

# PRIMEROS ESTUDIOS CON MODELOS EN LA PISTA DE ENSAYO DEL C.E.C. DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE CALCULO INVERSO Y APLICACION A LOS RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACION

ANGEL APARICIO MOURELO (\*)

**RESUMEN.** La puesta a punto de modelos matemáticos aplicados al dimensionamiento de firmes es uno de los objetivos de la Pista de Ensayo del Centro de Estudios de Carreteras (C.E.C.). Los estudios a partir del modelo elástico multicapa han conducido al desarrollo del programa BISDF, que permite realizar el cálculo de los módulos de elasticidad de las diferentes capas del firme a partir de las deflexiones medidas en superficie. Este programa se ha aplicado al análisis de los datos suministrados por los sensores del primer ensayo de firmes del C.E.C. El artículo realiza unas consideraciones generales sobre los modelos matemáticos aplicados a carreteras, describe las principales características del programa y expone los resultados obtenidos en una de las secciones del ensayo.

**ABSTRACT.** *The checking out of mathematical models applied to the dimensioning of pavements, is one of the aims of the Test-Track at the Road Studies Centre (C.E.C.). The studies, using a multilayer elastic model, have lead to the development of the BISDF programme, which makes possible to carry out the calculation of the elasticity modules for the different layers of the pavement structure, from the average surface deflections. This programme has been applied to the analysis of the data supplied by the sensors from the first surface tests of the C.E.C. The article makes some general suggestions concerning the mathematical models applied to roads, describes the main characteristics of the programme and sets out the results obtained from one of the test sections.*

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. LA PISTA DE ENSAYO DE FIRMES DEL CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS

Uno de los objetivos de la pista de ensayo de firmes del Centro de Estudios de Carreteras (C.E.C) lo constituye la puesta a punto de modelos matemáticos que describan con suficiente exactitud el comportamiento del firme al paso de la carga y la evolución de sus características resistentes en el tiempo.

El interés de esta línea de investigación estriba en la posibilidad de abordar el problema del dimensionamiento de firmes desde una metodología analítica, similar a la empleada en el cálculo de otras estructuras de ingeniería civil.

Dentro de la mecánica de firmes se utilizan diferentes modelos matemáticos para el cálculo de las tensiones, deformaciones y desplazamientos de la estructura

del pavimento al paso de la carga. Lógicamente, la introducción en el modelo de las características de tipo viscoso o plástico de los materiales, de la inercia en la respuesta del firme o de las particularidades derivadas de la aplicación de una carga en movimiento complica, por una parte, el desarrollo del modelo y, por otra, incrementa el número de parámetros de entrada necesario para caracterizar la sección estructural.

Los estudios del C.E.C. han comenzado por el modelo elástico multicapa. La elección no ha venido dada simplemente por la sencillez del modelo, sino también por el hecho de que en la actualidad se dispone de una abundante literatura sobre su aplicación a los firmes de carretera. Por otra parte, la aparente mejor capacidad de caracterización del comportamiento del firme de modelos más complejos se compensa por su dificultad de empleo: estos modelos exigen introducir características de los materiales del firme difíciles de establecer. El margen de error introducido por estos parámetros anula buena parte de las ventajas derivadas del empleo de un modelo más sofisticado.

(\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de Programa en el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX.

## 1.2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO ELÁSTICO

La caracterización del comportamiento mecánico de los materiales que componen un firme de carreteras resulta complicada. Aún más complicado resultaría el análisis del estado tenso-deformacional de una estructura formada por varias de estas capas. Esta complejidad aconseja introducir algunas simplificaciones. A continuación se analiza la importancia de las simplificaciones derivadas del empleo del modelo elástico multicapa.

Podemos admitir que, en un firme «correctamente proyectado», las deformaciones correspondientes a la carga debida al paso del tráfico son principalmente elásticas. Ahora bien, esta respuesta depende de la intensidad de las tensiones, ya que la relación tensión-deformación no es lineal en la mayor parte de los materiales empleados en los firmes de carreteras. Medidas de tensiones, deformaciones y deflexiones en firmes reales parecen indicar, sin embargo, que la no-linealidad es mucho menos pronunciada en los firmes que en los materiales constituyentes de éstos. Para el empleo del modelo elástico, el problema de esta no-linealidad se evita empleando la relación tensión-deformación correspondiente a los niveles de tensiones a los que va a estar sometido el firme en la realidad.

Los efectos de inercia pueden desprejarse al ser las velocidades características de la onda elástica en el firme mucho mayores que las velocidades usuales del tráfico. De esta manera, podemos analizar el problema como si se tratara de la aplicación de una carga estática. El firme se modeliza como un sistema de capas de extensión indefinida en el plano horizontal apoyadas en un semiespacio homogéneo y elástico. Sobre este sistema se aplica una carga en una cierta área de su superficie libre.

Las hipótesis básicas del modelo elástico multicapa son las siguientes:

### A. Hipótesis geométricas.

1. El firme está formado por capas horizontales de espesor finito y uniforme apoyadas sobre una capa inferior de espesor infinito.
2. Las capas son infinitas en las direcciones horizontales.

### B. Hipótesis sobre las propiedades de las capas.

3. Las capas son de un material homogéneo.
4. Los materiales constituyentes de las diferentes capas son isótropos en cuanto a su comportamiento mecánico.
5. La relación tensión-deformación de estos materiales es lineal.
6. Los materiales son elásticos.

La carga se supone aplicada uniformemente sobre una superficie circular. En la práctica, la carga aplicada por el neumático no cumple estas características, pero la aproximación resulta razonable. La carga real aplicada por el neumático podría modelizarse, para cálculos más afinados, por medio de un conjunto de cargas circulares convenientemente distribuidas.

## 1.3. EL PROBLEMA DEL CÁLCULO INVERSO

La generalización del uso del modelo elástico ha permitido su aplicación más allá de la determinación de la respuesta estructural de un firme. El uso cada vez más extendido de los llamados métodos «no destructivos» de evaluación del estado de un pavimento ha conducido a su empleo en la interpretación de los resultados obtenidos por algunos de estos equipos, como el Deflectómetro de Impacto (F.W.D.), el Dynaflect, etc.

En este caso, el cálculo que se plantea es el denominado «problema del cálculo inverso». Los equipos citados anteriormente permiten medir la respuesta estructural del firme (generalmente las deflexiones) en diferentes puntos de la superficie. Conocidos esos valores y las características de la carga aplicada, se intentan determinar las características mecánicas de todas o de alguna de las capas del firme suponiendo que éste se comporta como un macizo elástico multicapa y que el resto de las características del pavimento son conocidas.

Cada una de las capas del firme viene caracterizada por cuatro parámetros: el espesor, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y la condición de adherencia con la capa inferior. En la resolución del problema de cálculo inverso suelen suponerse conocidos el espesor (ya que se dispone, en general, de datos para determinarlo con suficiente precisión) y el coeficiente de Poisson (dado que su influencia en el comportamiento final del firme es reducida). Al resultar complicado establecer cómo es la transmisión de esfuerzos entre una capa y la siguiente, suele considerarse que existe adherencia perfecta entre capas, si bien podría realizarse el cálculo con otra hipótesis. El problema se reduce entonces a la determinación de los módulos de elasticidad de todas o de algunas de las capas del firme a partir de los valores de la deflexión medida en puntos situados a diferentes distancias de la carga aplicada.

El problema podría plantearse, evidentemente, para cualquier magnitud representativa de la respuesta estructural del firme medida con un equipo adecuado. En concreto, nada impide que estos principios puedan aplicarse a los valores obtenidos mediante sensores colocados en el firme que midan parámetros como las tensiones, las deformaciones o los desplazamientos, en la superficie o en el interior de la estructura. Esta ha sido, precisamente, la línea de investigación introducida en el C.E.C. para la explotación de los resultados procedentes de la instrumentación del primer ensayo de firmes a escala real.

## 2. PROGRAMA DE CÁLCULO INVERSO BISDF DESARROLLADO POR EL CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERA

### 2.1. OBJETIVOS PLANTEADOS CON EL PROGRAMA BISDF

El seguimiento de las secciones ensayadas en la pista del C.E.C. incluye la medida de tensiones, deformaciones y desplazamientos mediante sensores situados en

varios puntos del firme. Se realizan además campañas de auscultación sistemáticas con empleo de diferentes equipos, incluido el deflectómetro de impacto.

La obtención de estas medidas permite conocer la respuesta estructural de cada una de las secciones a lo largo del ensayo. De esta forma, puede abordarse uno de los objetivos de la instalación: el ajuste de modelos analíticos. Para ello, se planteó como vía de estudio la resolución del problema de cálculo inverso: a partir de las mediciones realizadas, calcular los módulos de elasticidad de las diferentes capas a lo largo del ensayo.

El problema así planteado exigía un estudio exhaustivo previo mediante modelo elástico de las seis secciones ensayadas en la pista, con la finalidad de comprobar su respuesta teórica esperable y la influencia de cada uno de los parámetros de entrada en los valores de las tensiones, deformaciones y desplazamientos medidos por los sensores.

Establecido este primer estudio, y consultada la literatura disponible sobre el tema, se constató que los programas de cálculo inverso desarrollados en otros países se dirigían únicamente a la resolución del problema a partir de las deflexiones obtenidas mediante los aparatos de auscultación, en los que se dispone de un número limitado de medidas (entre 5 y 7) a una distancia en general no superior al metro. Por otra parte, la documentación sobre estos programas describe escasamente el procedimiento de cálculo empleado. Finalmente, en estos programas se busca minimizar el tiempo de cálculo aun a costa de no conseguir resultados en un cierto número de casos, debido a que el objetivo final es el de analizar un tramo de carretera en el que se ha realizado un número elevado de medidas.

Esta situación aconsejaba el desarrollo de un programa propio que, aun a costa de un mayor tiempo de cálculo, permitiera conocer exactamente el procedimiento empleado y modificar con facilidad el programa para adaptarlo no sólo al cálculo de módulos a partir de deflexiones, sino también a partir de tensiones, deformaciones o desplazamientos en otros puntos del interior del macizo elástico, o de una combinación de dichos parámetros.

Este desarrollo permitiría, además, el empleo de la totalidad de los datos de las curvas obtenidas por los sensores e incluso el plantear el cálculo de otros parámetros de entrada en el modelo elástico, como condiciones de adherencia, coeficientes de Poisson o espesores.

El primer paso en esta línea de investigación ha consistido en la elaboración de un programa de cálculo de módulos de elasticidad a partir de valores de la deflexión superficial a diferentes distancias del firme. A la presentación de este programa y de un ejemplo concreto de aplicación se dedica el resto del artículo.

## **2.2. CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA**

**2.2.1. Estructura general.** El programa BISDF del Centro de Estudios de Carreteras se ha desarrollado a partir del programa BISAR (Bitumen Stress Analysis in

Roads), de Shell Research B.V. El lenguaje empleado ha sido FORTRAN 77 y puede utilizarse en un ordenador personal.

La entrada de datos se realiza mediante un fichero ASCII. Para facilitar la elaboración de este fichero se ha desarrollado el programa auxiliar DBISDF.

Las modificaciones introducidas en el programa BISAR han afectado al programa principal y a las subrutinas de salida de resultados, dejando el resto de la aplicación sin variaciones a pesar de que se podría haber conseguido algún ahorro de tiempo.

**2.2.2. Datos de entrada en el programa.** Los parámetros contenidos en el fichero de datos de entrada son los siguientes:

### **A. Identificación del cálculo.**

1. Título del cálculo.
2. Fecha.
3. Número de problemas a calcular.

Para cada uno de los casos o problemas a calcular se introducen los datos siguientes:

### **B. Características de las cargas.**

1. Número de cargas.
2. Posición de cada carga.
3. Componente vertical y horizontal de cada carga.
4. Radio del círculo en que se aplica cada carga.
5. Angulo de la componente horizontal con el eje  $x$ .

### **C. Valores de la deflexión a diferentes distancias de la(s) carga(s).**

1. Coordenadas de cada punto en que se mide la deflexión.
2. Valor de cada deflexión.

### **D. Características de cada capa.**

En cada una de las capas, el usuario puede elegir entre introducir un valor del módulo de elasticidad fijo o calcularlo mediante el programa. Los parámetros a introducir son:

1. Una variable para indicar si el módulo de la capa es conocido o debe ser calculado.
2. Espesor de cada capa.
3. Valor de coeficiente de Poisson.
4. Intervalo admisible del valor de cada módulo (si fuera a ser calculado).
5. Valor inicial estimado del módulo (si fuera a ser calculado), o valor fijo de éste.
6. Condición de adherencia con la capa inferior.

### **E. Características del proceso de convergencia**

1. Valor de la diferencia máxima admisible entre las deflexiones introducidas y las calculadas por el programa para los valores finales de los módulos de elasticidad.
2. Número máximo de iteraciones a realizar.

**2.2.3. Procedimiento de cálculo.** El procedimiento empleado se basa en la diferente influencia que tienen los módulos de cada una de las capas del sistema multicapa

en las deflexiones medidas a diferentes distancias de la carga.

Se ha comprobado, en efecto, que la rigidez de las capas inferiores tiene una importancia mayor según se aleja de la carga el punto donde se considera la deflexión.

Las figuras 1, 2 y 3 permiten apreciar con claridad este fenómeno en un caso concreto. Se trata de un firme formado por tres capas, cuyas características se recogen en la tabla 1.

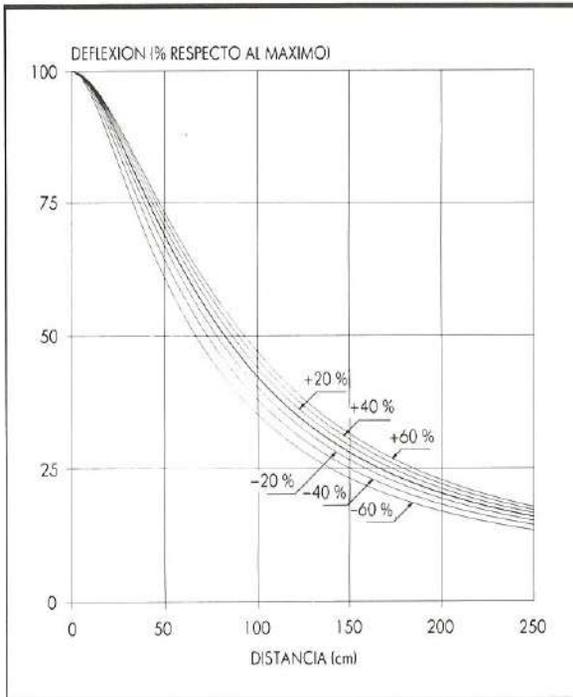


FIGURA 1. Variación de la forma de la curva de deflexiones al variar  $E_1$ .

La figura 1 muestra la influencia de una variación del módulo de elasticidad de la capa superior ( $E_1$ ) en la forma de la curva de deflexiones. Estas curvas se han calculado mediante el programa BISAR, para una carga igual a la indicada en 3.1. La línea gruesa continua corresponde al sistema de la tabla 1. El resto de las

CAPA	E (Bar)	COEFICIENTE POISSON	ESPESOR (cm)	ADHERENCIA
1	50.000	0,33	18	PEGADA
2	2.500	0,40	25	PEGADA
3	1.000	0,40	—	—

TABLA 1.

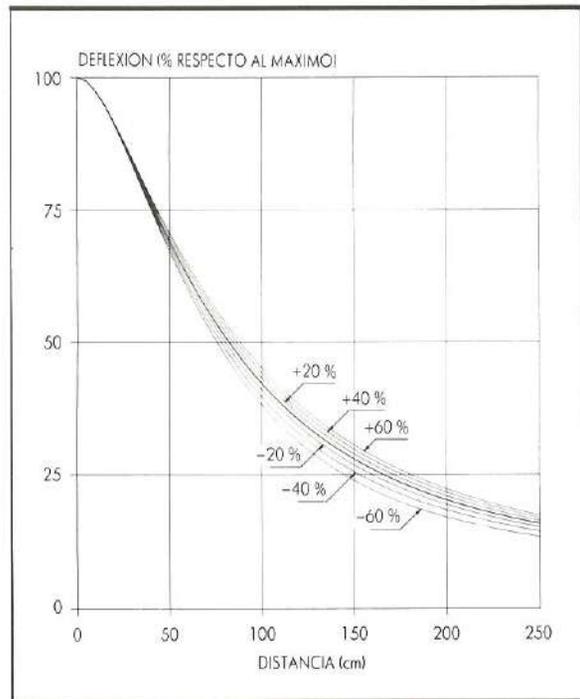


FIGURA 2. Variación de la forma de la curva de deflexiones al variar  $E_2$ .

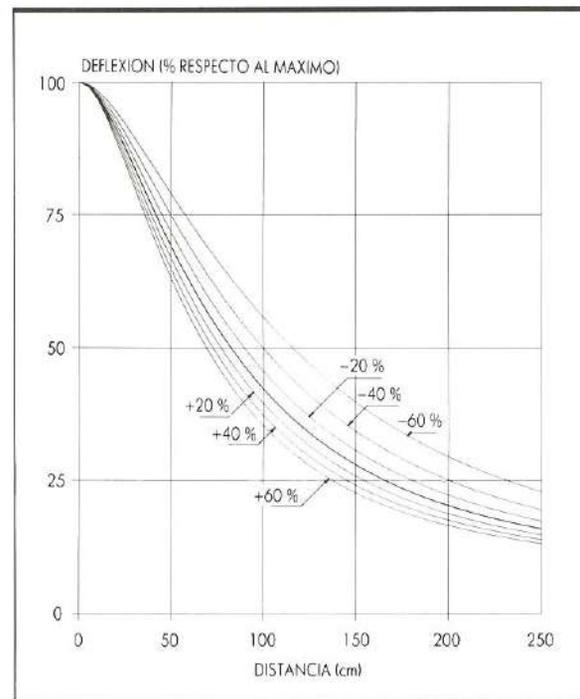


FIGURA 3. Variación de la forma de la curva de deflexiones al variar  $E_3$ .

curvas se han establecido variando en un 20 %, un 40 % y un 60 % dichos valores. Los valores de cada curva se expresan en porcentaje respecto a su valor máximo con el fin de facilitar su comparación.

La figura 2 recoge las mismas curvas de deflexiones. En este caso se ha variado en un 20 %, un 40 % y un 60 % el módulo de la capa intermedia ( $E_2$ ). En las curvas de la figura 3 el módulo de elasticidad variado ha sido el de la capa inferior ( $E_3$ ).

En estas figuras se observa que la influencia del módulo de la capa superior ( $E_1$ ) resulta más acusada en la parte inicial y media de la curva: valores bajos de  $E_1$  producen curvas con mayor curvatura en el valor máximo (más «afiladas»); valores altos de  $E_1$  conducen a la obtención de curvas más suaves. El módulo de elasticidad de la capa inferior ( $E_3$ ) influye en toda la curva, pero muy especialmente en su parte final: al descender el valor de  $E_3$ , la curva va haciéndose más suave. Por último, la influencia de la capa intermedia ( $E_2$ ) sólo se hace notar a partir de la parte media de la curva, y de manera menos significativa que en los casos precedentes.

Basándose en este principio, es posible concebir un procedimiento de cálculo en el que se fijen los módulos de todas las capas del macizo elástico, excepto el de una de ellas. Este módulo incógnita se calculará con la deflexión situada a la distancia de la carga que resulte más conveniente según la posición de la capa incógnita en el macizo. Una vez fijado el módulo de esta capa, puede pasarse a determinar el de otra de ellas, tomándola ahora como incógnita y eligiendo la deflexión más conveniente para esta nueva capa. Ajustados los módulos de todas las capas, deberá comprobarse cuál es la diferencia total entre las deflexiones de partida y las determinadas con los módulos así calculados. El procedimiento, por consiguiente, es iterativo, y resulta necesario repetirlo un cierto número de veces antes de obtener la solución definitiva.

El programa comienza siempre por la capa inferior, tomando la deflexión más alejada de la carga y fijando el resto de los módulos con los valores iniciales dados por el usuario. Es importante que estos valores iniciales no se encuentren muy alejados de la solución final, ya que de lo contrario el tiempo de cálculo puede incrementarse notablemente, e incluso puede comprometerse la convergencia del proceso.

Una vez ajustado el módulo de elasticidad de la capa inferior, el programa pasa a la capa inmediatamente superior, determinando su módulo de manera que la deflexión en el punto siguiente al anterior resulte suficientemente próxima a la calculada por el programa BISAR. Lógicamente, el valor del módulo de elasticidad de la capa inferior habrá pasado a ser el calculado en el paso anterior (y no el inicial dado por el usuario).

El programa continúa capa a capa de la misma manera. Cuando se alcanza la capa superior, se determina el conjunto de valores de la deflexión, se calcula el error total entre las deflexiones de partida y las calculadas

por BISAR y se compara su valor con el del error máximo admisible. Si se supera éste, el cálculo vuelve a iniciarse desde la capa inferior; en caso contrario, se da por finalizado el cálculo.

La mayor dificultad en un proceso como el aquí descrito estriba en la determinación de los módulos de elasticidad correspondientes a las capas intermedias. Ya hemos visto en la figura 2 que, para un firme flexible como el definido en la tabla 1, la influencia del módulo de elasticidad de la capa intermedia resulta considerablemente inferior a la de los correspondientes a las capas superior e inferior. Cuando se tiene un número mayor de capas el problema se agrava, hasta el punto de obtener valores de difícil justificación desde un punto de vista técnico. Esta debilidad del procedimiento se ve compensada, parcialmente, por el hecho de que el cálculo resulta válido precisamente para las capas más influyentes en la respuesta estructural del firme y más importantes desde el punto de vista de su comportamiento final.

**2.2.4. Control del proceso de convergencia.** En un procedimiento como el descrito, pueden encontrarse situaciones en las que el programa no sea capaz de encontrar el conjunto de módulos de elasticidad que satisface las condiciones de partida. Por otra parte, dichas deflexiones habrán sido medidas con un cierto error, por lo que no parece razonable exigir al programa un grado de ajuste mayor que el correspondiente a dicho error.

Por ello, el usuario debe introducir en el programa un conjunto de parámetros que controlen el proceso de convergencia, tanto en cuanto al error admisible como al número máximo de iteraciones a realizar. Estos parámetros se emplean tanto en cada uno de los procesos de cálculo del módulo de elasticidad de una capa (convergencia de capa) como en el control general para establecer si la solución final ha sido encontrada o si debe continuarse el proceso.

### 2.3. LIMITACIONES DEL PROCEDIMIENTO DE CALCULO DESCRITO

El proceso del cálculo inverso resulta complicado, relativamente reciente y todavía lleno de dificultades. El programa aquí presentado no escapa a estas limitaciones. Entre estos problemas podemos señalar los siguientes:

1. La no unicidad en la solución. A partir de unos valores de deflexión dados, pueden obtenerse diferentes módulos de elasticidad según los valores iniciales supuestos, los intervalos de validez considerados y el error admitido en su determinación.
2. Los errores derivados de las posibles variaciones en los espesores de las capas del firme. Las variaciones en los espesores pueden ser superiores al 10 %, y su influencia puede resultar decisiva en los valores de los módulos finalmente obtenidos. Este efecto resulta especialmente importante en las capas más rígidas.
3. El considerar, como hace el modelo elástico, que la capa inferior tiene espesor indefinido introduce otra

fuente de error. Resulta razonable pensar que la deformación vertical debida a la aplicación de la carga se extiende exclusivamente hasta una cierta profundidad. Aunque no fuera así, el hecho es que frecuentemente ignoramos las características del terreno situado por debajo de aquél en el que hemos realizado la explanación. En general, la bibliografía sobre este problema aconseja considerar la existencia de una capa muy rígida a unos 7 m de profundidad, siempre que no se tenga constancia de la existencia de un lecho rocoso más próximo a la superficie.

4. El tiempo empleado en el cálculo resulta apreciable y difícil de reducir, dada la complejidad del proceso.

5. La no linealidad en el comportamiento de las capas granulares introduce una nueva fuente de error, agravada por el hecho de que el módulo de estas capas se determina a partir de los valores de la deflexión a mayor distancia de la carga (por tanto, para un estado tensional muy débil). Como ya se ha expuesto, el modelo elástico considera este valor constante.

6. La limitada precisión en la medida de las deflexiones (especialmente de las deflexiones más alejadas de la carga) dificulta la obtención de valores suficientemente precisos en los módulos y puede incluso comprometer la obtención de una solución con significado ingenieril.

### 3. EJEMPLO DE CALCULO. APLICACION A UNO DE LOS SENSORES DE PRIMER ENSAYO DE FIRMES A ESCALA REAL

#### 3.1. PLANTEAMIENTO DEL CALCULO

Se presenta a continuación un problema de cálculo planteado en el primer ensayo de firmes a escala real del Centro de Estudios de Carreteras. Se trata de la determinación de los módulos de elasticidad de las capas de la sección de ensayo número 4 a partir de las deflexiones medias en superficie por el sensor 31FV31.

La sección número 4 es un pavimento flexible constituido por cuatro capas: una capa de rodadura de mezcla bituminosa, con 5 cm de espesor; una capa intermedia, también bituminosa, de 13 cm; una base granular de 25 cm y, finalmente, una explanada de tipo E2

(CBR > 10 %). El firme descansa sobre una cubeta de hormigón armado situada a 210 cm bajo la superficie del pavimento, y está separada de ella por una capa drenante de 20 cm de espesor.

Para el cálculo resulta necesario introducir los espesores, coeficientes de Poisson y condiciones de adherencia entre capas. También resulta necesario establecer los límites superior e inferior del rango en el que se considera que puede moverse cada módulo de elasticidad y el valor inicial de éste. Todos estos parámetros se recogen en la tabla 2, y responden a valores usualmente considerados como razonables para un firme de estas características. En el caso de los espesores, los valores adoptados han sido iguales a los de proyecto. La capa de hormigón (losa inferior de la cubeta) se consideró como indefinida tras comprobar la escasa influencia que tenía el considerar una nueva capa de suelo por debajo de ella; por otra parte, la colocación del sensor hacía que se estuvieran midiendo desplazamientos verticales con respecto a esta capa y no valores absolutos.

La carga aplicada por el vehículo se asimiló a dos cargas simétricas de huella circular y presión de contacto uniforme. Para establecer la presión de contacto, se midió la huella de cada uno de los dos neumáticos del vehículo parado. Estas huellas se asimilaron a círculos de 12,0 cm de radio, con una separación de 36,0 cm entre ejes. Dado que la carga aplicada por cada rueda era de 3.250 kg, la presión de contacto resultó igual a 7,2 Bar.

El sensor 31FV31 está formado por un LVDT anclado mediante un hilo de invar al fondo de la cubeta de hormigón de la pista de ensayo. Su extremo superior queda unido a la superficie del firme. De esta manera, el sensor mide el desplazamiento relativo entre el fondo de la cubeta y la superficie del pavimento. Las medidas se toman al paso de la carga, cada 5 cm. La longitud total en la cual se dispone de medidas es de 5 m. La figura 4 recoge una de las curvas de este sensor, que ha servido para el cálculo aquí descrito. Esta curva se obtuvo en el ciclo 131738 a una temperatura del firme cercana a los 25 °C y una velocidad del vehículo de 42,6 km/h. El

CAPA	E inf. (Bar)	E sup. (Bar)	E ini. (Bar)	POISSON	ESPESOR (cm)	ADHERENCIA
M.B.	10.000	100.000	50.000	0,33	18	PEGADO
B.G.	100	20.000	2.000	0,40	25	PEGADO
EXP.	100	20.000	1.000	0,40	167	DESPEGADO
HOR.	—	—	300.000	0,25	—	—

TABLA 2. Características del cálculo.

M.B.: Mezcla bituminosa (rodadura + intermedia).  
 B.G.: Base granular.  
 EXP.: Explanada.  
 HOR.: Hormigón.

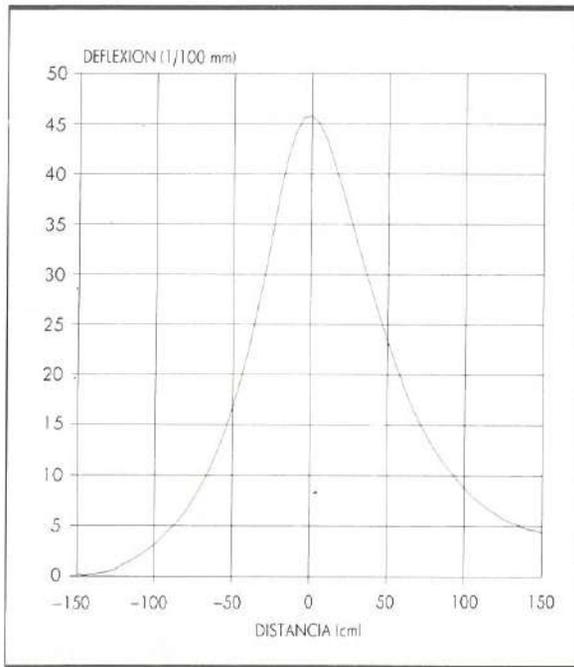


FIGURA 4. Sensor 31FV31 - Ciclo 131738. Posición transversal central.

sensor se encontraba situado entre los dos neumáticos del vehículo.

### 3.2. COMPROBACION DE LA VALIDEZ DE LAS MEDIDAS DEL SENSOR

Los valores obtenidos por este sensor han debido ser contrastados para comprobar su validez antes de introducirlos en el programa de cálculo. Para ello se siguió el procedimiento indicado a continuación.

Como se sabe, la deflexión de un firme depende principalmente de la temperatura de su capa bituminosa y de la velocidad de paso de la carga aplicada. La humedad de la explanada, si bien también es importante, tiene una influencia escasa en la Pista de Ensayo, al disponer de una capa drenante y de una cubeta aislante de hormigón. Partiendo de este hecho se planteó un estudio estadístico de los valores máximos medidos por el sensor 31FV31 en los momentos iniciales del ensayo (cuando puede considerarse que el firme no ha comenzado su proceso de deterioro). Se estableció, en primer lugar, una clasificación de estos datos por velocidades. Posteriormente se determinó la regresión lineal entre las deflexiones máximas de cada rango de velocidades y la temperatura del firme. Los valores obtenidos para el coeficiente de correlación lineal resultaron superiores a 0,90. Con esta regresión se calculó el valor de la deflexión a 25 °C y su desviación típica.

Calculado este valor, se comprobó que el valor máximo en la curva elegida se encontraba suficientemente cercano al predicho por la regresión lineal.

Una vez admitida la curva, se planteó el problema de

decidir a qué distancias de la carga se considerarían las deflexiones del firme.

Para decidirlo, se calculó el módulo superficial equivalente de firme en todos los puntos en los que se disponía de valor de la deflexión. Este parámetro es el valor del módulo de elasticidad de un macizo elástico indefinido que presenta la misma deflexión en el punto considerado y para la misma carga que el firme estudiado.

El cálculo del módulo equivalente permitió establecer algunas conclusiones interesantes:

1. La influencia de la cubeta de hormigón.
2. La mejor adaptación al cálculo de los valores de la rama de descarga.
3. El rango de distancias a la carga dentro del cual podían esperarse mejores resultados.

Tras este análisis, se decidió considerar exclusivamente la rama de descarga del sensor en el tramo situado entre el máximo de la curva y 120 cm de distancia a la carga. Los puntos donde se consideraron las deflexiones se situaron finalmente a 0, 30 y 90 cm del máximo.

### 3.3. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos se recogen en la tabla 3. La figura 5 muestra la gráfica correspondiente al sensor 31FV31 (rama de descarga) y la calculada por el modelo BISAR al introducir la sección número 4 (Vid. tabla 2) con estos módulos de elasticidad.

Como puede observarse en la figura 5, a partir de una distancia de 120 cm, las dos curvas comienzan a

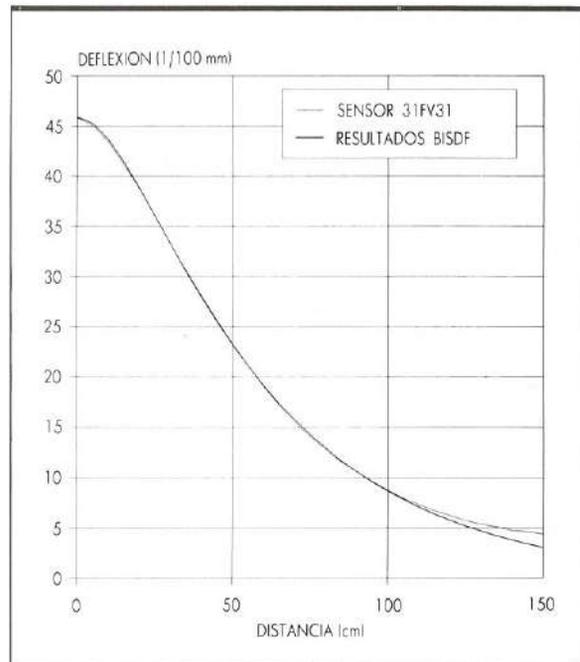


FIGURA 5. Sensor 31FV31 - Ciclo 131738. Posición transversal central.

CAPA	MODULO CALCULADO (Bar)	DEFLEXION COORD. X (cm)	DEFLEXION COORD. Y (cm)	DEFLEXION SENSOR 31FV31 (1/100 mm)	DEFLEXION DADA POR BISAR (1/100 mm)
M.B.	22.567	0	0	45,757	45,865
B.G.	1.633	30	0	33,177	33,208
EXP.	1.037	90	0	10,587	10,562

**TABLA 3.** Resultados del cálculo inverso.

M.B.: Mezcla bituminosa (rodadura + intermedial).  
 B.G.: Base granular.  
 EXP.: Explanada.

alejarse. La curva real presenta deflexiones más elevadas en esta zona final, de manera que la influencia de la carga parece afectar a una mayor parte del firme. Este fenómeno ya se había presentado en el estudio con el módulo superficial equivalente. En el resto de la curva, el ajuste resulta muy aceptable.

Los cálculos realizados con otros sensores han confirmado las posibilidades del procedimiento, por lo que se ha abordado un estudio que permita comparar este programa con otros de cálculo inverso disponibles en el C.E.C., como WESDEF, MODULUS o ELMOD.

La reciente puesta a punto en el C.E.C. de un defleómetro de impacto capaz de medir simultáneamente la deflexión en cinco puntos de la superficie del firme ha abierto otro campo de aplicación a este programa dentro del área de la auscultación de tramos de carreteras.

**4. CONCLUSIONES**

El programa BISDF, desarrollado por el C.E.C. a partir del programa BISAR permite realizar el cálculo de módulos de elasticidad de todas o algunas de las capas de un firme, introduciendo un número de deflexiones igual al de capas cuyo módulo se quiere determinar.

El programa se ha aplicado con éxito al análisis de las medidas tomadas mediante sensores en el primer ensayo de firmes a escala real.

En la actualidad se está realizando un estudio de sensibilidad del programa, con el fin de conocer la influencia de la indeterminación existente en los distintos parámetros de entrada sobre los resultados obtenidos y se está comparando con otros programas similares de cálculo inverso.

En el futuro se espera que el programa podrá realizar el cálculo de módulos de elasticidad o de otros parámetros del firme a partir no sólo de deflexiones, sino de cualquier otra magnitud medida mediante sensores.

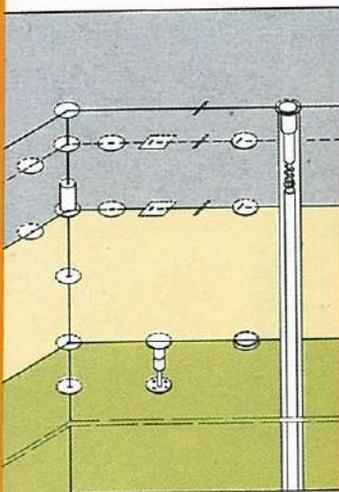
**5. BIBLIOGRAFIA**

1. ALI, N. A.; KHOSLA, N. Paul. «Determination of Layer Moduli Using a Falling Weight Deflectometer» en Transportation Research Record n.º 1117, pp. 1-10. Washington D.C., Transportation Research Board, 1981.
2. DRNEVICH, Vincent P.; HOSSAIN, M. Makbul; WANG, Jianren; GRAVES, Ronnie C. «Determination of Layer Moduli in Pavement Systems by Nondestructive Testing». Paper presented at the 69th Annual Meeting of the T.R.B.; Washington D.C., Transportation Research Board, 1990.
3. RWEBANGIRA, T.; HICKS, R. G.; TRUEBE, Mark. «Sensitivity Analysis of Selected Backcalculation Procedures» en Transportation Research Record n.º 1117, pp. 25-37. Washington D.C., Transportation Research Board, 1981.
4. SCULLION, Tom; UZAN, Jacob; PAREDES, Miguel. MODULUS: a Microcomputer Based Backcalculation System. Texas Transportation Institute, 1990.
5. DE JONG, D. L.; PEUTZ, M. G. F.; KORSWAGEN, A. R. Computer Program BISAR. Layered systems under normal and tangential surface loads. Amsterdam, Koninklijke/Shell Laboratorium (Shell Research B.V.), 1979.
6. STOCK, A. F.; YU, J. «Use of Surface Deflection for Pavement Design and Evaluation» en Transportation Research Record n.º 954, pp. 64-69. Washington D.C., Transportation Research Board, 1981.
7. ULLIDTZ, Per. Pavement Analysis. Amsterdam, Elsevier, 1987.
8. ZHON, Haiping; HICKS, R. G.; BELL, C. A. «BOUSDEF: a backcalculation program for determining moduli of a pavement structures». Paper presented at the 69th Annual Meeting of the T.R.B.; Washington D.C., Transportation Research Board, 1990.

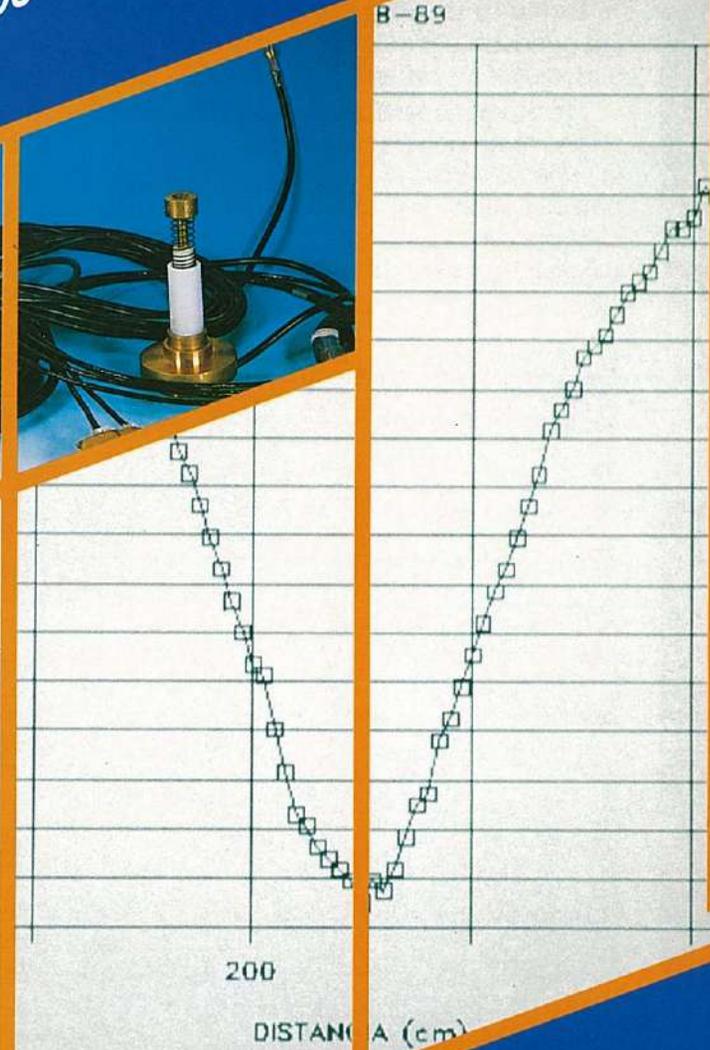
# PISTA DE ENSAYOS DE FIRMES DEL CENTRO DE ESTUDIOS DE CARRETERAS

## INSTRUMENTACION Y SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

SENSORES



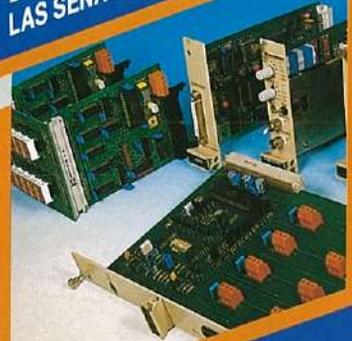
DISPOSICION DE  
LOS SENSORES



MEDIDA DINAMICA DE DEFORMACIONES

- EQUIPOS DE ENSAYO DE FIRMES:**
- Analizador de Regularidad Superficial.
  - Auscultación vibratoria.
  - Viógrafo.
  - Deflectógrafo Lacroix.
  - Perfilómetro manual.

ELECTRONICA  
DE ADECUACION DE  
LAS SEÑALES



INGENIERIA  
DE INSTRUMENTACION  
Y CONTROL, S.A.

Arapiles, 14.  
28015 MADRID  
Teléfono: 445 03 00  
Fax: 446 55 46  
Télex: 42779 EPTI-E

SISTEMA DE CONTROL



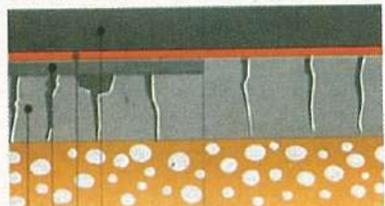
ASFALTO TEXTIL

# polyfelt® PGM 14

La manera efectiva para mejorar el comportamiento de pavimentos bituminosos



Carpeta asfáltica aplanada con rodillo en caliente sobre un pavimento envejecido (con y sin capa compensadora).



Pavimento nuevo  
Polyfelt PGM 14  
Capa compensadora  
Pavimento viejo

- **Evita la penetración de humedad.** Forma una membrana elástica impermeable entre las capas asfálticas evitando la introducción a las mismas de aguas superficiales y oxígeno.
- **Reduce la fatiga del pavimento.** La adhesión de las capas asfálticas viene incrementada notablemente. La fuerza de adhesión es uniforme sobre toda la superficie entera. La sollicitación de fuerzas flexurales en la interfase se reduce notablemente incrementando así la vida útil de la carpeta extendida.
- **Retarda el reflejo del agrietamiento.** La desaparición importante de las tensiones en la interfase elimina o retarda el reflejo de grietas desde la capa vieja hacia la capa nueva.



Hemos colaborado con **POLYFELT PGM-14** en las siguientes obras españolas:

- Carretera N-332 Joroco-Gandía.
- Autovía del Mediterráneo Valencia-Barcelona.
- Autovía Norte (Calahorra-Logroño).
- Calles del Polígono Industrial Las Mercedes, Coslada (Madrid).



INDUSTRIAS TRANSFORMADORAS DE  
CEMENTO ETERNIT, S.A.  
Mejía Lequerica, 10 - 28004 MADRID  
Tel.: (91) 446 58 98 - Fax: 448 37 09

