

Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición

Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris

I. Pérez^(*), M. Toledano^(*), J. Gallego^(**) y J. Taibo^(*)

Recepción/Received: 9-I-06
Aceptación/Accepted: 12-VII-06

RESUMEN

En este trabajo se dosificaron mezclas bituminosas fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Se realizaron una serie de ensayos que permitieron caracterizar el comportamiento mecánico de estas mezclas. Los parámetros mecánicos de las mezclas con áridos reciclados son similares a los de las mezclas fabricadas únicamente con áridos naturales de cantera. Sin embargo, las mezclas bituminosas con áridos reciclados tuvieron un mal comportamiento frente a la disminución de la resistencia por pérdida de cohesión por la acción del agua. No obstante, mediante la selección de materiales de mejor calidad y corrección de este mal comportamiento, existen posibilidades de utilizar áridos reciclados en mezclas bituminosas. Para ello será necesario ampliar la primera aproximación realizada en este artículo.

Palabras clave: árido, tratamiento de residuos, durabilidad, propiedades mecánicas, caracterización.

SUMMARY

The mix design for asphalt mixtures containing recycled aggregates from construction and demolition debris was evaluated. The tests conducted to characterize the mechanical behaviour of these mixtures showed that the mechanical properties of mixtures with recycled and virgin aggregate are similar. The asphalt mixtures containing recycled aggregate proved to have lower resistance to water action. Nonetheless, recycled aggregate was found to be potentially usable in asphalt mixtures if higher quality materials are selected and such low resistance is corrected. This will call for expanding upon the preliminary work described in the present article.

Keywords: aggregate, waste treatment, durability, mechanical properties, characterization.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad está extendida la idea de la necesidad de un desarrollo sostenible que gestione de forma correcta los bienes escasos que el medio aporta. Ante este reto, la industria de la construcción ha sido pionera en el desarrollo

1. INTRODUCTION

There is widespread general consensus today about the need for sustainable development policies to efficiently manage the planet's scarce natural resources. In rising to this challenge, the construction industry has been

(*) Universidade da Coruña. ETSI Caminos, A Coruña (España).

(**) Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Caminos, Madrid (España).

de técnicas para la reutilización de los materiales de desecho que genera. La Unión Europea (UE) fomenta una política de reciclado a través de una serie de investigaciones de carácter técnico para poder dar uso a estos materiales. En este sentido, hay todo un catálogo de residuos que contempla la UE y que se conoce como CER (Catálogo Europeo de Residuos), donde los residuos de construcción y demolición (RCD) se contemplan con el código CER 170000. Los RCD se conocen habitualmente como "escombros". Se generan en grandes cantidades y su volumen supera al de origen doméstico. Su poder contaminante es bastante bajo. Por el contrario, su impacto visual es con frecuencia alto, debido tanto al gran volumen que ocupan, como al escaso control ambiental ejercido sobre los terrenos elegidos para su depósito. Un segundo impacto ecológico negativo se deriva del despilfarro de materias primas. Por estas razones en España se aprobó el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) (1), estableciendo como uno de sus objetivos el reciclaje del 60% de los RCD en el año 2006. Sin embargo, este porcentaje en España es inferior al 5%, existiendo una red insuficiente de plantas de reciclaje. En Europa la media de este porcentaje se sitúa en torno al 28%.

En este orden de ideas cabe decir que dada la enorme cantidad de áridos que se consumen en los firmes de carreteras, parece adecuado pensar en la posibilidad del uso de los RCD en sus diversas capas. En este sentido, en la actualidad existe diversa literatura técnica sobre la caracterización de hormigones estructurales elaborados con áridos reciclados de RCD (2, 3). Asimismo, existen experiencias sobre el empleo de estos materiales en carreteras como capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos (4-6). Sin embargo, los autores de este artículo no conocen antecedentes de estudios técnicos de caracterización de estos residuos para su empleo como mezclas bituminosas para capas de firmes de carreteras. Por lo dicho anteriormente, el objetivo de esta investigación es ampliar el uso de los áridos reciclados más allá de una simple zorra para una capa granular o de un material tipo grava-cemento. En concreto, se abordará el estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas en caliente elaboradas con áridos reciclados para su empleo en carreteras.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Se investigó la factibilidad de dosificar dos tipos de mezclas bituminosas en caliente a partir de áridos reciclados (AR) en diferentes proporciones. Asimismo, con el fin de comparar los resultados se dosificaron los mismos tipos de mezclas bituminosas elaboradas con áridos naturales (AN) de cantera. Las dosificaciones de las mezclas se hicieron de acuerdo al Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, también denominado PG-3 (7).

among the first to develop techniques to reuse the waste it generates. The European Union (EU) furthers recycling by sponsoring a number of technical research projects whose aim is to find a suitable use for such materials. To this end, the EU has drawn up a catalogue of waste. Known as the EWC (European Waste Catalogue), it lists construction and demolition debris (CDD) under code EWC 170000. Generally termed "rubble", CDD is generated on a massive scale, outpacing the production of domestic waste. While it constitutes a low pollutant hazard, its visual impact is often high due to the large volume involved and the scant environmental control exercised in the areas involved. Another environmental problem facing the industry is the squandering of raw materials. In light of such concerns, the Spanish Government instituted its National Construction and Demolition Waste Plan (Spanish initials, PNCRD) (1), one of whose targets is to recycle 60% of CDD in 2006. The actual percentage at this writing, however, is less than 5%, due to a shortage of recycling plants. In Europe roughly 28% of such waste is recycled.

Be it said in this vein that one possible use for CDD would be as aggregate for paving roads, given the vast amounts needed in the various courses. A wide variety of technical literature is presently available on the characterisation of different types of structural concrete made with recycled CDD aggregate (2, 3). Experiments have also been conducted on the use of these materials in road bases and subbases (4-6). The authors of this article, however, are unaware of any prior technical studies on the characterization of this debris for use in asphalt mixtures for bituminous courses. In light of the foregoing, the purpose of the present study was to broaden the use of recycled aggregate to more than just a base and subbase material in road construction. More specifically, the paper addresses the mechanical properties of hot asphalt mixes containing recycled aggregate for use as road pavement.

2. EXPERIMENTAL

The viability of two types of hot asphalt mixes made with different doses of recycled aggregate (RA) was explored. The same types of asphalt mixtures were also prepared with natural aggregate (NA) for purposes of comparison. The mixes were designed to Spain's General Technical Specifications for Road and Bridge Construction, also known as PG-3 (7).

2.1. Definición de las mezclas

Se estudió como capa de base una mezcla G-20, mientras que como capa intermedia se estudió una mezcla S-20. La mezcla G-20 es una mezcla gruesa cuya granulometría es continua, con un tamaño máximo de 25 mm. Está compuesta en casi tres cuartas partes por árido grueso, con un contenido de filler y betún que ronda el 4%. La mezcla S-20 es una mezcla semidensa de granulometría continua, con tamaño máximo de 25 mm. Está compuesta en torno a las dos terceras partes por árido grueso, con un contenido de filler y betún que ronda el 5%. En la Tabla 1 se presentan los husos granulométricos de estas dos mezclas bituminosas.

Para caracterizar los materiales básicos se utilizaron las Normas Técnicas Españolas NLT (8) (Ensayos de Carreteras) del Centro de Estudio de Carreteras y las normas UNE-EN (9) de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

Betún. Se optó por elegir un betún de uso convencional con propiedades medias. En concreto se seleccionó un betún de penetración 60/70 (NLT-124), con un valor del punto de reblandecimiento de anillo y bola (NLT-125) igual a 48,5. El índice de penetración Pleiffer (NLT-181) es igual a -0,8. La densidad es de 1,03 g/cm³ (NLT-122). Este betún posibilita su uso en multitud de circunstancias de tráfico y climas. En una zona templada se puede utilizar como capa de rodadura, intermedia y de base. Se comprobó que el betún cumple todas las especificaciones del PG-3.

Áridos naturales. Estos áridos fueron proporcionados por una cantera en fracciones 0/6, 6/12 y 12/25. La roca de la que proceden los áridos es un esquisto feldespático de grano fino producido por metamorfismo regional, compuesto por filitas grises con abundantes lentes de cuarzo microscópicas intercaladas entre unos planos de esquistosidad muy plegados. Sus componentes principales son cuarzo (35%), feldespato sódico (30%), mica incolora o moscovita (20%) y clorita (15%). Esta roca presenta un color gris lustroso y buenas propiedades como árido para capas de base, intermedia y de rodadura.

2.1. Mixture composition

A G-20 road base and S-20 binder course were used throughout. G-20 consists in a coarse mixture with continuous grading and a maximum particle size of 25 mm. Nearly three fourths of the volume comprises coarse aggregate, while filler and bitumen account for approximately 4%. S-20 is a semi-dense mixture with continuous grading and a maximum particle size of 25 mm. Around two thirds of the volume comprises coarse aggregate, while filler and bitumen account for roughly 5%. The particle size distribution and grading envelopes for the two hot asphalt mixes are given in Table 1.

The basic materials were characterized as specified in the Spanish NLT technical standards (Road Tests) published by the Road Study Centre (8) and Spanish Association for Standardization (AENOR) UNE-EN standards (9).

Bitumen. A conventional bitumen with average properties was chosen. Specifically, a penetration grade bitumen (60/70) (NLT-124) with a ring-and-ball softening point of 48.5 (NLT-125) was used. The Pleiffer penetration index (NLT-181) was -0.8 and density 1.03 g/cm³ (NLT-122). This bitumen can be used for many different traffic intensities and climates. In mild climates, it can be used as a wearing course, binder course or road base. It was tested to PG-3 requirements.

Natural aggregate. This quarry aggregate came in 0/6, 6/12 and 12/25 fractions. It was quarried from fine-grained feldspar schist generated by regional metamorphism consisting of small grey lines with a fair number of microscopic quartz crystals interspersed between tightly folded schistose planes. The main components were found to be quartz (35%), sodium feldspar (30%), colourless or moscovite mica (20%) and chlorite (15%). This lustrous grey rock constitutes a good aggregate for wearing and binder courses as well as road bases. Table 2 lists the main characteristics of S-20 and G-20 graded

Tabla 1 / Table 1
 Husos y curvas granulométricas
 Particle size distribution and grading envelopes

Mezcla / Mixture		Tamaño de los tamices / Sieve sizes UNE-EN-933-2 (mm)										
		Árido grueso / Coarse aggregate						Árido fino / Fine aggregate				Filler
		40	25	20	12.5	8	4	2	0.50	0.25	0.125	0.063
Semidensa S-20 Semi-dense S-20	Huso / Grading envelope	---	100	80-95	64-79	50-66	35-50	24-38	11-21	7-15	5-10	3-7
	AN / NA	---	100	95	78	63	40	30	15	12	8	5.5
	AR / RA	---	100	95	78	63	40	30	15	12	8	6.5
Gruesa G-20 Coarse G-20	Huso / Grading Envelope	---	100	75-95	55-75	40-60	25-42	18-32	7-18	4-12	3-8	2-5
	AN / NA	---	100	95	75	60	37.75	28.5	13	10	7	4.25
	AR / RA	---	100	95	75	60	37.75	28.5	13	10	7	4.75

En la Tabla 2 se reflejan las características principales de los áridos correspondientes a las granulometrías S-20 y G-20. Como se observa, cumple las especificaciones del PG-3, ya que el índice de las fracciones ensayadas es <20% (UNE-EN-933-3), todas sus caras son de fractura (UNE-EN-933-5); el equivalente de arena es de un 70,1 y un 75,4% (UNE-EN-933-8); el coeficiente de Los Ángeles está comprendido es 19,4 y 22,1% (UNE-EN-1097-2). El coeficiente de absorción del agua es 0,17 y 0,19% (UNE-EN-1097-6). La densidad de los áridos en aceite de parafina (NLT-167) es 2,69 g/cm³.

Áridos reciclados. Los áridos reciclados tienen la granulometría requerida para rellenos en la fracción 0/40. Su composición en peso es la siguiente: hormigón (72%); piedra (20%); cerámico (2%) y betún (6%). En la Tabla 2 se observan sus características principales. Cuando, como se explica en el apartado 3.1, en la granulometría S-20 se utiliza un 100% de AR, los valores del índice de las caras de fractura y equivalente de arena cumplen los requisitos del PG-3. Sin embargo, el coeficiente de desgaste de Los Ángeles supera ampliamente los valores especificados, ya que presenta un resultado del 39,65%. También cabe destacar el alto valor del coeficiente de absorción del agua, igual al 6,1%, 36 veces superior al valor de la granulometría S-20 con un 100% de AN. La densidad de los áridos en aceite de parafina es 2,58 g/cm³. Por otra parte, al emplear en todas las fracciones, tanto de las granulometrías S-20 como G-20, un 50% de AN + un 50% de AR, se observó que los valores del índice de las caras del equivalente de arena también cumplen los valores establecidos. En este caso, lógicamente, se obtuvieron unos menores valores de los coeficientes de Los Ángeles, aunque todavía no cumplen lo especificado en el PG-3 para carreteras con tráfico medio. Los valores del coeficiente de absorción del agua siguen siendo elevados, del orden de 27 a 25 veces los valores obtenidos con un 100% de AN. Por último, al combinar los dos tipos de áridos se produce un incremento de la densidad relativa en aceite de parafina hasta alcanzar un valor igual a 2,66 g/cm³.

aggregate. With an elongation index in all the fractions tested of <20% (UNE-EN-933-3), all its coarse aggregate particles fractured (UNE-EN-933-5), sand equivalents of 70.1 and 75.4% (UNE-EN-933-8) and Los Angeles abrasion coefficients of 19.4 and 22.1% (UNE-EN-1097-2), this aggregate was found to meet all PG-3 requirements. Its water absorption coefficient was 0.17 and 0.19% (UNE-EN-1097-6) and density in paraffin oil (NLT-167) 2.69 g/cm³.

Recycled aggregate. *The recycled aggregate met the grading specifications for 0/40 fill. Its composition by weight was as follows: concrete (72%), stone (20%), ceramic materials (2%) and bitumen (6%). The main characteristics are shown in Table 2. As explained in section 3.1, when 100% RA was used in S-20 grading, the elongation index, fractured particle and sand equivalent values were PG-3-compliant. At 39.65%, however, the Los Angeles abrasion coefficient, was substantially higher than the specified ceiling. The water absorption coefficient was likewise very high: the value found, 6.1%, was 36 times greater than the figure for S-20 graded 100% NA. Aggregate density in paraffin oil was 2.58 g/cm³. Moreover, when 50% NA + 50% RA were used in all fractions of both S-20 and G-20 graded aggregate, the elongation index and sand equivalent values also complied with the established values. Under these conditions, the Los Angeles coefficient values were naturally lower, although still higher than required to meet PG-3 specifications for roads with medium traffic. The water absorption coefficient values were also high – around 27 to 25 times higher than the values obtained with 100% NA. Lastly, when the two types of aggregates were combined, the relative density in paraffin oil increased to a value of 2.66 g/cm³.*

Tabla 2 / Table 2
Características de los áridos
Aggregates characteristics

Ensayo / Test	100% AN / 100% NA		100% AR / 100% RA	50% AR + 50% AN / 50% RA + 50% NA	
	S-20	G-20	S-20	S-20	G-20
Índice de las caras / Elongation index (%)	17.2	19.4	16.2	17.1	18.3
Caras de fractura / Fractured particles (%)	100	100	100	100	100
Equivalente de arena / Sand equivalent (%)	75.4	70.1	87.2	85.4	88.1
Coeficiente de los Ángeles / Los Angeles Abrasion (%)	19.4	22.1	39.65	25.6	24.8
Coeficiente de absorción de agua / Water Absorption Coefficient (%)	0.17	0.19	6.1	4.59	4.82
Densidad relativa en aceite de parafina / Relative density in paraffin oil (g/cm ³)	2.69	2.69	2.58	2.66	2.66

Filler. El filler utilizado en todos los casos fue el proveniente del proceso de trituración del árido natural. Esto se hizo así procurando que el mástico se comporte de igual manera en los dos casos.

2.3. Ensayos mecánicos

A continuación se presentan los ensayos seleccionados para la caracterización mecánica de las mezclas. Los ensayos Marshall, inmersión-compresión y de pista en laboratorio se realizaron con objeto de buscar la dosificación óptima de las mezclas para poder ser utilizada dentro de alguna de las categorías de tráfico recogidas en el PG-3, Tabla 3. Como complemento de estos estudios se realizaron ensayos de fatiga, que sin ser preceptivos en el Pliego de Carreteras, permiten profundizar en el comportamiento de la mezcla bituminosa frente al inicio de fisuras debido a la presencia de solicitaciones cíclicas.

Marshall (NLT-159). Se compactaron cinco series de tres probetas cilíndricas, de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de alto. Cada serie se fabricó con idéntica granulometría pero distinto porcentaje de betún sobre el peso de árido. Para cada porcentaje de betún se calculó la media de los siguientes parámetros: Huecos en áridos, Ha (%); Huecos en mezcla, Hm (%); Densidad aparente, Da (g/cm³); Deformación, D (mm) y Estabilidad, E (kN). Los resultados de este ensayo se utilizaron para definir el porcentaje de óptimo de betún (Bo) de las mezclas para cumplir con los criterios establecidos en el PG-3, Tabla 3. Las probetas que se fabricaron para el resto de los ensayos se dosificaron con el porcentaje de betún óptimo seleccionado en este ensayo.

Filler. The filler used in all cases was crushed virgin aggregate to ensure that similar behaviour in the two types of mixtures.

2.3. Mechanical testing

The tests used for the mechanical characterization of the mixtures are described below. Marshall, immersion-compression and wheel tracking tests were conducted to determine the optimum mix design to build roads for the traffic categories listed in PG-3, Table 3. Fatigue tests were conducted in addition to the above for, while not required under road specifications, they provide a deeper understanding of bituminous mixture behaviour after fissuring as a result of dynamic stress.

Marshall (NLT-159). Samples were compacted into five series of three cylindrical specimens, each measuring 101.6 mm in diameter by 63.5 mm high. The grading was identical in each series, while the percentage of bitumen by weight of aggregate weight varied. The mean values of the following parameters were calculated for each percentage of bitumen: voids in mineral aggregate, Va (%); voids in total mix, Vm (%); bulk specific gravity, Bg (g/cm³); flow value, F (mm) and stability, S (kN). The results of this test were used to define the optimum bitumen content (Bo) in mixtures to meet PG-3, Table 3 requirements. The specimens prepared for all the other tests were made with the optimum asphalt content determined in this test.

Tabla 3 / Table 3
 Criterios de dosificación preceptivos en el PG-3
 Criteria for mandatory mix design in PG-3

Características / Characteristics		Categoría de tráfico pesado+ / Category of heavy traffic+			
		T00 y T0 T00 and T0	T1 y T2 T1 and T2	T3 y arcenes T3 and shoulders	T4 T4
Marshall	Estabilidad / Stability (kN)	>15	>12.5	>10	8-12
	Deformación / Flow value (mm)	2-3	2-3.5		2.5-3.5
	Huecos en mezcla Voids in total mix (%)	4-6	5-8	4-8	4-8*
	Capa intermedia S-20 Binder course S-20				
	Capa de base G-20 Road base G-20	5-8	6-9	5-9	---
Huecos en áridos / Voids in mineral aggregate (%)		>14			
Índice de resistencia conservada / Retained rate RRC (%)		>75			
Velocidad de deformación (mm/min) Deformation rate (mm/min)		Capa intermedia S-20 Binder course S-20	<20		
		Capa de base G-20 Road base G-20	---		

* vías de servicio / service roads.

+ T00 (IMDp≥4000); T0 (2000≤IMDp<4000); T1 (800≤IMDp<2000); T2 (200≤IMDp<800); T3 (50≤IMDp<200); T4 (IMDp<50); (IMDp=Intensidad media diaria de vehículos pesados) / AADTcv= Annual average daily commercial traffic).

Efecto del agua en la resistencia de las mezclas bituminosas (NLT-161 y NLT-162). Se fabricaron 10 probetas cilíndricas de dimensiones: 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de alto. Cinco probetas se sumergieron en un baño de agua a 60 °C durante 24 horas y cinco no. Posteriormente, se sometieron a compresión simple y se determinó la media de la tensión máxima alcanzada en cada grupo. El Índice de Resistencia Conservada IC (%) se calcula dividiendo la resistencia del grupo que estuvo inmerso a 60 °C entre la resistencia del grupo que no estuvo. Mediante este ensayo se caracteriza la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua en las mezclas. Según el PG-3 los valores de IC en mezclas S-20 y G-20 deben ser superiores al 75% (Tabla 3).

Pista en laboratorio (NLT-173). Se fabricaron tres probetas prismáticas de dimensiones 300 x 300 x 50 mm. El ensayo consiste en someter una probeta al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. La media de la velocidad de deformación (VD) se midió en el intervalo de tiempo comprendido entre los 105 a los 120 minutos desde el comienzo. Este ensayo solamente es obligatorio para capas de rodadura o intermedias (Tabla 3).

Fatiga a flexotracción dinámica (NLT-350). Se fabricaron diez probetas prismáticas de dimensiones 300 x 50 x 50 mm y se ensayaron en flexotracción en una prensa servohidráulica en control de desplazamiento a una frecuencia de 10 Hz. Los valores de deformación se midieron mediante un extensómetro dinámico colocado en la parte inferior de la probeta, que es donde se soportan las mayores tensiones de tracción. A partir de estos ensayos se determinó para cada mezcla: la ley de fatiga, el módulo dinámico y el ángulo de desfase.

Mediante la ley de fatiga se cuantifica el agotamiento del material provocado por el daño acumulado ante la presencia de solicitaciones cíclicas y que se manifiesta en la fisuración del mismo. La ley de fatiga relaciona el número de ciclos de carga hasta la fatiga del material (N), con el nivel de deformación (ϵ) producida por la sollicitación cíclica. ϵ y N están ligados por la expresión:

$$\epsilon = kN^B \quad [1]$$

donde k y B son constantes que describen el comportamiento a fatiga del material y dependen, entre otros factores, de los áridos de la mezcla.

El módulo dinámico (MD) es una medida de la rigidez de la mezcla y se calcula como el cociente entre la amplitud cíclica de la función tensión (T_c) y la amplitud cíclica de la función deformación (ϵ_c) en el ciclo 200. Su expresión es la siguiente:

Immersion-compression test (NLT-161 and NLT-162). The ten cylindrical specimens prepared measured 101.6 mm in diameter and 101.6 mm high. Five specimens were soaked in water at a temperature of 60 °C for 24 hours and the other five kept dry. All samples were subsequently subjected to simple compression and the mean maximum stress recorded for each group was determined. The retained ratio RR (%) was found by dividing the strength of the group soaked in water at 60 °C by the strength of the control group. This test was used to characterize the loss of resistance to water action. According to PG-3 (Table 3), the S-20 and G-20 RR values must be >75%.

Wheel tracking test (NLT-173). Three samples were made, measuring 300 x 300 x 50 mm. In this procedure the specimen is tested under a concentrated load by a rolling-wheel device reciprocating back and forth at a predefined temperature, while the rut depth is periodically recorded. The mean deformation rate (DR) was measured over time intervals of 105 to 120 minutes. This test is mandatory for wearing or binder courses only (Table 3).

Bending fatigue test (NLT-350). Sample prisms measuring 300 x 50 x 50 mm were prepared and fatigue tested with a hydraulic servo press at a displacement frequency of 10 Hz. The deformation values were measured with a dynamic extensometer positioned at the bottom of the specimen where tensile stress was greatest. The results of these tests were used to determine the law of fatigue, dynamic modulus of elasticity and phase angle for each mixture.

The law of fatigue was used, in turn, to quantify fatigue failure of the material resulting from the cumulative damage caused by dynamic loads, which adopts the form of fissures in the material. The law of fatigue relates the number of loading cycles to fatigue failure (N) to the strain (ϵ) generated by cyclic stress as follows:

where k and B are constants describing the fatigue behaviour of the material which depend, among others, on the aggregates in the mixture.

The dynamic modulus of elasticity (DM), which provides a measure of mixture stiffness, is found as the quotient between the cyclical amplitude of stress function (T_c) and the cyclical amplitude of strain function (ϵ_c) in cycle 200, i.e.:

$$MD = T_d / \varepsilon_c \quad [2]$$

El ángulo de desfase (φ) da una idea del predominio del carácter elástico o viscoso de la mezcla estudiada, un ángulo de $\varphi=0^\circ$ indicaría que el material es elástico, mientras que un ángulo de $\varphi=90^\circ$ indicaría que el material es viscoso. Se calcula mediante la expresión:

$$\varphi = (B_t - B_\varepsilon) 180 / \pi \quad [3]$$

donde B_t y B_ε son los ángulos de fase de las funciones tensión y deformación.

Phase angle or difference (φ) is an indication of the predominance of the elastic or viscous nature of the mixture: angle differences of $\varphi=0^\circ$ signify an elastic material, while differences of $\varphi=90^\circ$ denote viscosity. Phase or angle difference is found as:

where B_t and B_ε are the phase angles of the stress and strain functions.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de los ensayos Marshall

Los resultados obtenidos con el método Marshall evidenciaron la imposibilidad de utilizar únicamente árido reciclado en mezcla. Para la mezcla S-20-AR, compuesta por 100% árido reciclado, se observó que las mezclas tenían poca cohesión, el árido más grueso no se encontraba correctamente envuelto por el betún y el conjunto tenía un aspecto terroso. Este comportamiento se debe a la excesiva porosidad del árido; al aumentar la superficie específica del mismo, se requieren mayores cantidades de betún para conseguir la suficiente cohesión. Las mezclas fabricadas con un 5,90% de betún arrojaron valores de H_a , E y D elevados, pero dentro del PG-3. En cambio, el valor de H_m era del 11,7 (%), por tanto, no se cumplió este criterio preceptivo para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para su uso en firmes. Para las dosificaciones realizadas con menores cantidades de betún no se consiguió consistencia en las mezclas, que terminaban por disgregarse.

Del análisis de los resultados anteriores se optó por dosificar las mezclas con AR utilizando un 50% de árido reciclado. En las mezclas con AN se eligió la cantidad de filler en función de la relación ponderal filler-betún recomendada en el PG-3; mientras que en las mezclas con AR se tuvo que elevar la cantidad de filler hasta casi el límite superior del huso. En la Figura 1 se representan de forma gráfica los resultados de los ensayos Marshall, tanto de las mezclas AN, como de las AR. A este respecto, se pueden hacer los comentarios siguientes:

1. Las curvas de H_a no presentan grandes pendientes, siendo poco susceptibles al contenido del betún. Las mezclas con AR producen un aumento de los H_a de entre el 3% y el 5% con respecto a las mezclas con AN. La causa está en que la mayor absorción de betún por parte de los áridos reciclados disminuye el grosor de la película que envuelve los áridos y, en definitiva, disminuye la facilidad de encaje entre los mismos.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Marshall tests

The Marshall test results showed that mixtures containing only recycled aggregate were not viable. In mixture S-20-RA comprising 100% recycled aggregate, cohesion was observed to be poor, the coarser aggregate was not fully coated by the bitumen and the mix had a gritty appearance. These results may be attributed to the considerable porosity of the aggregate. Cohesion requires greater quantities of bitumen in such mixes, due to the greater specific surface involved. The V_a , S and F values observed in mixes made with 5.90% bitumen were high, but within PG-3 specifications. The V_m value, on the contrary, at 11.7%, failed to meet the standard requirement for hot asphalt mixes intended for use in road pavements. The mixtures made with smaller proportions of bitumen, in turn, exhibited insufficient consistency leading to segregation.

In light of the above results, the dosage established for RA mixtures was 50% of recycled aggregate. In the NA mixtures, the amount of filler was determined from the weighted filler-bitumen ratio recommended in PG-3; in the RA mixtures, the amount of filler had to be increased to nearly the upper limit of the grading envelope. The chief considerations stemming from the results of the Marshall tests for the NA and RA mixes, charted in Figure 1, are as follows:

1. The slopes of the V_a curves are not steep, as they are scanty affected by bitumen content. In mixtures containing RA the V_a values were from 3% to 5% higher than in the NA mixtures. The reason is that since the recycled aggregate absorbs greater amounts of bitumen, the film around the aggregate is thinner, which ultimately lessens its bindability.

2. Las curvas de Hm son descendentes con el contenido de betún hasta alcanzar un mínimo donde aproximadamente se mantiene constante. El porcentaje de betún utilizado no fue lo suficientemente elevado para alcanzar este mínimo. Las mezclas con AR presentan un 3,0% más de Hm para la mezcla G-20 y un 7,0% más para la mezcla S-20. Según estos resultados se puede predecir un comportamiento peor de las mezclas con AR frente a la entrada de agua.
3. La curva de deformación es creciente con el contenido de betún. Siendo similar en todos los casos.
4. Se aprecian las ramas ascendentes y descendentes de la estabilidad tanto para la mezcla S-20-AN, como para la mezcla G-20-AR. La mezcla G-20-AN presenta solamente la rama ascendente, mientras que la mezcla S-20-AR presenta únicamente la rama descendente.
5. Las densidades de las mezclas con AR son ligeramente inferiores a las de las mezclas con AN. Esto se debe a la mayor dificultad de compactación de las mezclas con AR.

A partir de los resultados obtenidos del ensayo Marshall se seleccionaron las proporciones de B_o para cada tipo de mezcla, que cumpliera con los requisitos del PG-3 para las diferentes categorías de tráfico (Tabla 3). En la mezcla S-20-AN el porcentaje de B_o adoptado es igual al 5% sobre el peso total de los áridos. Con esta dosificación la mezcla cumple para las categorías de tráfico T3 y T4. Para la mezcla G-20-AN el porcentaje de B_o adoptado es igual al 4,25%, por tanto, se verifican todos los requisitos de los T3 y T4. En la mezcla S-20-AR el porcentaje de B_o es el 5,90%, confirmándose todos los requisitos desde T1 hasta T4. Finalmente, en la mezcla G-20-AR el porcentaje de B_o es igual al 4,75%; aquí el comportamiento es peor, ya que solamente se cumplen todos los requisitos de la categoría T4. Los resultados del ensayo Marshall para las dosificaciones seleccionadas se incluyen en la Tabla 4.

3.2. Índice de resistencia conservada

Los resultados del índice de resistencia conservada IC (%) se presentan en la Tabla 4. Para las mezclas S-20-AN y G-20-AN los valores obtenidos son ligeramente superiores del 75% marcado en la Tabla 3. Con respecto a las mezclas con AR la resistencia conservada no cumple con las especificaciones de la Tabla 3. En particular los valores de la G-20 AR fueron inferiores a los obtenidos con las mezclas S-20-AR.

La mezcla S-20-AR presenta un valor de huecos en mezcla no excesivamente alto (8%). Por tanto, la entrada de agua en el interior de la misma y la consiguiente pérdida de resistencia debería ser parecida al de otras mezclas con la misma cantidad de huecos. Una posible explicación a este resultado sería que dada la naturaleza de los áridos reciclados, que contiene entre ellos materiales arcillosos y hormigón, podría haber favorecido la retención de agua en

2. The Vm curves slope downward with increasing bitumen contents, flattening out after reaching a minimum value, although the percentage of bitumen used in this trial was not high enough to reach such a minimum value. The RA mixtures had 3.0% more Vm in G-20 and 7.0% more in S-20 than the respective NA mixtures. On the basis of these results, the RA mixtures can be expected to be less resistant to water action.
3. The flow curve, which rises with bitumen content, was similar for all samples.
4. Upward and downward arms are observed on the stability graph for mixtures S-20-NA and G-20-RA. Mixture G-20-NA, in turn, has an upward arm only and mixture S-20-RA only a downward arm.
5. The bulk specific gravity is slightly lower in RA than in NA mixtures, because compaction is more difficult to achieve in the former.

The above Marshall test findings were used as a basis to determine the proportions of B_o required for each mixture type to comply with the specifications set out in PG-3 for the various traffic categories (Table 3). The proportion of B_o adopted for mixture S-20-NA was 5% of the aggregate by total weight. With this dosage the mixture was compliant for traffic categories T3 and T4. The proportion of B_o used in mixture G-20-NA was 4.25% of the aggregate by total weight, also complying with all T3 and T4 requirements. With 5.90% B_o , mixture S-20-RA was compliant with all specifications for categories T1 through T4. Finally, mixture G-20-RA had 4.75% B_o , with which it complied with only one traffic category, T4. The Marshall test results for the above proportions are given in Table 4.

3.2. Retained ratio

The retained ratio RR(%) results are listed in Table 4. The values obtained for mixtures S-20-NA and G-20-NA were slightly higher than the 75% minimum specified in PG-3 Table 3. The retained ratios found for the RA mixtures failed to meet the Table 3 specifications, with the G-20-RA mixtures exhibiting lower values than the S-20-RA mixes.

At 8%, the total voids in mix value for S-20-RA was not overly high and should determine water penetration and therefore retained ratio values similar to those found for other mixtures with the same voids ratio. One possible explanation might be that in view of the nature of the recycled aggregate, with clay-base materials and concrete, water may have been retained within the mixture, displacing the bitumen and lowering strength values.

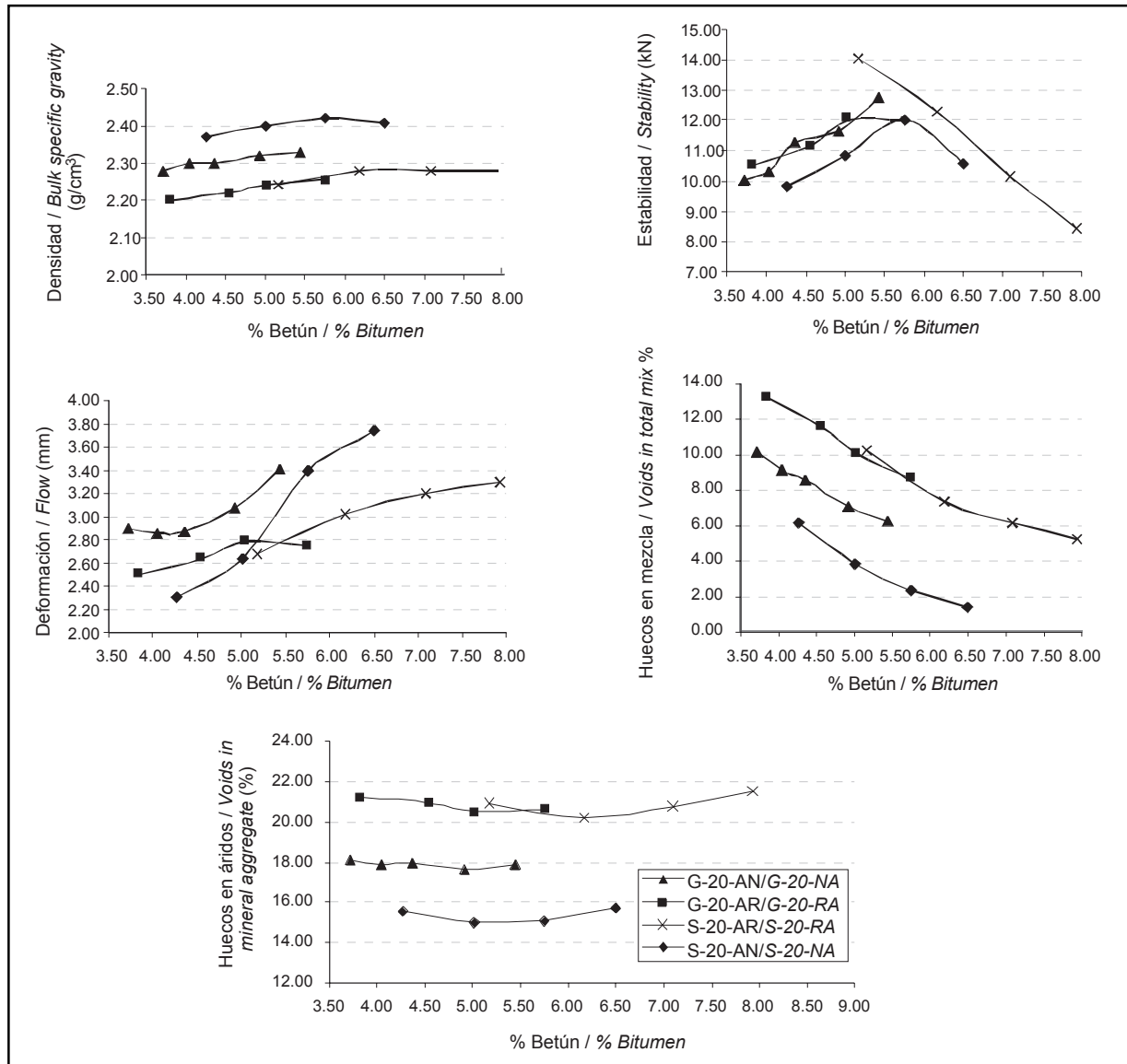


Figura 1. Ensayo Marshall.

Figure 1. Marshall Test.

su interior, desplazando el betún y disminuyendo consecuentemente la resistencia. Los valores tan bajos obtenidos para la G-20-AR se pueden explicar en base al elevado porcentaje de huecos en mezcla que presenta sumado a la naturaleza arcillosa de los RCD (igual que en la mezcla S-20-AR).

3.3. Deformación permanente

Los resultados de la media de las VD de las probetas de las mezclas S-20 se presentan en la Tabla 4. En la mezcla S-20-AN, la velocidad VD es igual a 19,29 $\mu\text{m}/\text{min}$; y en la mezcla S-20-AR es 15,07 $\mu\text{m}/\text{min}$. Ambas cumplen el límite de 20 $\mu\text{m}/\text{min}$. (Tabla 3). Las mezclas G-20 no fueron ensayadas porque no es preceptivo en el PG-3.

The extremely low values obtained for G-20-RA may be attributed to the combined effect of the high percentage of voids in the mixture and the high clay content of the CDD (as in the case of mixture S-20-RA).

3.3. Tracking wheel test

The mean DR values for the S-20 mixture specimens are shown in Table 4. In mixture S-20-NA, the DR was 19.29 $\mu\text{m}/\text{min}$; and in mixture S-20-RA, 15.07 $\mu\text{m}/\text{min}$, both under the 20- $\mu\text{m}/\text{min}$ ceiling (Table 3). The G-20 mixtures were not tested for this parameter, which is not required under PG-3 for such grades. The deformation vs

En la Figura 2 se representan las curvas deformación-tiempo de las dos mezclas. Obsérvese que la mezcla S-20-AN presenta una elevada deformación al principio del ensayo, pero a medida que éste discurre se va estabilizando. En cambio, en la mezcla S-20-AR, al principio del ensayo la deformación es menos elevada que en el caso anterior. En la mezcla S-20-AN la estabilización de VD se produce antes que en la S-20-AR. Hacia el final del ensayo la deformación se va incrementando ligeramente en la S-20-AN, mientras que van decreciendo en la S-20-AR. De no variar esta tendencia, la S-20-AN podría ser poco resistente a largo plazo a las deformaciones plásticas. La mezcla S-20-AR se comporta mejor frente a las deformaciones plásticas.

3.4. Ley de fatiga

Los valores experimentales de ε y N para las mezclas estudiadas están representados en escala logarítmica en las Figuras 3a y 3b. En estas figuras se han incluido también las leyes de fatiga del Centro de Experimentación de Obras Públicas (Cedex) (10) y las contempladas en la Instrucción 6.1-IC (11) para las mezclas G-20 y S-20 para comparar los resultados obtenidos y determinar si el agotamiento que sufren las mezclas ante la presencia de cargas cíclicas está dentro de los límites esperados.

En la Figura 3a se observa que tanto la mezcla G-20-AN como la mezcla G-20-AR presentan un comportamiento a fatiga muy similar. Esto se refleja en que sus pendientes (B) y coeficientes (k) son similares (Tabla 4). Con respecto a las curvas del Cedex y de la Instrucción, las mezclas G-20-AN y G-20-AR, por un lado están situadas sobre la ley Cedex 2; y, por otro lado, están siempre por debajo de la ley de la instrucción (con pendientes ligeramente más pronunciadas).

En la Figura 3b se puede observar que la mezcla S-20-AN y la mezcla S-20-AR presentan un comportamiento a fatiga diferente. La mezcla S-20-AR tiene una pendiente (B) mucho más pronunciada que la mezcla S-20-AN. La ley de la mezcla S-20-AR está dentro de ese intervalo

time curves for the two mixtures are shown in Figure 2. Mixture S-20-NA exhibited substantial deformation at the beginning of the trial, but stabilized as the test progressed. Initially, deformation was smaller in mixture S-20-RA than in S-20-NA, but the DR stabilized sooner in the latter. Towards the end of the test, deformation rose slightly in S-20-NA and declined in S-20-RA. Unless this trend reverses, S-20-NA resistance to plastic deformation would be scant in the long term, while mixture S-20-RA would exhibit better performance in this regard.

3.4. Law of fatigue

The experimental ε and N values for the mixtures under study are shown on a logarithmic scale in figures 3a and 3b. These figures also show the laws of fatigue published by the Public Works Research Centre (Cedex) (10) and the laws set out in Code 6.1-IC (11) for mixtures G-20 and S-20 to compare the results obtained and determine whether the fatigue recorded for the samples was within acceptable limits.

Figure 3a shows that mixtures G-20-NA and G-20-RA reacted similarly to fatigue stress, with similar slope (B) and coefficient (k) values. The laws for the G-20-NA and G-20-RA mixtures are observed to be located above the Cedex 2 law but consistently below the Code law (with slightly steeper curves).

The curves in Figure 3b show that mixtures S-20-NA and S-20-RA exhibited different fatigue behaviour. The slope (B) of the S-20-RA curve is much steeper and its law falls within the interval specified by CEDEX (with a steeper curve), whereas the S-20-NA law is compliant, being

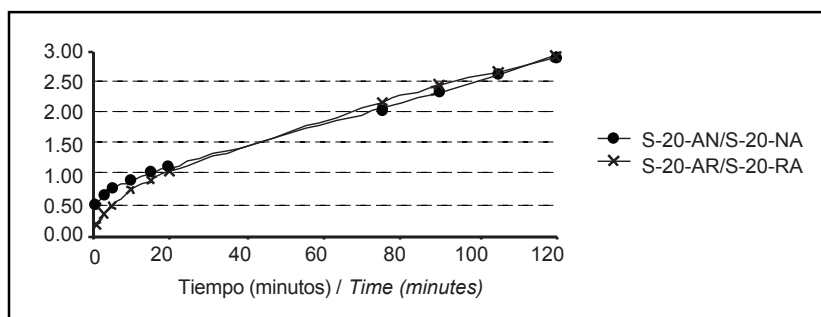


Figura 2. Ensayo de Pista de Laboratorio.
Figure 2. Wheel tracking test.

marcado por el CEDEX (con pendiente más pronunciada) y, por el contrario, la ley de la mezcla S-20-AN se sale favorablemente fuera del mismo (con pendiente mucho menos pronunciada). La pendiente de la ley de la instrucción es más pronunciada que la ley de la mezcla S-20-AN. Para una misma deformación unitaria la ley de la mezcla S-20-AN predice un mayor número de ciclos para llegar al agotamiento que las leyes de la mezcla S-20-AR y de la instrucción. Se puede deducir que las mezclas S-20-AN presentan un mejor comportamiento que las mezclas S-20-AR, aunque el de esta última es aceptable.

3.5. Módulo dinámico

Los valores de los módulos dinámicos se presentan en la Tabla 4. Los valores del módulo dinámico de las mezclas S-20 con betún 60/70 se encuentran dentro de un intervalo usual de 6.000 ± 1.000 MPa (10). En este sentido la mezcla S-20-AN es ligeramente inferior al módulo usual para este tipo de mezclas. Sin embargo, la mezcla S-20-AR está dentro de ese intervalo. Por otra parte, el intervalo de valores de los módulos para las mezclas G-20 con un betún 60/70 es de 5.500 ± 1.000 MPa. En este sentido, la mezcla G-20-AN está por debajo de ese intervalo y la mezcla G-20-AR está dentro del mismo. Se obtienen mezclas de mayor rigidez cuando se añade AR. Las rigideces concuerdan de manera razonable con la capacidad de soportar las cargas de las mezclas, reflejadas en los valores de estabilidad obtenidos en los ensayos Marshall (Figura 1). Estos módulos bajos ponen de manifiesto un punto de debilidad de las mezclas fabricadas con AN. Al no ser lo suficientemente rígidas, con el paso del tráfico, se deformarían de forma excesiva al no absorber de forma adecuada las tensiones. Esto podría favorecer una fisuración temprana de la mezcla más superficial al tener una capa de base poco rígida.

positioned outside that interval (with a much flatter slope). The slope of the Code law is much steeper than the slope of the S-20-NA mixture law. In other words, for a given unit strain, the law for mixture S-20-NA predicts a larger number of cycles to fatigue failure than the S-20-RA and Code laws. The logical inference is that the S-20-VA mixtures perform better than the S-20-RA mixtures, which are nonetheless also acceptable.

3.5. Dynamic modulus of elasticity

The values of the dynamic modulus of elasticity are given in Table 4. For the S-20 mixtures containing bitumen 60/70, these values fall within the standard interval, namely $6,000 \pm 1,000$ MPa (10). In this regard, the mixture S-20-VA modulus was slightly lower than normally found in such mixtures. The mixture S-20-RA value, by contrast, fell within the interval. The modulus value for the G-20 mixtures containing bitumen 60/70, in turn, was $5,500 \pm 1,000$ MPa. Specifically, the G-20-NA mixture value was beneath the lower limit of the interval, whereas the G-20-RA value fell inside the interval. Greater stiffness is obviously achieved when RA is added to the mixture. These stiffness values concur reasonably well with mixture ability to withstand loads, as denoted by the Marshall test stability results (Figure 1). Low modulus values reveal a weak point in mixes made with VA, whose insufficient stiffness would expose them to unacceptable levels of deformation due to their limited ability to absorb stress. This might facilitate premature wearing course fissuring for want of stiffness.

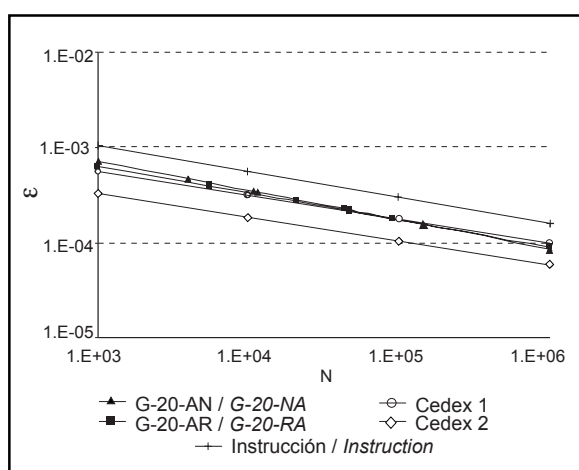


Figura 3a. Leyes de fatiga de las mezclas G-20.
 Figure 3a. G-20 laws of fatigue.

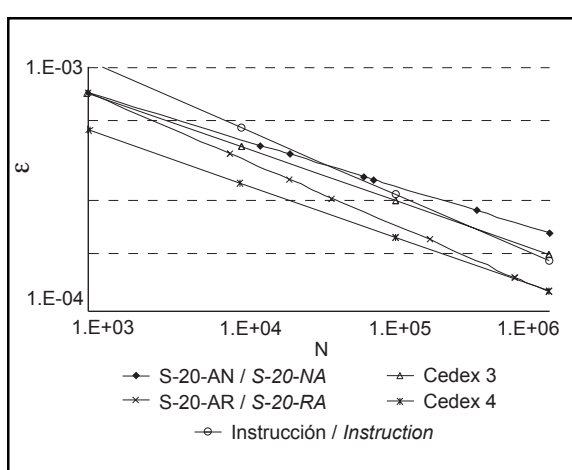


Figura 3b. Leyes de fatiga de las mezclas S-20.
 Figure 3b. S-20 laws of fatigue.

Tabla 4 / Table 4
Resultados de los ensayos
Test results

Mezcla Mixture	Ensayo Marshall / Marshall Test						IC / CI (%)	VD / DV (μ m, min)	Ley de fatiga / Laws of fatigue			MD / DM	φ
	Bo	Ha	Va	Hm	Vm	D / F			k	B	R ²		
OS-20-AN S-20-NA	5.00	15.0	4.0	2.6	10.8	2.4	76.99	19.29	0.0029	-0.1903	0.8575	3866	45.85
S-20-AR S-20-RA	5.90	20.2	8.0	2.9	12.6	2.28	63.72	15.07	0.0051	-0.2716	0.9697	5016	35.05
G-20-AN G-20-NA	4.25	18.0	8.9	2.8	11	2.3	79.34	---	0.0060	-0.3064	0.8620	4086	37.71
G-20-AR G-20-RA	4.75	20.9	11.0	2.7	11.5	2.22	50.26	---	0.0045	-0.2823	0.9502	4675	37.05

3.6. Ángulo de desfase

En la Tabla 4 se exponen los resultados del ajuste de las funciones tensión y deformación en el ciclo 200. Estos valores de desfase se encuentran dentro de lo normal, resultando muy parecidos a los obtenidos por otros autores (12). La mezcla S-20-AR es la más elástica (tiene además el mayor módulo), mientras que la mezcla S-20-AN (con el menor módulo de todas) es la más viscosa.

3.6. Phase difference

Table 4 gives the results of fitting the stress and strain functions in the 200th cycle. The phase difference values are normal and similar to the figures reported by other authors (12). Mix S-20-RA is the most elastic (exhibiting the highest modulus), whereas mixture S-20-NA (with the smallest modulus) is the most viscous.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se pueden extraer de este trabajo de investigación son las siguientes:

1. Se ha podido llevar a cabo una dosificación de mezclas bituminosas que contienen árido reciclado en un 50% de peso en todas las fracciones. Estas mezclas tienen un contenido de betún superior al de las mezclas realizadas sólo con árido natural y además necesitan una mayor cantidad de filler, y sólo así se han podido cumplir los requisitos que el PG-3 establece para los parámetros obtenidos en el ensayo Marshall en carreteras de bajo tráfico. Por otro lado, no se ha podido realizar una dosificación de mezclas realizadas únicamente con árido reciclado.
2. Las mezclas realizadas con árido natural presentan un comportamiento adecuado a la acción del agua, cumpliendo los requisitos establecidos para el ensayo de inmersión-compresión, mientras que las mezclas realizadas con un 50% de árido reciclado presentan una pérdida de resistencia excesiva.
3. En general las mezclas S-20 se comportan bien frente a las deformaciones plásticas, cumpliendo con los valores exigidos en el PG-3 para carreteras de bajo tráfico.
4. En cuanto a las leyes de fatiga obtenidas, éstas son muy parecidas a las de otros autores. Los valores del módulo dinámico son razonables, siendo mayores en mezclas con árido reciclado al 50%.

4. CONCLUSIONS

The main conclusions that can be drawn from this study include:

1. Bituminous mixtures containing 50% recycled aggregate by weight in all fractions were successfully manufactured. These mixtures required a higher bitumen as well as a higher filler content than virgin aggregate mixtures to meet the PG-3 specifications regarding the Marshall test parameters for roads with light traffic. Mixtures containing recycled aggregate only failed to reach the necessary consistency.
2. The natural aggregate mixtures exhibited satisfactory resistance to water action, meeting the immersion-compression test requirements, while the retention rate found for mixtures made with 50% recycled aggregate was not standard-compliant.
3. S-20 mixtures withstood plastic strain well, meeting the PG-3 requirements for lightly travelled roads.
4. The laws of fatigue obtained were similar to those reported by other authors. Reasonable dynamic modulus of elasticity values were observed, and proved to be higher in mixtures containing 50% recycled aggregate.

5. De acuerdo a las conclusiones anteriores se puede decir que existe la posibilidad de uso de mezclas realizadas con árido reciclado en carreteras de bajo tráfico. No obstante, todavía hay que seguir investigando en las distintas soluciones que se pueden introducir para mejorar el comportamiento frente al agua. Así, se presenta una serie de alternativas para alcanzar resultados más favorables en el futuro, entre las que se destacan:

- Selección de áridos reciclados de mejor calidad
- Disminución de la proporción de árido reciclado en la mezcla
- Utilización de filleres de aportación como cal y cemento
- Utilización de betunes más duros o modificados

5. Pursuant to the above conclusions, mixtures made with recycled aggregate can be used to build roads where traffic intensity is low. Nonetheless, solutions must be explored to improve resistance to water. A number of alternatives may be considered to obtain more favourable results in the future, namely the use of:

- Higher quality recycled aggregate
- Lower proportions of recycled aggregate in the mixture
- Lime and cement fillers
- Harder or modified bitumen

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Ministerio de Medio Ambiente: "Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006", *BOE*, nº 166 (2001), pp. 25305-25313.
- (2) Sánchez de Juan, M.: "Estudio sobre la utilización de áridos reciclados para la fabricación de hormigón estructural". p. 505. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 2004.
- (3) González, B. y Martínez, F.: "Hormigones con áridos reciclados: estudio de propiedades de los áridos y de las mezclas", *Mater. Construcc.*, vol. 55, nº 279 (2005), pp. 53-66.
- (4) Park, T.: "Application of Construction and Building Debris as Base and Subbase Materials in Rigid Pavement", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 129, nº 5 (2003), pp. 558-563.
- (5) Bennert, T.; Papp, W.; Maher, A. y Gucunski, N.: "Utilization of construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications", *Transportation Research Record*, nº 1714 (2000), pp. 33-39.
- (6) Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). UNE-146131: "Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas estructurales de firmes", Anexo A (informativo), Áridos reciclados, Madrid, 2003.
- (7) Dirección General de Carreteras: "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3", *Ministerio de Fomento*, Ediciones Liteam, Madrid, 2002.
- (8) Dirección General de Carreteras: "Normas NLT. Ensayos de carreteras", *Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT)*, 2ª Edición, Madrid, 1992.
- (9) Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR): "Manual de normas técnicas UNE-EN". *Serie construcción. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras*, Madrid, 2001, p. 526.
- (10) García, J.: "Caracterización de módulos, fatiga y otros ensayos dinámicos", *Jornada sobre caracterización y control de mezclas bituminosas*, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 2000, p. 21.
- (11) Dirección General de Carreteras: "Secciones de firme de la Instrucción de Carreteras IC", *Ministerio de Fomento*, Ediciones Liteam, Madrid, 2002, p. 36.
- (12) Alarcón, J.: "Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta". *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona, 2003, p. 232.

* * *