primer ensayo fueron la 321 y la 322 de la vigente Instrucción 6.1 y 2-IC sobre Secciones de Firme (Fig. 1). La primera de ellas (sección 1 en el ensayo) tiene un gran espesor de material granular (25 cm de zahorra artificial más 25 cm de zahorra natural) y 15 cm de mezcla bituminosa. La segunda (sección 4 en el ensayo) tiene un espesor menor de material granular (25 cm de zahorra) y mayor de mezcla bituminosa (18 cm). En cada dos de las otras cuatro secciones de ensayo se mantienen los mismos espesores y tipo de capas inferiores, con la única variación del espesor de las capas bituminosas, que resulta disminuido.

the test track is carried out in relation to the initial surface, in other words the one formed by the wearing course once the pavement is constructed. It is directly ascertained by using a profilometer to examine the transverse profile of the section by geometrical measurement. The profile is examined at 1 m intervals along the section. An examination of these profiles at different times during the course of a test enables the development of wear to be studied. Several parameters are defined in monitoring it, the most important being the maximum rutting and the rate of wear (the difference between the maximum rutting between cycles divided by the number of cycles). In particular cases, other parameters are examined such as the area of the ridden zone passed over and the gradient of the transverse profile.

The study of wear in longitudinal surface evenness is carried out by using the Dipstick (Digital Incremental Profiler). This device automatically measures the differences between the levels of a sequence of points separated by a fixed distance (normally 25 or 30 cm) and stores them in memory. Dipstick measurements are usually interpreted by calculating the IRI (International Roughness Index). It is calculated by obtaining the average rectified gradient of the filtered longitudinal profile using the so-called standardized quarter-car model for a standard speed of 80 kmph over a specific length.

Surface cracking at the track is evaluated by visual inspection and the cracks which appear are painted over the whole section. At each auscultation different coloured paint is used to distinguish the appearance of cracks over a period of time. A metal grid is then placed over the surface of the sections and photographs of the pavement are taken showing the whole grid and the cracks inside it which

are distinguished by their different colours. The cracks can be easily referenced by their position in the grid. Finally, a drawing of the cracks is digitalized for later processing. The parameters which are calculated with respect to this type of wear are the lengths of the cracks, the area of cracking and the degree of seriousness involved.

In respect of loss of load-bearing capacity, an impact deflectometer is used. This equipment has a large capacity for repeated measurements and is very easy to move around the track, where it can be positioned with degree of precision over the point to be measured. The parameter used in the analysis is the average deflection.

3.2. AN EXAMPLE FROM THE FIRST TEST

3.2.1. Description of the First Test. The first pavement sections tested were types numbers 321 and 322 of the current Pavement Section Code 6.1 and 2-IC (see Fig. 1). The first of these (Section 1 in the test) has very thick layers of granular material (25 cm of wet mix and 25 cm of natural graded aggregate), and 15 cm of asphalt. The second section (number 4 in the test), has a lesser thickness of granular material (25 cm of graded aggregate) and more asphalt (18 cm). In each pair of the remaining four test sections, the same thicknesses and types of base layers were maintained and the only variation was in the thicknesses of the asphalt layers, which were progressively reduced.

The main purpose of the test was to compare the useful life of two sections which are proposed in the codes as alternative solutions for use in similar design situations. In addition, information was sought as to the sensitivity of these sections to a decrease in the thickness of the asphalt layer.

3.2.2. Results from the First Test. Section 322, made up of

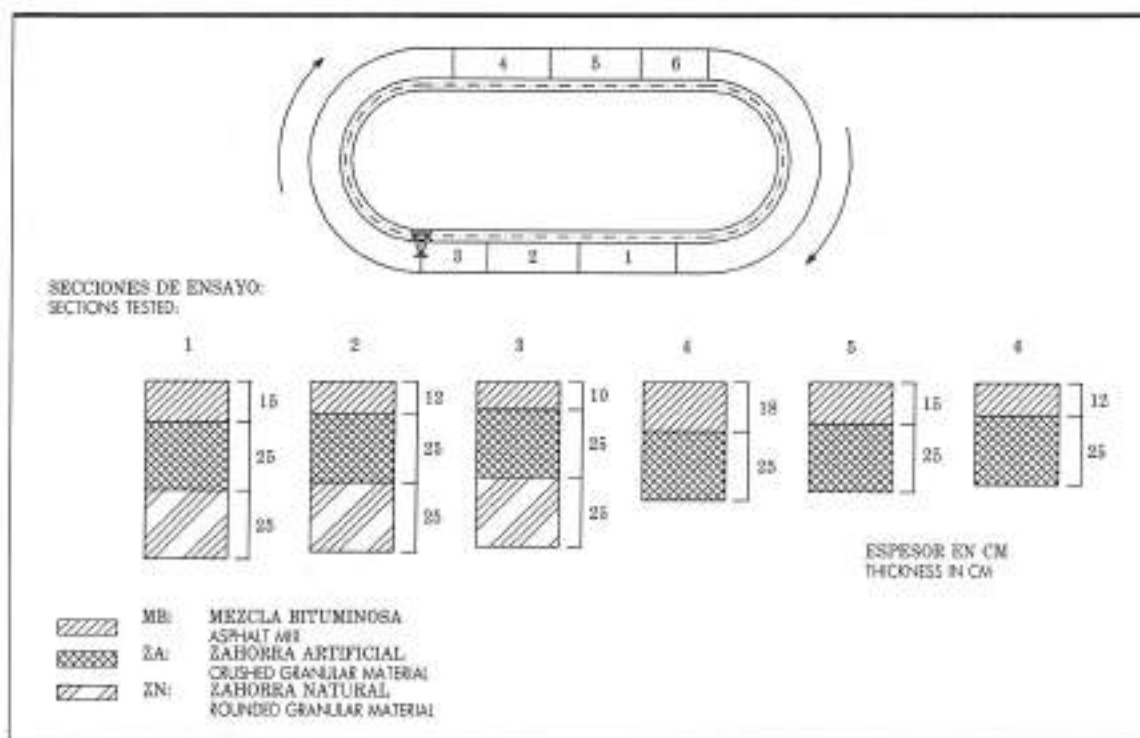


FIGURA 1.
Secciones de firme
del primer ensayo en
la pista.
FIGURE 1.
Pavement sections in
the first test on the
track.

El objetivo principal del ensayo ha sido comparar la vida de servicio de dos secciones del catálogo propuestas como soluciones alternativas para unas mismas condiciones del proyecto. Se trataba también de determinar la sensibilidad de estas secciones a los decrementos de espesor de la mezcla bituminosa.

3.2.2. Resultados del primer ensayo. La sección 322, compuesta por 15 cm de mezclas bituminosas sobre 50 cm de material granular (25 cm de zahorra artificial y 25 cm de zahorra natural), constituye una solución técnica mejor que la 321, compuesta por 18 cm de mezclas bituminosas sobre 25 cm de zahorra artificial. Esta conclusión se basa en dos hechos, manifestados en el ensayo:

- La sección 322 ha soportado 1.000.000 ciclos de carga sin haber mostrado deterioros significativos, mientras que la sección 321 tenía al finalizar el ensayo un 44 % de longitud fisura-

da y había fallado por deformación en el cielo 600.000 (ver Tabla 1).

- La sección 322 es menos sensible a las disminuciones de espesor de las capas de mezcla bituminosa. Las secciones ensayadas con las mismas capas inferiores que las anteriores, pero con 2 cm menos de pavimento, han tenido un comportamiento muy distinto. La se-

cción 321, compuesta por 18 cm de mezcla bituminosa sobre 25 cm de zahorra artificial, no resistió más de 600.000 ciclos de carga sin haber mostrado deterioros significativos. La sección 322, compuesta por 15 cm de mezcla bituminosa sobre 50 cm de material granular (25 cm de zahorra artificial y 25 cm de zahorra natural), constituyó una solución técnica mejor que la 321, compuesta por 18 cm de mezcla bituminosa sobre 25 cm de zahorra artificial. Esta conclusión se basa en dos factores que emergieron del test:

- La sección 322 resistió 1.000.000 ciclos de carga sin haber mostrado deterioros significativos.

SECCION SECTION	CF	CRT
1	> 1.000	> 1.000
2	> 1.000	> 1.000
3	670	700
4	1.000	600
5	700	550
6	410	500

TABLA 1. Ciclos de carga de vida útil de las secciones por fisuración y por deterioro de la regularidad transversal (1.º ensayo).

TABLE 1. Useful life in load cycles of sections in terms of cracking and wear resulting from transverse evenness (1st test).

CF = Vida útil por fisuración (miles de ciclos).
Useful life in terms of cracking cycles x 1.000.
CRT = Vida útil por regularidad transversal (miles de ciclos).
Useful life in terms of transverse evenness cycles x 1.000.

out showing any significant wear whilst, by the end of the test, Section 321 had suffered cracking along 44 % of its length and suffered deformation failure at cycle 600,000 (see Table 1).

- Section 322 was less sensitive to the reduction in the thickness of the asphalt layers. The sections tested with the same base layers but with 2 cm less surface layer behaved very differently. In the case of the 321 type, it failed, in accordance with one of the criteria utilized, at 550,000 load cycles. The analogous 322 type section had not suffered 50 % cracking by the end of the test.

Section type 321 is not suitable for the operational conditions for which it is specified in Code 6.1 and 2-IC. The section failed during the test after 600,000 load cycles. As a result, in climatic conditions similar to those found in Madrid, it is highly probable that it would not last beyond 10 to 12 years with a traffic density towards

mejante a la sección 321 alcanzó el fallo, según alguno de los criterios empleados, a los 550.000 ciclos de carga. La análoga a la sección 322 al final del ensayo no había llegado al 50 % de fisuración.

La sección 321 no es adecuada para las condiciones de trabajo previstas en la Instrucción 6.1 y 2-IC. Esta sección ha llegado al fallo en este ensayo con 600.000 ciclos de carga. En consecuencia, su durabilidad, en unas condiciones climáticas similares a las de Madrid, tiene una gran probabilidad de encontrarse entre diez y doce años para un nivel alto de tráfico dentro del intervalo de variación previsto para su tipo en la Instrucción de Carreteras. Para un nivel medio de tráfico dentro de este intervalo, si cumpliría las condiciones de proyecto. No obstante, con 500.000 aplicaciones de carga (trece años de servicio para dicho nivel medio) el porcentaje de longitud fisurada en el ensayo supera el 15 %. En la práctica esto quiere decir que esta sección estructural puede requerir frecuentes labores de conservación y rehabilitación.

La sección constituida por 10 cm de mezcla bituminosa y 50 cm de capas granulares es equivalente, en cuanto a vida de servicio, a la formada por 18 cm de mezcla bituminosa y 25 cm de zahorras, habiendo soportado ambas unos 650.000 ciclos de carga. Es decir, en este tipo de firmes 1 cm de mezcla bituminosa es equivalente a 3 cm de zahorra natural. Estas equivalencias se han establecido componiendo los criterios de fallo por pérdida de regularidad y por agrietamiento. Considerando individualmente cada tipo de fallo, la primera sección es mejor que la segunda en cuanto a regularidad y peor en fisuración.

Como consecuencia de lo anterior, y por las razones expuestas, se propuso eliminar de la Instrucción la sección 321, ya que su empleo podría originar unos gastos excesivos de conservación, o llevar a un fallo total prematuro, y mantener la sección 322. Aunque el espesor de mezcla bituminosa parece superior al necesario para soportar el tráfico de proyecto, su reducción podría llevar a situaciones críticas.

En las figuras 2 a 4 se presentan algunos ejemplos de la evolución de deterioros con los ciclos de carga producidos, durante este ensayo, en las seis secciones de la pista.

3.3. EJEMPLO DEL SEGUNDO ENSAYO

3.3.1. Descripción del segundo ensayo. La idea básica

the maximum limit as set out in the Road Code for its type. At average levels of traffic density provided for in the Code, it would however meet the specified conditions. Nevertheless, after being loaded 500,000 times (13 years in service at this average level), the proportion of longitudinal cracking in the test exceeded 15 %. In practice, this means that this structural pavement section would require frequent maintenance work and rehabilitation.

The section made up of 10 cm of asphalt and 50 cm of granular layers is equivalent in terms of useful life to the made up of 18 cm of asphalt and 25 cm of granular layer as both withstood 650,000 load cycles. In other words, with this type of pavement, 1 cm of asphalt is equivalent to 3 cm of rounded

granular material. This equivalence is arrived at by compounding the criteria of failure through loss of evenness and through cracking. Taking each type of failure individually, the first section is superior to the second in terms of evenness and inferior in terms of cracking.

As a result of the above and for the reasons mentioned, it was proposed that Section 321 should be removed from the Code as its use could give rise to excessive maintenance costs or a premature total failure, and that section 322 should be left in. Although the thickness of asphalt seems greater than necessary to withstand the traffic in question, a critical situation could arise if it were reduced.

Various examples of the development of different types of wear are given in figures 2 to

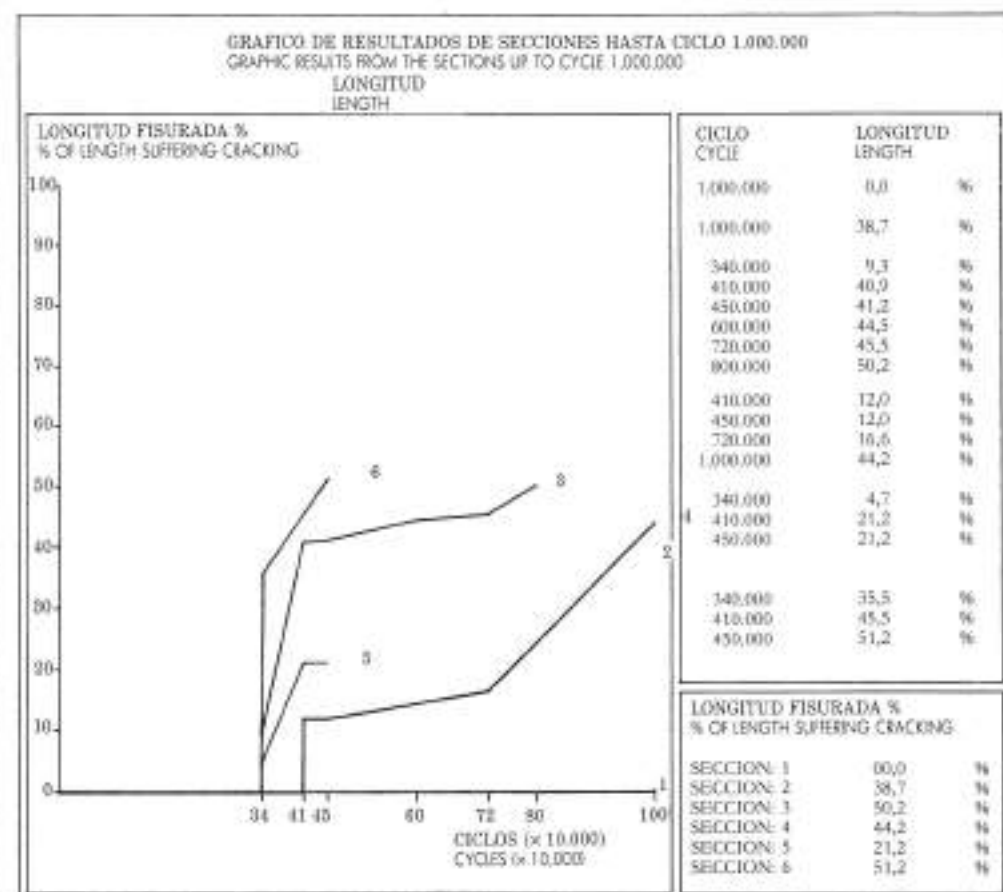


FIGURA 2. Evolución de la longitud fisurada con el número de ciclos en todas las secciones.
FIGURE 2. Development of the extent of cracking in all sections after different number of cycles.

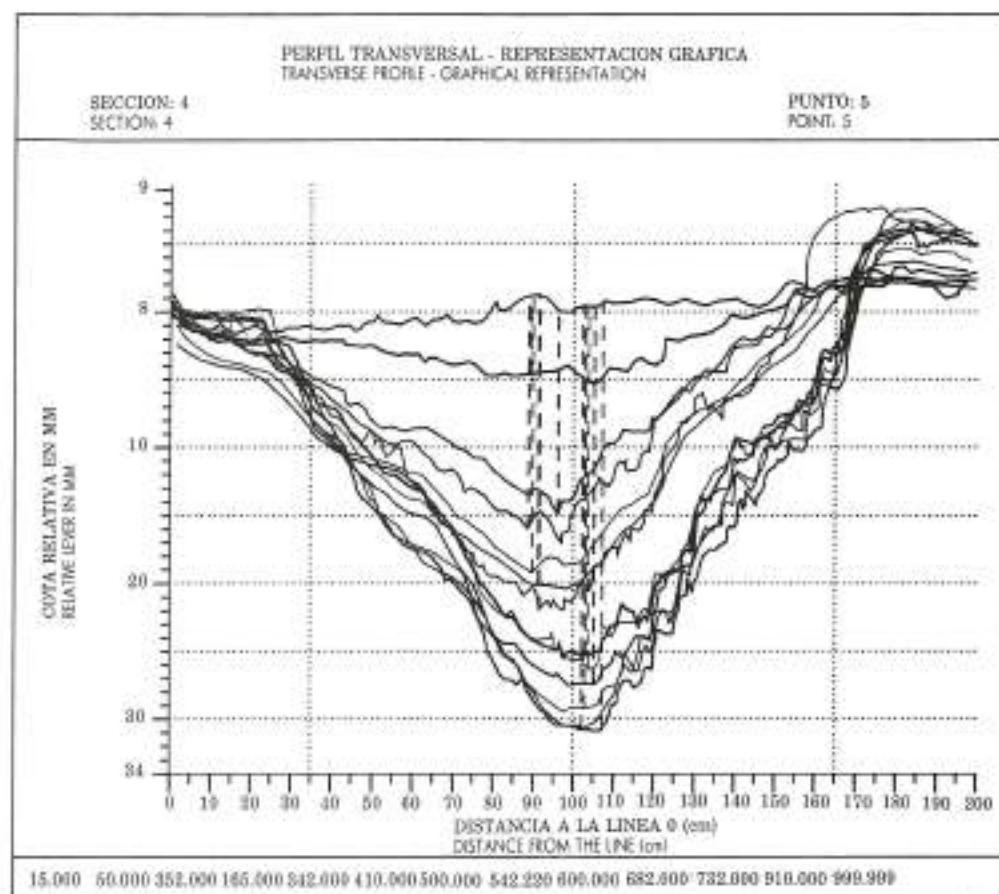


FIGURA 3. Ejemplo de evolución de la regularidad transversal.
FIGURE 3. Example of development of transverse evenness.

del ensayo es la comparación de firmes del catálogo con pavimento bituminoso, pero con distintos tipos de base, estudiándose además la influencia de tipos diferentes de explanada. Para ello se han seleccionado, de acuerdo con las directrices marcadas por la Subdirección General de Construcción del MOPT, tres secciones de la Instrucción 6.1 y 2-IC, las terminadas en 2, 3 y 4, correspondientes a un nivel de tráfico T2 y apoyadas en explanadas tipo E2 y E3. Las secciones estudiadas se presentan en la figura 5.

Como resultado del ensayo se espera determinar la vida de servicio relativa de las secciones con pavimento de mezcla bituminosa y apoyados sobre zahorras, suelocemento o gravacemento. Asimismo se

hará un análisis del procedimiento seguido en el catálogo de la disminución de espesor de los firmes al pasar de la explanada tipo E2 a la tipo E3.

Con el fin de acelerar el ensayo, éste se realizará en las condiciones más desfavorables en cuanto al nivel freático situando éste a 80 cm de la superficie de la explanada. Con este fin se ha diseñado un sistema de inundación del suelo provisto de sus correspondientes dispositivos de control. Complementariamente se simularán los fenómenos de lluvia de forma controlada, para lo que se han cubierto todas las secciones de ensayo y se ha diseñado y construido un sistema de riego. Con el objetivo de obtener una explanada del tipo E2 y E3, y de

4, based on the load cycles applied during the test along the six sections of the track.

3.3. AN EXAMPLE FROM THE SECOND TEST

3.3.1. Description of the Second Test. The basic aim of this test was to compare asphalt pavements listed in the Code but with varying types of base and also to study the effect of different types of subgrade. For this purpose, in accordance with instructions issued by the Sub-Directorate General for Construction of the Ministry of Public Works and Transport, three sections were selected from Code 6.1 and 2-IC, those labelled 2, 3 and 4, corresponding to a traffic level of T2 and laid over subgrade of types E2 and E3. The sections in question are detailed in Figure 5.

It is hoped that the relative useful lives can be determined of asphalt pavement sections laid over graded aggregates, cement-stabilized soil and gravel cement. An analysis will also be made of the procedure set out in the Code for reduction of the thickness of the pavements when moving from Type E2 to E3 subgrade.

In order to accelerate the test, it was carried out under the most unfavourable conditions in terms of the groundwater level, which was put at 80 cm from the surface of the subgrade. To this end, a ground flooding system was devised and fitted with the monitoring devices. To complement this, controlled rainfall was simulated by covering all the sections of the test track and a sprinkler system was designed and installed. In order to simulate the subgrade of Type E2 and E3 in line with Code 6.1 and 2-IC, measures were implemented which consisted in capping the embankment with 50 cm (constant thickness) of selected earth, which in the case of E3 had to have a CBR of 20 or more, and an embankment core built of a soil with tolerable consistency in a thickness varying between one section and another.

3.3.2. Results from the Second Test (Partial). After subjecting the test pavements to the first 400,000 load cycles (seven months of testing during the spring, summer and part of the autumn), no developments had taken place in terms of the types of wear studies other than to a minimal degree. As far as cracking was concerned for example, no surface cracks appeared in any of the six sections. The first results available to date are shown in Figures 6 and 7.

4. THE CALIBRATION OF MODELS

4.1. GENERAL DESCRIPTION Despite their widespread use, the problems of testing and cali-

acuerdo con la Instrucción 6.1 y 2-IC., se adoptó la siguiente solución: coronación del terraplén formada por 50 cm (espesor constante) de suelo del tipo seleccionado, al que en el caso de E3 se le exigía un CBR superior o igual a 20, y núcleo del terraplén constituido por suelo tolerable, de espesor variable de unas secciones a otras.

3.2.2. Resultados del segundo ensayo (parciales). Después de sometidos los firmes de ensayos a los primeros 400.000 ciclos de carga (siete meses de ensayo correspondientes a primavera, verano y parte del otoño), todavía no ha existido evolución en ninguno de los deterioros estudiados, o bien ésta ha sido mínima. Por ejemplo, en cuanto a fisuración no se ha producido ninguna grieta superficial en ninguna de las seis secciones. En las figuras 6 y 7 se adjuntan los primeros resultados obtenidos hasta la fecha.

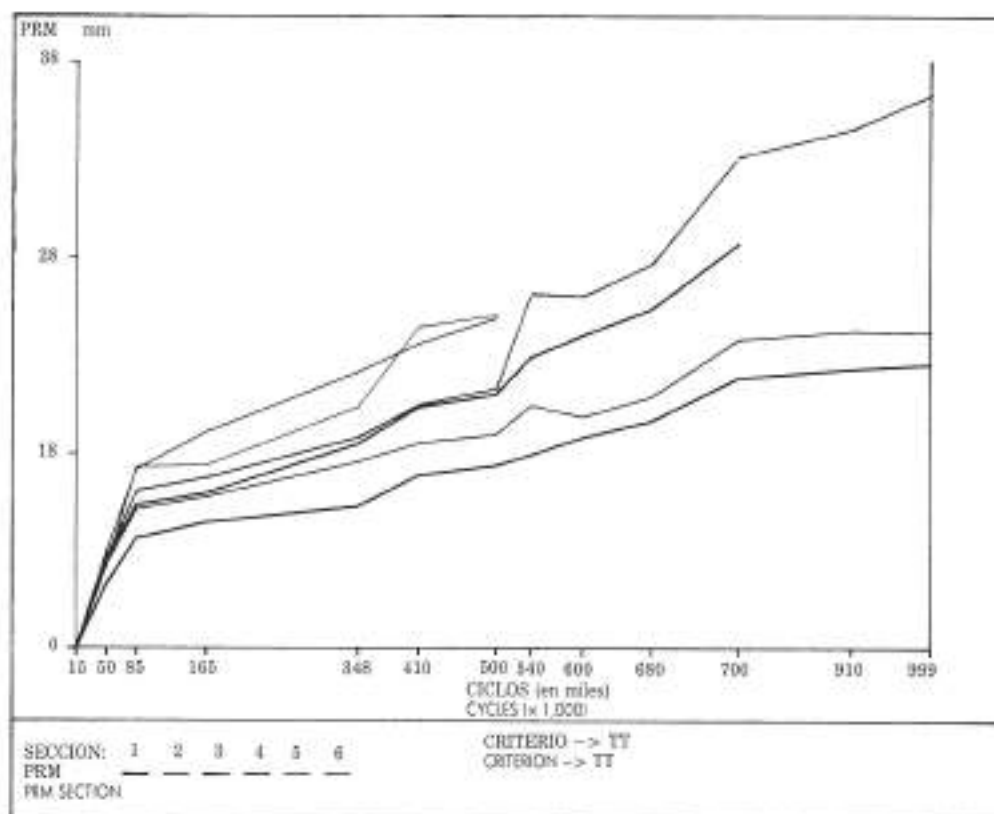


FIGURA 4. Evolución de la rodadura media con el número de ciclos (I.^{er} ensayo).
FIGURE 4. Development of the average rutting with number of cycles (Ist test).

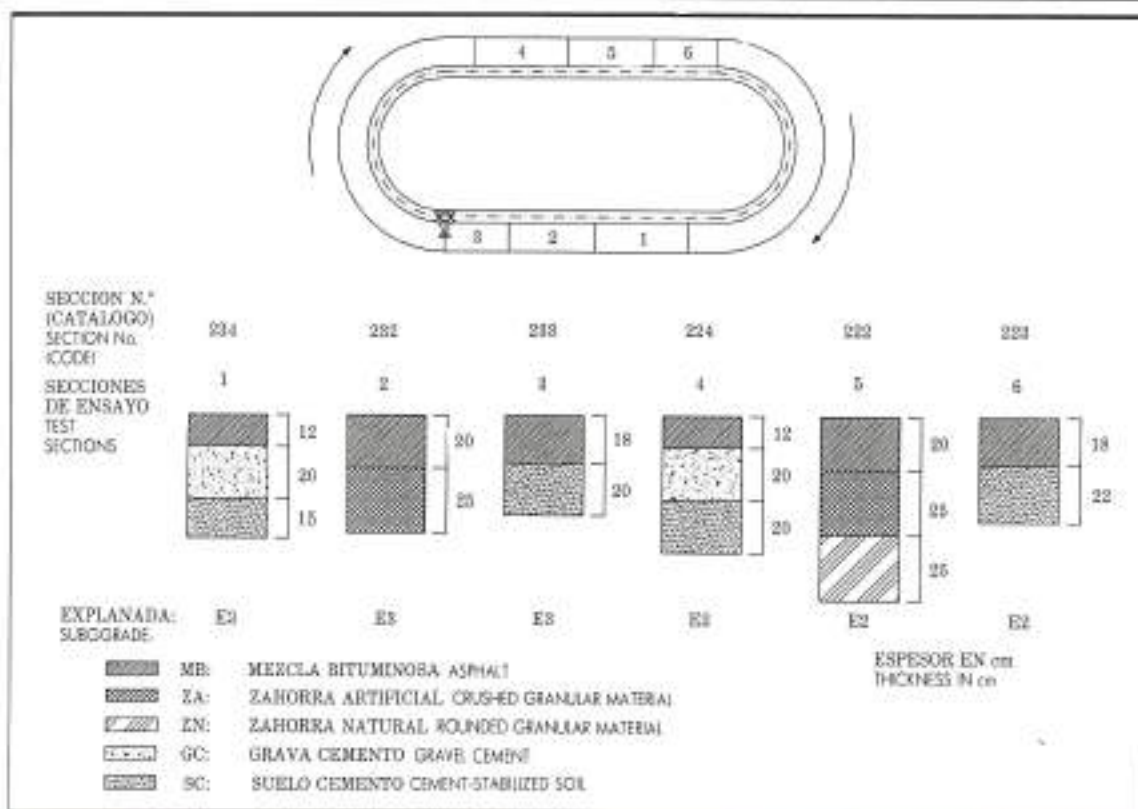


FIGURA 5.
Secciones de firme
del segundo ensayo
en la pista.
FIGURE 5.
Pavement sections from
the second test.

4. TARADO DE MODELOS

4.1. DESCRIPCION GENERAL

No obstante su utilización rutinaria, aún hoy en día persisten los problemas inherentes a los modelos, el de la verificación y tarado. La necesidad de esperar veinte o treinta años para tener resultados definitivos en muchos casos ha frenado los intentos de verificación, que en la actualidad son muy escasos, con contadas excepciones. Es por ello que la pista de ensayo ofrece una interesante perspectiva dentro de este campo. Las circulares o lineales existentes hasta la fecha tienen problemas en este campo, unas veces por el tipo de solicitaciones impuestas, y otras por la dificultad de hacer verificaciones comparadas, ensayando distintos firmes en condiciones análogas. La pista construida por el CEDEX reúne una serie de condiciones únicas que la convierte en una herramienta óptima de tarado.

Desde otro punto de vista puede comprenderse fácilmente que en la pista de ensayo no pueden estudiarse todas las secciones posibles de firmes. Y aunque esto fuera factible, no se podrían analizar las diferentes condiciones climáticas o de suelos. Para dar una mayor generalidad a sus resultados, es conveniente realizar una labor de tarado de modelos de forma que luego pueda utilizarse una herramienta contrastada para el análisis de casos distintos a los ensayados.

4.2. TARADO DE LEYES DE FATIGA. EJEMPLO DEL PRIMER ENSAYO

En el primer ensayo se utilizó la misma mezcla bituminosa y el mismo tipo de sección (mezcla sobre capas granulares) en los seis firmes ensayados. Para el tarado del modelo

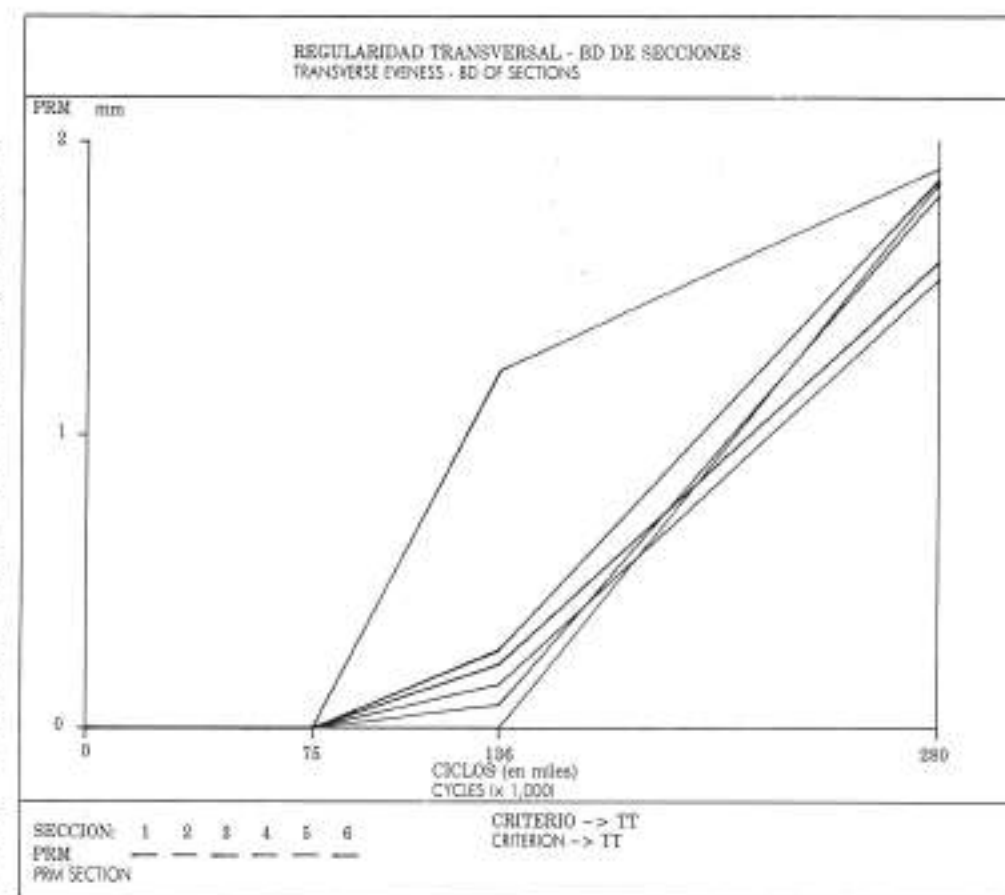


FIGURA 6. Evolución de la rodadura media con el número de ciclos de carga (2.º ensayo).
FIGURE 6. Development of average rutting with number of load cycles (2nd test).

se definieron los módulos de las distintas capas a través de un programa de cálculo inverso que utilizaba las deflexiones medidas en la pista. A partir de estos módulos, y con el programa BISAR, se calcularon las deformaciones críticas iniciales, y éstas se relacionaron con el número de aplicaciones de carga hasta fatiga por agrietamiento de las distintas secciones en el ensayo frente a la deformación horizontal máxima obtenida en el cálculo. En el caso de las secciones 1, 2 y 3, la sección 1 no se agrietó a lo largo del ensayo, lo que coincide con la tendencia de la línea 2-3. En la figura

8 se representa el número de aplicaciones de carga hasta fatiga por agrietamiento de las distintas secciones en el ensayo frente a la deformación horizontal máxima obtenida en el cálculo. En el caso de las secciones 1, 2 y 3, la sección 1 no se agrietó a lo largo del ensayo, lo que coincide con la tendencia de la línea 2-3. En la figura

8 se representa el número de aplicaciones de carga hasta fatiga por agrietamiento de las distintas secciones en el ensayo frente a la deformación horizontal máxima obtenida en el cálculo. En el caso de las secciones 1, 2 y 3, la sección 1 no se agrietó a lo largo del ensayo, lo que coincide con la tendencia de la línea 2-3. En la figura

8 se representa el número de aplicaciones de carga hasta fatiga por agrietamiento de las distintas secciones en el ensayo frente a la deformación horizontal máxima obtenida en el cálculo. En el caso de las secciones 1, 2 y 3, la sección 1 no se agrietó a lo largo del ensayo, lo que coincide con la tendencia de la línea 2-3. En la figura

8 se representa el número de aplicaciones de carga hasta fatiga por agrietamiento de las distintas secciones en el ensayo frente a la deformación horizontal máxima obtenida en el cálculo. En el caso de las secciones 1, 2 y 3, la sección 1 no se agrietó a lo largo del ensayo, lo que coincide con la tendencia de la línea 2-3. En la figura

4.2. CALIBRATION OF THE FATIGUE LAWS. AN EXAMPLE FROM THE FIRST TEST

During the first test, the same asphalt and pavement types were examined (asphalt over granular layers) in the case of all six pavements. In order to calibrate the model, moduli were determined for the different layers using a back-calculation program based on

ra 8 los valores de agrietamiento se refieren a un 20 % de longitud fisurada, comparándose los resultados con las leyes obtenidas sobre testigos en laboratorio, con muestras extraídas de la pista de ensayo. Se ensayaron dos muestras a flexotracción con tres puntos de apoyo y los resultados presentaban la dispersión que se aprecia en la figura. La pendiente de la línea obtenida con las secciones es muy similar a la obtenida con los testigos, pero poco puede decirse de la comparación por la gran dispersión obtenida en los resultados sobre testigos.

En la figura 9 se presentan los resultados para fatiga por deformación de la explanada. Los resultados obtenidos con la pista, para una profundidad de rodadura de 10 mm, se han comparado con las siguientes leyes de fatiga:

Shell (N 1):

$$\epsilon = 2,8 \times 10^{-2} \times N^{-0,25}$$

Chevron (N 2):

$$\epsilon = 1,05 \times 10^{-2} \times N^{-0,223}$$

Brown y Pell (N 3):

$$\epsilon = 2,16 \times 10^{-2} \times N^{-0,28}$$

Como puede verse, los puntos correspondientes al ensa-

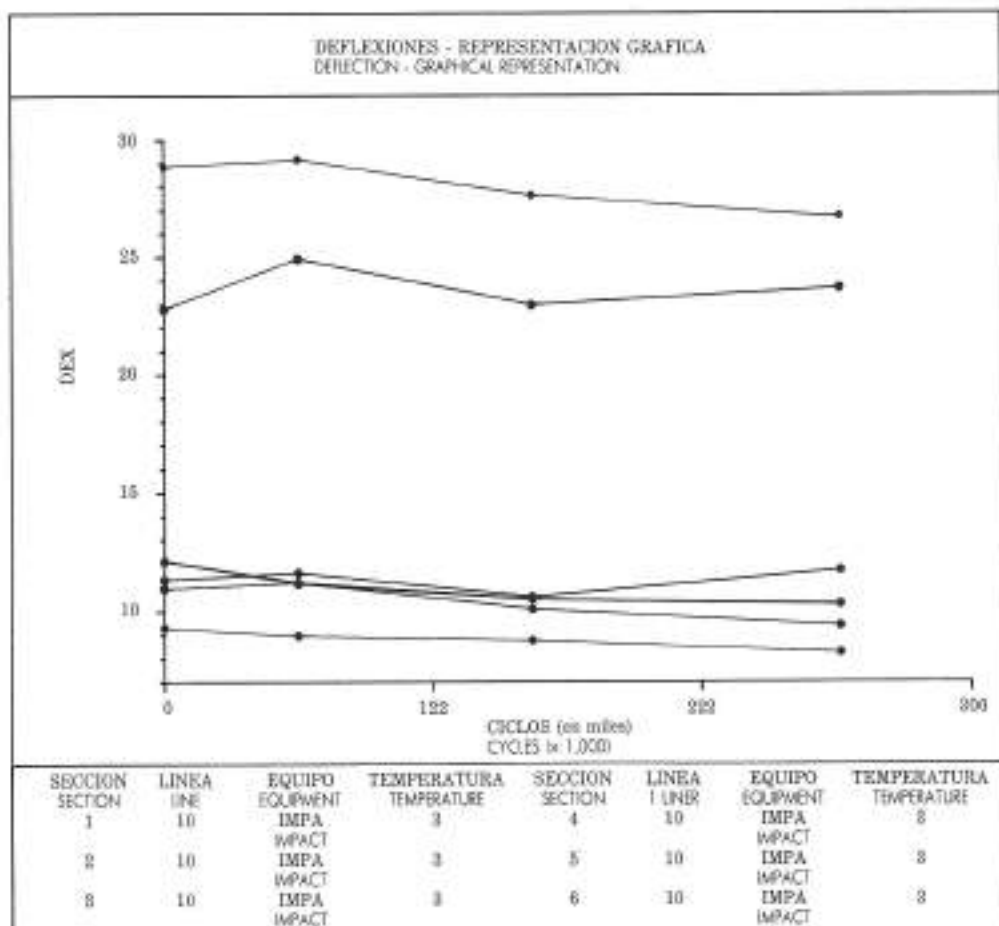


FIGURA 7. Evolución de la deflexión media en la zona rodada de las secciones de ensayo (deflectómetro de impacto: 20 °C).

FIGURE 7. Development of average deflection in the load bearing area of the test sections (falling weight deflectometer: 20 °C).



FIGURA 8. Leyes de fatiga por el 20 % de fisuración de la mezcla (comparación con otras leyes).

FIGURE 8. Fatigue laws at 20 % asphalt cracking (comparison with other laws).

the deflections measured on the track. By taking these moduli and using the BISAR program, the initial critical strains were calculated and these were related to the number of load cycles at different degrees of failure.

The number of load cycles applied to the point of fatigue as a result of cracking is shown in Figure 8 in respect to the different sections used in the test, plotted against the maximum horizontal strain resulting from the calculations. In the cases of Sections 1, 2 and 3, Section 1 did not crack throughout the test, which coincides with the tendency of Line 2-3. In Figure 8, the values for cracking refer to 20 % of the length, with a comparison made between the values for the results in ac-

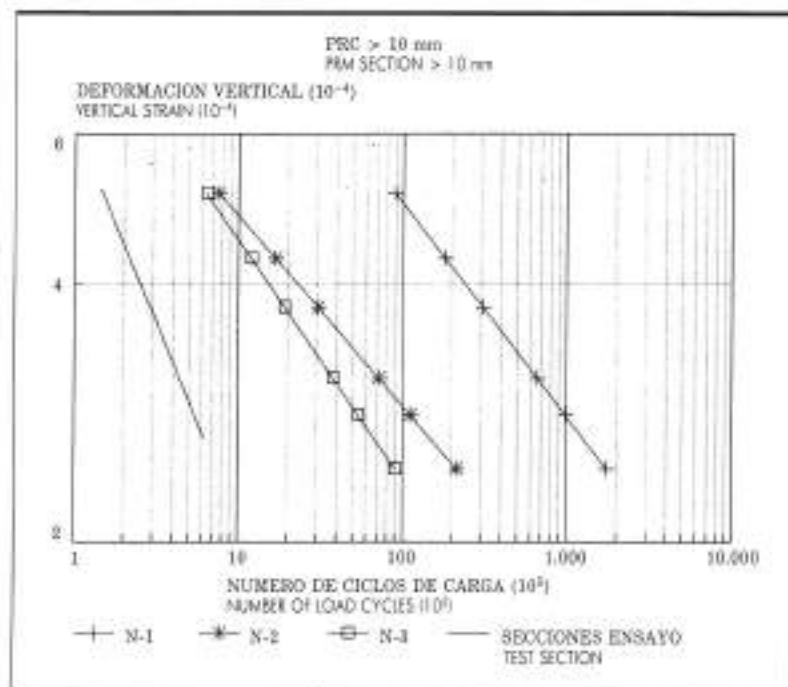


FIGURA 9. Leyes de fatiga por regularidad superficial (comparación con otras leyes).
FIGURE 9. Fatigue laws for surface evenness (comparison with other laws).

son because of the wide spread of results from the cores.

The results in respect of the subgrade fatigue as a result of deformation are shown in Figure 9. The results obtained at the track from a depth of rutting of 10 mm were compared with the following fatigue laws:

Shell:

$$\epsilon = 2.8 \times 10^{-2} \times N^{-0.25}$$

Chevron:

$$\epsilon = 1.05 \times 10^{-2} \times N^{-0.223}$$

Brown & Pell:

$$\epsilon = 2.16 \times 10^{-2} \times N^{-0.28}$$

As can be seen from the corresponding points, the test results produce a steeper line than the theoretical results and which less life before fatigue.

4.3. CALIBRATION OF RESPONSE MODELS. AN EXAMPLE FROM THE SECOND TEST

In the second test the verification was basically concerned with response models. The procedure used is as follows: the input parameters (moduli) are defined by back-calculation of the deflections and then the results from the model are compared with the measurements obtained from the sensors installed in the pavement. If the comparison is poor, the model is modified (the degree of ad-

yo encajan en una línea con mayor pendiente que las teóricas, y que lleva a menores vidas de fatiga.

4.3. TARADO DE MODELOS DE RESPUESTA. EJEMPLO DEL SEGUNDO ENSAYO

En el segundo ensayo la verificación se refiere fundamentalmente a los modelos de respuesta. El procedimiento es el siguiente: se definen los parámetros de entrada (módulos), mediante el cálculo inverso de las deflexiones, y a continuación se comparan los resultados del modelo con las medidas obtenidas en los sensores instalados en el firme. Si la comparación no es buena, se modificará el modelo (grado de adherencia entre capas u optimización mediante cálculo inverso con el conjunto de los sensores).

En la Tabla 2 se presentan los valores de módulos obtenidos para los diferentes materiales y secciones por el procedimiento de cálculo inverso.

En este trabajo se ha utilizado un programa desarrollado en el CEDEX. En las figuras 10 y 11 se presentan, finalmente, algunos ejemplos comparativos entre la curva obtenida por el modelo (utilizando los módulos de la tabla) y la curva medida con el sensor embebido en el firme, ambas en condiciones (carga, temperatura, número de ciclos) análogas.

cordance with the laws derived from testing core samples in the laboratory and samples taken from the test track. Two samples were subjected to a flexural strength test with three supporting points and the results show the spread which is shown in the figure. The slope of the line derived from the sections is very similar to that obtained with the core samples, but little can be taken from the compari-

SECCION SECTION	EX M	ZN M	ZA M	SC M	GC M	MB M
1	160	—	—	5.000	22.000	6.100
2	160	—	410	—	—	6.100
3	160	—	—	20.000	—	6.100
4	105	—	—	20.000	25.000	6.100
5	105	830 (*)	830 (*)	—	—	6.100
6	105	—	—	20.000	—	6.100

TABLA 2. Módulos obtenidos en el cálculo.
TABLE 2. Moduli resulting from the calculations.

M = Módulo medio de cálculo inverso (Mpa).
Average modulus from inverse calculation (Mpa).
EX = Suelos de explanada y terraplenes.
Subgrade and embankment soils.
ZN = Zahrera natural.
Foundry granular material.
ZA = Zahrera artificial.
Crushed granular material.

SC = Suelo cementado.
Cement-stabilized soil.
GC = Gravamesto.
Gravel cement.
MB = Mezcla bituminosa.
Asphalt.
(*) = Considerando una única capa.
Considered one single layer.

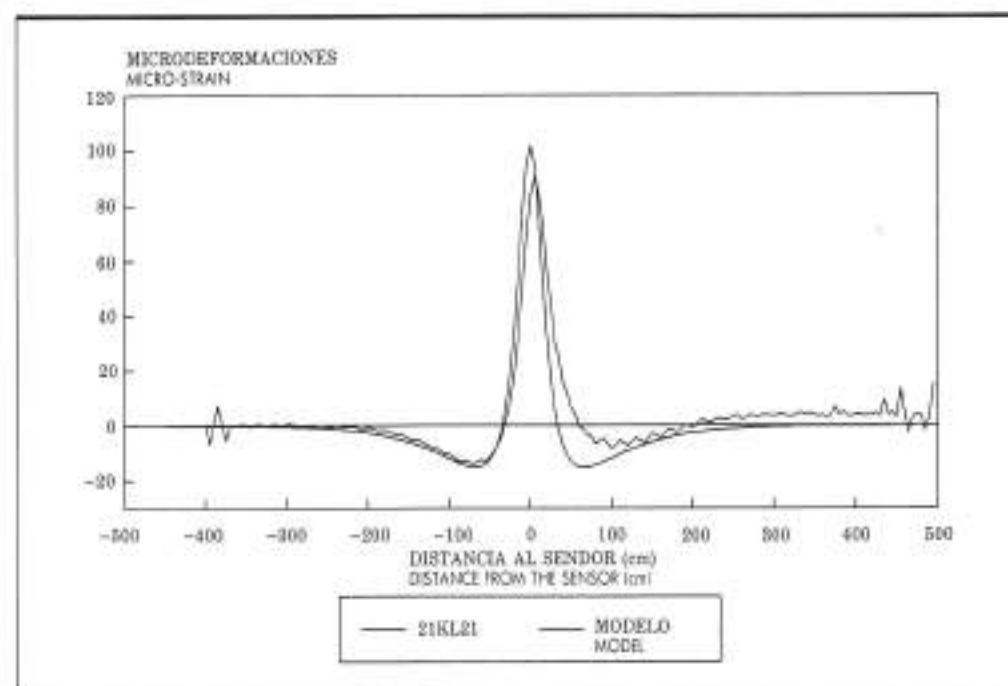


FIGURA 10. Ejemplo comparativo entre curva teórica (modelo) y experimental (sensor) de la deformación longitudinal en mezcla bituminosa.

FIGURE 10. Example of comparison between the theoretical curve (model) and experimental curve (sensor) in respect of the longitudinal strain in asphalt mixes.

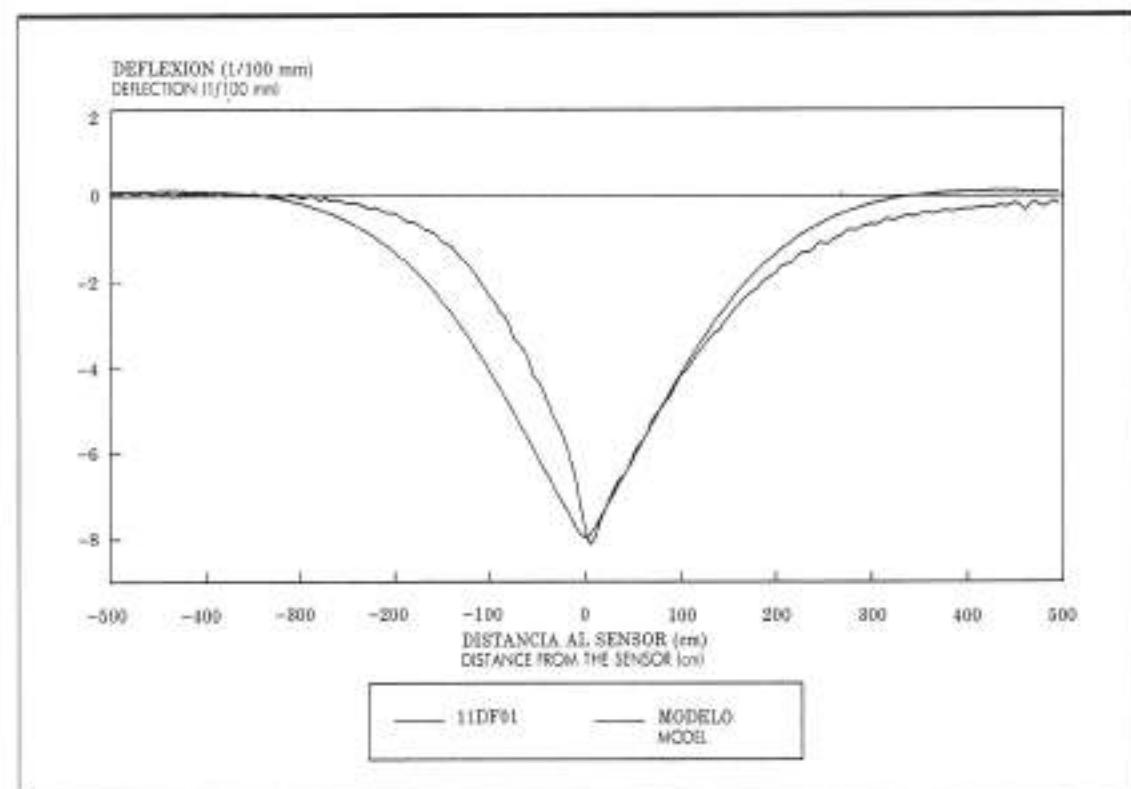


FIGURA 11. Ejemplo comparativo entre curva teórica (modelo) y experimental (sensor) de la deflexión.

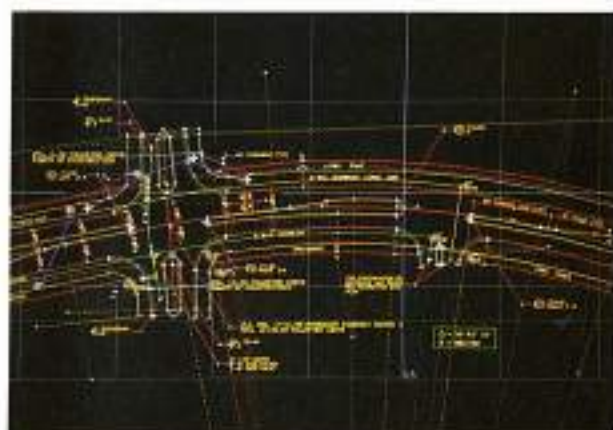
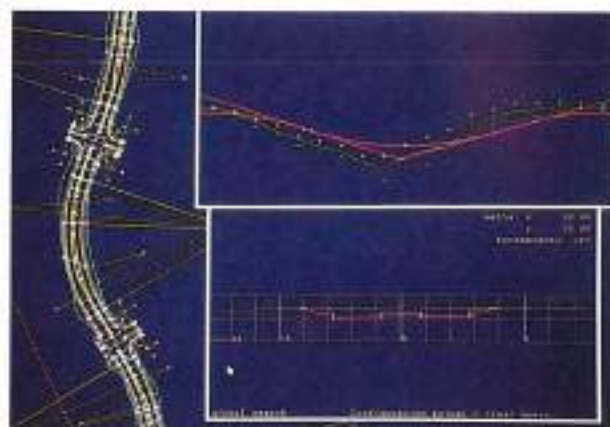
FIGURE 11. Example of comparison between the theoretical curve (model) and experimental curve (sensor) in respect of deflection.

hesion between layers and optimization by inverse calculation using the set of sensors).

The values for the moduli obtained in respect of the different sections and materials by the inverse calculation process are shown in Table 2. A program developed at CEDEX was used for this purpose. Finally, some examples of comparisons between the curve resulting from the model (using the moduli given in the table) and that measured by the sensor inserted in the pavement are shown in Figures 10 and 11, in both cases under analogous conditions (load, temperature and number of cycles).

MetaSite®

PROGRAMA ESPECIFICO DE INGENIERIA CIVIL
SOBRE ESTACIONES DE TRABAJO SILICON GRAPHICS



Especializado: MetaSite es un sistema totalmente integrado, desarrollado específicamente para proyectos de Ingeniería Civil y Topografía.

Productivo: Incrementa significativamente su productividad, desarrollando los conceptos preliminares del diseño y los planos de producción final en un tiempo record.

Integrado: Abarca todo el proceso de diseño. Desde la introducción de la información original del terreno hasta la producción completa de los planos de ejecución, incluyendo todas las fases de desarrollo de proyectos de carreteras, urbanizaciones, campos de golf.... Controla el proyecto tridimensionalmente y permite la visualización fotorrealista de los resultados.

Avanzado: Altas prestaciones de cálculo para el diseño de carreteras, determinación automática de curvas de nivel, obtención instantánea de las secciones transversales y longitudinales, así como los movimientos de tierras, análisis de pendientes, altitudes y orientaciones, escaneado del terreno para determinar en cualquier punto las zonas vistas y ocultas, para cálculos de pérdida de trazado y señalización, distribución de aguas, drenajes de pluviales...

Sin limitaciones: MetaSite le permite trabajar con grandes volúmenes de datos de diseño, asociados a proyectos de grandes dimensiones.

Sobre el ordenador adecuado: Funciona sobre estaciones de trabajo **Silicon Graphics**, la tecnología más avanzada en sistemas gráficos 3D.



INARCO Informática

Cavanubias, 9, Bajo izq.
Teléfs.: 446 18 99 y 446 14 68
Fax: 446 13 27
28010 MADRID



SiliconGraphics, S.A.
Computer Systems



Pico DOKYO (Himalaya) 5.460 m.



Barcelona '92

Las cotas más altas han sido cubiertas



CUBIERTAS
Y MZOV, S.A. CIA. GRAL. DE CONSTRUCCIONES