



Optimización de la utilización de materiales en la vida útil de secciones de firmes flexibles y semiflexibles en carreteras

Autor: David Colorado Aranguren

Institución: Universidad Alfonso X El Sabio

Otros autores: Alberto Esteban Ciria (Universidad Alfonso X El Sabio); Ángel Sampedro Rodríguez (Universidad Alfonso X El Sabio); Luis Couceiro Martínez (Universidad Alfonso X El Sabio)

Resumen

Al diseñar un firme de carretera, éste se dimensiona de acuerdo a un volumen de tráfico de vehículos pesados que previsiblemente circularán en un periodo de tiempo definido. Al ir alcanzando dicho firme el fin de su vida útil se deben acometer las labores de conservación y reparación de éste.

Si las labores de repavimentación se retrasan el coste económico de los trabajos crece exponencialmente. Las labores de reparación tienen también un coste medioambiental alto, ya que se utilizan derivados de los hidrocarburos, materiales pétreos y maquinaria pesada. Hacer la reparación de los firmes de carreteras en el momento óptimo, permite reducir costes económicos y minimizar el impacto en el medio natural.

Este trabajo describe los criterios técnicos y la metodología a seguir para saber cuándo deben acometerse estas tareas de reparación. En particular se focaliza en el estudio de carreteras con firmes flexibles o semiflexibles.

Palabras clave: Firmes flexibles, firmes semiflexibles, carreteras, vida útil, pavimento, reparación.

1. Introducción.

Al diseñar un firme de carretera, éste se dimensiona de acuerdo a un volumen de tráfico de vehículos pesados que previsiblemente circularán en un periodo de tiempo definido. Según va alcanzando dicho firme el fin de éste periodo ó vida útil se deben acometer unas las labores de conservación y reparación de éste y de no ser así; cuanto más tiempo perdure ésta situación, la repercusión económica se hace mucho más costosa. Esta repercusión económica siempre va asociada a un coste medioambiental ya que se necesitarán mayores recursos naturales y artificiales como materiales fósiles y pétreos para su reconstrucción y la utilización de maquinaria pesada para acometer estas labores con el consiguiente consumo de recursos naturales y artificiales así como la emisión de agentes contaminantes a la atmósfera y al medio ambiente.

El presente artículo desarrolla cuándo se deben acometer éstas tareas de reparación ó conservación para optimizar ó en la medida de lo posible minimizar el coste económico y que a su vez repercutirá en la utilización de los distintos materiales que compondrán la estructura de la sección del firme flexible ó semiflexible de una vía de comunicación. Dejamos como vía de investigación el desarrollo del coste ambiental que será repercutido por la utilización de la maquinaria a realizar en estas tareas ya que se considera debe estudiarse para casos más específicos al tenerse que conocer por ejemplo distancias de acarreo a las canteras ó graveras y plantas de mezclas asfálticas, para poder obtener unos rendimientos y tener definido el periodo de tiempo que durarán las labores de reparación ó conservación y consiguientemente el tiempo que esta maquinaria estará produciendo un coste medioambiental. Así como los resultados de la obligada valorización de los materiales a desechar una vez depositados en la preceptiva Planta de Residuos de Construcción y Demolición, Planta de RCD's.

2. Definición de los parámetros críticos que definen la vida útil de la estructura de la sección del firme.

La totalidad de las agencias, organismos y expertos competentes en la materia, tanto nacionales, Centro de Estudios y Experimentaciones de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento de España (Dirección General de Carreteras), Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, (IECA), Instituto Técnico de la Vialidad y del Transporte (INTEVÍA) etc. Autores tanto de las normativas existentes de Firmes en España, como internacionales, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), The Asphalt Institute (TAI), Shell International Petroleum Company (SHELL), Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (LCPC-SETRA) etc. coinciden en que los parámetros críticos que se deben calcular (deformaciones y tensiones) con los modelos de respuesta son:

- En las mezclas bituminosas, la máxima deformación horizontal de tracción (agotamiento estructural) en su fibra inferior.

- En las capas tratadas con conglomerantes hidráulicos (capas tratadas con cemento y suelos estabilizados S-EST3), la máxima tensión de tracción en la capa (agotamiento estructural) en su fibra inferior.
- En las capas granulares y explanadas sin estabilizar, la máxima deformación vertical de compresión (acumulación de deformaciones permanentes).
Se ilustra en la fig. 2.1 dichos parámetros críticos:

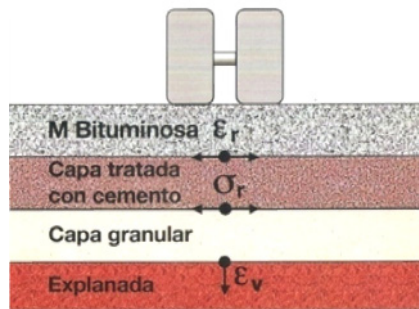


Fig.2.1. Parámetros críticos del modelo de respuesta asociados a los modelos de deterioro de los diferentes materiales del firme.

Fuente: Dimensionamiento Analítico de firmes. Curso práctico, CEDEX-INTEVÍA.2010.

A continuación se estudian las diferentes secciones por el método analítico; para ello se ha utilizado el programa de software DEPAV, diseñado para el cálculo analítico de firmes basado en las tensiones, deformaciones y desplazamientos producidas por las cargas del tráfico que experimentan las diferentes capas del firme en función del módulo de Young, coeficiente de Poisson y espesor de estas capas.

2.1. Tráfico.

Para el dimensionamiento de un firme es necesario conocer el número ó volumen de vehículos pesados que circularán por la carretera durante el periodo de diseño pero además es necesario conocer la carga tipo de cálculo. Como es normal, por cualquier carretera circulan por ella una amplia variedad de vehículos con diferentes cargas, diferente distribución de éstas por ejes, etc. para ello en España se adopta ó se suele adoptar el llamado tráfico equivalente (TE), ejes equivalentes (EE), tráfico equivalente de proyecto (TEP) ó simplemente tráfico de proyecto (TP) que modela el tráfico acumulado de vehículos pesados durante el periodo de proyecto considerado en un eje simple con ruedas gemelas, una distancia entre éstas, un radio de carga, una presión de contacto y una carga. Se muestra en la fig.2.1.1 dicha modelación:

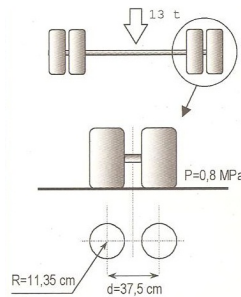


Fig.2.1.1. Carga tipo adoptada en España en el cálculo analítico. Fuente: Manual de Firmes con capas tratadas con cemento. CEDEX-IECA.2009.

De acuerdo a esto la Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco 2.012 [VASC12] adopta los valores expresados en la tabla 2.1.1:

TP (en millones)	CATEGORÍA
$43,8 \geq TP < 87,6$	T00
$21,9 \geq TP < 43,8$	T0
$15,3 \geq TP < 21,9$	T1A
$8,8 \geq TP < 15,3$	T1B
$4,4 \geq TP < 8,8$	T2A
$2,2 \geq TP < 4,4$	T2B
$1,1 \geq TP < 2,2$	T3A
$0,55 \geq TP < 1,1$	T3B
$0,27 \geq TP < 0,55$	T4A
$TP < 0,27$	T4B

Tabla 2.1.1. Categorías de Tráfico de Proyecto. Fuente: Norma para el dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco.2012.

2.2. Explanada.

En base a los resultados de ensayos practicados por la agencia American Association of State Highway Officials (AASHO), hoy en día, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), la deformación permanente que va sufriendo la explanada por las cargas del tráfico obedece a una Ley de Fatiga, la cual se muestra a continuación en la siguiente ecuación:

$$\square_v = f_1 * N_d^{-f_2} \quad (\text{Ec. 2.2.1})$$

Dónde:

\square_v Deformación vertical elástica por compresión de la explanada.

f_1 y f_2 Constantes determinadas de pruebas experimentales.

N_d Número admisible de repeticiones de carga limitado por el valor de la deformación vertical elástica.

Siendo los parámetros que adopta Instituto Técnico de la Vialidad y del Transporte (INTEVÍA) los mostrados a continuación en la tabla 2.2.1.

ORGANISMO	PARÁMETRO	
[INTE10]	f_1	f_2
	$1,575 * 10^{-2}$	0,25

Tabla 2.2.1. Coeficientes Ley de Fatiga de la Explanada adoptados en el Cálculo Analítico INTEVÍA. Dimensionamiento Analítico de Firmes. 2010.

Se muestra en la fig. 2.2.1 el aspecto del firme de una carretera cuando la explanada ha alcanzado un alto grado de deformación permanente:



Figura 2.2.1. Deterioro de la carretera por deformación permanente de la explanada.
 Fuente: Firmes Ecológicos SOLTEC.

2.3. Capas Granulares.

Varios autores, sirva el ejemplo del Centro de Estudios y Experimentaciones de Obras Públicas (CEDEX) fijan el módulo de elasticidad de cada capa de material granular acorde al módulo de la capa subyacente según la ecuación:

$$E_i = C * E_{i-1} \quad (\text{Ec. 2.3.1})$$

Donde:

E_i Módulo de la capa i

C Coeficiente de proporcionalidad en función del tipo de material granular.

E_{i-1} Módulo de la capa $i-1$ situada debajo de la anterior.

Siendo los parámetros que adopta éste organismo los mostrados a continuación en la tabla 2.3.1:

ORGANISMO	TIPO DE MATERIAL	C	$E_{\text{máx}}$ (Mpa)	ν
[CEDEX09]	Zahorra Artificial	3	600	0,3 5

Tabla 2.3.1. Parámetros de Características Mecánicas Capas Granulares adoptados en el Cálculo Analítico en el Manual de Firmes con Capas Tratadas con Cemento. CEDEX-IECA.2009.

2.4. Mezclas Bituminosas.

De acuerdo a los resultados del ensayo AASHTO y THE ASPHALT INSTITUTE se han desarrollado las leyes de fatiga de mezclas bituminosas, siendo el modelo para la fisuración por fatiga de los materiales el adoptado por la siguiente ecuación:

$$\epsilon_d = f_1 * N_d^{-f_2} \quad (\text{Ec. 2.4.1})$$

- ϵ_d Deformación por tracción en la fibra inferior de la mezcla asfáltica.
- f_1 y f_2 Constantes determinadas de pruebas experimentales.
- N_d Número admisible de repeticiones de carga por agrietamiento por fatiga.

Siendo los parámetros utilizados por los principales organismos, los mostrados en la tabla 2.4.1:

ORGANISMO	TIPO DE MBC	f_1	f_2
[CEDEX09]	DENSAS y SEMIDENSAS	$6,920 \cdot 10^{-3}$	0,2724 3
	GRUESAS	$6,443 \cdot 10^{-3}$	0,2724 3
	ALTO MÓDULO	$6,612 \cdot 10^{-3}$	0,2724 3

Tabla 2.4.1. Coeficientes Ley de Fatiga de las Mezclas Bituminosas en Caliente adoptados en el Cálculo Analítico en el Manual de Firmes con Capas Tratadas con Cemento. CEDEX-IECA.2009.

Se muestra en la fig. 2.4.1 el aspecto de un firme bituminoso cuando ha alcanzado un alto grado de fisuración por fatiga:



Figura 2.4.1. Deterioro de la carretera por fisuración por fatiga de la MBC.
 Fuente: Asociación Española de la Carretera. (AEC)

3. Definición del periodo óptimo de reparación del firme en función del coste.

Según Per Ullidtz en su libro “Modeling flexible pavement response and Performance” en su apartado 2 cita, las fisuras no se hacen visibles en la superficie hasta que la capa de MBC no ha perdido entre el 70% y el 80% de su módulo de elasticidad, es decir, el deterioro de la MBC tiene lugar antes de que aparezca visible en superficie.[AVIL06].

De acuerdo con Ph. D. Roger E. Smith, Ing. M. Sc. Thomas J. Freeman e Ing. M. S.c. Carlos Chang Albitres en su libro “Gestión de Infraestructura Vial” de no ejecutar éste refuerzo, la repercusión económica sería de un grado altísimo, [GEST06].

Se muestra a continuación en la figura 3.1 la tasa promedio de deterioro y el cambio de los costos de reparación a medida que el pavimento se deteriora en función del Pavement Condition Index (PCI) y la edad de éste.

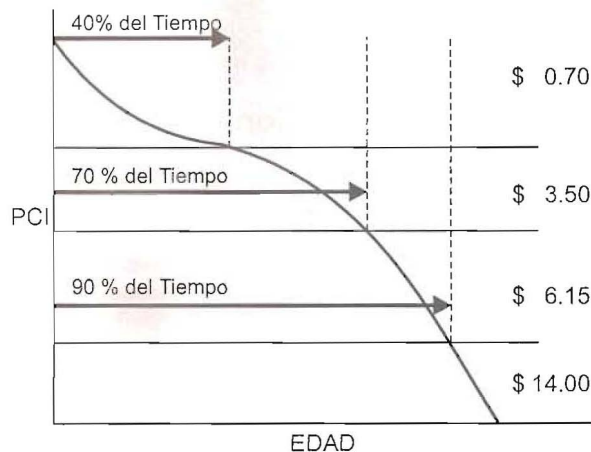


Figura 3.1: Gráfico tasa promedio de deterioro y cambio de los costos de reparación.
 Fuente: Pavement Management. Gestión de Infraestructura Vial. Instituto de la Construcción y Gerencia.

4. Cálculo y estudio de la longevidad de la sección del firme con la optimización ó minimización de utilización de materiales.

De acuerdo con la Ley de Miner, la cual establece que si un firme tiene diferente composición y está sometido a diferentes sollicitaciones, entonces la fatiga total consumida por un firme, es la suma de las fatigas consumidas cuando se halla sometido a diferentes situaciones de esfuerzos ó deformaciones. Siendo la fatiga total la suma de las fatigas parciales. [MINE45].

Según los parámetros expuestos en los apartados 2 y 3, se procede al cálculo de las secciones; debido a la gran amplitud de secciones existentes, se eligen de la Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red del País Vasco 2012 [VASC12], únicamente tres categorías de tráfico; tráfico alto (T0), tráfico medio (T2A) y tráfico bajo (T3B), y una categoría de explanada media (EX2). Mostrándose a continuación en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 las secciones elegidas:

SECCIÓN TIPO 1.1 T0-EX2				
COMPOSICIÓN DEL FIRME	ESP. (cm)	E (Mpa)	POISSON	SECCIÓN
MBC DISC. BBTM 11 B	3	4000	0,35	MBC
MBC AC Tipo S ó D	30	6000	0,33	
ZAHORRA ARTIFICIAL	25	375	0,35	Z.A
EXPLANADA	-	125	0,35	EX2

Tabla 4.1. Composición y Características Mecánicas de la Sección para Tráfico Alto. Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red del País Vasco 2012

SECCIÓN TIPO 1.1 T2A-EX2				
COMPOSICIÓN DEL FIRME	ESP. (cm)	E (Mpa)	POISSON	SECCIÓN
MBC DISC. BBTM 11 B	3	4000	0,35	MBC
MBC AC Tipo S ó D	21	6000	0,33	
ZAHORRA ARTIFICIAL	25	375	0,35	Z.A
EXPLANADA	-	125	0,35	EX2

Tabla 4.2. Composición y Características Mecánicas de la Sección para Tráfico Medio. Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red del País Vasco 2012

SECCIÓN TIPO 1.1 T3B-EX2				
COMPOSICIÓN DEL FIRME	ESP. (cm)	E (Mpa)	POISSON	SECCIÓN
MBC AC Tipo S	14	6000	0,33	MBC
ZAHORRA ARTIFICIAL	25	375	0,35	Z.A
EXPLANADA	-	125	0,35	EX2

Tabla 4.3. Composición y Características Mecánicas de la Sección para Tráfico Bajo. Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red del País Vasco 2012,

Se muestra a continuación en las tablas 4.4, 4.5 y 4.6 los resultados obtenidos en la aplicación de dichas teorías [MINE45] y [AVIL06] calculando así el número máximo de tráfico de proyecto (TP) que soportaría la sección y refuerzo que se debe dotar a este firme, calculando varias alternativas a elegir:

SECCIONES FIRME		NÚM. MAX. DE REPETICIONES DE CARGA			
		MBC		EXPLANADA	
		□□	Max Ejes	□v	Max Ejes
FIRME 1	T0-EX2	6,010E-05	3,682E+07	1,540E-04	1,108E+08
FIRME 2	T0-EX2 (-3 + 8 CM)	4,810E-05	8,340E+07	1,230E-04	2,723E+08
FIRME 3	T0-EX2 (-3 + 9 CM)	4,620E-05	9,670E+07	1,180E-04	3,214E+08
TRAFICO FIRME		PORCENTAJE DE FATIGA CONSUMIDA			
		Tráfico Acumulado		Total	
		TP	Eje Doble 13 t	Porcentaje Fatiga	
FIRME 1	T0-EX2	4,30E+07	2,58E+07	70,0%	23,3%
FIRME 2	T0-EX2 (-3 + 8 CM)	4,17E+07	2,50E+07	30,0%	10,7%
FIRME 3	T0-EX2 (-3 + 9 CM)	4,84E+07	2,90E+07	30,0%	9,0%
FATIGA TOTAL ACUMULADA FIRME 2				100,0%	34,0%
FATIGA TOTAL ACUMULADA FIRME 3				100,0%	32,3%

Tabla 4.4. Fatiga del firme según Ley de Miner correspondiente a la Sección Tipo T0-EX2

SECCIONES FIRME		NÚM. MAX. DE REPETICIONES DE CARGA			
		MBC		EXPLANADA	
		□ _□	Max Ejes	□ _v	Max Ejes
FIRME 1	T2A-EX2	9,100E-05	8,031E+06	2,370E-04	1,975E+07
FIRME 2	T2A-EX2 (-3 + 7 CM)	7,360E-05	1,750E+07	1,880E-04	4,989E+07
FIRME 3	T2A-EX2 (-3 + 8 CM)	7,030E-05	2,071E+07	1,790E-04	6,070E+07
TRAFICO FIRME		PORCENTAJE DE FATIGA CONSUMIDA			
		Tráfico Acumulado		Total	
		TP	Eje Doble 13 t	MBC	Explanada
FIRME 1	T2A-EX2	9,37E+06	5,62E+06	70,0%	28,5%
FIRME 2	T2A-EX2 (-3 + 7 CM)	8,75E+06	5,25E+06	30,0%	12,4%
FIRME 3	T2A-EX2 (-3 + 8 CM)	1,04E+07	6,21E+06	30,0%	10,2%
FATIGA TOTAL ACUMULADA FIRME 2				100,0%	40,9%
FATIGA TOTAL ACUMULADA FIRME 3				100,0%	38,7%

Tabla 4.5. Fatiga del firme según Ley de Miner correspondiente a la Sección Tipo T2A-EX2

SECCIONES FIRME		NÚM. MAX. DE REPETICIONES DE CARGA			
		MBC		EXPLANADA	
		□ _□	Max Ejes	□ _v	Max Ejes
FIRME 1	T3B-EX2	1,600E-04	1,012E+06	4,130E-04	2,142E+06
FIRME 2	T3B-EX2 (+ 4 CM)	1,240E-04	2,579E+06	3,200E-04	5,943E+06
TRAFICO FIRME		PORCENTAJE DE FATIGA CONSUMIDA			
		Tráfico Acumulado		Total	
		TP	Eje Doble 13 t	MBC	Explanada
FIRME 1	T3B-EX2	1,18E+06	7,08E+05	70,0%	33,1%
FIRME 2	T3B-EX2 (+ 4 CM)	1,29E+06	7,74E+05	30,0%	13,0%
FATIGA TOTAL ACUMULADA FIRME 2				100,0%	46,1%

Tabla 4.6. Fatiga del firme según Ley de Miner correspondiente a la Sección Tipo T3B-EX2

Siendo el periodo de durabilidad del firme en función del refuerzo aplicado y espesor de éste los mostrados en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9:

SECCIONES FIRME		LONGEVIDAD DEL FIRME			
		Tráfico Total Acumulado (TP)	Número de Años (n)	Porcentaje Fatiga	
				MBC	Explanada
FIRME 1	T0-EX2	4,30E+07	20,85	70,0%	23,26%
FIRME 1	T0-EX2	6,14E+07	29,16	100,0%	33,23%
FIRME 2	T0-EX2 (-3 + 8 CM)	4,30E+07+4,17E+07	20,85+20,28	70%+30,0%	23,26%+10,7%
FIRME 3	T0-EX2 (-3 + 9 CM)	4,30E+07+4,84E+07	20,85+23,30	70%+30,0%	23,26%+9,0%

Tabla 4.7. Años de Durabilidad del Firme en función de la Fatiga del Firme según Ley de Miner correspondiente a la Sección Tipo T0-EX2

SECCIONES FIRME		LONGEVIDAD DEL FIRME			
		Tráfico Total Acumulado (TP)	Número de Años (n)	Porcentaje Fatiga	
				MBC	Explanada
FIRME 1	T2A-EX2	9,37E+06	22,60	70,0%	28,46%
FIRME 1	T2A-EX2	1,34E+07	31,66	100,0%	40,66%
FIRME 2	T2A-EX2 (-3 + 7 CM)	9,37E+06+8,75E+06	22,60+21,21	70+30,0%	28,46%+12,4%
FIRME 3	T2A-EX2 (-3 + 8 CM)	9,37E+06+1,04E+07	22,60+24,93	70%+30,0%	28,46%+10,2%

Tabla 4.8. Años de Durabilidad del Firme en función de la Fatiga del Firme según Ley de Miner correspondiente a la Sección Tipo T2A-EX2

SECCIONES FIRME		LONGEVIDAD DEL FIRME			
		Tráfico Total Acumulado (TP)	Número de Años (n)	Porcentaje Fatiga	
				MBC	Explanada
FIRME 1	T3B-EX2	1,18E+06	22,77	70,0%	33,05%
FIRME 1	T3B-EX2	1,69E+06	31,91	100,0%	47,24%
FIRME 2	T3B-EX2 (+ 4 CM)	1,18E+06+1,29E+06	22,77+24,75	70+30,0%	33,05%+13,02%

Tabla 4.9. Años de Durabilidad del Firme en función de la Fatiga del Firme según Ley de Miner correspondiente a la Sección Tipo T3B-EX2

5. Estudio comparativo del aumento de la utilización de recursos naturales por la demora en las tareas de reparación de la estructura del firme.

Según los cálculos realizados en el apartado 4, se procede a efectuar un análisis del coste medioambiental que tendría consecuencia de no efectuar las operaciones de conservación y reparación del firme en el periodo indicado en el apartado 3, es decir si la fatiga alcanzase el límite del 100% de durabilidad ó por el contrario si se efectuasen los trabajos de conservación y reparación al 70% de la durabilidad del firme tal como se aconseja realizar en dicho apartado [AVIL06].

Los cálculos siguientes se realizan en primer lugar en base al incremento de materiales fósiles y pétreos que daría lugar por kilómetro de carretera considerando las secciones típicas para un tráfico alto (T0), un tráfico medio (T2A) y un tráfico bajo (T3B). No se tienen en consideración los incrementos por peraltes transversales tanto en recta como en curva así como los sobreechanos, taludes ó derrames formados por la altura de las distintas capas del firme a la vez que se adopta una densidad media de las MBC. Se muestran a continuación en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 dichos resultados:

SECCIONES FIRME		SECCIÓN AUTOVÍA (MTS)		VOLUMEN MBC (Tn/Km)	
		ANCHO	ESPESOR MBC	INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T0-EX2	22,00	0,33	17.424	17.424
FIRME 2	T0-EX2 (-3 + 8 CM)		0,08		4.224
FIRME 3	T0-EX2 (-3 + 9 CM)		0,09		4.752

Tabla 5.1. Volúmenes de MBC, Sección Tipo T0-EX2

SECCIONES FIRME		SECCIÓN AUTOVÍA (MTS)		VOLUMEN MBC (Tn/Km)	
		ANCHO	ESPESOR MBC	INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T2A-EX2	22,00	0,24	12.672	12.672
FIRME 2	T2A-EX2 (-3 + 7 CM)		0,07		3.696
FIRME 3	T2A-EX2 (-3 + 8 CM)		0,08		4.224
SECCIONES FIRME		SECCIÓN CARRETERA DOBLE CALZADA (MTS)		VOLUMEN MBC (Tn/Km)	
		ANCHO	ESPESOR MBC	INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T2A-EX2	17,00	0,24	9.792	9.792

FIRME 2	T2A-EX2 (-3 + 7 CM)		0,07		2.856
FIRME 3	T2A-EX2 (-3 + 8 CM)		0,08		3.264
SECCIONES FIRME		SECCIÓN CARRETERA CONVENCIONAL (MTS)		VOLUMEN MBC (Tn/Km)	
		ANCHO	ESPESOR MBC	INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T2A-EX2	10,00	0,24	5.760	5.760
FIRME 2	T2A-EX2 (-3 + 7 CM)		0,07		1.680
FIRME 3	T2A-EX2 (-3 + 8 CM)		0,08		1.920

Tabla 5.2. Volúmenes de MBC, Sección Tipo T2A-EX2

SECCIONES FIRME		SECCIÓN CARRETERA CONVENCIONAL (MTS)		VOLUMEN MBC (Tn/Km)	
		ANCHO	ESPESOR MBC	INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T3B-EX2	10,00	0,14	3.430	3.430
FIRME 2	T3B-EX2 (+ 4 CM)		0,04		980

Tabla 5.3. Volúmenes de MBC, Sección Tipo T3B-EX2

De acuerdo con los datos extraídos del Ministerio de Fomento correspondientes al año 2012 [FOME12] se obtienen las siguientes longitudes de carreteras existentes en España. Se ilustra en la tabla 5.4 el resumen de dicha clasificación:

KILÓMETROS DE LA RCE, CC.AA, DIPUTACIONES Y CABILDOS POR TIPO DE VÍA				
AUTOPISTAS Y AUTOVÍAS		CARRETERAS DOBLE CALZADA	CARRETERAS DE UNA CALZADA	TOTAL KILÓMETROS
PEAJE	LIBRES			
3.025	11.676	1.634	149.260	165.595

Tabla 5.4. Resumen de Longitudes RCE, CC.AA, Diputaciones y Cabildos por tipo de vía. Año 2012. Fuente: Subdirección General de Explotación y Gestión de Red. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Consejerías de Comunidades Autónomas y Diputaciones.

Siendo las longitudes totales existentes en España dependientes de dicho Ministerio, clasificadas por categorías, las mostradas en la tabla 5.5:

KILÓMETROS DE LA RCE POR TIPO DE VÍA				
AUTOPISTAS Y AUTOVÍAS		CARRETERAS DOBLE CALZADA	CARRETERAS CONVENCIONALES	TOTAL KILÓMETROS
PEAJE	LIBRES			
2.538,15	8.389,27	607,23	14.503,12	26.037,77

Tabla 5.5. Resumen de Longitudes RCE por tipo de vía. Año 2012. Fuente: Gobierno de España. Ministerio de Fomento. Secretaría General de Infraestructuras. Dirección General de Carreteras

Con el ánimo de no desvirtuar en demasía los resultados en la medida de lo posible, se efectúan únicamente los cálculos de la RCE ya que en las carreteras con cargo a CC.AA, Diputaciones y Cabildos existe una gran amplitud de secciones con anchos y estructuras de firme muy variadas de acuerdo al tipo y categoría de la vía. Así mismo se considera oportuno, realizar los siguientes repartos; categoría de tráfico Alto (T0) el 100% de los kilómetros de las autopistas de peaje y un 60% de los kilómetros de las autovías libres, categoría de tráfico Medio (T2A) el 40% restante de los kilómetros de autovías libres, el 100% de las carreteras de doble calzada y un 50% de los kilómetros de las carreteras convencionales, asignando el restante 50% de los kilómetros de carreteras convencionales a la categoría de tráfico T3B. Se muestra a continuación en la tabla 5.6 los resultados de dichos repartos:

KILÓMETROS DE LA RCE SEGÚN CATEGORÍAS DE TRÁFICO ALTO, MEDIO Y BAJO				
CATEGORÍA DE TRÁFICO	AUTOPISTAS Y AUTOVÍAS		CARRETERAS DOBLE CALZADA	CARRETERAS CONVENCIONALES
	PEAJE	LIBRES		
ALTO (T0)	2.538,15	5.033,56	-	-
MEDIO (T2A)	-	3.355,71	607,23	7.251,56
BAJO (T3B)	-	-	-	7.251,56
TOTALES	2.538,15	8.389,27	607,23	14.503,12

Tabla 5.6. Resumen de Longitudes RCE según asignación de Categorías de Tráfico Alto, Medio y Bajo por tipo de vía.

Multiplicando las mediciones de los volúmenes reflejados en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 por las mediciones de las longitudes de la tabla 5.6 obtenemos los resultados que se muestran en las tablas 5.7, 5.8 y 5.9:

CATEGORÍA TRÁFICO ALTO (T0): 100% AUTOPISTA DE PEAJE ; 60% AUTOVÍA LIBRE				
SECCIONES FIRME		TOTAL Km	VOLUMEN TOTAL Tn	
			INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T0-EX2	7.572	131.929.475	131.929.475
FIRME 2	T0-EX2 (-3 + 8 CM)			31.982.903
FIRME 3	T0-EX2 (-3 + 9 CM)			35.980.766

Tabla 5.7. Resultados de Volúmenes de MBC para la RCE de acuerdo a las Categorías de Tráfico Alto y Tipo de Vía.

CATEGORÍA TRÁFICO MEDIO (T2A): 40% AUTOVÍA LIBRE				
SECCIONES FIRME		TOTAL Km	VOLUMEN TOTAL Tn	
			INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T2A-EX2	3.356	42.523.557	42.523.557
FIRME 2	T2A-EX2 (-3 + 7 CM)			12.402.704
FIRME 3	T2A-EX2 (-3 + 8 CM)			14.174.519
CATEGORÍA TRÁFICO MEDIO (T2A): 100% CARRETERA DOBLE CALZADA				
SECCIONES FIRME		TOTAL Km	VOLUMEN TOTAL Tn	
			INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T2A-EX2	607	5.945.996	5.945.996
FIRME 2	T2A-EX2 (-3 + 7 CM)			1.734.249
FIRME 3	T2A-EX2 (-3 + 8 CM)			1.981.999
CATEGORÍA TRÁFICO MEDIO (T2A): 50% CARRETERA CONVENCIONAL				
SECCIONES FIRME		TOTAL Km	VOLUMEN TOTAL Tn	
			INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T2A-EX2	7.252	41.768.986	41.768.986
FIRME 2	T2A-EX2 (-3 + 7 CM)			12.182.621
FIRME 3	T2A-EX2 (-3 + 8 CM)			13.922.995

Tabla 5.8. Resultados de Volúmenes de MBC para la RCE de acuerdo a las Categorías de Tráfico Medio y Tipo de Vía.

CATEGORÍA TRÁFICO BAJO (T3B): 50% CARRETERA CONVENCIONAL				
SECCIONES FIRME		TOTAL Km	VOLUMEN TOTAL Tn	
			INICIAL	REFUERZO
FIRME 1	T3B-EX2	7.252	24.872.851	24.872.851
FIRME 2	T3B-EX2 (+ 4 CM)			7.106.529

Tabla 5.9. Resultados de Volúmenes de MBC para la RCE de acuerdo a las Categorías de Tráfico Bajo y Tipo de Vía.

6. Conclusión.

Según los cálculos efectuados, en aproximadamente 20 años de su construcción inicial ó alcanzar el 70% de la fatiga acumulada del firme (ver tablas 4.7, 4.8 y 4.9) se deberían realizar las labores de reparación del firme aplicando un refuerzo, duplicando de ésta manera, es decir otros 20 años, la edad del firme invirtiendo en reparar las carreteras de la RCE unos 65 millones de toneladas de materiales pétreos y fósiles (ver tablas 5.7, 5.8 y 5.9) mientras que si la fatiga acumulada del firme llegase al 100%, esto ocurriría aproximadamente en 10 años más, es decir a los 30 años de su construcción inicial, (ver tablas 4.7, 4.8 y 4.9) se deberían invertir unos 245 millones de toneladas de materiales pétreos y fósiles (ver tablas 5.7, 5.8 y 5.9) consecuentemente obtendríamos una minoración en las operaciones de extracción de recursos naturales de unos 180 millones de toneladas.

Luego a tenor de los resultados obtenidos queda patente la importancia del ahorro medioambiental, energético y económico que supone actuar en el momento preciso en la reparación de las carreteras de un país. Circunstancia que por la actual coyuntura económica está sucediendo y que repercutirá tanto económicamente como medioambientalmente durante los próximos años en España.

7. Referencias.

- [INTE10] Curso de Dimensionamiento Analítico de Firmes. Cap. 6. Ley de Fatiga de la Explanada. Instituto Tecnológico de la Vialidad y del Transporte INTEVÍA. 2010.
- [CEDE09] Manual de Firmes de Capas Tratadas con Cemento. 2ª Edición. CEDEX-IECA. Cap. 10 pp.227-228. 2009.
- [AVIL06] VII Congreso Nacional de Firmes, pág.17. Ávila, del 23 al 25 de Mayo de 2006.
- [GEST06] Ph. D. Roger E. Smith, Ing. M. Sc. Thomas J. Freeman, Ing. M. Sc. Carlos Chang Albitres, "Pavement Management. Gestión de Infraestructura Vial". Instituto de la Construcción y Gerencia. (ICG). Cap. 6, pp.75-80.2006.
- [MINE45] Miner, M.A, 1945 "Cumulative Damage in Fatigue". J. Applied Mechanics. V 12, A 159 – A164.
- [VASC12] Norma para el Dimensionamiento de Firmes de la Red de Carreteras del País Vasco. Gobierno Vasco. Departamento de Vivienda, Obras Públicas y Transporte. 2012.
- [FOME12] Listado de Carreteras con Resumen por Tipo de Vía y Organismo. Gobierno de España, Ministerio de Fomento. Secretaría General de Infraestructuras. Dirección General de Carreteras y Subdirección General de Explotación y Gestión de Red, Consejerías de Comunidades Autónomas y Diputaciones.