

*Evaluación técnico-económica
de las secciones de firme de la Norma 6.1-IC*

D. Carlos Kraemer

Universidad Politécnica de Valencia

D. Raúl Albelda

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

INTEVÍA - MADRID

INTRODUCCIÓN

La **Norma 6.1 IC "Secciones de firme" (2.003)** contiene un catálogo para dimensionar firmes nuevos. Para cada categoría de tráfico pesado y de explanada se fijan tres o cuatro alternativas de firme, con un total de **61 secciones de firme** (Tabla1), de las cuales:

- 23 son firmes semirrígidos
- 19 son firmes con pavimento de hormigón
- 13 son firmes semiflexibles, y
- 6 son firmes flexibles

El presente trabajo expone de forma resumida la metodología y los resultados obtenidos en la evaluación técnica y económica de estas secciones realizada por los autores en el Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes de la Universidad Politécnica de Valencia.

El objetivo principal es ofrecer a los proyectistas que apliquen la normativa citada una información adicional, en muchos casos relevante, de la capacidad estructural de las diferentes opciones para su aplicación en un proyecto deter-

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T00	T0	T1	T2
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1				211 MB 28 ZA 45 212 MB 15 SC 30 ^m 214 HF 23 HM 15 ZA 20
	E2			121 MB 30 ZA 25 122 ^m MB 20 SC 25 ^m 123 MB 15 GC 22 ^m HM 15 124 ^m HF 25	221 MB 25 ZA 25 222 ^m MB 18 SC 22 ^m 223 MB 15 SC 20 ^m HM 15 224 ^m HF 23
	E3	0031 MB 35 ZA 25 0032 MB 25 SC 30 0033 MB 20 GC 25 ^m SC 25 0034 HF 25 HM 15	031 MB 30 ZA 25 032 MB 20 SC 25 ^m 033 MB 15 GC 22 ^m SC 20 034 HF 24 ^m HM 15	131 MB 25 ZA 25 132 MB 20 SC 20 ^m 134 HF 25 HM 15	231 MB 20 ZA 25 232 MB 15 SC 20 ^m 234 HF 23 HM 15

MB Mezclas bituminosas HF Hormigón de firme HM Hormigón magro vibrado GC Graavacemento SC Suelocemento ZA Zahorra artificial

(1) Para las categorías de tráfico pesado T00 y T0 se emplearán únicamente pavimentos continuos de hormigón armado con los espesores indicados.
 (2) Capas tratadas con cemento que deberán prefisurarse con espaciamientos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).
 (3) Para poder proyectar esta solución será preceptivo que la capa superior de la explanada E2 esté estabilizada con cemento.

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T31	T32	T41	T42
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	3111 MB 20 ZA 40 3112 MB 15 SC 30 3114 HF 21 ZA 30	3211 MB 18 ZA 40 3212 MB 12 SC 30 3214 HF 21 ZA 20	4111 MB 10 ^m ZA 40 4112 MB 8 SC 30 4114 HF 20 ZA 20	4211 MB 5 ^m ZA 35 4212 MB 5 SC 25 4214 HF 18 ZA 20
	E2	3121 MB 16 ZA 40 3122 MB 12 SC 30 3124 HF 21 ZA 25	3221 MB 15 ZA 35 3222 MB 10 SC 30 3224 HF 21 ZA 20	4121 MB 10 ^m ZA 30 4122 MB 8 SC 25 4124 HF 20	4221 MB 5 ^m ZA 25 4222 MB 5 SC 22 4224 HF 18
	E3	3131 MB 16 ZA 25 3132 MB 12 SC 22 3134 HF 21 ZA 20	3231 MB 15 ZA 20 3232 MB 10 SC 22 3234 HF 21	4131 MB 10 ^m ZA 20 4132 MB 8 SC 20 4134 HF 20	4231 MB 5 ^m ZA 20 4232 MB 5 SC 20 4234 HF 18

MB Mezclas bituminosas HF Hormigón de firme SC Suelocemento ZA Zahorra artificial

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente flexibles, gravaemulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

Nota 1: Para las categorías de tráfico pesado T3 (T31 y T32) las capas tratadas con cemento deberán prefisurarse con espaciamientos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).

Nota 2: En la categoría de tráfico pesado T42 con tráficos de intensidad reducida (menor que 100 vehículos/carril/día) podrá disponerse un riego con gravilla bicapa como sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.

Tabla 1. Catálogos de secciones de firme de la Norma 6.1 IC (2.003).

minado. El estudio económico sólo ofrece una orientación general comparativa, previa al estudio detallado a realizar en cada proyecto con los costes de construcción aplicables, teniendo en cuenta los materiales disponibles para la obra.

A excepción de las secciones correspondientes a las categorías de tráfico de vehículos pesados inferiores (T41 y T42) que han quedado finalmente al margen de este trabajo, el catálogo de la Norma ha sido evaluado mediante **métodos analíticos de dimensionamiento**. Estos métodos permiten estimar las tensiones y deformaciones a las que se ve sometido el firme, para posteriormente **comparar** estos con unos valores patrón dados por el criterio de fallo. Son procedimientos que, aunque realizan una simplificación del fenómeno de la fatiga de un firme, permiten relacionar **cualitativamente** el comportamiento teórico de los firmes durante su vida útil.

2. EVALUACIÓN TÉCNICA

Para analizar el comportamiento estructural teórico de las distintas secciones de firme del catálogo de secciones de la Norma, se realizan dos análisis distintos:

1. Las secciones de firme con pavimento bituminoso se analizan por medio de la teoría del modelo elástico multicapa de Burmister, considerando el terreno sobre el que apoya como un macizo de Boussinesq.
2. Las secciones con pavimento de hormigón son analizadas por medio del método empírico de la AASTHO [1] en su versión de 1.993, y sus resultados contrastados mediante el método analítico que recoge la Guía Técnica del LCPC [17] de Francia.

Aunque la metodología para abordar el dimensionamiento de dichos firmes sea distinta en cada caso, existen una serie de variables o parámetros de cálculo que son comunes tanto para el caso de los firmes con pavimento de hormigón como para el de los firmes con pavimento bituminoso.

2.1. FACTORES DE DISEÑO

Los principales factores de diseño que intervienen en el proyecto del firme de una nueva carretera son:

- El periodo de proyecto
- El tráfico
- La capacidad de soporte de la explanada

- El clima
- Las características de los materiales que componen las capas de firme
- Condicionantes constructivos

Los condicionantes constructivos influyen notablemente en la elección de la tipología de firme que finalmente se construya, pero debido a su amplia casuística no se consideran en la evaluación técnica, que tiene un carácter general. Acerca del resto de los mencionados factores, las hipótesis adoptadas para la realización de los cálculos han sido las detalladas a continuación.

PERIODO DE PROYECTO

El valor del periodo de proyecto (intervalo de tiempo durante cual la estructura de firme va a permanecer en estado de servicio sin necesidad de actuaciones de rehabilitación importantes) no viene definido en la Norma 6.1 IC, si bien desde 1.975 habitualmente se han venido adoptando 20 años para los firmes flexibles, semiflexibles y semirrígidos, y 30 años para los firmes con pavimento de hormigón.

TRÁFICO

La variable habitualmente empleada para estudiar el tráfico que soporta un firme es la intensidad media de vehículos pesados en el carril de proyecto y en el año de apertura al tráfico (IMD_P). A la hora de adoptar en los cálculos un valor de esta IMD_P que sea un máximo representativo de la categoría de tráfico pesado de la sección que se pretende calcular, se ha considerado el siguiente criterio:

Se define un único valor (τ) de manera que represente de modo razonablemente conservador a todo el intervalo de la categoría de tráfico:

- Tráfico T00: $\tau=7.000$ vehículos pesados (en ausencia de límite superior)
- Tráficos T0, T1 y T2: τ dado por la expresión:

$$\frac{\log_{10} \tau}{\log_{10} IMD_{Pmax}} = 0,99$$

- Tráficos T31, T32, T41 y T42: τ dado por la expresión:

$$\frac{\log_{10} \tau}{\log_{10} IMD_{Pmax}} = 0,98$$

siendo t el valor que representa la categoría de tráfico a partir del cual el proyectista pasaría a la categoría superior, y siendo IMD_{Pmax} el valor del extremo superior del intervalo que limita la categoría de tráfico a la que pertenece la IMD_P .

De este modo, resultan los siguientes valores del límite razonable τ de categoría de tráfico:

CATEGORÍA DE TRÁFICO		$IMD_{P\ max}$	τ
T00		-	7.000
T0		4000	3.682
T1		2000	1.854
T2		800	748
T3	T31	200	171
	T32	100	87
T4	T41	50	44
	T42	25	22

Tabla 2.1. Valores límites propuestos del tráfico máximo admisible τ para cada categoría

Pero tanto los métodos analíticos como la mayoría de los empíricos, utilizan para el cálculo el concepto de tráfico equivalente de proyecto (TEP), o lo que es lo mismo, el número de ejes tipo que solicitarán el firme durante el periodo de proyecto considerado.

Se adopta como eje tipo de carga representativo del tráfico de pesados el eje simple con ruedas gemelas de 13 toneladas (130 kN), equitativamente repartida entre las cuatro ruedas, con una presión de contacto de 0,8 MPa, radio de huella 11,35 cm y distancia entre centros de las ruedas gemelas de 37,5 cm.

La obtención del valor del tráfico equivalente de proyecto que es utilizado en los cálculos de dimensionamiento, se realiza mediante la aplicación de la siguiente expresión:

$$TEP = IMD_p \cdot CE \cdot 365 \cdot F \cdot \gamma_t$$

siendo:

- TEP: Tráfico equivalente de proyecto.
- IMD_p : Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto considerado, en el año de apertura al tráfico.
- CE: Coeficiente de equivalencia medio de los vehículos pesados.

Su valor representa la equivalencia de los vehículos pesados traducidos a ejes tipo de 13 toneladas, siendo los valores adoptados:

- Firmes flexibles y semiflexibles: CE = 0,5
- Firmes semirrígidos: CE = 0,6
- Firmes con pavimento de hormigón:... CE = 1,0

- F: Factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados. Representa la acumulación de tráfico durante el periodo de proyecto, y se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$F = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

siendo r la tasa de crecimiento anual del tráfico de vehículos pesados constante en tanto por uno (se ha adoptado un crecimiento anual $r = 3\%$), y el exponente n , el periodo de proyecto del firme.

- γ : Coeficiente de seguridad en cargas. Se trata de un coeficiente de mayoración de cargas que se determina en función de la categoría de tráfico de proyecto, y que responde a la incertidumbre asociada al valor de las cargas de los vehículos pesados que circulan por la carretera. En este trabajo se han aplicado los siguientes valores:

- Carreteras de tráfico T4: $\gamma_t = 1,06$
- Carreteras de tráfico T3 y T2: $\gamma_t = 1,12$
- Carreteras de tráfico T1 y T0: $\gamma_t = 1,15$
- Carreteras de tráfico T00: $\gamma_t = 1,18$

Con esta metodología se obtiene el número acumulado de ejes equivalentes que es capaz de soportar un firme de características de tráfico medias en su categoría.

Agrupando por tipologías de firmes, se obtienen los siguientes valores:

CATEGORÍA DE TRÁFICO		IMD _p DE CÁLCULO (τ)	TEP ($\cdot 10^6$) firmes semiflexibles	TEP ($\cdot 10^6$) firmes semirrígidos	TEP ($\cdot 10^6$) pavimentos de hormigón
T00		7.000	40,5	48,6	143,4
T0		3.682	20,8	24,9	73,5
T1		1.854	10,4	12,5	37,0
T2		748	4,2	5,1	14,9
T3	T31	171	0,96	1,1	3,4
	T32	87	0,48	0,57	1,7

Tabla 2.2. Valores del tráfico equivalente de proyecto exigido (TEP) a las secciones en función de cada tipología de firme y categoría de tráfico.

LA EXPLANADA

La Norma 6.1 IC clasifica las explanadas en tres categorías, en función del módulo mínimo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}):

Categoría de explanada	E3	E2	E1
Módulo de compresibilidad mínimo E_{v2} (MPa)	300	120	60

EL CLIMA

El clima es un agente que modifica las propiedades, y por tanto el comportamiento de los materiales que componen el firme. A efectos de proyecto, el clima se tiene en cuenta en la elección de los materiales a emplear en las capas de firme (tipo de betún asfáltico, relación polvo mineral/betún...), así como en otros elementos constructivos como son los dispositivos de drenaje.

PARÁMETROS CONSTITUTIVOS DE LOS MATERIALES

En este trabajo se han adoptado unos valores estándar de los coeficientes de Poisson y de los módulos de deformación de los materiales, de tal modo que sean razonablemente representativos y que cubran un amplio rango de utilización bajo condiciones climáticas medias (Tabla 2.3):

TIPO DE MATERIAL		E (Mpa)	ν
MEZCLAS BITUMINOSAS	S y D	7.000	0,33
	G	5.000	0,35
	MAM	11.000	0,30
	PA, F, M	4.000	0,35
	AF	1.500	0,35
MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO Y HORMIGONES	SC	8.000	0,25
	GC	20.000	0,25
	HM	25.000	0,20
	HF	32.000	0,20
MATERIALES GRANULARES Y EXPLANADAS	ZA sobre E1	180	0,35
	ZA sobre E2	360	0,35
	ZA sobre E3	600	0,35
	E1	60	0,35
	E2	120	0,35
	E3	300	0,35

Tabla 2.3. Parámetros constitutivos de los materiales empleados en los firmes del catálogo de la Norma 6.1 IC

2.2. MODELOS DE RESPUESTA Y DE COMPORTAMIENTO

No se considera necesario describir aquí el proceso de dimensionamiento analítico, según el modelo de Burmister. Únicamente se indica que, tras evaluar y comparar las principales expresiones existentes de las **leyes de fatiga** de los materiales de las capas de firme (Tabla 2.4), se han empleado las leyes propuestas por el Ministerio de Fomento, que en general, quedan del lado de la seguridad.

2.3 SECCIONES CON PAVIMENTO BITUMINOSO

Se ha supuesto:

- Adherencia total entre las superficies de contacto entre capas de firme contiguas excepto entre dos capas de materiales tratados con cemento

MATERIAL		NORMA 6.1 IC (2.002)	O.C. 09/2.002 REHABILITACIÓN DE FIRMES	MANUAL CAPAS TRATADAS. IECA-CEDEX (2.003)	GUIDE TECHNIQUE. LCPC-SETRA (1.994)	INSTRUCCIÓN ANDALUCÍA. CEDEX (1.999)
MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	G	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	$\epsilon_r = 6,443 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	$\epsilon_r = 1,653 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,2}$ (GB 1)	$\epsilon_r = 6,443 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
	S	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	$\epsilon_r = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	$\epsilon_r = 6,920 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	$\epsilon_r = 2,126 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,2}$ (GB 3)	$\epsilon_r = 6,920 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
	MAM	$\epsilon_r = 6,617 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	$\epsilon_r = 6,617 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	$\epsilon_r = 6,612 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$	$\epsilon_r = 2,362 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,2}$ (EME 2)	$\epsilon_r = 6,612 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$
SUELOCEMENTO		$\frac{\sigma_r}{R_f} = 1 - 0,080 \cdot \log N$	$\frac{\sigma_r}{R_f} = 1 - 0,0875 \cdot \log N$	$\frac{\sigma_r}{0,90} = 1 - 0,080 \cdot \log N$	$\frac{\sigma}{0,5} = \left(\frac{N}{10^6}\right)^{\frac{1}{12}}$ (S2)	$\frac{\sigma_r}{0,72} = 1 - 0,06 \cdot \log N$
GRAVACEMENTO		$\frac{\sigma_r}{R_f} = 1 - 0,065 \cdot \log N$	$\frac{\sigma_r}{R_f} = 1 - 0,0723 \cdot \log N$	$\frac{\sigma_r}{1,6} = 1 - 0,065 \cdot \log N$	$\frac{\sigma}{0,75} = \left(\frac{N}{10^6}\right)^{\frac{1}{15}}$ (G2)	$\frac{\sigma_r}{1,3} = 1 - 0,06 \cdot \log N$
ZAHORRA ARTIFICIAL		$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	$\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$	$\epsilon_z = 1,58 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$	$\epsilon_z = 1,44 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,222}$	
EXPLANADA		-	-	$\epsilon_z = 1,58 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,25}$	$\epsilon_z = 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,222}$	

Tabla 2.4. Expresiones más relevantes de las leyes de fatiga estudiadas en la evaluación técnica.

(suelocemento, gravacemento, suelo estabilizado S-EST 3) en que se consideran capas semiadheridas.

- Distribución de espesores de mezcla bituminosa de acuerdo a las prescripciones de la propia Norma 6.1 IC y de los artículos 542 y 543 del PG-3, y de acuerdo también a la práctica constructiva española.
- Empleo del programa informático de cálculo analítico AlizéWin v.1.02 del LCPC, herramienta potente, útil y de manejo sencillo, al estar realizado para trabajar en sistema Windows.

Los resultados de los cálculos realizados se resumen en la Tabla 2.5:

						211	212			3111	3112	3211	3212	Secc				
						5,4	12,9			1,4	4,6	0,84	1,5	N				
						121	122	123	221	222	223	3121	3122	3221	3222	Secc		
						15	17	679	6,8	1,4	438	1,5	10,3	1,1	3,8	N		
0031	0032	0033	031	032	033	131	132			231	232			3131	3132	3231	3232	Secc
89	2.021	4.430	46	117	2.799	19	14			8	1,6			3,5	1,6	2,6	0,45	N

40,5 48,6 48,6 20,8 24,9 24,9 10,4 12,5 12,5 4,2 5,1 5,1 0,96 1,1 0,48 0,57 TEP

Tabla 2.5. Número de ejes tipo calculados para las secciones con pavimento bituminoso. Bajo la denominación de la sección, en negrita el número de ejes tipo (**N**) calculados, y finalmente la última fila en cursiva muestra los ejes tipo exigidos (TEP) a las secciones de su respectiva columna.

2.4 SECCIONES CON PAVIMENTO RÍGIDO

En la Norma 6.1 IC, para cada categoría de tráfico pesado y explanada, siempre se reserva una sección estructural de firme con pavimento de hormigón (la numerada siempre con un 4 como última cifra en su designación).

Analizadas este tipo de secciones mediante el empleo del método empírico de la Guía AASHTO (en su versión de 1.993) se ha calculado el número de ejes tipo de 13 toneladas que soportan estas secciones, y estos resultados se han contrastado con los que ofrece el método analítico de la Guía Técnica francesa [17].

Para las categorías de tráfico T00 a T2 en los que el pavimento de hormigón dispone de una base de 15 cm de hormigón magro, los resultados utilizados en el análisis del número de ejes soportados han sido los que ofrece el método de la Guía del LCPC [17], debido a que reproducen mejor el comportamiento real de estos pavimentos para tráficos pesados similares a los españoles.

Para los pavimentos de los tráficos T3, se ha seguido el Método AASHTO. Los resultados de los valores de ejes teóricos (N) de todas las secciones con pavimento de hormigón calculadas son los que recoge la Tabla 2.6.

			214	3114	3214	Secc
			38,5	1,5	1,2	N
		124	224	3124	3224	Secc
		270	107	2,3	1,8	N
0034	034	134	234	3134	3234	Secc
1.239	867	1.239	601	4,2	3,7	N
<i>143,4</i>	<i>73,5</i>	<i>37,0</i>	<i>14,9</i>	<i>3,4</i>	<i>1,7</i>	<i>TEP</i>

Tabla 2.6. Número de ejes tipo calculados para las secciones con pavimento de hormigón. Bajo la denominación de la sección, en negrita se muestra el número de ejes calculados y finalmente la última fila en cursiva muestra los ejes tipo exigidos (TEP) a las secciones de su respectiva columna.

2.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se ha estudiado la importancia que tienen ciertos factores en la vida de servicio obtenida (y en consecuencia, en la propia durabilidad de un firme de carretera) como son:

A. Variación de los espesores de las capas

B. Condición de adherencia entre las capas de firme

C. Tipo de mezcla bituminosa dispuesta como capa de base

D. Empleo de una mezcla de alto módulo (MAM) como capa de base

Para llevar el estudio de los tres primeros factores, han sido escogidas las secciones semiflexibles y semirrígidas pertenecientes a la categoría de tráfico pesado T1, y para evaluar la influencia estructural que tiene el empleo de una mezcla de alto módulo, se han calculado todas las secciones en las que la Norma permite su empleo (secciones 0031, 0032, 031, 121, 131 y 221).

A. Sensibilidad a la reducción de espesores de capa

Este es sin duda uno de los problemas más frecuentes que se pueden dar en la ejecución de un firme, siempre que no se controlen estrictamente los espesores mínimos que prescribe el catálogo de secciones de firme.

Se ha estudiado la sensibilidad a la merma de espesor de distintos materiales, resultando:

*Sensibilidad a la reducción de espesor de capa de **mezcla bituminosa**:*

		PROYECTO	- 1 cm	- 2 cm	- 3 cm	- 4 cm
121	ϵ_r (μdef)	76,1	79,6	83,3	87,2	91,4
	N	15,5	13,2	11,1	9,4	7,9
	Reducción N	-	15%	28%	39%	49%
131	ϵ_r (μdef)	71,6	74,8	78,3	82,2	85,9
	N	19,4	16,5	14	11,7	9,9
	Reducción N	-	15%	28%	40%	49%
122	σ_r (MPa)	-0,379	-0,392	-0,406	-0,422	-0,435
	N	17,2	11,4	7,2	4,3	2,9
	Reducción N	-	34%	58%	75%	83%
132	σ_r (MPa)	-0,358	-0,371	-0,384	-0,398	-0,412
	N	33,7	22	14,7	9,4	6
	Reducción N	-	35%	56%	72%	82%

Tabla 2.7. Influencia de **reducción del espesor de mezcla bituminosa** en la vida de servicio.

En los casos estudiados, se deduce que la merma en la vida de servicio esperada es más acusada en el caso de secciones semirrígidas, puesto que únicamente con 2 cm menos de mezcla bituminosa ya se obtiene una reducción en la vida de servicio superior al 50%.

— **Sensibilidad a la reducción de espesor de capa de *suelocemento*:**

		PROYECTO	- 1 cm	- 2 cm	- 3 cm	- 4 cm
122	σ_r (MPa)	-0,379	-0,394	-0,410	-0,426	-0,443
	N	17,2	10,7	6,4	3,8	2,2
	Reducción N	-	38%	63%	78%	87%
132	σ_r (MPa)	-0,358	-0,373	-0,388	-0,404	-0,421
	N	33,7	20,9	12,9	7,7	4,5
	Reducción N	-	38%	62%	77%	87%

Tabla 2.8. Influencia de **reducción del espesor de *suelocemento*** en la vida de servicio.

Las variaciones de espesor de esta capa muestran la gran sensibilidad a la reducción del espesor, puesto que entorno a 1,5 cm de reducción de espesor puede disminuir la vida de servicio esperada a la mitad.

Esto se debe principalmente a la ley de fatiga que caracteriza los materiales tratados con cemento, que al ser tan tendida, pequeñas oscilaciones en las tensiones soportadas provocan grandes variaciones de la vida de servicio esperada.

— **Sensibilidad a las variaciones de espesor de capa de *zahorra artificial*:**

Esta capa, debido a su limitada aportación estructural al firme (comparativamente al resto de las capas), no tiene una gran influencia en la durabilidad calculada. Incluso con reducciones de espesor importantes, la merma en la vida de servicio no es tan acusada como lo es en el caso de la reducción de espesores de mezcla bituminosa o de *suelocemento*. Por este mismo motivo, el aporte estructural que tiene el aumento de espesor de la *zahorra artificial* es reducido. Este extremo queda comprobado en la Tabla 2.9 al calcular de nuevo la sección pero aumentando en 15 cm el espesor de *zahorra artificial* (resultados en la última columna), que aun disponiendo un espesor total de 40 cm sólo incrementa la vida de servicio entre un 15% y un 21%.

		PROYECTO	- 3 cm	- 6 cm	- 10 cm	+15 cm
121	ε_r (μdef)	76,1	77,2	78,4	80,3	72,2
	N	15,5	14,7	13,9	12,7	18,8
	Reducción N	-	-5%	-10%	-18%	+21%
131	ε_r (μdef)	71,6	72,4	73,4	75,0	69,0
	N	19,4	18,6	17,7	16,4	22,2
	Reducción N	-	-4%	-9%	-15%	+15%

Tabla 2.9. Influencia de la variación del espesor de zahorra artificial en la vida de servicio.

B. Adherencia entre capas

El estudio de este factor viene a reflejar la trascendencia de las condiciones de puesta en obra. Un firme puede estar bien proyectado, y también ejecutado respetando los espesores mínimos de las capas que lo constituyen, pero si las condiciones de adherencia entre las distintas capas del firme no son las adecuadas, este factor puede ser determinante en el fallo estructural prematuro de la sección.

En este apartado se evalúa este factor en dos superficies:

- B.1. Adherencia entre la capa intermedia y la capa de base del pavimento bituminoso
- B.2. Adherencia entre la explanada y el firme

B.1. Condición de adherencia entre las capas de mezcla bituminosa.

El firme se calcula generalmente con condición de adherencia entre todas las capas, excepto entre dos capas tratadas con cemento, que se considera adherencia parcial. Pero esta condición supuesta en proyecto puede no hacerse efectiva en la fase de construcción, provocando una reducción en la vida de servicio esperada para el firme. Se han calculado las secciones variando las condiciones de **adherencia entre las capa intermedia y de base bituminosa**, resultando:

SECCIÓN		ε (μdef)	N	Reducción N
NÚMERO	CONDICIÓN ADHERENCIA			
121	(ADH)	76,1	15,0	-
121	(1/2 ADH)	91,0	8,0	46,3%
121	(DESPEGADA)	106,0	4,6	69,3%
131	(ADH)	71,6	19,0	-
131	(1/2 ADH)	76,8	15,0	21,0%
131	(DESPEGADA)	82,3	11,6	38,9%

Tabla 2.10. Influencia de las condiciones de **adherencia entre las capas de mezcla bituminosa** en la vida de servicio de las **secciones semiflexibles**

SECCIÓN		σ (Mpa)	N	Reducción N
NÚMERO	CONDICIÓN ADHERENCIA			
122*	(ADH)	0,394	10,7	-
122*	(1/2 ADH)	0,476	0,77	92,8%
132*	(ADH)	0,385	14,2	-
132*	(1/2 ADH)	0,465	1,1	92,3%

Tabla 2.11. Influencia de las condiciones de **adherencia entre las capas de mezcla bituminosa** en la vida de servicio de las **secciones semirrígidas**.

*Secciones calculadas con condición de **semiadherencia** entre el suelocemento y la explanada estabilizada

Con independencia de los valores obtenidos, se deduce que este factor tiene una gran importancia en la durabilidad de las secciones. Por lo tanto, se deberá cuidar especialmente la puesta en obra de las mezclas bituminosas de manera que se hagan efectivas las condiciones de adherencia supuestas en fase de proyecto. Esta merma de la vida de servicio se hace más evidente en las secciones semirrígidas, que en general parecen ser más sensibles a la variación de las condiciones

B.2. Adherencia entre la explanada y el firme

En general, siempre se considera el firme adherido a la explanada (excepto en el caso de firmes sobre explanadas que disponen en coronación un S-EST 3), y en las secciones de control escogidas (121, 131, 122 y 132) se han realizado los cálculos considerando la no adherencia entre el firme y la explanada. Los resultados han sido:

SECCIÓN	121	122	131	132	
Valor crítico proyecto	-76,1 μdef	-0,369 Mpa	-71,6 μdef	-0,358 Mpa	
N	15,5	17,2	19,4	33,7	
$\Delta\varepsilon_r$ (μdef)	-7,1	-	-7,9	-	Resultados con firme no adherido a la explanada
$\Delta\sigma_r$ (Mpa)	-	-0,031	-	-0,054	
N	11	6,4	13,2	6	
Reducción del nº de aplicaciones carga tipo	29%	63%	32%	82%	

Tabla 2.12. Influencia de las condiciones de **adherencia entre la explanada y el firme** en la vida de servicio.

Como puede observarse, la no adherencia con la explanada reduce en un 30 % la vida de servicio esperada de las secciones semiflexibles, y en el caso de las secciones semirrígidas, esta reducción es mucho más acusada, situándose entorno a un 70 %. C. Tipo de mezcla bituminosa dispuesta como capa de base

Se ha estudiado la influencia del tipo de mezcla dispuesta como capa de base en el comportamiento a fatiga del firme. Por ello se han comparado secciones, proyectándolas con una base bituminosa de tipo G y con una del tipo S, tratando de estimar la diferencia en la capacidad estructural existente entre ambas alternativas. Los resultados han sido:

Existe una importante influencia en la vida de servicio según el tipo de mezcla empleada como capa de base. A excepción de la sección proyectada con gravacemento (en donde puede interesar para limitar la reflexión en superficie de las juntas en fresco), que al tener una muy elevada capacidad estructural este efecto no es tan acusado, en las secciones semiflexibles, el empleo de mezclas tipo S incrementa la vida de servicio entorno a un 75%. En el caso de las secciones de firme semirrígidas, este incremento se sitúa entorno al 38%.

De aquí se puede inferir que en las secciones semiflexibles, debido a la limitada aportación estructural de la zahorra artificial, la mejora en la calidad del tipo de mezcla empleada en la base bituminosa tiene mayor efecto en el aumento de la durabilidad que en el caso de las secciones semirrígidas.

		Base tipo G	Base tipo S
121	ε_r (μdef)	-76,1	-63,9
	N	15,5	29
	INCREMENTO N	-	87%
122	σ_r (MPa)	-0,379	-0,369
	N	17	24
	INCREMENTO N	-	40%
123	ε_z (μdef)	-76,2	-72,7
	N	574	679
	INCREMENTO N	-	18%
131	ε_r (μdef)	-71,6	-62,3
	N	19,4	32
	INCREMENTO N	-	65%
132	σ_r (MPa)	-0,358	-0,348
	N	33,7	46
	INCREMENTO N	-	36%

Tabla 2.13. Influencia del **tipo de mezcla bituminosa** dispuesta en capa de base en la vida de servicio.

D. Empleo de una mezcla de alto módulo (MAM) como capa de base

El empleo de mezclas de alto módulo como capas de base ofrece una solución estructural muy interesante, aunque sin duda su utilización es hoy en día aún limitada, debido a que la reducción de espesor de mezcla bituminosa permitida por la Norma 6.1 IC no se ve compensada con su mayor coste unitario.

Como muestra la Tabla 2.14, han sido evaluadas las secciones en las que la Norma permite el empleo de mezclas de alto módulo. Planteando en ellas directamente la máxima reducción permitida del espesor de la capa de base, con el empleo de mezclas de alto módulo resultan los siguientes valores en la vida de servicio:

		PROYECTO	con MAM
0031	ε_r (μdef)	-47,3	-43,8
	N	89	118
	INCREMENTO N	-	33%
0032	σ_r (MPa)	-0,230	-0,235
	N	2.021	1.772
	INCREMENTO N	-	-12,3%
031	ε_r (μdef)	-58,0	-53,4
	N	46	57
	INCREMENTO N	-	24%
121	ε_r (μdef)	-76,1	-68,8
	N	15	22
	INCREMENTO N	-	47%
131	ε_r (μdef)	-71,6	-66,4
	N	19	26
	INCREMENTO N	-	37%
211	ε_r (μdef)	-101,3	-92,0
	N	5,4	7,7
	INCREMENTO N	-	43%

Tabla 2.14. Influencia en la vida de servicio del empleo de mezclas de alto módulo en capas de base.

A excepción de la sección 0032 (que parece estar sobredimensionada y la reducción de espesor tiene una mayor influencia en la vida de servicio esperada que la mejora en el tipo de material), las secciones ven considerablemente mejorado su comportamiento a fatiga.

En resumen, una vez analizados los cuatro factores y vistos los resultados obtenidos, de ellos se puede inferir que existe una gran sensibilidad en la durabilidad de un firme ante pequeñas modificaciones de estos factores.

3. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Este apartado pretende abordar los costes de construcción de las distintas soluciones estructurales, a efectos de una primera aproximación comparativa. Por ello, no deben tomarse como referencia los costes aquí empleados, puesto que cada obra tiene sus costes particulares. La evaluación económica realizada se ha realizado con unos valores medios, obtenidos como promedio de las siguientes cuatro fuentes consultadas:

- A. Costes de una constructora de la Comunidad Valenciana
- B. Costes estimados de la construcción en Castilla y León
- C. Banco CICCOP 2.002 de precios y condiciones técnicas
- D. Base de precios de la construcción 2.003 de la Consejería de Vivienda, Urbanismo y Transporte de la Junta de Extremadura

Se siguen los siguientes criterios:

- El coste de las secciones de firme se efectúa por metro cuadrado de sección, estimando su coste de construcción (materiales, mano de obra, maquinaria y costes indirectos) sin tener en cuenta el coste de los trabajos destinados a la obtención de la explanada, que es común a cada grupo.
- Las unidades contempladas incluyen el coste de ejecución material y los costes indirectos.
- Los materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento) incluyen ya el correspondiente % de cemento (4,5% en el caso del suelocemento, y 3,5% en el de la gravacemento), fabricación, transporte, preparación de la superficie de apoyo, extendido, compactación y riego de protección.
- Las mezclas bituminosas incluyen ya los porcentajes correspondientes de filler y betún, fabricación, puesta en obra, extendido y compactación.
- Los pavimentos de hormigón incluyen la parte proporcional del coste de la tipología de juntas que le corresponda, distinguiendo éstas según clase de pavimento.

Con estas particularidades mencionadas, y por medio de los costes unitarios de las fuentes consultadas, se ha llegado a los costes medios reflejados en la Tabla 3.1:

MATERIAL	COSTE MEDIO	UNIDAD
Zahorra artificial	21,7	€/m ³
Suelocemento	25,1	€/m ³
Gravacemento	34,3	€/m ³
Mezcla bituminosa G25	22,6	€/t
Mezcla bituminosa S20	23,5	€/t
Rodadura S12 (Cuarcita)	25,3	€/t
Rodadura S20 (Cuarcita)	24,5	€/t
Rodadura PA12 (Cuarcita)	27,2	€/t
Mezcla de Alto Módulo	36,7	€/t
Hormigón magro vibrado	72,8	€/m ³
HF-3,5	81,5	€/m ³
HF-4,0	86,2	€/m ³
HF-4,5	88,4	€/m ³
PCHA HF-4,5	117,0	€/m ³
OTROS COSTES	COSTE MEDIO	UNIDAD
BETÚN	212	€/t
Cemento CEM II/B-M 32,5 M	81,2	€/t
Riego de adherencia ECR-1	0,25	€/m ²
Riego de imprimación ECI	0,28	€/m ²
Filler calizo	5,20	€/t
Prefisuración CRAFT	0,51	€/m ²

Tabla 3.1. Costes medios de las distintas unidades de obra consideradas.

Con estos costes de construcción de las distintas unidades de obra, resulta la valoración aproximada de las secciones de la Tabla 3.2:

SECCIÓN	ZA	SC	GC	HF	HM	MB	CRAFT	TOTAL €/m ²
0031	5,4					28,5		33,9
0032		7,5				20,9		28,4
0033		6,3	7,5			17,5	0,51	31,8
0034				29,3	10,9			40,2
031	5,4					24,5		29,9
032		6,3				16,8		23,1
033		5,0	7,5			15,7	0,51	28,8
034				28,1	10,9			39,0
121	5,4					24,5		29,9
122		6,3				16,8		23,1
123		5,5	7,5			13,0	0,51	26,6
124				22,1	10,9			33,0
131	5,4					20,9		26,3
132		5,0				16,8	0,51	22,3
134				22,1	10,9			33,0
211	8,7					23,0		31,7
212		7,5				15,3	0,51	23,3
214	4,4			19,8	10,9			35,1
221	5,4					20,9		26,3
222		5,5				15,3	0,51	21,3
223		5,0	6,9			13,0	0,51	25,4
224				19,8	10,9			30,7
231	5,4					16,8		22,2
232		5,0				13,0	0,51	18,5
234				19,8	10,9			30,7
3111	8,7					16,8		25,5
3112		7,5				13,0		20,6
3114	6,5			17,1				23,6
3121	8,7					14,5		23,2
3122		7,5				10,8		18,3
3124	5,4			17,1				22,5
3131	5,4					14,5		19,9
3132		5,5				10,8		16,3

3134	4,4			17,1			21,5
3211	8,7					14,8	23,5
3212		7,5				10,5	18,0
3214	4,4			17,1			21,5
3221	7,6					12,5	20,1
3222		7,5				9,8	17,3
3224	4,4			17,1			21,5
3231	4,4					12,5	16,9
3232		5,5				9,2	14,7
3234				17,1			17,1
4111	8,7					9,2	17,9
4112		7,5				6,7	14,2
4114	4,4			15,8			20,2
4121	6,5					9,2	15,7
4122		6,3				6,7	13,0
4124				15,8			16,3
4131	4,4					9,2	13,6
4132		5,0				6,7	11,7
4134				15,8			15,8
4211	7,6					4,9	12,5
4212		6,3				4,9	11,2
4214	4,4			14,1			18,5
4221	5,4					4,9	10,3
4222		5,5				4,9	10,4
4224				14,1			14,1
4231	4,4					4,9	9,3
4232		5,0				4,9	9,9
4234				14,1			14,1

Tabla 3.2. Coste medio aproximado (en euros por metro cuadrado de sección) de las secciones de la Norma 6.1 IC, desglosado según costes de cada capa. Espesores de capa según catálogo de la Norma.

Notación: ZA: Capa de zahorra artificial MB: Capa de mezcla bituminosa
SC: Capa de suelocemento CRAFT: Coste por m² de la eventual prefisuración
GC: Capa de gravacemento
HF: Hormigón de firmes
HM: Hormigón magro vibrado

Se pueden extraer las siguientes conclusiones generales:

1. Con la base de datos que ha sido manejada, los costes de las secciones semirrígidas con suelocemento (soluciones con designación terminada en 2) son las más ventajosas económicamente. Este hecho se explica por el menor espesor de mezcla bituminosa que requieren respecto de las secciones proyectadas con zahorra artificial, así como por los competitivos costes de fabricación del suelocemento.
2. La zahorra artificial, debido tanto a las actuales exigencias de fabricación que obliga el Artículo 510 del PG-3 como por las limitaciones medioambientales en la explotación de las canteras, ha sufrido un sensible aumento en su coste, lo cual influye también en el coste de las secciones que contienen este material. Por ello, estas secciones han resultado tener un coste de construcción medio entorno a un 20% superior al de las secciones con suelocemento. En las secciones de las categorías de tráfico pesado inferiores (T31, T32, T41 y T42) esta diferencia se reduce a un 12%.
3. Tal y como era esperable, los costes de construcción de los firmes con pavimento de hormigón son más elevados que los de las secciones alternativas. Los costes medios se sitúan entorno a un 39% superiores al coste de la sección más económica, pero como ya ha sido comentado, su periodo de proyecto es un 50% mayor al del resto, y a medio plazo llegan a ser las secciones más económicas cuando se consideran los costes de conservación y los costes sociales.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los objetivos marcados en el análisis de los resultados han sido fundamentalmente los siguientes:

- 1º Detectar la existencia de posibles secciones infradimensionadas
- 2º Entre las secciones que cumplen con la durabilidad mínima exigida, señalar las que en virtud de los cálculos realizados, parecen sobredimensionadas
- 3º Tratar de armonizar el comportamiento a la fatiga de las secciones del catálogo de firmes de la Norma 6.1 IC, presentando un catálogo de secciones que contenga las alternativas que eviten en lo posible grandes diferencias en el comportamiento teórico a fatiga de las secciones equivalentes en el catálogo.

A la hora de valorar los resultados obtenidos del cálculo analítico de las secciones estudiadas, se distingue por un lado el análisis de las secciones correspondientes a las categorías de tráfico de pesados superiores (T00 a T2), y por otro, el resto (T31 y T32). Esto se debe fundamentalmente a que no tiene la misma incidencia un dimensionamiento deficiente en el caso de secciones de firme con tráfico de pesados reducido que en el caso de secciones con tráficos superiores ya que las consecuencias de un fallo estructural prematuro afectarán a un mayor número de usuarios en el caso de tratarse de una carretera correspondiente a las categorías de tráfico superiores. Probablemente el coste económico de la rehabilitación será relativamente comparable entre ambas, pero no así su coste social.

Del mismo modo, si una sección resulta estar **sobredimensionada** (su vida de servicio es muy superior a la requerida), la repercusión del sobre coste que tiene dicha sección, será tanto mayor, cuanto mayor sea el presupuesto de ejecución de la carretera (mayor obviamente en el caso de las carreteras de gran capacidad, con mayor categoría de tráfico de pesados).

Debido a ello, para evaluar el dimensionamiento de las secciones de firme de las categorías de tráfico de pesados inferiores (T31 y T32), en el caso de que los cálculos así lo aconsejen, este apartado se limita a sugerir unas secciones alternativas que ofrezcan un comportamiento estructural similar, sin llegar a afectar al valor de la vida de servicio esperada, pero que optimicen los espesores de las capas de firme.

A. SECCIONES DE FIRME CON TRÁFICO ELEVADO (T00 a T2)

Se ha optado en esta evaluación técnica por establecer las comparaciones de las vidas de servicio de las secciones en términos logarítmicos, definiendo para ello el siguiente estimador:

$$k = \frac{\log_{10} N}{\log_{10} \text{TEP}}$$

De este modo, si una sección del catálogo de firmes según el cálculo analítico realizado soporta 34 millones de aplicaciones de la carga tipo ($N=34 \cdot 10^6$) y, dada su tipología de firme y categoría de tráfico pesado, el valor límite de su categoría de tráfico es 12,5 millones de ejes ($\text{TEP}=12,5 \cdot 10^6$), entonces la relación que analiza el grado de adecuación entre la vida de servicio calculada y la esperada por su categoría de tráfico y tipología de firme es $k=1,06$.

Por medio de este parámetro así definido, se establece el siguiente criterio:

- los valores de k que estén por debajo de la unidad ($k < 1$), serán indicativos de que la sección está infradimensionada, y por lo tanto, no soporta-

rá las solicitaciones a las que se va a ver sometida durante su vida de servicio de proyecto (20 ó 30 años).

- los valores de k que estén por encima de 1,2 ($k > 1,2$), van a indicar que la sección está sobredimensionada

De acuerdo con este criterio se han evaluado todas las secciones. En la Tabla 4.1, para cada sección aparecen cuatro números: de arriba abajo, el primero de ellos es la numeración oficial de la sección, el segundo es el valor N (número de aplicaciones de la carga tipo resistidos) resultante de los cálculos realizados, el tercero es la equivalencia de N en años, y el cuarto y último, el valor de k que permite evaluar la durabilidad de la sección.

20	20	20	30	20	20	20	30	20	20	20	30	20	20	20	30	AÑOS
												211	212		214	SECCIÓN
												5,4	12,9		38,5	N
												24	38		53	AÑOS
												1,02	1,06		1,06	K
								121	122	123	124	221	222	223	224	SECCIÓN
								15	17	679	270	6,8	1,4	438	107	N
								26	25	128	82	28	7	145	83	AÑOS
								1,02	1,02	1,24	1,11	1,03	0,92	1,29	1,12	K
0031	0032	0033	0034	031	032	033	034	131	132		134	231	232		234	SECCIÓN
89	2.021	4.430	1.239	46	117	2.799	867	19	14		1.239	8	1,6		601	N
34	120	145	88	34	53	152	97	30	22		131	32	8		138	AÑOS
1,04	1,21	1,25	1,11	1,05	1,09	1,28	1,14	1,04	1,01		1,20	1,04	0,92		1,22	K
40,5	48,6	48,6	143,4	20,8	24,9	24,9	73,5	10,4	12,5	12,5	37,0	4,2	5,1	5,1	14,9	APLICACIONES
NOTACIÓN:	N° SECCIÓN	Designación oficial Norma 6.1 IC												Sección sobredimensionada		
	N	Número de aplicaciones de la carga tipo (13 t) obtenidas												Sección infradimensionada		
	AÑOS	Años de vida de servicio esperables														
	K	Cociente de logaritmos de aplicaciones de la carga tipo														

Tabla 4.1. Resultados del cálculo de las secciones de categoría de tráfico de pesados superiores (T00 a T2)

A.1. SECCIONES INFRADIMENSIONADAS

Tal y como se observa en la Tabla 4.1, a tenor de los cálculos realizados en base al modelo y criterios empleados, se deduce que existen dos secciones infradimensionadas:

- La sección 222, con un valor de $k=0,92$, que alcanza la fatiga en la capa del suelocemento tras la aplicación de 1,4 millones de aplicaciones de la carga tipo, cuando debería soportar la aplicación de 5,1 millones del eje tipo de 13 t.
- La sección 232, en la que de los 5,1 millones de aplicaciones teóricas que debería soportar, sólo se alcanza la cifra de 1,6 millones.

Se proponen y comprueban analíticamente las siguientes alternativas que verifican las condiciones de vida de servicio esperadas:

<i>Sección 222:</i> 18 cm MB + 22 SC	(N=1,4·10 ⁶ , con TEP=5,1·10 ⁶)
→ <i>Sección <u>222</u> alternativa:</i> 18 cm MB + 25 SC	(N=7,3·10 ⁶)
<i>Sección 232:</i> 15 cm MB + 20 SC	(N=1,6·10 ⁶ con TEP=5,1·10 ⁶)
→ <i>Sección <u>232</u> alternativa:</i> 15 cm MB + 23 SC	(N=8,6·10 ⁶)

Con estas dos secciones alternativas, todas las secciones correspondientes a las categorías superiores de tráfico de pesados del catálogo de la Norma 6.1 IC cumplen con la capacidad estructural requerida.

A.2. SECCIONES SOBREDIMENSIONADAS

Tal y como muestran los valores de la Tabla 4.1 algunas de las secciones parecen estar sobredimensionadas. Se trata de secciones cuya durabilidad (según las hipótesis y cálculos realizados) está muy por encima de la exigida. Estas son las alternativas de firmes sugeridas, y comprobadas analíticamente:

<i>Sección 0032:</i> 25 cm MB + 30 cm SC	(N=2.021·10 ⁶ , con TEP=48,6·10 ⁶)
→ <i>Sección <u>0032</u> alternativa:</i>	25 cm MB + 25 cm SC (N=527·10 ⁶)
<i>Sección 0033:</i> 20 cm MB + 22 cm GC + 25 cm SC	(N=4.430·10 ⁶ , con TEP=48,6·10 ⁶)
→ <i>Sección <u>0033</u> alternativa:</i>	15 cm MB + 20 cm GC + 22 cm SC (N=1.458·10 ⁶)
<i>Sección 033:</i> 18 cm MB + 22 cm GC + 20 cm SC	(N=2.799·10 ⁶ , con TEP=24,9·10 ⁶)
→ <i>Sección <u>033</u> alternativa:</i>	15 cm MB + 20 cm GC + 20 cm SC (N=1.458·10 ⁶)
<i>Sección 123:</i> 15 cm MB + 22 cm GC + 22 cm SC	(N=679·10 ⁶ , con TEP=12,5·10 ⁶)
→ <i>Sección <u>123</u> alternativa:</i>	12 cm MB + 20 cm GC + 20 cm SC (N=300·10 ⁶)
<i>Sección 223:</i> 15 cm MB + 20 cm GC + 20 cm SC	(N=438·10 ⁶ , con TEP=5,1·10 ⁶)
→ <i>Sección <u>223</u> alternativa:</i>	12 cm MB + 18 cm GC + 20 cm SC (N=209·10 ⁶)
<i>Sección 234:</i> 23 cm HF + 15 cm HM	(N=601,3·10 ⁶ , con TEP=14,9·10 ⁶)
→ <i>Sección <u>234</u> alternativa:</i>	21 cm HF + 15 cm HM (N=278·10 ⁶)

A.3. SECCIONES OPTIMIZADAS Y SECCIONES ADICIONALES

En este tercer apartado se pretende sugerir algunas modificaciones que permitan mejorar y adecuar el comportamiento global del catálogo de firmes.

Por un lado, se plantean unas secciones con base de gravacemento, en los casos en que esta tipología de sección ha sido eliminada del catálogo. Y por otro lado, son planteadas algunas variaciones a las secciones con pavimento de hormigón que se justifican principalmente en base a la experiencia, conocido el comportamiento que han tenido algunos firmes proyectados y ejecutados según estas condiciones.

—NUEVA SECCIÓN 133: 4 cm PA12 + 8 cm S20 + 22 cm GC

Se plantea este nuevo firme que dispone de una capa de base de gravacemento sin la subbase de suelocemento. La existencia en coronación de la explanada de una capa de suelo estabilizado tipo S-EST 3 (de espesor mínimo 30 cm) sobre la que apoya directamente la gravacemento, hace en principio viable la eliminación de la capa de suelocemento. Si bien el cálculo analítico justifica esta solución, el estudio de esta sección en un tramo de ensayo es la vía que puede permitir validar la eficacia estructural de esta sección.

—NUEVA SECCIÓN 213: 4 cm PA12 + 8 cm S20 + 18 cm GC + 20 cm SC

Estas son las características de la nueva sección planteada, de características análogas a la sección 223, pero apoyada sobre la explanada E1.

—NUEVA SECCIÓN 233: 4 cm PA12 + 8 cm S20 + 20 cm GC

—SECCIÓN 0034 - OPTIMIZADA

En este caso se plantea reducir en 1 cm el espesor del pavimento armado continuo, que con 24 cm (anterior Norma 6.1 y 2 IC) ha mostrado un excelente comportamiento en servicio, resultando 24 cm *HF* + 15 cm *HM*

—SECCIÓN 034 - OPTIMIZADA

Al igual que el caso anterior, se reduce en 1 cm el espesor del pavimento de hormigón armado, pasando de 24 a 23 cm *HF* +15 *HM*.

—SECCIÓN 214 - OPTIMIZADA

Se plantea en esta sección la eliminación de la capa de zahorra artificial dispuesta bajo la base de hormigón magro. En principio, el hormigón magro ofrece una buena base de apoyo al pavimento de hormigón, y no parece necesaria estructuralmente la capa de zahorra artificial. De este modo, se obtiene un firme con 23 *HF* + 15 *HM* (directamente sobre la explanada E1).

Se adjunta a continuación una tabla con los valores resultantes de la durabilidad (medida en el número **N** de ejes soportados) de todas las secciones, incorporando las sugeridas o que han sido modificadas, resaltándose en sombreado:

		20	20	20	30	20	20	20	30	20	20	20	30	20	20	20	30	AÑOS
														211	212	213	214	SECCIÓN
														5,4	12,9	91	29,1	N
														24	38	93	46	AÑOS
														1,02	1,06	1,19	1,04	K
						121	122	123	124	221	222	223	224					SECCIÓN
						15	17	300	270	6,8	7,3	209	107					N
						26	25	102	82	28	27	120	83					AÑOS
						1,02	1,02	1,19	1,11	1,03	1,02	1,24	1,12					K
0031	0032	0033	0034	031	032	033	034	131	132	133	134	231	232	233	234	SECCIÓN		
89	527	1.639	867	46	117	1.458	601	19	14	601	601	8	8,6	128	278	N		
34	77	113	77	34	53	131	86	30	22	124	108	32	30	104	113	AÑOS		
1,04	1,13	1,20	1,10	1,05	1,09	1,24	1,12	1,04	1,01	1,24	1,16	1,04	1,03	1,21	1,18	K		
40,5	48,6	48,6	143,4	20,8	24,9	24,9	73,5	10,4	12,5	12,5	37,0	4,2	5,1	5,1	14,9	APLICACIONES		

NOTACIÓN:

Nº SECCIÓN	Designación oficial Norma 6.1 IC
N	Número de aplicaciones de la carga tipo (13 t) obtenidas
AÑOS	Años de vida de servicio esperables
K	Cociente de logaritmos de millones de aplicaciones de la carga

Tabla 4.2. Resultados del cálculo incluyendo las secciones propuestas en este análisis (señaladas con sombreado) de las categorías de tráfico T00 a T2.

B. SECCIONES DE FIRME CON TRÁFICO MEDIO (T31 y T32)

En estos casos, este trabajo se limita a **sugerir** algunas modificaciones que pretenden mejorar las estructuras de estas categorías de tráfico, obviamente sin llegar a afectar la durabilidad que se les exige.

En primer lugar, para las secciones semiflexibles que presentan un espesor de zahorra artificial de 40 ó 35 centímetros (secciones 3111, 3121, 3211 y 3221) se realiza la propuesta (avalada por el cálculo analítico) de reducir este espesor a 25 ó 20 cm. De este modo esta capa puede ser ejecutada en una única tongada, y con un espesor de fácil compactación.

Así se obtienen las siguientes secciones:

Sección 3111-alternativa: 6 S20 + 6 S20 + 8 G25 + 25 ZA

Sección 3121-alternativa: 6 S20 + 10 G25 + 25 ZA

Sección 3211-alternativa: 6 S20 + 12 G25 + 25 ZA

Sección 3221-alternativa: 6 S20 + 6 S20 + 8 G25 + 25 ZA

Acerca de las secciones con suelocemento, se puede hacer un razonamiento análogo. El cálculo analítico permite teóricamente reducir los espesores de las secciones (por ejemplo, las secciones 3112 y 3122 pueden ser ejecutadas con 28 y 26 cm de suelocemento respectivamente). Pero la elevada sensibilidad en

los cálculos a la reducción de los espesores (especialmente en esta capa), aconsejan ser prudentes.

Por otra parte, el cálculo analítico de la sección 3232 (mostrado en el apartado 3.3) ha mostrado esta como una posible sección infradimensionada. Habiendo sido calculada dos veces variando las condiciones de adherencia entre la explanada y el suelocemento (con semiadherencia y con adherencia completa), queda reflejada de nuevo la trascendencia de las condiciones de adherencia en la durabilidad teórica de un firme. Calculada esta sección con condición de adherencia total, $N=1,4$) se pasa a una sección ligeramente infradimensionada (con la habitual condición de semiadherencia resulta $N=0,45$).

5. CONCLUSIONES

El **dimensionamiento analítico de firmes** ha sido la herramienta empleada para realizar el estudio del comportamiento estructural de las secciones de firme que ha presentado la Norma 6.1 IC. Si bien esta técnica tiene unas limitaciones evidentes debidas a la simplificación que realiza del proceso real al que se ve sometido un firme bajo carga, con el estado actual de conocimientos se muestra como la herramienta más adecuada, ya que permite disponer de resultados de una manera rápida, relativamente sencilla, y con un coste económico netamente inferior al de los métodos empíricos basados en ensayos de firmes. Sin embargo, no se debe obviar que se trata de un análisis fundamentalmente cualitativo que permite comparar estructuras de firme.

Es desaconsejable el empleo de los métodos analíticos para el dimensionamiento de las secciones de firme de las categorías de tráfico T41 y T42, ya que estas secciones no se agotan por fenómenos de fatiga por repetición de cargas (soportan tráficos muy reducidos), sino por la acción de sobrecargas.

La utilización del **nuevo software AlizéWin** (gentilmente facilitado por el LCPC) como herramienta de cálculo ha facilitado enormemente la fase de obtención de datos. En la realización de la evaluación técnica de las secciones de la Norma 6.1 IC, se ha adoptado como carga tipo la carga máxima legal por eje simple de 13 t que es empleada en España. Acerca de los valores de los parámetros que caracterizan los materiales del firme (módulo de deformación y coeficiente de Poisson) tras un cuidadoso y razonado proceso de selección, han sido adoptados en los cálculos unos valores medios dentro del rango habitual de variación de los mismos.

El estudio de las **leyes de fatiga** ha mostrado que en general, las expresiones adoptadas por la Dirección General de Carreteras en la Norma 6.1 IC suelen

quedar del lado conservador respecto de otras expresiones estudiadas. De todos modos parece evidente la falta de consenso en la adopción de una ley que caracterice con bastante representatividad el comportamiento de los materiales que componen un firme. En este campo sería recomendable que en un futuro se realizasen investigaciones encaminadas a un mejor conocimiento del comportamiento de los materiales.

La **evaluación técnica** de las secciones mediante las hipótesis de cálculo realizadas, respetando y adoptando los criterios y leyes de fatiga seguidas en la Norma 6.1 IC, ha permitido obtener algunas conclusiones:

- De cada sección se ofrece un valor cualitativo en forma de aplicaciones de la carga tipo soportadas. Este valor **permite establecer comparaciones** entre secciones de un mismo grupo (secciones con la misma categoría de tráfico de pesados y de explanada), y también respecto de otras secciones con distinta categoría de tráfico de pesados y/o explanada. Estas comparaciones muestran que el comportamiento a fatiga de las secciones depende en gran medida de la tipología de la sección. En ocasiones, estas diferencias son muy notables, pudiendo entonces inferir que existen evidentes diferencias en la durabilidad que van a ofrecer las secciones de firme comparadas una vez sean construidas y puestas en servicio.
- Con el estado actual de conocimientos y con los métodos analíticos empleados actualmente en España, **el resultado global de la evaluación técnica del catálogo de firmes de la Norma 6.1 IC es satisfactorio.**
- En los casos en que en virtud de los cálculos realizados estas diferencias entre el comportamiento teórico y el esperado han sido muy notables, algunas de estas secciones serían merecedoras de un estudio detallado y eventual ensayo en tramos de control que permitiese estudiar su comportamiento. El análisis de resultados ha mostrado que tres de las secciones parecen estar infradimensionadas (la 222, la 232 y la 3232) y que existen algunas secciones cuyo comportamiento resistente está muy por encima del que requieren y por lo tanto su estructura podría ser optimizada, habiéndose previsto en estos casos secciones alternativas (apartado 4).
- Acerca de las distintas **estructuras de firme** analizadas se puede deducir que:
 1. Las secciones que contienen **zahorra artificial** (firmes semiflexibles) han mostrado, respecto de sus alternativas, la resistencia a la fatiga más ajustada a la durabilidad exigida. Este hecho se justifica debido a la limitada aportación estructural que ofrece al firme la zahorra artificial, y que ha sido compensada con el espesor de mezcla bituminosa.

2. Las secciones con bases y subbases de **suelocemento** tienen en general un mejor comportamiento a la fatiga que las secciones con zahorra artificial, con la ventaja medioambiental de la utilización de los suelos próximos a la traza y sin necesidad de los mayores espesores de pavimento bituminoso que requieren estas últimas.
 3. Las secciones que contienen **gravacemento** (tan sólo 4 de las 61 secciones del nuevo catálogo) son las que ofrecen el mejor comportamiento a la fatiga. Tienen una muy holgada durabilidad teórica, y bastará una correcta ejecución para obtener con esta tipología estructural, un firme resistente y muy duradero.
 4. Las secciones con pavimento de **hormigón** ofrecen un comportamiento a la fatiga muy bueno, requiriendo durante su vida de servicio escasas labores de conservación. Como muestra de su comportamiento, ya en la fase de proyecto se dimensionan para una vida de servicio de al menos un 50% superior a la de los firmes con pavimento bituminoso.
- El **análisis de sensibilidad** realizado ha mostrado que:
 1. La durabilidad de un firme es muy sensible a la **reducción de los espesores de las capas**. Esta sensibilidad a la reducción del espesor (medida en términos de merma en el valor teórico del número de aplicaciones de la carga tipo soportadas) es mucho más acusada en las capas de firme que presentan una mayor capacidad resistente y viceversa, llegando a ser del 38% con una merma de sólo 1 cm de suelocemento.
 2. Las **condiciones de adherencia** tienen una especial importancia en la durabilidad de un firme. Estas condiciones que se presuponen en fase de proyecto, son muchas veces descuidadas en fase de ejecución, por culpa de un riego de adherencia insuficiente o de unas inadecuadas condiciones de limpieza de la superficie de apoyo de una determinada capa de firme. Así, estudiada la condición de adherencia entre capas del pavimento bituminoso, una mala adherencia entre ellas (con hipótesis de semiadherencia) puede fácilmente reducir a la mitad la vida de servicio esperada.
 3. El empleo de una **mezcla bituminosa tipo S** en lugar de la convencional mezcla tipo G puede elevar la durabilidad media de un firme entre un 40% en el caso de secciones flexibles y semiflexibles, y un 80% en el caso de las semirrígidas.
 4. El empleo de una **mezcla de alto módulo**, incluso con la máxima reducción posible (20%) del espesor de mezcla bituminosa, permite obtener firmes de mayor durabilidad (en términos medios se sitúa en el 35-40% el aumento de la vida de servicio).

La **evaluación económica** realizada a partir de los costes de construcción ha mostrado como estructuras muy competitivas económicamente las secciones semirrígidas con suelocemento. La aparente ventaja económica respecto de la solución con zahorra artificial (que en categorías de tráfico elevadas su coste es entre un 15 y un 30% superior) responde a la necesidad estructural que tienen los firmes semiflexibles de disponer de mayores espesores de mezcla bituminosa, lo cual encarece su coste. Las cuatro secciones con base de gravacemento ofrecen, además de sus importantes características mecánicas, unos costes de construcción muy competitivos, a veces similares al de los firmes semiflexibles. Las secciones con hormigón resultan competitivas en vías de baja intensidad de tráfico, y en general lo son siempre que se evalúan los costes globales (construcción+conservación). Si bien su coste de construcción es en general superior al del resto de alternativas, su mayor durabilidad y reducida necesidad de conservación hacen del pavimento de hormigón una solución rentable a medio plazo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AASHTO (1.993): AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, Washington.
- [2] CAROFF, G., PEYRONNE, C. (1.984): Dimensionnement des chaussées. Cours de routes. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Paris
- [3] CONSEJERÍA DE FOMENTO (1.996): Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos, Junta de Castilla y León, Valladolid
- [4] CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTE (1.999): Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía, Junta de Andalucía, Sevilla
- [5] CPCA (1.993): Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavement, CANADIAN PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, Ottawa.
- [6] CRESPO DEL RÍO, R., MEDINA RODRIGUEZ, L., PÉREZ PÉREZ, I. (enero 2.002): Comprobación estructural de las secciones de firme de la instrucción de carreteras 6.1 y 6.2 IC, Revista de Obras Públicas, Madrid
- [7] DEL VAL, M. A., BARDESI, A. (1.991): Manual de pavimentos asfálticos para vías de baja intensidad de tráfico. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid
- [8] DÍAZ MINGUELA, J., JOFRÉ IBÁÑEZ, C., ZABALA ZUAZO, I., Y OTROS (2.003): 1er Curso sobre Aplicaciones del Cemento en Explanadas y Firmes. Sesión 4: Estabilización de explanadas y bases tratadas con cemento, y Sesión 5: Pavimentos de hormigón, IECA, Granada
- [9] DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2.000): Geotecnia vial en lo referente a materiales para la construcción de explanaciones y drenajes. Orden Circular 326/2.000, Ministerio de Fomento, Madrid
- [10] DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2.001): Riegos auxiliares, mezclas bituminosas y pavimentos de hormigón. Orden Circular 5/2.001, Ministerio de Fomento, Madrid
- [11] DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2.002): Secciones de firme y capas estructurales de firme. Orden Circular 10/2.002, Ministerio de Fomento, Madrid

- [12] JOFRÉ, C., KRAEMER, C., VAQUERO, J., Y OTROS (2.002): Manual de pavimentos de hormigón. Vías de baja intensidad de tráfico. IECA, Madrid
- [13] KRAEMER, C., MARTÍNEZ DE ARAGÓN, A. (1.977): Análisis de tensiones y deformaciones y estudio de la fatiga de las secciones estructurales de firmes flexibles de la Norma 6.1 IC (1.975). Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid
- [14] KRAEMER, C., MORILLA, I., DEL VAL, M. A. (1.998): Carreteras II. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid
- [15] KRAEMER, C., et al. (2.004): Ingeniería de Carreteras (Volumen II), MacGraw-Hill Interamericana, Madrid
- [16] LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1.998): Catalogue des structures types de chaussées neuves, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Paris
- [17] LCPC (1.994): Conception et dimensionnement des structures de chaussé, SETRA, Paris
- [18] PIARC (1.991) Semi-rigid Pavements. Paris
- [19] RUIZ, A., JOFRÉ, C., KRAEMER, C. Y OTROS (2.003): Manual de firmes con capas tratadas con cemento, IECA – CEDEX, Madrid
- [20] VARIOS AUTORES (octubre 2.003): Curso sobre Mezclas con cemento en explanadas y firmes, INTEVÍA, Madrid
- [21] VARIOS AUTORES (2.003): Pavimentos de hormigón en entornos urbanos e industriales, IECA, Jaen
- [22] WILLIAMS, R.I.T. (1.986): Cement-treated pavements, ELSEVIER, London
- [23] YODER, E.J., WITCZAK, M. W., (1.975): Principles of pavement design, WILEY-INTERSCIENCE, New York