

## CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE FABRICADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS

I. Perez<sup>1</sup>, J. Gallego<sup>2</sup>, M. Toledano<sup>1</sup>, J. Taibo<sup>1</sup>, S. F. Garrido<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade da Coruña. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
Campus de Elviña s/n, 15071 Coruña. E-mail: iperez@udc.es

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
C/Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid.

### RESUMEN

En este trabajo se estudia la resistencia a la fisuración por fatiga de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). Las mezclas se dosificaron con un 50% de árido reciclado (AR) para ser utilizadas como capas de base o intermedia en carreteras de bajo tráfico. Los ensayos de fatiga se hicieron en flexión en tres puntos para generar tensiones de tracción que dan lugar a la formación de fisuras. Para cada una de las mezclas estudiadas se determinó las constantes de la ley de fatiga en deformación. También se obtuvieron otros parámetros de fatiga como el módulo dinámico y ángulo de desfase. Con estos datos y considerando un comportamiento del medio elástico lineal se obtuvo la vida del firme. Los resultados se compararon con los datos obtenidos para mezclas fabricadas únicamente con áridos de cantera (AC). Se ha constatado que a pesar de encontrar debilidades en las mezclas con áridos reciclados, los parámetros obtenidos en este caso, son similares a los que se obtienen con las mezclas que contienen áridos naturales.

### ABSTRACT

This work evaluates the resistance to crack from fatigue of hot asphalt mixtures made with aggregates from construction and demolition debris. The mixtures were elaborated with a 50% of recycled aggregates in order to use them as road bases and binder courses in low traffic roads. The fatigue tests were carried out under flexural test to generate tensile stresses at the bottom of the bituminous surface layer, which are manifested as microcracks (crack initiation phase). Later microcracks propagate, densify and coalesce to form macrocracks. For each mixture studied the fatigue laws constants in deformation were obtained, as well as, the dynamic modulus. By means of this information and taking into consideration an elastic lineal behaviour the service lives were estimated. These results were compared to those obtained in hot asphalt mixtures elaborated with only virgin aggregates from quarries. Although they were found some shortcomings in the mixtures elaborated with a 50% of recycled aggregates, it was confirmed that the parameters are very similar to those obtained in the case of mixtures made with only virgin aggregates.

**PALABRAS CLAVE:** Leyes de fatiga, mezclas bituminosas en caliente, áridos reciclados

## 1. INTRODUCCIÓN.

En la construcción de carreteras se utiliza una gran cantidad de materiales que no necesitan demasiadas prestaciones para ser utilizados en la elaboración de terraplenes, explanadas y para las capas interiores del firme. Mientras que las capas superiores de la sección han de ser más resistentes a la flexión, a la cizalla y deben ser drenantes, a medida que las capas son inferiores su misión consiste, simplemente, en transmitir los esfuerzos de compresión. Debido a ello, los requerimientos de los materiales utilizados en estas capas no son tan exigentes, y es factible el uso de materiales de desecho.

En la actualidad, la mayoría de los trabajos de investigación relativos a la viabilidad del uso de materiales reciclados en la fabricación de carreteras, se centran en el empleo de áridos procedentes de la demolición de subcapas de carreteras y de derribos de obras públicas, para servir como zahorra y materiales de relleno. Estos áridos debidamente machacados cumplen la normativa que establece el Pliego de Condiciones generales para obras de carreteras [1-2]. En cuanto a los estudios sobre el uso de áridos procedentes de los RCD para capas de firme, los avances más importantes se han producido en el empleo de los áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos en capas estructurales [3].

Otra de las alternativas de uso de los RCD en carreteras consiste en utilizar los áridos reciclados (AR) como componentes de mezclas bituminosas en caliente (MBC) [4-5]. Las MBC fabricadas con áridos de cantera (AC) son empleadas en firmes flexibles para formar las capas de rodadura o intermedias, y en firmes semiflexibles se utilizan además como capas de base. En este tipo aplicación una de las principales causas de deterioro de las mezclas asfálticas se debe al agrietamiento o fisuración por fatiga. De forma general puede decirse que un firme flexible sometido a las sollicitaciones cíclicas generadas por las ruedas de los automóviles, sufre una serie de deformaciones en las capas de mezcla bituminosa que se transforman en esfuerzos de tracción. La acumulación de estas tensiones tangenciales puede dar origen a la nucleación y propagación de microfisuras que con el tiempo provocan la reducción de rigidez del pavimento. Estas fisuras de fatiga se originan en la fibra inferior de la mezcla bituminosa, donde la tensión tangencial que produce el paso repetido de vehículos puede ser lo suficientemente elevada como para superar las tensiones de cohesión entre los áridos. Como la resistencia del árido es mucho mayor que la del ligante bituminoso, esta diferencia en resistencia implica que la fisura se propagará a lo largo de las caras del árido.

Si la cohesión entre los áridos es fundamental para el inicio de microfisuras de fatiga, es necesario tener en cuenta que un cambio en el tipo de árido de la mezcla

puede estar favoreciendo el deterioro del firme. En este caso, es fundamental determinar cuantitativamente la variación de vida útil debido a la incorporación de áridos reciclados (AR) en comparación con mezclas que utilizan únicamente áridos de cantera (AC).

En este trabajo se aborda el estudio de dos mezclas bituminosas en caliente (MBC), en función de la posición en la capa del firme y del contenido de árido reciclado. Según este criterio se eligieron dos de las MBC más utilizadas en las carreteras españolas. Una mezcla semidensa, S-20 para capas intermedias y otra gruesa, G-20, utilizada como capa de base. Cada una de estas mezclas se ha fabricado con dos tipos de áridos; con el 100% de árido de cantera (utilizadas como muestras de control) y con una proporción de 50% de AR + 50% de AC en cada fracción de árido. En todos los casos se utilizó filler de cantera con el fin de evitar la influencia del mástico en la durabilidad de la mezcla. Para la caracterización del comportamiento a fatiga se aplicó la norma española del laboratorio de transportes NLT-360 [6].

## 2. MATERIALES

La vida útil de un firme está determinada en gran medida por los materiales que lo componen. El fallo estructural del pavimento se puede producir por el uso de un árido con caras redondeadas, una granulometría fuera del huso, una arena de mala calidad, un % de ligantes altos.... Estas son razones más que suficientes que justifican la importancia de la caracterización físico-química de los materiales que forman parte de un firme.

En este trabajo los materiales utilizados son mezclas bituminosas en caliente (MBC), que son las de mayor uso en España. Están constituidas aproximadamente por un 90% de áridos gruesos y finos, un 5% de filler y otro 5% de ligante hidrocarbonado, de manera que las partículas quedan cubiertas por una película continua de betún.

### 2.1. Composición de las mezclas bituminosas

En total se han confeccionado cuatro grupos de MBC: semidensa con árido de cantera (S-C), semidensa con árido de cantera y reciclado (S-CR), gruesa con árido de cantera (G-C) y por último, gruesa con árido de cantera y reciclado (G-CR). En la Tabla 1 se indica la composición granulométrica de cada mezcla en función de las fracciones de los áridos. Las mezclas S-C y S-CR están ajustadas en el huso S-20 y las mezclas G-C y G-CR en el huso G-20.

Como ligante se utilizó un betún de penetración 60/70, de uso convencional en mezclas bituminosas en caliente y que cumple con las especificaciones del Pliego General. El contenido de betún óptimo (B<sub>o</sub>) de cada

mezcla se estableció mediante el ensayo Marshall [5] de acuerdo a las especificaciones del PG3. En la Tabla 2 se presentan el porcentaje de betún óptimo obtenido, sobre el peso total de los áridos, y la categoría de tráfico para que cumple los requisitos.

Tabla 1. Granulometría de las MBC.

MBC	Porcentaje que Pasa (% en masa) - Tamices UNE (mm)										
	Árido Grueso					Árido Fino					Filler
	25	20	12.5	8	4	2	0.5	0.25	0.125	0.063	
S-C	100	95	78	63	40	30	15	12	8	5.5	
S-CR	100	95	78	63	40	30	15	12	8	6.5	
G-C	100	95	75	60	37.75	28.5	13	10	7	4.25	
G-CR	100	95	75	60	37.75	28.5	13	10	7	4.75	

Tabla 2. Porcentaje de betún óptimo ( $B_o$ ) y categorías de tráfico para los que cumplen las especificaciones.

Ensayo Marshall	MBC			
	S-C	S-CR	G-C	G-CR
$B_o$ (%)	5	5.90	4.25	4.75
Categoría de tráfico	T3-T4	T1-T2-T3-T4	T3-T4	T4

De estos datos cabe destacar el elevado contenido de betún y de filler empleado en las mezclas con árido reciclado (S-CR y G-CR). En ambos tipos de mezclas la proporción de filler se tuvo que elevar hasta casi el límite superior del huso, debido a que la gran cantidad de poros que presenta el árido en cuestión eleva la superficie específica del mismo y por lo tanto se necesita una cantidad mayor de betún para poder crear la misma película alrededor de los áridos, en consecuencia se necesita mayor cantidad de filler para mantener la relación filler-betún recomendada en el PG-3.

### 2.2. Caracterización de los áridos:

La composición en peso de los áridos reciclados es la siguiente: hormigón (72%), piedra (20%), cerámico (2%), y betún (6%). En la tabla 3 se reflejan las características principales de los áridos correspondientes a las granulometrías estudiadas.

Tabla 3. Características de los áridos de las MBC.

Ensayo	MBC			
	S-C	S-CR	G-C	G-CR
Coefficiente de absorción de agua (%)	0.17	4.59	0.19	4.82
Coefficiente de los Ángeles (%)	19.4	25.6	22.1	24.8
Densidad relativa ( $g/cm^3$ )	2.69	2.66	2.69	2.66

La principal limitación que presenta el uso de áridos reciclados es el coeficiente de los Ángeles. Los valores

obtenidos limitan el uso de las mezclas S-CR y G-CR a firmes de tráfico T4, en capas de base e intermedia. También cabe destacar que el coeficiente de absorción de agua en las mezclas que contienen AR es muy superiores a los obtenidos en las que sólo tienen AC. Los valores de densidad relativa son similares en todos los casos.

## 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 3.1. Ensayo de fatiga a flexotracción

Consiste en un ensayo de flexión en tres puntos, sobre probetas en forma de viga prismática de dimensiones 300x50x50mm, apoyadas sobre unos soportes metálicos separados 250 mm. El equipamiento consta de una máquina servohidráulica de ensayos universales Instron 8516 conectado a una célula de carga de 5 kN. La medida de las deformaciones en la fibra inferior de la probeta se realizó colocando un extensómetro en la base de la viga. En la Fig.1 se muestra la configuración del dispositivo de ensayo.

El registro de las funciones de carga, deformación y desplazamiento se realizó a través del equipo de adquisición de datos cada 500 ciclos, a partir del ciclo 200, siendo la velocidad de toma de datos de 50 kHz. La temperatura del ensayo se mantuvo constante a 20°C

Los ensayos se realizaron en control de desplazamiento, aplicando una onda senoidal de la forma (1):

$$D = D_o \text{sen}(2\pi Ft) \quad (1)$$

donde  $D_0$  es la semiamplitud del desplazamiento, F es la frecuencia (10 Hz) y t el tiempo.



Figura 1. Ensayo de flexotracción dinámica

El ensayo finaliza cuando el valor de la amplitud cíclica de carga es menor o igual a la mitad de la amplitud cíclica de carga inicial. En ese momento se considera que aparecen las primeras fisuras en la viga.

### 3.2. Ley de fatiga en deformación

Uno de los objetivos del ensayo dinámico de flexotracción es determinar la resistencia de la mezcla bituminosa al inicio de fisuras originadas por el tráfico. La resistencia al agrietamiento de la mezcla se expresa mediante la ley de fatiga en deformación, que está dada por la relación (2):

$$\varepsilon = KN^B \quad (2)$$

donde  $\varepsilon_{200}$  es la mitad de la amplitud cíclica de la función de deformación inicial, que se corresponde con la medida en el ciclo 200. N es el número de ciclos soportado hasta la aparición de las primeras fisuras, y representa la durabilidad de la viga. K y B son constantes que describen el comportamiento a fatiga del material y dependen entre otros factores de la naturaleza de los áridos.

La función deformación  $\varepsilon$  se determina, para cada ciclo, a partir de la función extensométrica registrada,  $\Delta$ , de la distancia entre apoyos, L, y de la base de medida del extensómetro, B, a través de la expresión (3):

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{20 + \frac{B-20}{2} \left( 1 + \frac{L/2 - B/2}{L/2 - 10} \right)} \quad (3)$$

Para determinar las constantes K y B de la ley de fatiga se utilizó una media de ocho/diez probetas para cada tipo de MBC. A cada probeta se le aplicó una amplitud de desplazamiento diferente comprendido entre 80  $\mu\text{m}$  y 350  $\mu\text{m}$ .

### 3.3. Módulo Dinámico

El módulo dinámico (MD) es una medida de la rigidez de la muestra, en un determinado ciclo. Y se define como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión ( $T_c$ ) y la amplitud cíclica de la función deformación ( $\varepsilon_c$ ), mediante la expresión (4).

$$MD = \frac{T_c}{\varepsilon_c} \quad (4)$$

La función tensión T, se determina para cada ciclo, a partir de la función de carga registrada (P), de las dimensiones de la probeta y distancias entre apoyos (L) según la expresión (5):

$$T = \frac{3P(L/2 - 10)}{CD^2} \quad (5)$$

Donde C y D son el ancho y espesor de la probeta respectivamente.

En este trabajo se determinó el módulo dinámico en el ciclo 200 que se corresponde con la condición de inicio del ensayo de fatiga y por tanto con la rigidez inicial de la mezcla.

## 4. MÉTODOS ANALÍTICOS.

Para ampliar la investigación sobre la posibilidad de utilización de las MBC con AR se determinó la vida útil de dos secciones estructurales de firme de la Instrucción 6.1-IC. Se consideraron dos opciones, la primera incorporando mezclas G-20 y S-20 con un 50% de AR (mezclas G-CR y S-CR), y la segunda opción incorporando un 100% de AC (G-C y S-C). En concreto se analizaron las secciones denominadas 211 y 3211, destinadas a carreteras de tráfico medio y bajo. Todas ellas están compuestas de 40 cm de zahorras artificiales (módulo dinámico de 500 MPa), una base de mezcla G-20 cuyo espesor varía entre 8 y 18 cm, una capa intermedia con mezcla S-20, de 7 cm de espesor, y una capa de rodadura de 3 cm de espesor, fabricada con mezcla D-12, una mezcla de granulometría densa muy empleada en carreteras de tráfico medio y bajo en España y de módulo dinámico 6000 MPa. Se adoptó como eje tipo de carga representativo del tráfico, el eje simple con ruedas gemelas de 115 kN, equitativamente repartida entre las cuatro ruedas, con una presión de contacto de 0.90 MPa, radio de huella 14.26 cm. En la tabla 4 se incluyen los detalles de las secciones consideradas.

Tabla 4. Secciones estructurales para análisis de durabilidad.

Capa	Espesor (cm)	Sección 211 IMD <sub>p</sub> = 200		Sección 3211 IMD <sub>p</sub> = 50	
		Opción 1	Opción 2	Opción 1	Opción 2
Rodadura	3	D-12		3	D-12
Intermedia	7	S-CR	S-C	7	S-CR S-C
Base	18	G-CR	G-C	8	G-CR G-C
Subbase	40	ZA-25		40	ZA-25
Explanada	$\infty$	EI		$\infty$	EI

Para este análisis se utilizó un modelo multicapa elástico lineal [7] que utiliza como variables, el módulo dinámico de la mezcla, el espesor de la capa y la rigidez del soporte (explanada y subbase). A partir de estos parámetros se calculan las deformaciones máximas a tracción de las mezclas  $\varepsilon_t$ . Estos valores se sustituyeron en las correspondientes leyes de fatiga de deformación, que representan la resistencia a la fatiga y se obtuvieron los valores de durabilidad de las mezclas.

## 5. RESULTADOS

Los registros de carga y número de ciclos realizados en los ensayos de flexotracción dinámica permiten poner de manifiesto la pérdida de rigidez en el material debido a las fisuras de fatiga que se generan por las tensiones de tracción en la fibra inferior de las mezclas sometidas a cargas cíclicas. En la figura 2, se representa la disminución de la amplitud de carga soportada por la mezcla S-C con el tiempo, para las condiciones de sollicitación impuestas de desplazamiento constante.

En las gráficas de las figuras 3, y 4 se representa en escala logarítmica, la mitad de la amplitud de deformación cíclica inicial,  $\epsilon_{200}$ , frente a la durabilidad,  $N$  para las mezclas S-20 y G-20, respectivamente. En estas gráficas se han incluido para cada tipo de mezcla, las leyes de fatiga de los autores, las elaboradas por el Centro de Experimentación de Obras Públicas (Cedex) y las contempladas en la Instrucción de firmes 6.I-IC.

En la Tabla 5 se incluyen los coeficientes de ajuste de las leyes de fatiga experimentales y los módulos dinámicos.

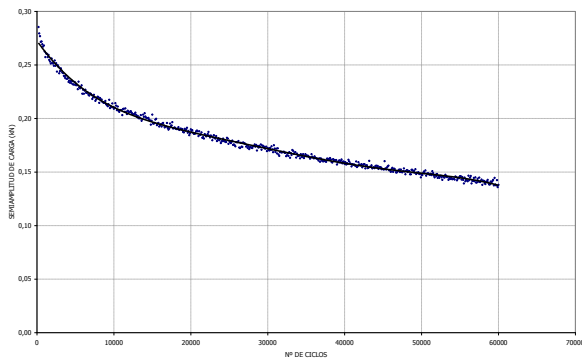


Figura 2. Evolución de la semiamplitud de carga en la mezcla S-20 con árido de cantera en el ensayo de fatiga en flexotracción.

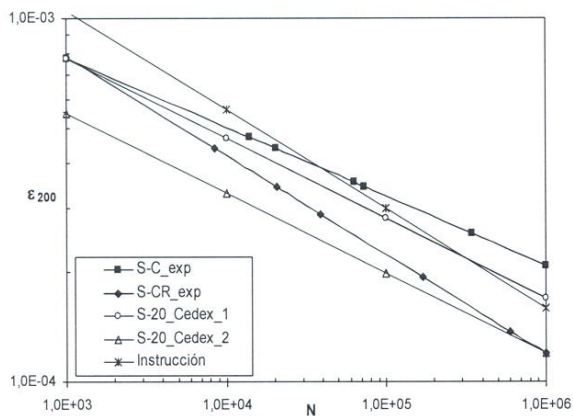


Figura 3. Leyes de fatiga para la mezcla S-20

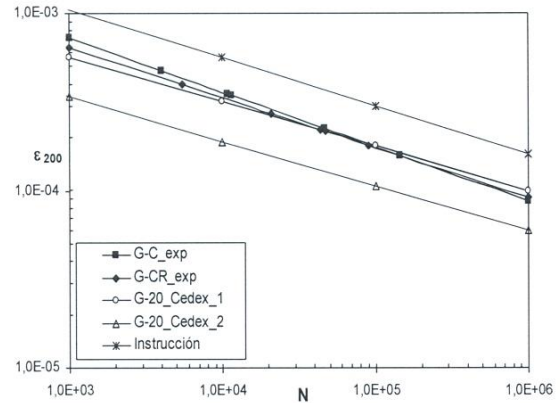


Figura 3. Leyes de fatiga para la mezcla G-20

Tabla 5. Coeficientes de la ley de fatiga y módulo dinámico.

MBC	Ley de Fatiga en Deformación $\text{Log}E=A+B \text{Log}N$		Módulo Dinámico
	A	B	MD(MPa)
S-C	-2.54	-0.19	3866
S-CR	-2.29	-0.27	5016
G-C	-2.22	-0.30	4086
G-CR	-2.35	-0.28	4675

En relación a los coeficientes de la ley de fatiga en deformación se observa que la mezcla S-C y la mezcla S-CR presentan un comportamiento a fatiga diferente, La ley de fatiga de la mezcla S-C tiene una pendiente más suave (un 30% inferior) y está más desplazada hacia la derecha, lo que significa que para una misma deformación impuesta la durabilidad de la mezcla S-C es mayor que la mezcla S-CR, y por lo tanto se comporta mejor frente al agotamiento por fatiga. En relación a las mezclas con granulometría G-20, puede observarse que tanto la mezcla G-C y G-CR presentan un comportamiento a fatiga muy similar, dado que sus pendientes (B) se diferencian en tan sólo un 6.7% y sus ordenadas en el origen son muy próximas. La diferencia más importante se puede notar en el rango de las altas deformaciones donde las diferencias de durabilidad pueden favorecer el empleo de las mezclas con árido de cantera.

Por último cabe decir, que los parámetros de estas leyes son similares a los obtenidos por otros investigadores y están situadas dentro de unos intervalos de deformación que se pueden considerar habituales.

Los valores del módulo dinámico de las mezclas S-20 con betún 60/70 se encuentran dentro de un intervalo usual de  $6000 \pm 1000$  MPa. En este sentido, para la mezcla S-C el valor obtenido es ligeramente inferior al módulo usual para este tipo de mezclas. Sin embargo, la mezcla S-CR está dentro de ese intervalo. En relación con las mezclas G-20 con un betún 60/70 el intervalo de valores de los módulos es de  $5500 \pm 1000$  MPa. En este sentido la mezcla G-C está por debajo de ese intervalo y la mezcla G-CR está dentro del mismo. Se observa por tanto que cuando se añade AR se obtienen mezclas de mayor rigidez debido a su comportamiento más rígido. Y los valores obtenidos concuerdan con lo esperado, en el sentido de

que las mezclas con AR con granulometría S-20 tienen mayor módulo que las mezclas con AR del tipo G-20.

En la tabla 6 están reflejados los resultados de la vida útil para las dos secciones de firme de diferentes espesores. Se incluyen los valores de la tensión de tracción crítica en la capa de base de mezcla bituminosa,  $\epsilon_t$ , del número de ejes sencillos que la sección resistirá antes de su agotamiento ( $N_a$ ) y el número de ejes sencillos previstos durante una vida útil de 15 años, teniendo en cuenta una tasa de crecimiento anual del tráfico de un 2%, ( $N_t$ ).

Tabla 6. Análisis de la respuesta a fatiga.

	Sección 211		Sección 3211	
	Opción 1	Opción 2	Opción 1	Opción 2
$E_t$ ( $\times 10^4$ )	0.77	0.83	1.36	1.47
$N_a$ ( $\times 10^5$ )	18.2	11.5	2.42	1.82
$N_t$ ( $\times 10^5$ )	6.22		1.56	

De esta tabla se deduce que en todos los casos, el número de ejes admisibles ( $N_a$ ) supera al número de ejes previstos ( $N_t$ ). Por otro lado, cuanto mayor es el espesor de la capa de base más se incrementa la durabilidad del firme. Además, se observa una mayor durabilidad en las secciones construidas con AR que en las construidas con AC. Este resultado refleja los datos obtenidos para el módulo dinámico. Según se dedujo de la tabla 5 los valores del módulo dinámico eran inferiores en las mezclas con AC, y por tanto, al no ser lo suficientemente rígidas, con el paso del tráfico, se deforman de manera excesiva al no absorber de forma adecuada las tensiones. En consecuencia, en la opción 2 en donde se han considerado mezclas con AC se favorece una fisuración temprana de la mezcla más superficial al tener una capa de base menos rígida que la opción 1, modelizada con mezclas con AR.

## CONCLUSIONES

- Las MBC gruesas con 50% de AR tienen una resistencia a la fatiga similar a las gruesas con 100% de AC; mientras que las semidensas con 50% de AR tienen un peor comportamiento a la fatiga que las semidensas con 100% de AC.
- Tanto en las MBC con 50% de AR como con 100% de AC se obtuvieron unos valores razonables, aunque algo bajos, del módulo dinámico, si bien los de las MBC con AR fueron más elevados.
- Desde el punto de la vida útil, las MBC fabricadas con AR son más resistentes que las fabricadas con AC.
- De todo lo dicho anteriormente se deduce que es posible utilizar los RCD en la fabricación de MBC de firmes de carreteras.

## BIBLIOGRAFÍA

[1]. Dirección general de Carreteras. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3. Ministerio de Fomento. Ediciones Liteam, Madrid, 2002.

- [2]. Reciclaje de residuos industriales. Xavier Elías Castells. Ed. Díaz de Santos, Madrid, 2000.
- [3]. Asociación española de normalización y certificación (AENOR). UNE- 146131:2003. Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas estructurales de firmes. Madrid 2003.
- [4]. Der-Hsien Shen, Jia-chong Du. "Evaluation of building material s recycling on HMA permanent deformation". Construction and building materials, 18, 2004,391-197.
- [5]. Pérez, M. Toledano, J. Gallego y J. Taibo "Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición". Mat. de Construcción, Vol. 57, 285,17-29,2007.
- [6]. Dirección General de Carreteras. Norma NLT- 350/90 "Ensayo de fatiga en flexotracción dinámica de mezclas bituminosas". Ministerio de Obras Públicas y Transportes, z- Edición, Madrid, 1992.
- [7]. Huang Y. H. Pavement Analysis and Design. Pearson Prentice Hall, 2004.
- [8]. García, J. "Caracterización de módulos, fatiga y otros ensayos dinámicos. Jornada sobre caracterización y control de mezclas bituminosas. p. 21. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 2000.