

Resultados del primer ensayo efectuado en la pista del Centro de Estudios de Carreteras (y 4.ª Parte)

RECAREDO ROMERO AMICH (*)

AURELIO RUIZ RUBIO (**)

RESUMEN. En este artículo se presenta la cuarta y última parte de los resultados obtenidos en el primer ensayo de la Pista de Ensayos sobre Firmes del CEDEX. Se exponen valores de deflexión para las seis secciones ensayadas, así como las principales conclusiones referidas a la corrección de la deflexión por temperatura del pavimento, la relación entre las medidas del deflectómetro de impacto y de la viga Benkelman, la influencia de la humedad de las capas granulares y de la fatiga del pavimento en los resultados y la comparación entre las diferentes secciones. Las deflexiones medidas se corresponden con los niveles de deterioro producidos por fisuración y pérdida de regularidad superficial.

RESULTS OF THE FIRST TEST CONDUCTED ON THE TEST TRACK AT THE ROAD RESEARCH CENTRE (4rd part)

ABSTRACT. In this article, the fourth and last part of the results of the first test on the CEDEX test track for pavements is presented. Data on deflection on the six tested pavements are given. The main conclusions referred to the correction of the deflections by temperature, the relationship between the falling weight deflectometer and the Benkelman beam, the influence of the granular layers moisture and fatigue of the pavement on the results and the comparison of the different pavements. The deflections measured correspond to the deterioration according to the cracking and rutting of the surface.

1. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE LA DEFLEXION

La evaluación de la capacidad de soporte se ha realizado mediante la medida de la deflexión superficial de los firmes de ensayo. Se utilizaron para ello dos equipos: el deflectómetro de impacto y la viga Benkelman (fotos 1 y 2). El primer equipo, por tener una gran repetibilidad en las medidas, su utilización sencilla (está totalmente automatizado y sólo necesita la servidumbre del conductor del vehículo), y sobre todo por su facilidad de movimiento dentro de la pista y por la posibilidad de ubicarlo con gran precisión sobre el punto a medir; el segundo,

por ser el que se considera como equipo tipo en la medida de las deflexiones.

En cada campaña de medidas se obtiene como parámetro representativo el valor de la deflexión media (DEX), que se calcula a partir de los valores medidos en la línea longitudinal central de la zona de rodada (denominada línea 10 en este trabajo). Se realizaron, asimismo, mediciones en una línea longitudinal suficientemente alejada de la zona de rodada del vehículo para que no se viesen afectadas por el paso del mismo. Los valores de deflexión obtenidos en esta última línea (línea 29), que teóricamente deberían mantenerse constantes a lo largo del ensayo, sirven como referencia de las medidas de la zona de rodada.

Durante el ensayo se han realizado un total de 13 campañas de medida. Se han medido las deflexiones con una equidistancia de un metro, lo que significa 15-20 medidas por sección y línea. En algunas auscultaciones se realizó una campaña más exhaustiva para obtener las curvas de corrección de la deflexión con la temperatura. En estas campañas se llegó a medir 10 veces en cada punto.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador de programas de Ensayos a Escala Real del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (Ministerio de Obras Públicas y Transportes).

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Laboratorio de Infraestructura Vial del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX (Ministerio de Obras Públicas y Transportes).



FOTO 1. Utilización del defleómetro de impacto en la pista de ensayo.

En todos los casos se midió también la temperatura del firme. La medida se realiza a dos profundidades: en la superficie de la rodadura (en la práctica a 2-3 mm de la superficie) y en el fondo de las capas de mezcla bituminosa. Para obtener la temperatura superior se utilizó un termómetro de alcohol y la temperatura inferior de la capa de mezcla se midió con ayuda de un termómetro digital.

2. CURVAS DE CORRECCION DE LA DEFLEXION CON LA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO

2.1. PROCEDIMIENTO UTILIZADO EN EL CALCULO

La capacidad de soporte depende sensiblemente de la temperatura a la que se encuentre el material bituminoso del firme. Para estudiar evoluciones es indispensable



FOTO 2. Utilización de la viga Baskelman en la pista de ensayo.

disponer de un procedimiento que permita pasar del valor de la deflexión medido a una temperatura t al que tendría el firme a una temperatura patrón.

Se tomó como temperatura patrón o de referencia 20°C . Se decidió también, por analogía con la curva de corrección de la Norma 6.3.I.C., presentar estas curvas en la forma K_t/TP , siendo TP la temperatura del pavimento y K_t la deflexión a 20°C dividida por la deflexión a $t^{\circ}\text{C}$. La gran mayoría de los cálculos se repitieron considerando tres temperaturas del pavimento distintas: la temperatura de los centímetros superiores del firme, la temperatura del fondo de la capa de mezcla bitumino-

sa y la temperatura media de las dos anteriores. Una vez obtenidas estas curvas, la corrección del valor de la deflexión, medida a una temperatura $t^{\circ}\text{C}$, se realiza mediante la fórmula:

$$D_{20^{\circ}\text{C}} = K_t \times D_{t^{\circ}\text{C}}$$

obteniéndose la deflexión corregida a 20°C . El esquema del proceso de corrección se presenta en la figura 1.

Este trabajo se ha realizado en cuatro auscultaciones a lo largo del ensayo, efectuándose un total de 6.057 medidas de deflexión superficial, junto con sus correspondientes medidas de las temperaturas inferior y

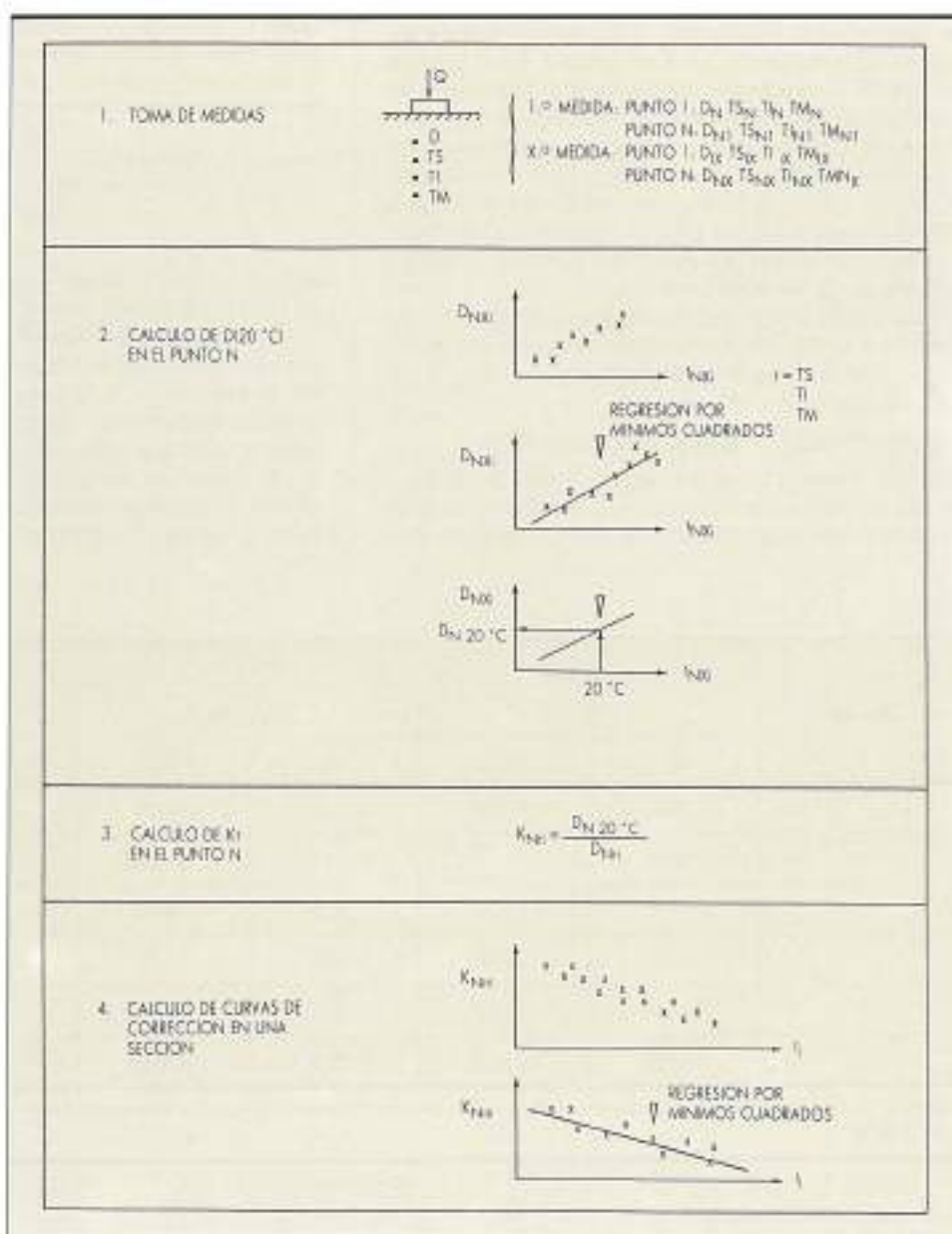


FIGURA 1. Esquema del proceso de cálculo de las curvas de corrección de la deflexión por la temperatura.

D = DEFLEXIÓN SUPERFICIAL
 TS = TEMPERATURA SUPERIOR DE LA MEZCLA
 TI = TEMPERATURA INFERIOR DE LA MEZCLA
 TM = TEMPERATURA MEDIA DE LA MEZCLA
 i = CUALQUIERA DE LAS TRES ANTERIORES
 K = COEFICIENTE DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA

superior del pavimento bituminoso. En las diferentes partes del proceso se ha utilizado un sistema de ajuste de curvas de regresión mediante polinomios de Tchebicheff, y otro de eliminación de valores anómalos mediante un procedimiento estadístico-visual.

Del análisis efectuado se desprende que el comportamiento de la deflexión se guiaba por la temperatura inferior del pavimento con un grado de correlación adecuado. Consecuentemente la corrección de las deflexiones se ha realizado respecto a una temperatura inferior de la capa de mezcla de 20 °C.

2.2. RESULTADOS OBTENIDOS

Las curvas de corrección de la deflexión por la temperatura obtenidas son de primer grado dentro del intervalo de temperaturas considerado, y los coeficientes de regresión (R^2) superiores a 0,8 en general. En el proceso de cálculo se comprobó que las curvas disminuyen su pendiente al aumentar el número de ciclos de carga por lo que, aunque en la zona sin rodar (línea 29) las rectas obtenidas y utilizadas han sido las mismas durante todo el ensayo, en las auscultaciones realizadas en la zona rodada (línea 10) ha sido preciso efectuar una interpolación entre las curvas de tarado para la corrección de las deflexiones en los distintos ciclos.

Las curvas de corrección obtenidas y finalmente utilizadas en el análisis de los valores medidos por el deflectómetro de impacto se presentan en las tablas 1 y 2 y en las figuras 2 y 3.

2.3. PRINCIPALES CONCLUSIONES OBTENIDAS

Con el número de ciclos de carga el grado de homogeneidad de una sección disminuye, y desciende también la correlación Deflexión-Temperatura obtenida. Este

SECCION	CUALQUIER CICLO	
	a_0	a_1
1	1,3256	- 0,0163
2	1,3004	- 0,0151
3	1,2290	- 0,0117
4	1,6920	- 0,0343
5	1,6366	- 0,0311
6	1,4723	- 0,0233

TABLA 1. Curvas de corrección por temperatura inferior de las deflexiones utilizadas en el análisis de la capacidad de soporte (deflectómetro de impacto; zona no rodada).

$$K_t = a_0 + a_1 \cdot t$$

t = Temperatura inferior de la mezcla (°C).

K_t = Coeficiente corrector de deflexión a t °C a deflexión a 20 °C.

hecho hace que la calidad de la correlación sea más alta en la zona no rodada que en la rodada.

Con la misma sección-tipo de referencia cuanto menor es el espesor de la mezcla bituminosa, menos sensible es esa sección a la temperatura del pavimento. A igualdad de espesor de mezcla bituminosa son más sensibles a la temperatura del pavimento las secciones que tienen menor espesor de capas granulares. Esta conclusión se ha contrastado mediante el programa de cálculo BISAR, aunque las diferencias obtenidas al modelizar

SECCION	CICLO					
	0		500.000		1.000.000	
	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0	a_1
1	1,3256	- 0,0163	1,2681	- 0,0136	1,2369	- 0,0117
2	1,3004	- 0,0151	1,1783	- 0,00885	1,1080	- 0,00540
3	1,2290	- 0,0117	1,09501	- 0,00474	—	—
4	1,6920	- 0,0343	1,4502	- 0,0223	1,2186	- 0,01081
5	1,6366	- 0,0311	1,2380	- 0,0119	—	—
6	1,4723	- 0,0233	1,1044	- 0,00522	—	—

TABLA 2. Curvas de corrección por temperatura inferior de las deflexiones utilizados en el análisis de la capacidad de soporte (deflectómetro de impacto; zona rodada).

$$K_t = a_0 + a_1 \cdot t$$

t = Temperatura inferior de la mezcla (°C).

K_t = Coeficiente corrector de deflexión a t °C a deflexión a 20 °C.

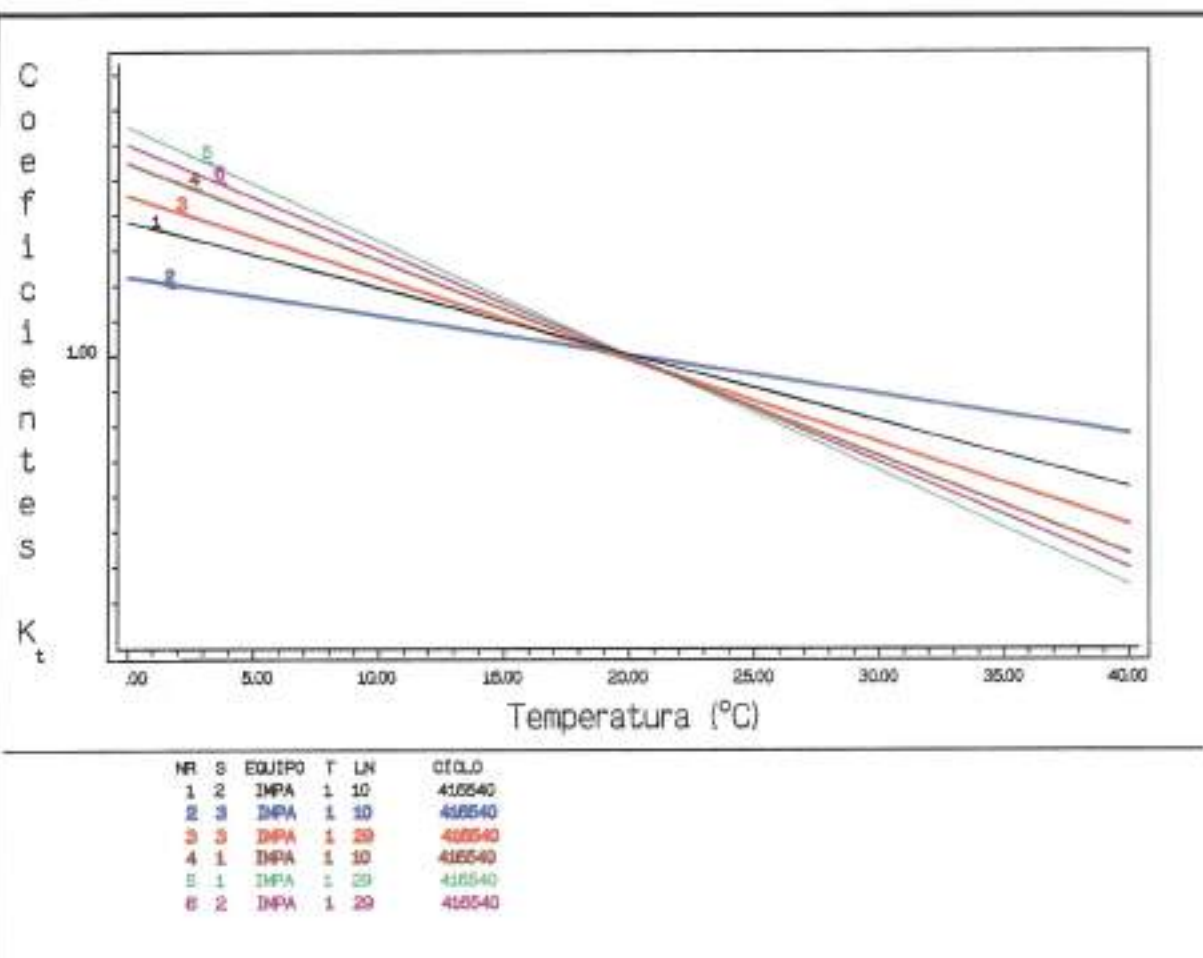


FIGURA 2. Curvas de corrección de la deflexión por la temperatura inferior de la capa de mezcla de las secciones 1, 2 y 3 (sección-tipo 322) en la zona rodada y no rodada. (Deflectómetro de impacto, ciclo 500.000).

son mucho más pequeñas que las conseguidas en la pista de ensayo. Por otro lado, con el número de ciclos de carga la sección se vuelve menos sensible a la temperatura del pavimento.

La correlación efectuada con los datos del deflectómetro de impacto da, en general, unos coeficientes de regresión medio-altos, y los resultados son satisfactorios. Sin embargo, los resultados obtenidos con la viga Benkelman tienen unos coeficientes de regresión muy bajos. Este hecho confirma su menor idoneidad para trabajar en la pista de ensayo, en comparación con el deflectómetro de impacto.

Si se comparan los resultados obtenidos con ambos equipos la viga Benkelman es menos sensible a la temperatura del pavimento que el deflectómetro de impacto, tanto en firmes recién construidos como en secciones con distinto nivel de fatiga. Probablemente la causa del distinto comportamiento de ambos equipos de medida se

deba a la no linealidad de los materiales que componen los firmes (y de la mezcla bituminosa en particular) ante la velocidad de ensayo y/o de la carga.

Las curvas obtenidas en la pista se encuentran, en general, comprendidas entre las presentadas en las Normas 6.3.I.C. y NLT-356/79, con la excepción de las curvas obtenidas en la zona rodada, a partir del ciclo 400.000, que en el intervalo 0-20 °C son menos sensibles que las de la Norma. En este último caso las curvas de la Norma se quedan del lado de la seguridad.

3. COMPARACION ENTRE DEFLECTOMETRO DE IMPACTO Y VIGA BENKELMAN

3.1. INTRODUCCION

De acuerdo con todo el análisis anterior, las curvas de corrección por temperatura obtenidas para la viga Benkelman son bastante insatisfactorias. El ajuste obtenido

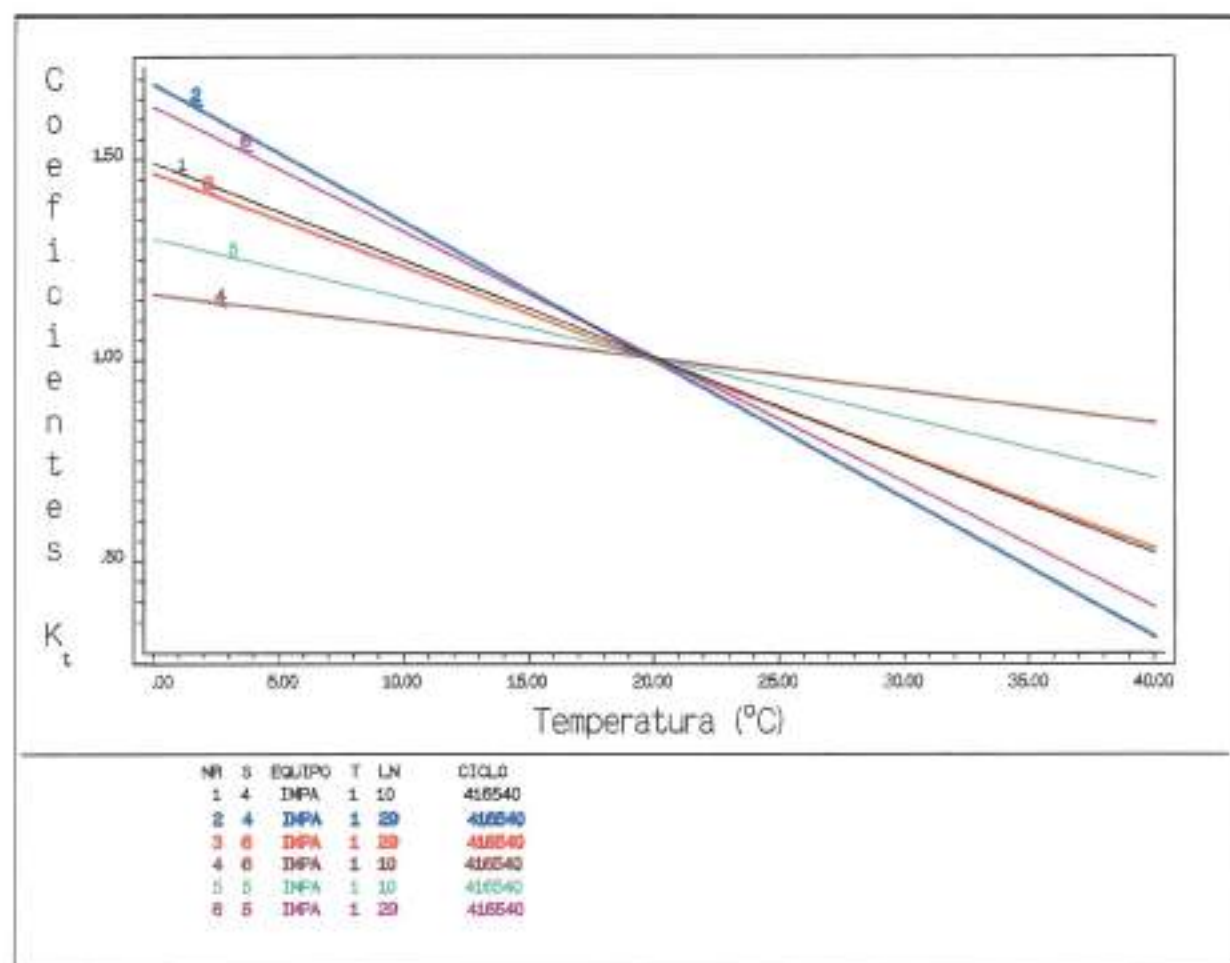


FIGURA 3. Curvas de corrección de la deflexión por la temperatura inferior de la capa de mezcla de los secciones 4, 5 y 6 (sección-tipo 321) en la zona rodada y no rodada. (Deflectómetro de impacto, ciclo 500.000).

es bajo y su aplicación conduce a errores importantes. La colocación manual de la viga, la distinta velocidad de avance del camión de carga, la probable influencia de los cambios de insolación de la viga durante el ensayo, etc., son las causas más importantes de estos hechos.

Todas estas razones aconsejan tomar como deflexión base para realizar el análisis de la evolución de la capacidad de soporte durante el ensayo la medida con el deflectómetro de impacto. Es interesante, sin embargo, la presentación de resultados tipo viga Benkelman, pues la deflexión medida con este equipo no solo es la establecida como patrón en la Norma 6.3.I.C., sino que además es la que sirve como referencia en nuestro país y en numerosos países europeos. Para obtener estos datos se hace necesario intentar traducir lo obtenido con el deflectómetro de impacto a la viga Benkelman, para lo que se realizó un estudio durante el ensayo.

3.2. PROCEDIMIENTO UTILIZADO Y RESULTADOS OBTENIDOS

El cálculo de los coeficientes de transformación de las deflexiones medidas por el deflectómetro de impacto a unas análogas a las obtenidas mediante la viga Benkelman, que en este estudio se denominan α , responden a la fórmula:

$$\alpha = \frac{\text{Deflexión de viga Benkelman (6,5t)}}{\text{Deflexión del deflectómetro de impacto (5t)}}$$

se ha efectuado mediante el proceso que se describe a continuación. Se escogieron tres puntos por cada sección y línea, y en ellos se realizaron medidas alternativamente con uno y otro equipo. El proceso se repitió hasta 27 veces, y posteriormente todas las parejas de valores se corrigieron a una temperatura de 20 °C (ya

que las temperaturas eran, lógicamente, dispares de unas medidas a otras). A partir de cada pareja de valores se obtuvo un valor del coeficiente α , y finalmente, por media simple, se obtiene el valor presentado en la tabla 3 en la que se incluye también el rango de variación obtenido.

Con el fin de confirmar estos resultados y, sobre todo, las tendencias observadas en cuanto a diferencias entre secciones, líneas o sección-tipo, se ha realizado también una comparación directa entre los valores de ambos equipos sin efectuar la previa corrección por temperatura, y en dos períodos de tiempo a lo largo del día en los que la temperatura inferior de la capa de mezcla permaneció razonablemente constante. Estos dos períodos fueron uno a primeras horas de la mañana y el otro a media tarde, y las temperaturas en el momento de realizar la operación fueron 26 y 42 °C, con un intervalo de variación de ± 2 °C. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

3.3. PRINCIPALES CONCLUSIONES OBTENIDAS

Los valores α dependen de la sección-tipo, siendo mayores en la 321 que en la 322. También dependen del espesor de la capa de mezcla, y, dentro de cada sección tipo, disminuyen al disminuir ésta.

SECCION	LINEA	[α]	α
1	10	2,17-2,33	2,25
	29	2,14-2,32	2,23
2	10	1,99-2,13	2,08
	29	1,97-2,16	2,08
3	10	1,93-2,09	2,00
	29	1,91-1,94	1,92
4	10	2,17-3,05	2,50
	29	2,76-2,87	2,80
5	10	1,94-2,73	2,27
	29	2,46-2,55	2,50
6	10	1,97-2,21	2,40
	29	2,32-2,49	2,40

TABLA 3. Coeficientes de transformación de la deflexión del deflectómetro de impacto a valores tipo viga Benkelman.

[α] = Rango de variación de α en los 3 puntos considerados

α = Deflexión viga Benkelman a 20 °C (*)

α = Deflexión deflectómetro a 20 °C (*)

(*) = Temperatura inferior de la capa de mezcla

SECCION	LINEA	VALORES α		
		Ti = 20	Ti = 26	Ti = 42
1	10	2,25	1,94	1,60
	29	2,25	1,94	1,63
3	10	2,00	1,72	1,61
	29	1,92	1,61	1,52
4	10	2,50	2,36	2,07
	29	2,80	2,54	2,13
6	10	2,13	2,06	1,90
	29	2,40	2,29	1,94

TABLA 4. Variación de los coeficientes α a distintas temperaturas.

Ti = Temperatura inferior de la capa de mezcla (°C)

α = $\frac{\text{Deflexión viga Benkelman}}{\text{Deflexión deflectómetro de impacto}}$

Por otra parte, los valores α dependen del nivel de fatiga de la sección. En general disminuyen al producirse la fatiga.

Finalmente, los coeficientes de transformación α dependen de la temperatura existente en el plano inferior de la capa de mezcla en el momento de la medición, disminuyendo al aumentar esta última.

4. ANALISIS EFECTUADO DEL DETERIORO DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE

4.1. EVOLUCION DE LA DEFLEXION CON EL NUMERO DE CICLOS DE CARGA

Todos los valores medios de deflexión con el deflectómetro de impacto se han transformado a deflexiones tipo viga Benkelman utilizando los coeficientes α obtenidos. Estos valores representan, por lo tanto, la deflexión media corregida a 20 °C de cada sección a lo largo del ensayo que se obtendría utilizando como equipo de medida la viga Benkelman. Se presentan en forma de evolución de la deflexión media (DEX) con el número de ciclos de carga en las figuras 4 y 5 correspondiendo la primera a las secciones 1, 2 y 3 (322) y la segunda a las 4, 5 y 6 (321).

En las variables climáticas pueden distinguirse, desde el punto de vista pluviométrico, varios grupos de auscultaciones (ver figura 6): las de los ciclos 50.000, 410.000 y 850.000, que corresponden a momentos en los que en el mes anterior a la medida había caído una gran cantidad de agua (superior a 50 mm de columna de agua), y las de los ciclos 165.000, 340.000, 720.000 y 910.000, que corresponden a momentos lluviosos,

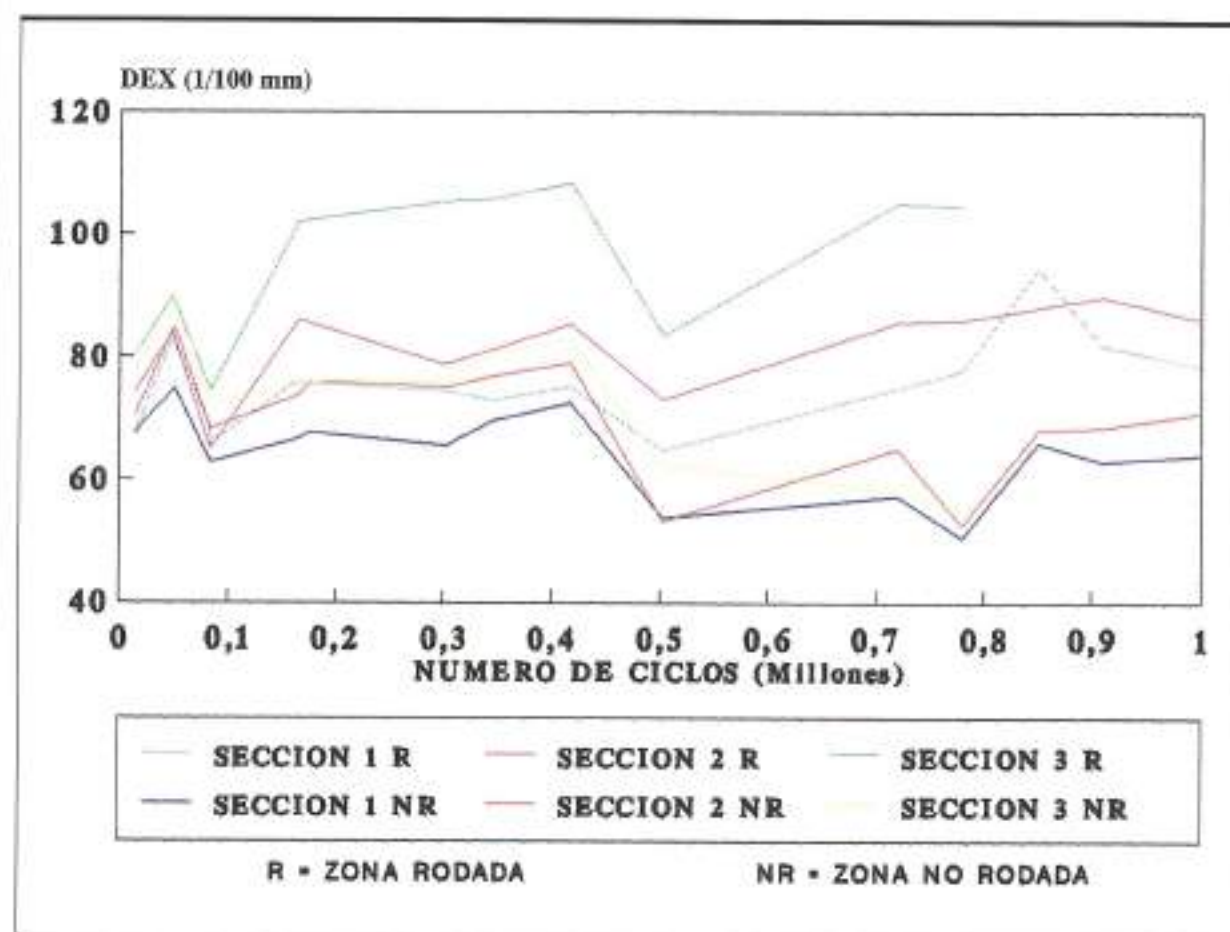


FIGURA 4. Evolución con el número de ciclos de la deflexión media tipo viga Benkelman en las zonas rodada y no rodada, Secciones 1, 2 y 3 (20 °C).

aunque con valores pluviométricos intermedios (entre 20 y 30 mm de columna de agua); finalmente, las auscultaciones de los ciclos 15.000, 85.000, 500.000, y 780.000 que se midieron en meses posteriores a periodos secos, y los tres últimos en/o después de periodos estivales.

Se aprecia que las deflexiones más elevadas en la zona no rodada se corresponden biunívocamente con los periodos húmedos del primer grupo citado (ciclos 50.000, 410.000 y 850.000), y que lo mismo puede decirse de los picos inferiores y los periodos secos del tercer grupo (ciclos 15.000, 85.000, 500.000 y 780.000). Las deflexiones intermedias, que no son picos superiores ni inferiores, se corresponden todas ellas con auscultaciones del segundo grupo, es decir, aquellas en las que se produjeron valores pluviométricos intermedios. La explicación a estos fenómenos es el cambio de humedad de las capas granulares inferiores producido por la entrada del agua de lluvia.

Por otro lado, del estudio de las figuras se puede concluir que la repetición de cargas ha producido el comienzo de la fatiga de la mezcla bituminosa en varias secciones, lo que se aprecia al comparar los valores obtenidos en las zonas rodada y sin rodar. Con el fin de evaluar el efecto de cada uno de los factores detectados (fatiga de la mezcla y cambios de humedad en la explanada), en las variaciones de deflexión se calcula la diferencia entre los valores de DEX (deflexión media tipo viga Benkelman corregida a 20 °C) entre la línea 29 (zona sin rodar y, por lo tanto, sin fatigarse) y la línea 10 (zona rodada y, por lo tanto, fatigada). Este valor representa el aumento de la deflexión producido por la fatiga. Por su parte, la influencia de los cambios de humedad en las capas granulares se calcula mediante la diferencia entre el DEX de la línea de medición en seco que se obtiene trazando una horizontal intermedia entre los valores de deflexión de las auscultaciones secas o picos inferiores de la línea 29 y el DEX de la línea 29.

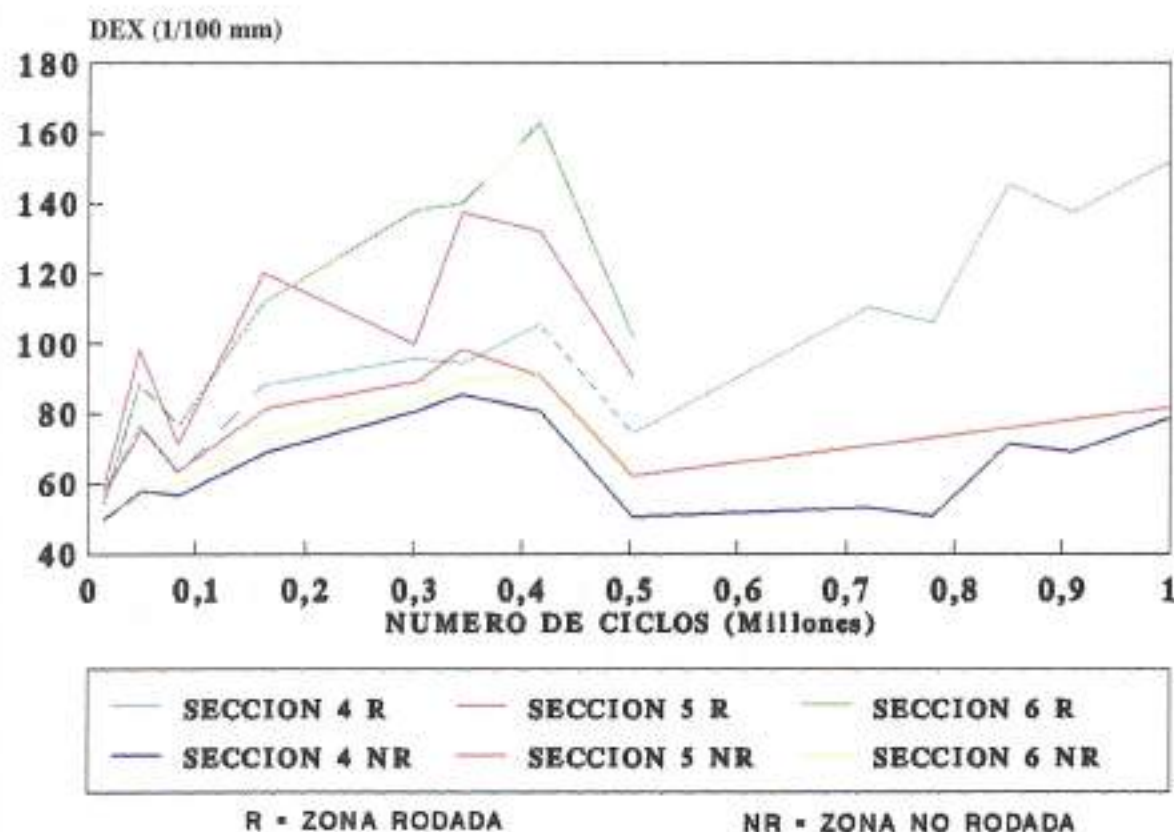


FIGURA 5. Evolución con el número de ciclos de la deflexión media tipo viga Berkelman en las zonas rodada y no rodada. Secciones 4, 5 y 6 (20 °C).

4.2. INFLUENCIA DE LAS VARIACIONES DE LA HUMEDAD

En la tabla 5 se presentan los principales datos obtenidos en este estudio. Del análisis efectuado y en forma resumida se deduce lo siguiente:

- Los aumentos de deflexión, para variaciones similares de la humedad, son mayores en los subtramos de la sección-tipo 321, llegando a valores de 32 a 40 1/100 mm, lo que significa 65-75 % de incremento del valor de la deflexión expresado en porcentaje.
- Los aumentos son más reducidos en los subtramos de la sección-tipo 322, con variaciones máximas de 21-32 1/100 mm, lo que en porcentaje es un 40-60 % de incremento de la deflexión.
- Dentro de cada sección-tipo, al disminuir el espesor de mezcla bituminosa crece la influencia de los cambios de humedad en la variación de la capacidad de soporte.
- Se hace imprescindible realizar, en cada medida de

SECCION	DEX(S)	DEX(H)	ΔDEX(VA)	ΔDEX(%)
1	52,1	73,5	21,4	41,1
2	52,9	81,7	28,9	54,6
3	55,0	86,6	31,6	57,3
4	50,2	82,2	32,0	63,9
5	60,0	98,4	38,4	64,0
6	51,2	90,6	39,3	76,7

TABLA 5. Aumento de la deflexión media de la zona no rodada producido por los cambios de humedad de las capas granulares.

DEX(S) = Deflexión media en las oscilaciones «seca» (en 1/100 mm)
 DEX(H) = Deflexión media en las oscilaciones «húmeda» (en 1/100 mm)
 ΔDEX(VA) = Diferencia de DEX(H) y DEX(S) en valor absoluto (en 1/100 mm)
 ΔDEX(%) = Diferencia de DEX(H) y DEX(S) en porcentaje

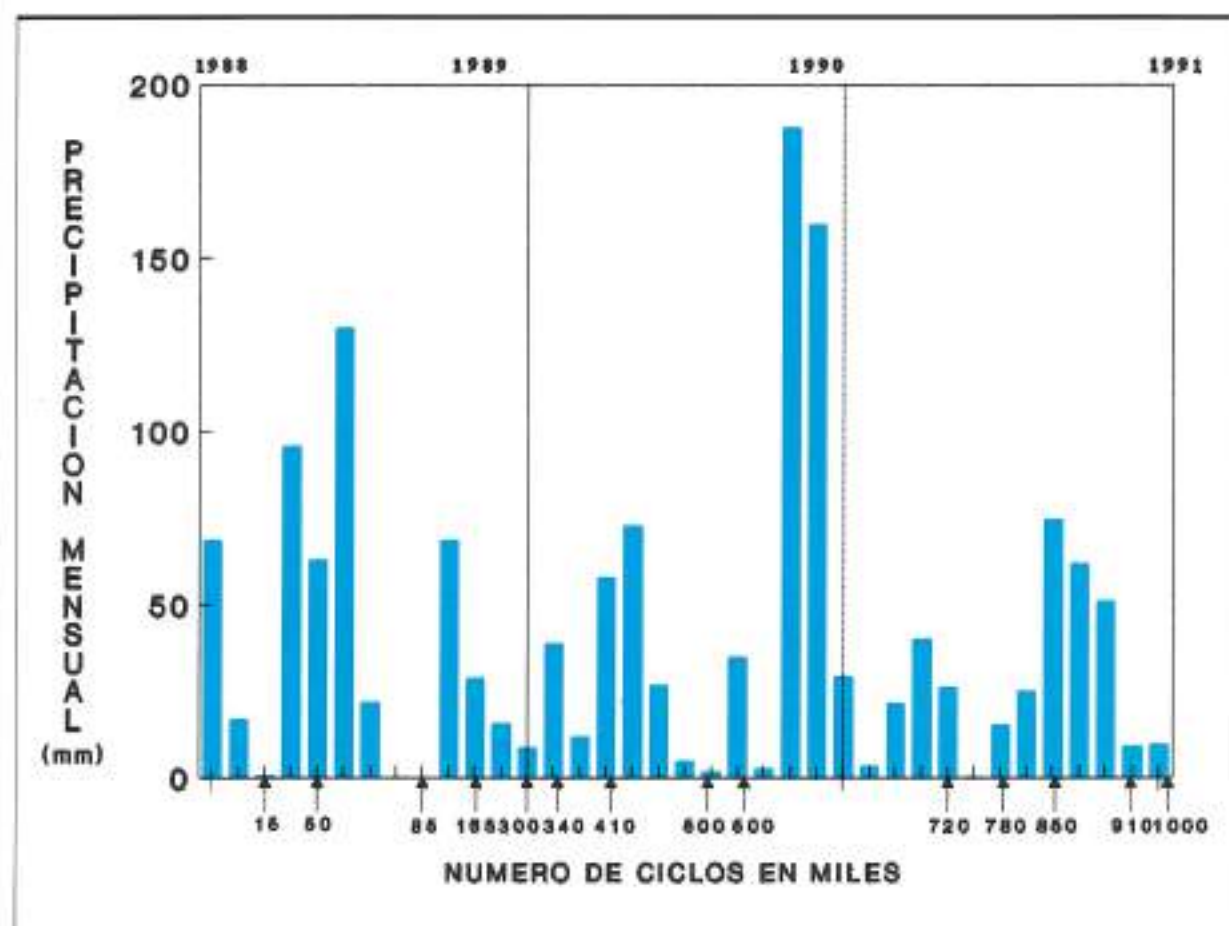


FIGURA 6. Relación entre distribución mensual de precipitaciones y los ciclos de carga de cada auscultación.

deflexiones, una corrección de los valores obtenidos no sólo por la temperatura del pavimento, sino también por la humedad de la explanada de los firmes.

4.3. INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA EN EL PAVIMENTO

En la tabla 6 se presentan los principales resultados obtenidos. Un resumen de las principales conclusiones obtenidas en el estudio de la influencia de los cambios de temperatura es el siguiente:

- La influencia de los cambios de temperatura en la variación de la deflexión disminuye, para una misma sección-tipo, al disminuir el espesor de mezcla bituminosa.
- La influencia de las variaciones de temperatura en la capacidad de soporte es mayor en la sección-tipo 321 que en la 322.
- Con el mismo espesor de mezcla bituminosa, la influencia de los cambios de temperatura en la deflexión

es mayor cuanto menor espesor existe de capas granulares.

- La influencia de las variaciones de la temperatura en la capacidad de soporte disminuye al irse acumulando las cargas del tráfico.
- Al pasar la temperatura inferior del pavimento de 0 a 30 °C, la deflexión de la sección-tipo 322 aumenta en un 70 % su valor, cuando los firmes están recién contruidos. En la sección-tipo 321, en las mismas condiciones, el aumento de la deflexión es del 160 %.
- Una vez aplicadas 400.000 cargas de 13 t por eje, el aumento de la deflexión de la sección-tipo 322 al pasar de 0 a 30 °C la temperatura inferior de la capa de mezcla es únicamente el 50 %. En la sección-tipo 321, en el mismo caso, el aumento de la deflexión es del 90 %.
- Es muy importante, en cualquier medida de deflexiones, corregir los datos obtenidos por la temperatura del pavimento.

SECCION	Δ DEX (")		e_1	e_2
	ZONA RODADA	ZONA NO RODADA		
1	54	69	15,5	50
2	31	55	12,5	50
3	21	38	10,5	50
4	90	155	18,0	25
5	43	136	16,0	25
6	24	90	14,5	25

TABLA 6. Aumento de las deflexiones medias producido por los cambios de temperatura del pavimento.

Δ DEX = Aumento de la deflexión media al pasar de 0 a 30 °C de temperatura inferior del pavimento (")

e_1 = Espesor medio de mezcla (cm)

e_2 = Espesor medio de capas granulares (cm)

(") = Con 410.000 ciclos de carga de 13 t

4.4. COMPARACION DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DE LAS SECCIONES SIN TRAFICO (ZONA NO RODADA)

La comparación de la capacidad de soporte de las secciones de ensayo sin tráfico, es decir, antes de efectuar las repeticiones de carga, se realiza a partir de las medidas efectuadas en la zona no rodada (línea 29). La comparación se efectúa directamente con los valores de la deflexión media (DEX), ya corregida a 20 °C. Los resultados se presentan en la tabla 7 expresándose la diferencia de capacidad de soporte mediante el aumento de la deflexión (Δ DEX) tanto en valor absoluto como en porcentaje.

La diferencia de capacidad de soporte entre dos secciones varía durante el ensayo entre los intervalos de un cierto rango, pero no se ven tendencias a que esa diferencia aumente o disminuya con el tiempo (o repeticiones de carga). En la sección-tipo 322, al disminuir el espesor de mezcla disminuye la capacidad de soporte de la sección, y se incrementa, por lo tanto, el valor de la deflexión. En valores medios una disminución de 1 cm de mezcla bituminosa produce un aumento de la deflexión de 2-2,5 1/100 mm, lo que significa un incremento medio de 3-3,5 %. También en la sección-tipo 321, al disminuir el espesor de mezcla disminuye la capacidad de soporte y aumenta la deflexión. En valores medios una disminución de 1 cm de mezcla conduce a un incremento de la deflexión de 1/100 mm, lo que significa 1,5 % de aumento. De todo ello se deduce que la sección tipo 322 parece más sensible, desde el punto de vista de la variación de las deflexiones, a la disminución del espesor de la mezcla, frente a la sección tipo 321.

CICLOS	DEX		Δ DEX(IVA)	Δ DEX(%)
	S1	S4	S4-1	S4-1
15.000	67	50	-	-
50.000	75	58	-	-
85.000	63	57	-	-
165.000	67	69	2	4
300.000	65	81	15	23
340.000	69	85	16	23
410.000	72	81	8	11
500.000	54	50	-	-
720.000	57	53	-	-
780.000	50	50	-	-
850.000	66	71	5	8
910.000	63	69	6	9
1.000.000	64	76	14	22

TABLA 7. Comparación de la capacidad de soporte de las secciones-tipo sin tráfico.

DEX = Deflexión media de la línea 29 (20 °C; 1/100 mm)

Δ DEX(IVA) = Aumento de DEX (1/100 mm)

Δ DEX(%) = Aumento de DEX(%)

S1 = Sección 1 (322)

S4 = Sección 4 (321)

S4-1 = Aumento de la sección 4 respecto a la 1

La capacidad de soporte de la sección-tipo 321 es inferior a la de la sección-tipo 322. Traducido a valores medios, la deflexión de la 321 es superior a la de la 322 en 11 1/100 mm, es decir, un 16 % mayor. Si se toman todas las secciones en la comparación, la clasificación de mayor a menor capacidad de soporte una vez construidas (es decir, sin tráfico) es la siguiente: 1, 2, 3 y 4 (capacidad de soporte similar) y 6.

4.5. COMPARACION DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DE LAS SECCIONES CON TRAFICO (ZONA RODADA)

La comparación de la capacidad de soporte de las secciones de ensayo con tráfico se realiza mediante los valores de la deflexión media ya corregida a 20 °C (DEX) medida en la zona rodada (línea 10). Los resultados se presentan en la tabla 8 expresándose la diferencia de capacidad de soporte por medio del aumento de la deflexión (Δ DEX), tanto en valor absoluto (1/100 mm), como en porcentaje.

CICLOS	DEX		Δ DEX(VA)	Δ DEX(%)
	S1	S4	S4-1	S4-1
15.000	68	56	-	-
50.000	83	77	-	-
85.000	66	62	-	-
165.000	76	88	12	16
300.000	74	96	22	29
340.000	73	94	21	30
410.000	75	105	30	40
500.000	65	74	10	15
720.000	75	110	35	47
780.000	78	106	28	36
850.000	94	145	51	54
910.000	82	137	55	67
1.000.000	79	152	73	93

TABLA 8. Comparación de la capacidad de soporte de las secciones tipo con tráfico.

DEX = Deflexión media de la línea 10 (20 °C, 1/100 mm)

Δ DEX(VA) = Aumento de DEX (1/100 mm)

Δ DEX(%) = Aumento de DEX (%)

S1 = Sección 1 (322)

S4 = Sección 4 (321)

S4-1 = Aumento de la sección 4 respecto a la 1

La diferencia de capacidad de soporte inicial existente entre las secciones (y obtenida en el apartado anterior) varía durante el ensayo. Comparando los resultados de las dos secciones tipo, hasta el ciclo 350.000 la capacidad de soporte de la 321 es inferior a la 322 en cuantía similar a la obtenida en la zona no rodada. A partir de ese ciclo la diferencia de capacidad de soporte se incrementa con el número de repeticiones de carga, desde valores de Δ DEX de 30 1/100 mm (40 %) en el ciclo 410.000, hasta 73 1/100 mm (93 %) al final del ensayo (ciclo 1.000.000).

Las diferencias de capacidad de soporte entre las secciones en la zona rodada aumentan debido al fenómeno del agrietamiento de la capa de mezcla, y se aprecia un crecimiento de las diferencias de deflexión, hecho que se produce 50.000-100.000 ciclos antes de que la fisura aparezca en superficie. Por medio de la comparación sistemática de deflexiones se puede, por lo tanto, prever la fisuración de una sección.

4.6. INFLUENCIA DE LA FATIGA DE LOS FIRMES PRODUCIDA POR LA REPETICIÓN DE LAS CARGAS DEL TRÁFICO

En todas las secciones de la pista se ha producido, en mayor o menor medida, el fenómeno de pérdida de capacidad de soporte por la fatiga del firme, debido a la repetición de las cargas del tráfico. El efecto de la fatiga de los firmes se mide en forma del aumento que se produce en los valores de la deflexión media de la zona rodada respecto a la no rodada ya que, debido a que se producen variaciones de la deflexión por los distintos grados de humedad de la explanada, ésta es la mejor forma de evitar las distorsiones de este factor. Los resultados de las distintas auscultaciones se presentan en la figura 7.

La fatiga, medida por medio de Δ DEX, se produce por saltos cualitativos, no en forma evolutiva. Mientras no aparece fatiga Δ DEX es 3-10 1/100 mm o un 5-15 % de aumento. El primer aumento de deflexiones producido por la fatiga es de cuantía similar de unas secciones a otras: 20-30 1/100 mm o, en porcentaje, 35-45 %. El segundo aumento es de 50-65 1/100 mm, es decir, un 85-100 % de crecimiento. Lo que difiere de unas secciones a otras es el número de ciclos en el que se producen estos aumentos.

El momento del comienzo de los efectos de la fatiga es diferente de unas secciones a otras: la sección 6 comienza a aumentar su deflexión tipo por fatiga en el ciclo 50.000, las secciones 3 y 5 en el ciclo 150.000, la sección 4 con 400.000 ciclos, la sección 2 con 500.000 ciclos y la sección 1 con 700.000 ciclos. El resultado anterior está de acuerdo con el estado de deterioro de las secciones durante el ensayo: tanto por fisuración como por regularidad la clasificación obtenida de las secciones es, de peor a mejor: 6, 5, 3 y 4, 2 y 1.

Se confirma la conclusión de que la sección-tipo 321 es más sensible a la fatiga que la 322: la primera comienza a fatigarse con menor número de repeticiones de carga (400.000 frente a 700.000), y al final del ensayo el valor de la fatiga es el triple: 100 % frente al 36 % de Δ DEX.

En todas las secciones se detecta la fatiga antes de la aparición de fisuras. El número de ciclos entre el inicio de la fatiga y el comienzo de la fisuración varía, de unas secciones a otras, entre 200.000 y 500.000. Detectar el inicio de la fatiga a partir de las deflexiones exige una labor previa de análisis de la influencia de la temperatura y humedad en una sección determinada.

La deflexión media en la que se produce la primera grieta parece estar comprendida en el intervalo 100-120 1/100 mm en la sección-tipo 322 y 110-140 1/100 mm en la 321. En las secciones 2 y 3, variantes de la sección-tipo 322, la primera fisura se produce en los puntos que alcanzan un valor de la deflexión de 100-120 1/100 mm, realizándose la medida con la explanada saturada. En las mismas condiciones la primera grieta de las variantes de la sección-tipo 321 se produce en los puntos que superan los 140 1/100 mm.

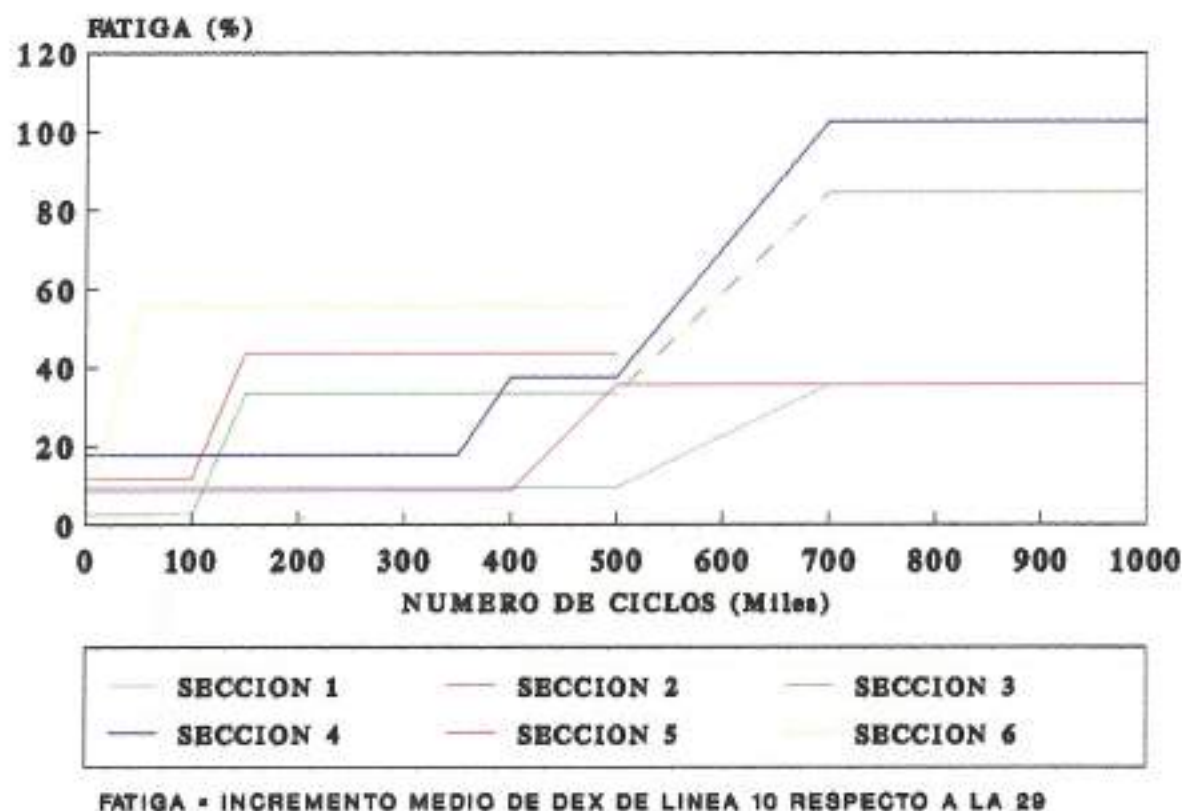


FIGURA 7. Evolución con los ciclos de la fatiga de la mezcla (medida en incrementos de deflexión).

La variante de la sección-tipo 322 (sección 3) comienza el ensayo con deflexiones medias comprendidas en el intervalo 75-90 1/100 mm, y cuando alcanza el fallo por fisuración la deflexión media tiene valores de 105 1/100 mm, lo que significa multiplicar la deflexión inicial por 1,2. Por su parte, las secciones variantes de la sección-tipo 321 presentan deflexiones medias en el rango 85-100 1/100 mm al comenzar el ensayo, y cuando alcanzan el fallo las deflexiones medias son de 150-160 1/100 mm, lo que implica multiplicar las iniciales por 1,8.

Se ha incluido en el análisis un criterio de fallo relacionado con la fatiga de los firmes, cuya definición es la siguiente: el fallo de una sección se produce cuando el aumento de la deflexión media de la zona rodada respecto a la no rodada es superior a un valor determinado. Es decir, con la nomenclatura utilizada en anteriores apartados:

$$\Delta \text{DEX (Fatiga)} > a \%$$

siendo a una constante. Aplicando este criterio se deduce que el valor de la constante «a» del criterio de fallo, aplicándolo cuando se produce el primer salto cualitativo de fatiga, es 35 %.

Con este criterio, la vida útil de la sección-tipo 322 es 700.000 ciclos y de la 321 400.000 ciclos, con una relación entre ambas de 1:1,8.

4.7. VARIACION DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE CON LOS ESPESORES DE MEZCLA BITUMINOSA

Este cálculo se ha efectuado a partir de las medidas de la deflexión efectuadas en distintas situaciones de los firmes (humedad en la explanada, sin y con tráfico, etc.) aunque todos los valores están corregidos a una temperatura de 20 °C. En las figuras 8 a 11 se presentan varios ejemplos.

En la figura 8 se representan las gráficas correspondientes a las secciones 1, 2 y 3 en la línea 29 (zona no

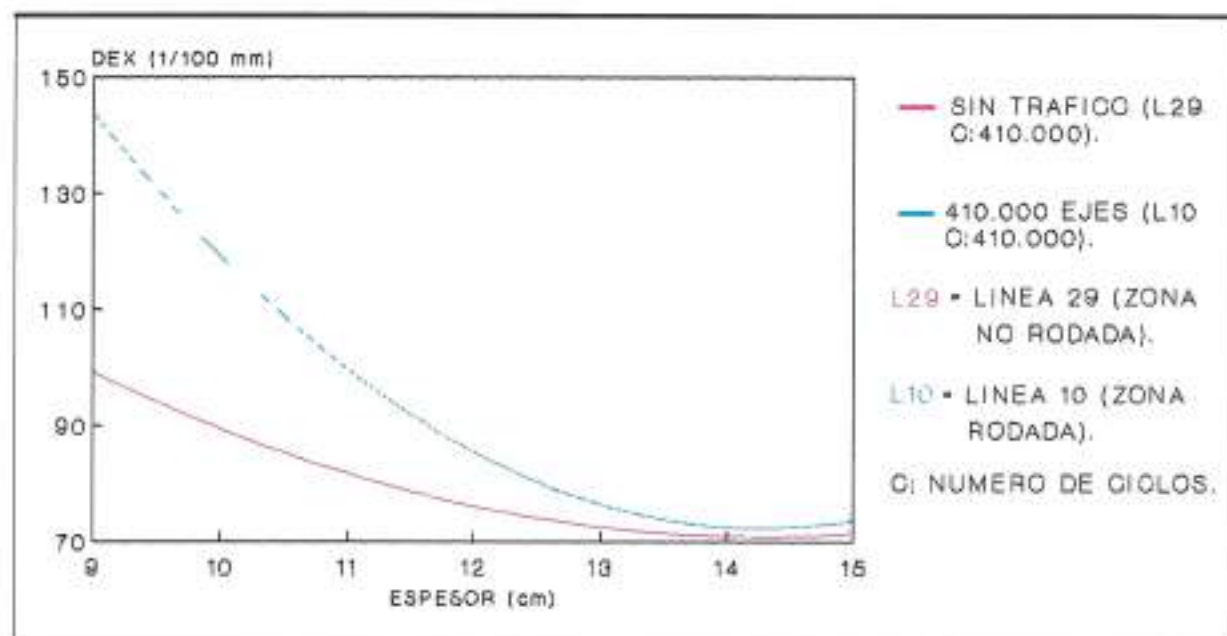


FIGURA 8. Curvas de variación de la deflexión tipo-viga Benkelman con el espesor de mezcla en la sección-tipo 322 sin tráfico y después de 410.000 ejes de 13 t con explanada saturada.

rodada) y la línea 10 (zona rodada) del ciclo 410.000. Las dos gráficas corresponden, por lo tanto, a las curvas de variación de la deflexión tipo viga Benkelman con el espesor de la capa de mezcla bituminosa en la sección-tipo 322 en dos situaciones: sin tráfico y después de 410.000 ejes de 13 t, en ambos casos con explanada saturada.

La diferencia entre ambas curvas dibujadas (con y sin tráfico) representa la fatiga que han producido en el firme los 410.000 ejes de 13 t. Si este parámetro se representa en forma de aumento de la deflexión, y se expresa en porcentaje, se pueden dibujar la figura 9. Esta gráfica representaría la variación de la fatiga con el espesor de mezcla en la sección-tipo 322.

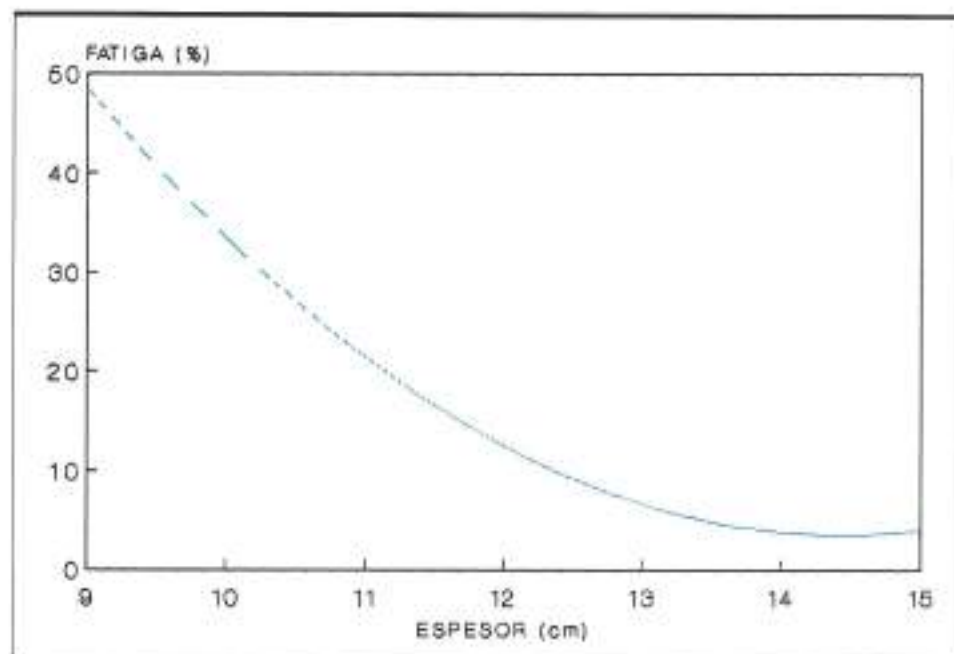


FIGURA 9. Variación de la fatiga de los firmes con el espesor de mezcla en la sección-tipo 322 después de 410.000 ejes de 13 t con explanada saturada.

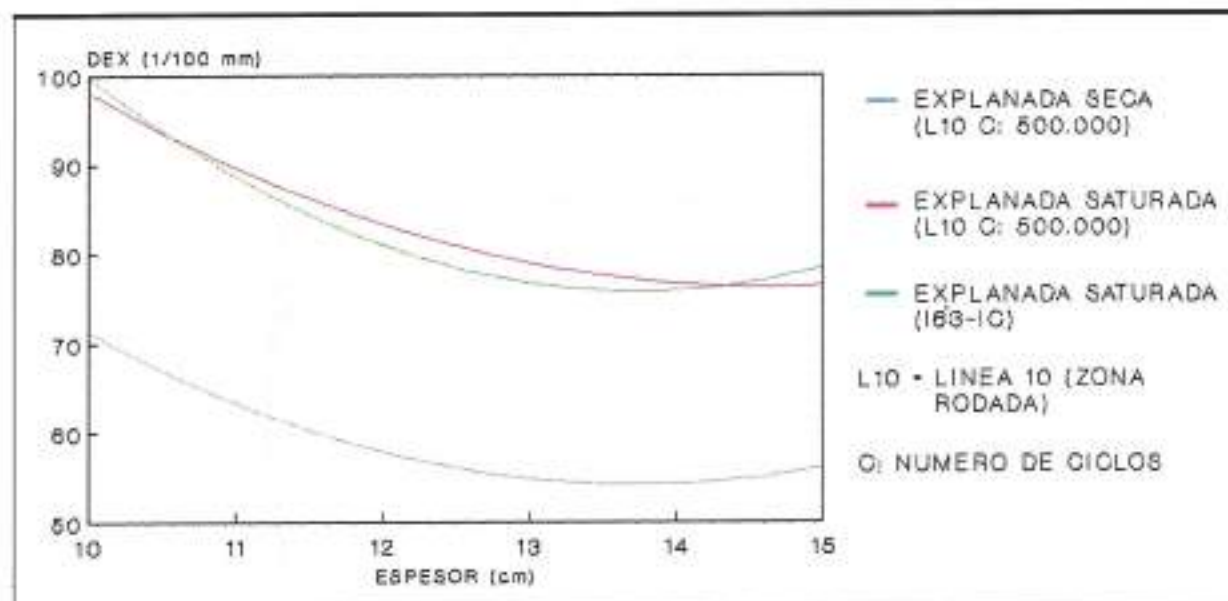


FIGURA 10. Curvas de variación de la deflexión tipo viga Benkelman con el espesor de mezcla en la sección-tipo 322 con explanada seca y saturada después de 500.000 ejes de 13 t.

En las figuras 10 y 11 se presentan dos ejemplos de la distinta influencia de los cambios de humedad de la explanada en la capacidad de soporte de las secciones-tipo, al variar también el espesor de mezcla bituminosa de los firmes. En la primera de estas figuras se representa la variación de la deflexión media de la sección-tipo 322 al decrecer el espesor de mezcla de 15 a 10 cm,

en dos situaciones distintas: con explanada seca y con explanada saturada (o cercana a la saturación). Ambas curvas han sido confeccionadas a partir de los datos de la línea 10 en el ciclo 500.000, auscultación en la que se efectuaron dos campañas de medida antes y después de fuertes lluvias. Se ha dibujado también la curva de deflexiones con explanada saturada que se obtendría si se

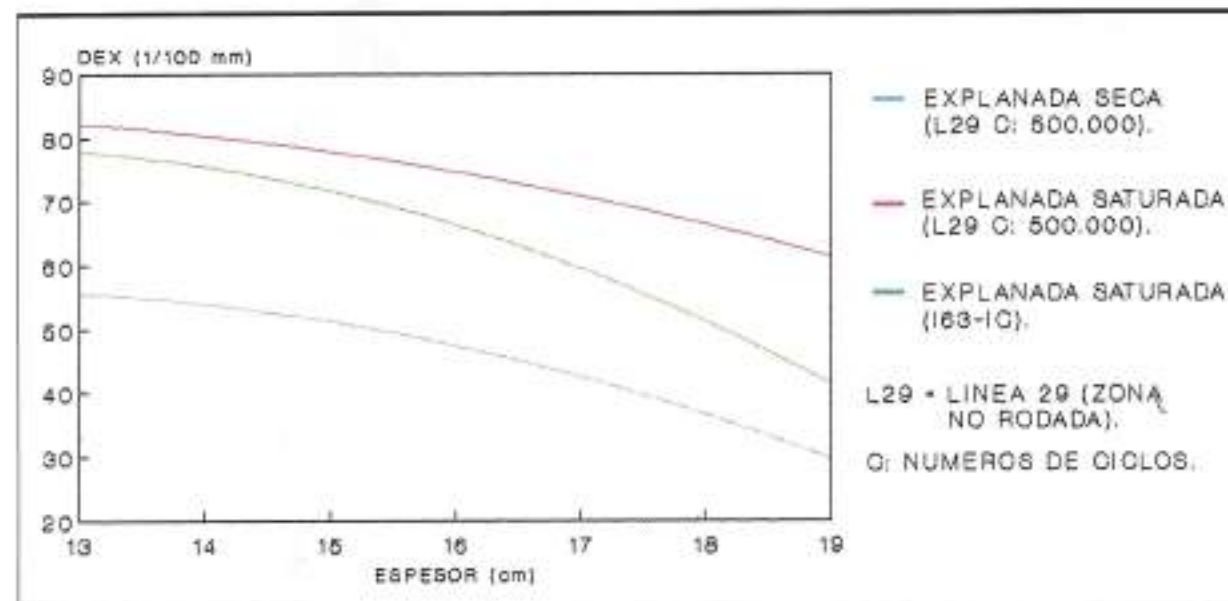


FIGURA 11. Curvas de variación de la deflexión tipo viga Benkelman con el espesor de mezcla en la sección-tipo 321 con explanada seca y saturada.

aplicase la Instrucción 6.3.I.C. a los valores obtenidos con la explanada seca. Esta Instrucción establece (ver apartado 4.6.2. de la misma) que para pasar de una a otra situación, en las condiciones de explanada y drenaje existentes en la pista, la deflexión debe ser multiplicada por un coeficiente de valor 1,4.

El mismo cálculo se ha realizado sobre la sección-tipo 321, presentándose las curvas obtenidas en la figura 11. En este caso los datos han sido extraídos de la misma auscultación (500.000) pero de la zona no rodada (línea 29), y se presentan para una variación del espesor de mezcla entre 13 y 19 cm.

En la sección tipo 322 la corrección por humedad de la explanada siguiendo los criterios establecidos en la Instrucción 6.3.I.C. coincide prácticamente con la gráfica realizada a partir de los valores obtenidos con la pista de ensayo. Los valores de la Instrucción parecen, por lo tanto, correctamente establecidos para este caso. En la sección tipo 321, por el contrario, la corrección por humedad dada por la Instrucción 6.3.I.C. da unos valores inferiores a los obtenidos en la pista de ensayo. Cuando se mide con explanada seca los criterios de la Instrucción son demasiado bajos y, además, no quedan del lado de la seguridad.

BIBLIOGRAFIA

- SACRISTAN, J.; GARZON, S.; GOMEZ, J., y SAMPEDRO, J. «Sistema automático de adquisición de datos para la pista de ensayo de firmes del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX». Revista *Carreteras*, 3.^a época, núm. 24, julio-agosto 1986.
- RUIZ, A., y ROMERO, R. «La pista de ensayo a escala real del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX». Revista *Carreteras*, 3.^a época, núm. 29, mayo-junio 1987.
- RUIZ, A., y ROMERO, R. «La pista de ensayo a escala real del Centro de Estudios de Carreteras». Revista *Ingeniería Civil*, núm. 63, julio-agosto 1987.
- APARICIO, A., y ROMERO, R. «La base des données du manège de fatigue du Centre d'Etudes des Routes Colloque Route et Informatique». Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris (Francia), 18-15 de marzo de 1990.
- APARICIO, A. «Primeros estudios con modelos en la pista de ensayo del CEC, desarrollo de un programa de cálculo inverso

- y aplicación a los resultados de la instrumentación». Revista *Ingeniería Civil*, núm. 76, julio-agosto-septiembre 1990.
- VARIOS. *Essai OCDE en vraie grandeur des superstructures routières*. Rapport publicado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), Service des Publications OCDE, Paris (Francia), 1991.
- ROMERO, R., y RUIZ, A. «Resultados del primer ensayo efectuado en la pista del Centro de Estudios de Carreteras (1.^a parte)». Revista *Ingeniería Civil*, núm. 79, abril-mayo-junio 1991.
- ROMERO, R. *L'essai croisé espagnol*. Conference de conclusion sur l'essai international en vraie grandeur des superstructures routières au manège du LCPC à Nantes. La Baule (Francia), 16-17 de mayo de 1991.
- RUIZ, A., y ROMERO, R. *Experimentación a escala real de firmes con capas granulares y mezclas bituminosas*. Publicado por la Asociación Española de Refinerías de Petróleo. Productores de Asfalto (ESPAS). Madrid (España), junio 1991.
- RUIZ, A.; ROMERO, R., y GONZALEZ, A. *Analysis of deflections on a test track*. Symposium on nondestructive testing and back calculation for pavements. Paper NDT-040. Nashville, Tennessee (USA), agosto de 1991.
- ROMERO, R.; RUIZ, A., y PEREZ, J. *First test on the CEDEX test track*. Record publicado por el Transportation Research Board, National Research Council, núm. 1354. Washington (USA). National Academy Press, 1992.
- ROMERO, R.; RUIZ, A., y PEREZ, J. *First test on the CEDEX test track*. 71 Annual meeting. Transportation Research Board. Paper 920008. Washington (USA), 12-16 de enero de 1992.
- ROMERO, R., y RUIZ, A. «Resultados del primer ensayo efectuado en la pista del Centro de Estudios de Carreteras (2.^a parte)». Revista *Ingeniería Civil*, núm. 83, enero-febrero-marzo 1992.
- ROMERO, R., y RUIZ, A. «Resultados del primer ensayo efectuado en la pista del Centro de Estudios de Carreteras (3.^a parte)». Revista *Ingeniería Civil*, núm. 85, julio-agosto-septiembre 1992.
- HALL, J. *European Airport Technology*. Report publicado por U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg, Mississippi (USA), octubre 1992.
- HUGO, F. *Vehicle. Pavement interaction of accelerated pavement testing devices*. 72 Annual meeting. Transportation Research Board. Paper 931085. Washington (USA), 10-14 de enero de 1993.
- ROMERO, R. «El Ensayo cruzado español en la pista de ensayo sobre firmes». Revista *Carreteras*, 4.^a época, núm. 63, enero-febrero 1993.

Balsas

LAGUNA DE BARLOVENTO
(Isla de La Palma)



BALSA DE PUNTAGORDA
(Isla de La Palma)



BALSA DE VALLE MOLINA
(Isla de Tenerife)

BALSA DE LA FLORIDA
(Isla de Tenerife)



BALSA DE SAN ANTONIO
(Isla de Tenerife)



ACTUACIONES EN CANARIAS

- BALSA DE SAN ANTONIO
(Isla de Tenerife)
- BALSA DE LA FLORIDA
(Isla de Tenerife)
- BALSA DE VALLE MOLINA
(Isla de Tenerife)
- BALSA DE PUNTAGORDA
(Isla de La Palma)
- EMBALSE DE ADEYAHAMEN
(Isla de La Palma)
- LAGUNA DE BARLOVENTO
(Isla de La Palma),
etc.



**GINES NAVARRO
CONSTRUCCIONES S.A.**

*Cuestión de
eficacia*

OFICINA CENTRAL:

c/ Basauri, 3 y 5 - 28023 Madrid
Telf.: 307 79 44 - Fax: 307 73 42

OFICINAS EN CANARIAS:

c/ Puerta Canseco, 49 - 38000 Sta. Cruz de Tenerife - Telf.: (922) 27 63 56 - Fax: (922) 28 71 07
c/ Italia, 1 - 35006 Las Palmas de Gran Canaria - Telf.: (928) 24 15 44 - Fax: (928) 23 49 19
c/ O'Daly, 35 - 38700 Sta. Cruz de la Palma - Telf.: (922) 41 67 42 - Fax: (922) 41 56 50
c/ Presbiterio Andrés Curbello, 2 - 35570 Lanzarote - Telf.: (928) 83 02 35 - Fax: (928) 83 02 34

Ajuntament de Calvià. Mallorca

PRETERITO IMPERFECTO

Calvià ha ido subsanando en los últimos tiempos los defectos de un crecimiento indiscriminado.

PRESENTE DE INDICATIVO

Calvià ha sido seleccionado como Municipio Piloto en el Plan de Mejora de la Competitividad Turística (Plan Futures).

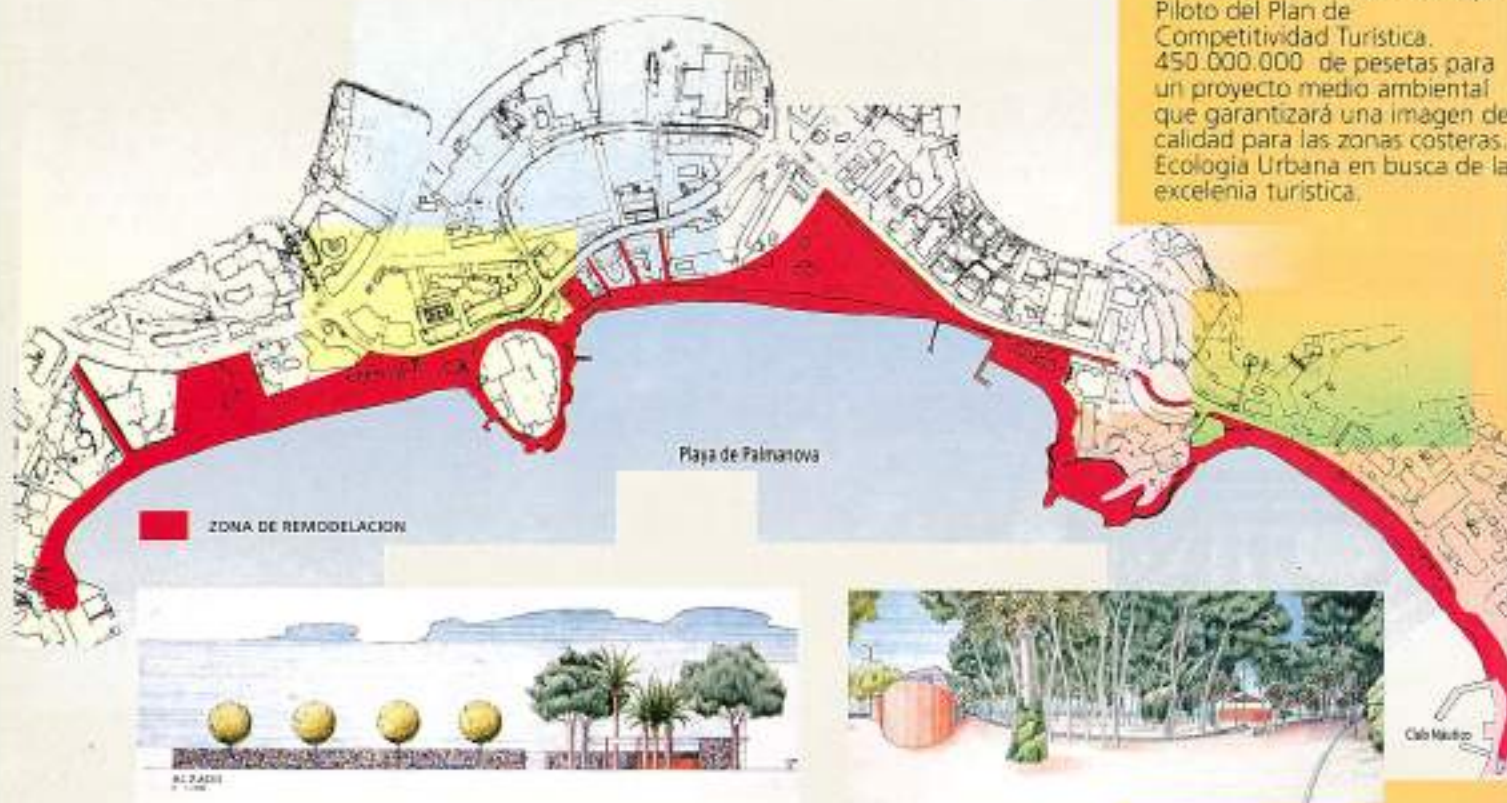
FUTURO PERFECTO

Obras de recuperación medio-ambiental de espacios costeros de Palmanova (Calvià) Mallorca.

El Ajuntament de Calvià, Municipio Piloto del Plan Futures de Mejora de la Competitividad Turística, consciente de que el mejor indicativo para demostrar su clara vocación de lograr un mejor presente para todos sus ciudadanos, es iniciar sus obras de mejora cuanto antes, ha elaborado en colaboración con el Ministerio de Obras Públicas y Transporte y la Conselleria de Turismo un ambicioso proyecto de regeneración del espacio costero.



Paseo Marítimo de Palmanova y regeneración de las 3 playas de la zona. Uno de los proyectos que ha permitido a Calvià ser nombrado Municipio Piloto del Plan de Competitividad Turística. 450.000.000 de pesetas para un proyecto medio ambiental que garantizará una imagen de calidad para las zonas costeras. Ecología Urbana en busca de la excelencia turística.



IC
INGENIEROS DE CONSTRUCCIONES

AGLOMSA



**AJUNTAMENT DE CALVIÀ
MALLORCA**

**CALVIÀ
ECOLOGIA URBANA**