

Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos Silestone®

Mechanical properties of hot bituminous mixes manufactured with recycled aggregate of Silestone® waste

M. C. Rubio^(*), A. Menéndez^(*), F. Moreno^(*), A. Belmonte^(**), A. Ramírez^(**)

Recepción/Received: 4-VI-09
Aceptación/Accepted: 21-X-09
Publicado online/Online publishing: 4-III-11

RESUMEN

Este artículo muestra los resultados de un proyecto de investigación que tiene por objeto analizar la viabilidad de incorporación de residuos procedentes de piedra decorativa en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

Para ello se fabricaron mezclas con áridos reciclados de residuos procedentes de piedra decorativa en distintos porcentajes, realizando un conjunto de ensayos que posibilitaron caracterizar el comportamiento mecánico de dichas mezclas. Los resultados obtenidos fueron similares a los de las mezclas convencionales fabricadas con áridos vírgenes procedentes de cantera. Los valores de resistencia conservada ante la acción del agua y deformación en pista, pusieron de manifiesto la aptitud del residuo incluso ante las condiciones de tráfico más exigentes. Los trabajos realizados en el laboratorio indican que la utilización del residuo en la fabricación de mezclas bituminosas es técnicamente viable, pudiendo obtenerse áridos reciclados de gran calidad y bajo coste para uso en firmes de carreteras.

Palabras clave: reutilización de residuos, mezclas bituminosas, propiedades mecánicas, áridos reciclados.

SUMMARY

This article presents the results of a research project which analyzes the viability of incorporating waste material from decorative quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes.

For this purpose, various bituminous mixes were manufactured with waste aggregate in different percentage. A set of tests were carried out that permitted the characterization of the mechanical behavior of these mixes. The results of these tests were similar to the results obtained when conventional mixes made from virgin quarry aggregate were tested. The results for moisture sensitivity as well as for wheel track rutting on mixes showed the optimal performance of this waste material even under very demanding traffic conditions. Laboratory studies showed that the use of this waste material in the manufacture of bituminous mixes is technically viable and can provide high-quality recycled aggregates at a very low cost, which can be used in the pavement of road.

Keywords: waste recycling, bituminous mixes, mechanical properties, recycled aggregates.

^(*) Universidad de Granada (Granada, España).

^(**) Sacyr (Madrid, España).

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de sostenibilidad se ha convertido en uno de los objetivos primordiales de la sociedad actual. Así, cada vez más, en la industria de la construcción se exige una utilización eficaz de los materiales y una reducción y valorización de los residuos. Buena prueba de ello es la proliferación del marco normativo al respecto, donde se demuestra el esfuerzo llevado a cabo por las diferentes administraciones para fomentar el uso racional de los recursos naturales y disminuir el volumen de los vertidos (1-3).

La ingeniería de carreteras, dada la envergadura de sus actuaciones, es una gran consumidora de estos recursos. Como consecuencia de ello, y vista la necesidad de adaptación a la política de desarrollo sostenible, comienzan a aparecer en el sector nuevas aplicaciones de residuos capaces de sustituir a los áridos naturales de uso convencional (4-9). El aprovechamiento de estos residuos permite disminuir el impacto causado por la actividad constructiva, ayudando a frenar los efectos medioambientales que supone la explotación de canteras y disminuyendo en parte el consumo energético de dicha actividad.

En la comarca de Almansora (Almería), la empresa Cosentino S.A. (10) produce más de 10.000 toneladas anuales de desechos procedentes de la fabricación de Silestone® (material destinado a la fabricación de encimeras de cocina, elementos decorativos, y revestimiento de suelos y paredes). Estos residuos se acumulan en vertederos de la zona, con los costes ambientales y económicos que ello conlleva. Teniendo en cuenta las tendencias del sector anteriormente reseñadas, y dado que a día de hoy no existe ninguna salida eco-eficiente para dichos residuos, desde esta investigación se ha estudiado su aptitud como árido en la fabricación de mezclas asfálticas.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Debido a la falta de conocimientos sobre el posible comportamiento del residuo como parte de una mezcla bituminosa, el tipo de mezcla elegido para desarrollar el estudio fue una F10 (actualmente denominada BBTM 11A desde la entrada en vigor de la Norma UNE-EN 13108-2), mezcla utilizada en capa de rodadura (la más exigente), de manera que si cumplía las condiciones establecidas para ésta, su uso pudiera generalizarse para mezclas de capas de base o intermedias. Así, se diseñaron cuatro mezclas del tipo F10 cuyas granulometrías combinaban en distintas proporciones áridos naturales (ofita y caliza) y áridos reciclados procedentes de Silestone®. De la misma forma, con el fin de comparar los resultados obtenidos en dichas mezclas con otra de referencia, se dosificó otra F10, únicamente fabricada con áridos naturales. Las dosificaciones de las mezclas se hicieron de

1. INTRODUCTION

The concept of sustainability has become one of the major priorities in society today. For this reason, there is a rising demand for the construction industry to make effective use of resources as well as to reduce and reuse waste materials. Evidence of this is the increasing number of legal regulations and requirements that reflect the efforts of national and local governments to foment the rational use of natural resources and to reduce the volume of waste materials (1-3).

Because of the complexity and impact of road construction, highway engineering is an important consumer of natural resources. The need to adapt construction methods and processes so that they are in harmony with policies of sustainable development has led the road construction sector to contemplate the use of waste materials as a substitute for conventional virgin aggregate (4-9). The exploitation of such wastes reduces the negative effects of construction activities by mitigating the negative environmental impacts caused by quarry exploitation. It also has the advantage of decreasing energy consumption in construction.

In the region of Almansora (Almería, Spain), Cosentino S. A. (10) produces more than 10000 tons of industrial waste per year. This waste is generated by the Silestone® industry, which manufactures engineered quartz for kitchen countertops, decorative surfaces, floors, and wall panelling. This waste accumulates in local landfills with the resulting costs to both the economy and the environment. One of the objectives of our study was to see if this waste could be reused as aggregate for the elaboration of asphalt mixes. Our research was motivated by the priority now given to the rational use of resources and to sustainable development. An added consideration was the absence of an existing eco-efficient solution for Silestone® waste.

2. EXPERIMENTAL STUDY

Because of the lack of knowledge regarding the performance of Silestone® waste as part of a bituminous mix, the type of mix selected for our study was an F10 mix (now known as BBTM 11A, according to the UNE-EN 13108-2). This type of mix is currently used for the surface course, which is the top layer of the road pavement, and as such, must be durable enough to sustain the weight of heavy traffic. As a result, it was hypothesized that if the mix made of Silestone® waste performed well under such demanding conditions, it could also be used for other underlying road layers at the base and intermediate levels. Accordingly, four F10 mixes were designed, whose grain-sizes combined different percentages of natural aggregate (i.e. ophite and limestone) and of Silestone® aggregate. In order to better compare the results of these mixes with those of another

acuerdo con el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (11).

type of mix, a fifth F10 mix was elaborated, which was solely composed of natural aggregate. All of the job-mix formulas were manufactured according to the "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes" (Spain's General Technical Specifications for Road and Bridge Construction), also known as PG-3 (11).

2.1. Definición de las mezclas

Las mezclas F (de capa fina) son uno de los dos tipos de mezclas bituminosas discontinuas para rodadura. Se colocan en espesores comprendidos entre los 2 y 3,5 cm y están formadas por un 65-80% de árido grueso, 20-35% de árido fino y un 7-10% filler. Su contenido en ligante es igual o superior al 5,5% (12). En la Tabla 1 se muestran las características generales de este tipo de mezclas:

2.1. Definition of the mixes

The F (fine layer) mix is one of two types of discontinuous bituminous mixes for surface courses. This mix is extended in thicknesses of 2-3.5 cm, and is composed of 65-80% coarse aggregate, 20-35% fine aggregate, and 7-10% filler. The binder content is equal to or greater than 5.5% (12). Table 1 shows the general characteristics of this type of mix:

Tabla 1 / Table 1
 Características de las mezclas F10 según PG-3. Orden Fom/891/2004 F10 Mix.
 Characteristics, according to the PG-3. Ministerial Order Fom/891/2004.

Características F10 / F10 Characteristics							
Huso granulométrico / Particle grain size	Tamaño del Tamiz (mm) / Sieve size / mm)	12.5	10	4	2	0.5	0.063
	% que pasa / % of material passing	100	75-97	23-38	18-32	11-23	7-9
Equivalente de arena del árido combinado / Sand equivalent of the combined aggregate	>50						
Proporción de partículas trituradas del árido grueso (% caras de fractura) (T00 a T2) ¹ / Percent of fractured face (or coarse aggregate angularity) ¹	100%						
Forma del árido grueso (índice de lascas) (T00 a T2) / Flakiness index	≤20						
Coef. Desgaste Los Ángeles (T00 a T2) / Los Angeles abrasion coefficient	≤20						
Resistencia al pulimento del árido grueso (CPA) (T0 a 2) / Resistance of coarse aggregate to polishing (accelerated polishing coefficient (APC)) (T0 to T2)	≥50						
Limpieza del árido grueso / Cleaning of coarse aggregate	<0.5%						
Proporción de polvo mineral de aportación (T00 a T2) / Percent of fill mineral dust (T00 to T2)	100%						
Dotación mínima de ligante* / Minimum binder content*	5.5 %						
Relación Filler-Betún / Filler-bitumen relation	1.3 a 1.7						
Ensayo Marshall / Marshall Test	Nº de golpes cada cara / Nº of blows on each end of the sample						50
	Estabilidad (kN) / Stability (kN)						>7.5
	Huecos mezcla (%) / (%) Air voids in the mix						>4
Resistencia conservada inmersión-compresión / Immersion-compression test (retained stability)	≥75%						
Resistencia a def. plásticas mediante pista en el intervalo 105 a 120 min (T00 a T2) y zona térmica templada / Resistance to plastic deformation or wheel tracking test in the interval of 105 to 120 min (T00 to T2) and a temperate climate zone	≤15 µm/min						

*Susceptible de corrección volumétrica en base a PG-3, OC 24/2008 / *Susceptible to volume correction, based on PG-3, OC 24/2008.

¹ Categorías de tráfico pesado: T00 (IMD_p≥4000), T0 (2000≤IMD_p<4000), T1(800≤IMD_p<2000) y T2 (200≤IMD_p<800). IMD_p: Intensidad media diaria de vehículos pesados (vehículos pesados/día). / ¹ Heavy vehicle categories: T00 (MDI_h≥4000), T0 (2000≤MDI_h<4000), T1(800≤MDI_h<2000) y T2 (200≤MDI_h<800). MDI_h: Mean daily intensity of heavy vehicle traffic (heavy vehicles/day).

Para caracterizar tanto los materiales, como las mezclas en sí, se utilizaron las Normas Técnicas Españolas NLT (13) (Ensayos de Carreteras) del Centro de Estudio de Carreteras y las Normas UNE-EN (14) de las Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

Betún. El betún utilizado en la fabricación de las mezclas es el mismo que se usa para la conformación de mezclas F10 convencionales. Se trata de un BM3b (betún modificado categoría 3b) que cumple con todas las prescripciones marcadas por el PG-3, con una penetración (NLT-124) de 55, un valor del punto de reblandecimiento de anillo y bola (NLT-125) igual a 89,60 °C, y con una recuperación elástica a 25 °C (NLT-329) de 84. El empleo de este betún posibilita el empleo de las mezclas en multitud de circunstancias de tráfico y climas.

Áridos naturales. Los áridos naturales utilizados fueron proporcionados por canteras en fracciones 0/3 de material calizo y 6/12 de ofita. En la Tabla 2 se reflejan las características principales de dichos áridos:

For the characterization of materials as well as mixes, the standards used were the Spanish Technical NLT Standards (13) (Road Tests) of the "Centro de Estudio de Carreteras" (Road Study Center) and the Spanish standard UNE-EN (14) of the Spanish Standards Association (AENOR)

Bitumen. *The bitumen used to manufacture the mixes was the same as that used for the conventional F10 mix of the highway section. It was BM3b (modified bitumen, category 3B), which meets all of the PG.3 requirements. It thus has a penetration value (NLT-124) of 55, a ring and ball softening point value (NLT-125) of 89.60 °C, and an elastic recovery (NLT-329) at 25 °C of 84. This bitumen made it possible to use mixes in a wide variety of vehicle traffic and climate situations.*

Natural aggregate. *The natural aggregate in the mixes was provided by a quarry in fractions 0/3 (limestone) and 6/12 (ophite). Its main characteristics are defined in Table 2.*

Tabla 2 / Table 2
Resultados de los ensayos de los áridos utilizados en la fabricación de las mezclas.
Test results for the aggregate types used in the mixes.

Ensayo / Test		Resultados / Results			
		Árido grueso / Coarse aggregate (6/12)		Árido fino / Fine aggregate (0/3)	
		Ofita / Ophite	Silestone®	Caliza / Limestone	Silestone®
Tamiz / Sieve		% que pasa / % of material passing	% que pasa / % of material passing	% que pasa / % of material passing	% que pasa / % of material passing
Granulometría (UNE-EN 933-1) / Grain size (UNE-EN 933-1)	12.5	97	100	100	100
	10	73	85	100	100
	4	0	6	100	100
	2	0	0	80	83
	0.5	0	0	32.7	33
	0.063	0	0	13.5	3
Equivalente de arena según UNE-EN 933-8 / Sand equivalent according to UNE-EN 933-8		-	-	63	93
Proporción de partículas trituradas según UNE-EN 933-5 / Percent of fractured face according to UNE-EN 933-5		100%	100%	-	-
Forma del árido grueso (índice de lajas) según UNE-EN 933-3 / Formation of coarse aggregate (flakiness index) according to UNE-EN 933-3		5%	18%	-	-
Resistencia a la fragmentación del árido grueso (Coeficiente Los Ángeles. CDLA) según UNE-EN1097-2 / Resistance to fragmentation of the coarse aggregate (Los Angeles Abrasion Coefficient, LAAC) according to UNE-EN1097-2		10.6	11.15	-	-
Resistencia al pulimento del árido grueso (CPA) según anexo D de la UNE 146130 /		0.51	0.51	-	-
Limpieza del árido grueso (contenido de impurezas) según anexo C de la UNE 146130 / Resistance of coarse aggregate to polishing (Accelerated Polishing Coefficient, APC) according to annex D of UNE 146130		0.11%	0.035%	-	-

Tabla 2 / Table 2 (Cont.)
 Resultados de los ensayos de los áridos utilizados en la fabricación de las mezclas.
 Test results for the aggregate types used in the mixes.

Ensayo / Test		Resultado / Results			
		Árido grueso / Coarse aggregate (6/12)		Árido fino / Fine aggregate (0/3)	
		Ofita / Ophite	Silestone®	Caliza / Limestone	Silestone®
Densidad relativa y absorción (NLT-153) / Relative density and absorption(NLT-153)	Den. rel. aparente / Apparent Relative Density	3.10 g/cm ³	2.38 g/cm ³	2.79 g/cm ³	2.33 g/cm ³
	DRASSS */ ARDSSB*	3.13 g/cm ³	2.36 g/cm ³	2.80 g/cm ³	2.31 g/cm ³
	Densidad relativa real / Real Relative Density	3.20 g/cm ³	2.35 g/cm ³	2.83 g/cm ³	2.30 g/cm ³
	Coef. de absorción / Absorption Coefficient	1.04%	0.75-3.14%	0.4%	0.56%

*DRASSS: Densidad Relativa Aparente Superficie Saturada Seca / *ARDSSB: Apparent Relative Density on a Saturated Surface-Dry Basis.

Como se observa si comparamos los resultados con la Tabla 1, ambos áridos cumplen las especificaciones del PG-3, para áridos de mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura con tráficos hasta T0 según la Orden FOM/891/2004.

Áridos reciclados. Según datos recogidos en su patente (número de publicación ES-2.187.313), Silestone® está compuesto por una mezcla de materiales pétreos de distinta granulometría, principalmente sílice, cuarzo y granito, y una resina de poliéster insaturado que proporciona consistencia a la mezcla (además de otros materiales como cristales, espejos, plásticos, pigmentos y otros aditivos, que son adicionados en menor medida). El proceso de fabricación del material se realiza por vibro-compresión al vacío. Los materiales son almacenados en silos y mezclados posteriormente con la resina de poliéster. Una vez realizada y homogeneizada la mezcla, ésta es colocada sobre moldes adosados a una mesa vibratoria donde sufre el proceso de vibro-compresión obteniendo como resultado una tabla de dimensiones variables. Tras finalizar dicho proceso, el material pasa a un horno de catálisis a una temperatura de unos 85 °C, que propiciará el endurecimiento final de dicha tabla.

El residuo del material estudiado para su posible valorización es el procedente de los recortes sobrantes de estas tablas. Los espesores de dichas tablas varían entre 1,5 y 3 cm, y como hemos comentado anteriormente su materia prima es fundamentalmente micronizado de sílice y resina de poliéster.

Para poder reutilizar dicho residuo fue necesario dar un tratamiento previo hasta conseguir las diferentes fracciones a adicionar en la conformación de las mezclas bituminosas. El tratamiento dado fue un proceso de machaqueo consistente en una reducción de los tejos de las tablas residuo a una fracción 0/200 mediante una machacadora de mandíbulas, para posteriormente, mediante el empleo de un molino de impactos obtener las fracciones definitivas 0/3 y 6/12 a adicionar en el aglomerado.

As can be observed, when compared with the results in Table 1, both aggregate types conform to the PG-3 specifications for aggregate in discontinuous hot bituminous mixes for surface courses with vehicle traffic up to T0, according to Ministerial Order FOM/891/2004.

Recycled aggregate. According to its patent information (publication number ES-2.187.313), Silestone® is composed of a mixture of stone materials of various grain sizes, mainly natural quartz, granite, and silica sand aggregate (along with small quantities of other materials such as ground glass, crushed mirror, plastics, pigments, and other additives), combined with a polymerized thermosetting polyester resin to give the mixture greater consistence. The manufacturing process for artificial stone sheets is performed by means of vibro-compression under vacuum. The materials are stored in silos, and then mixed with the polyester resin. When the mixture is homogenized, it is placed in moulds (of varying dimensions), and attached to a vibratory table, where it then undergoes vibro-compression. The result is a stone sheet that can have various dimensions. After this process is finished, the sheet is placed in a catalytic oven at a temperature of approximately 85 °C to harden.

The waste material assessed in this study was scrap material from these stone sheets, which were a by-product of the manufacturing process. The thickness of these stone sheets varied from 1.5 cm to 3 cm. As previously mentioned, the raw material was basically micronized silica and polyester resin.

In order to reuse this waste, it had to be treated in order to obtain the different fractions that were used in the bituminous mixes. This process involved reducing the stone chips to a size fraction of 0/200 by means of a jaw crusher. Subsequently, an impact crusher was used to obtain fractions of 0/3 and 6/12, which were the sizes required for the aggregate.

En la Tabla 2 se recogen las granulometrías obtenidas para cada una de las fracciones tras el proceso de machaqueo y, los resultados de los diferentes ensayos a los que fueron sometidos los áridos Silestone®. Del análisis de éstos, además de observar que todos cumplen con las exigencias marcadas por el PG-3 para áridos de capas de rodadura, podemos destacar los buenos valores obtenidos al desgaste y en resistencia al pulimento. Al contrario que con las propiedades de forma, (índice de lajas o caras de fragmentación), donde cambiando el proceso de machaqueo pueden mejorarse los resultados obtenidos, los valores de CPA y CDLA son los más difíciles de cumplir por un árido, ya que si no poseen dichas propiedades, es prácticamente imposible tratarlos para mejorarlas.

Filler. El filler utilizado en la conformación de las mezclas fue en su totalidad de aportación (cemento), tal y como indica la normativa (Tabla 1).

Mezclas bituminosas Silestone®. A partir de las fracciones granulométricas de los distintos áridos a utilizar en la mezcla (caliza, ofita y Silestone®) se procedió a realizar los tanteos para encajar los husos granulométricos de las fórmulas de trabajo en el de las mezclas tipo F 10 que marca el PG-3 (Tablas 3 y 4).

Table 2 gives the particle sizes obtained for each size fraction after the crushing process as well as the results of the test results for the Silestone aggregate®. The results showed that this aggregate fulfilled PG-3 specifications for surface course aggregate. Especially outstanding were the excellent values obtained for resistance fragmentation and resistance to polishing. Unlike the shale properties (flakiness index and percent of fractured faces), where by varying the crushing process, it is possible improve the results obtained, the APC and the LAAC values are the most difficult for an aggregate to fulfil. If an aggregate does not possess these basic properties, there is no treatment that can easily remedy this condition.

Filler. *The only fill material used in the mixes was cement, as specified in the regulations for this type of mix (see Table 1).*

Silestone® bituminous mixes. *Based on the particle size fractions of the different aggregates in the mixes (limestone, ophite, and Silestone®), trials were run to fit the grain sizes of these job-mix formulas to those of F10 mixes, as specified in the PG-3 specifications (Tables 3 & 4).*

Tabla 3 / Table 3
 Dosificación óptima de los áridos.
 Optimal quantities of aggregates.

Fórmulas de trabajo / Job-mix Formula						
F 10-convencional / Conventional F 10	Fracción / Fracción	6/12		0/3		Filler
	Composición / Composición	70% ofita		23% caliza		7% cemento
F 10-1	Fracción / Fracción	6/12		0/3		Filler
	Composición / Composición	30% Silestone®	38% ofita / ophite	13% Silestone®	15% caliza / limestone	4% cemento / cement
F 10-2	Fracción / Fracción	6/12		0/3		Filler
	Composición / Composición	36% Silestone®	36% Ofita	24% caliza		4% cemento / cement
F 10-3	Fracción / Fracción	6/12		0/3		Filler
	Composición / Composición	73% Silestone®		21.4% caliza		5.6% cemento / cement
F 10-4	Fracción / Fracción	6/12		0/3		Filler
	Composición / Composición	67.7% Silestone®		25% Silestone®		7.3% cemento / cement

A partir de estas dosificaciones se obtuvieron las granulometrías de los áridos combinados:

The combined grain-size curves were obtained from these dosages

Tabla 4 / Table 4
 Granulometría de las mezclas estudiadas.
 Grain size of the Mix Formulas studied.

Tamices UNE / UNE Sieves	F 10-convencional (% que pasa) / Conventional F 10 (% of material passing)	F 10-1 (% que pasa) / F 10-1 (% of material passing)	F 10-2 (% que pasa) / F 10-2 (% of material passing)	F 10-3 (% que pasa) / F 10-3 (% of material passing)	F 10-4 (% que pasa) / F 10-4 (% of material passing)
12.5	100	99.3	95.4	99.3	100
10	75.4	86.6	77.6	91.3	89
4	30.5	32.9	31.6	34.6	36
2	27.0	25.4	27.1	23.9	28
0.5	14.1	13.1	14.3	12.5	16
0.063	8	7.0	8.0	8.4	8

2.2. Ensayos mecánicos

Para llevar a cabo la caracterización de las propiedades mecánicas de las mezclas, se realizaron los ensayos Marshall, inmersión-compresión y resistencia a la deformación plástica, como así especifica el PG-3.

Marshall (NLT 169). Para determinar el contenido óptimo de betún a emplear en cada una de las fórmulas de trabajo, se compactaron cuatro series de probetas cilíndricas, de 101,6 mm de diámetro por 63,5 mm de alto, para cada una de dichas fórmulas. Cada serie se fabricó con la misma granulometría (la correspondiente a cada fórmula) variando el porcentaje de betún añadido sobre el peso del árido. Para cada porcentaje de betún se calculó la media de los siguientes parámetros: huecos en áridos (Ha) en %, huecos en mezcla (Hm) en %, densidad aparente (Da) en g/cm³, deformación (D) en mm y estabilidad (E) en kN. El criterio de elección de contenido óptimo de betún se realizó en base a lo establecido en el PG-3 para este tipo de mezclas (Tabla 1). En el resto de ensayos, la cantidad de betún utilizado en la fabricación de las probetas fue dicho porcentaje óptimo.

Inmersión-compresión (NLT 162). Según se especifica en la norma, para llevar a cabo este ensayo es necesaria la fabricación de 10 probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de alto. Dichas probetas son separadas en dos grupos de cinco, de los cuales, un grupo es sumergido en un baño con agua a 60 °C durante 24 horas, y el otro grupo se deja a temperatura ambiente. Una vez transcurridas las 24 horas, ambos grupos de probetas son sometidos a una carga de compresión simple hasta su rotura, obteniendo de esta forma un valor medio de resistencia en cada uno de los grupos. El resultado de este ensayo que mide la sensibilidad de las probetas a la acción del agua es el índice de resistencia conservada. Dicho índice (expresado en %) se calcula dividiendo la resistencia obtenida por el grupo que estuvo inmerso a 60 °C entre la resistencia obtenida por el seco. Según el PG-3 los valores de índice de resistencia

2.2. Mechanical Tests

The mechanical properties of the mixes were characterized by performing the Marshall Test, the immersion-compression test, and the wheel tracking test, as specified in the PG-3.

Marshall Test (NLT 169). In order to determine the optimal bitumen content in each of the job-mix formulas, four series of cylindrical test specimens with a diameter of 101.6 mm and a height of 63.5 mm were manufactured with each of the formulas. Each series had the same grain size (the one corresponding to each formula) though the bitumen content varied in relation to the weight of the aggregate. For each bitumen content, the mean value of the following percentages was calculated: (i)% of voids in aggregate (Va); (ii)% of voids in mix (Vm); (iii) apparent density (Ad) in g/cm³; (iv) deformation (D) in mm; (v) stability (S) in kN. The criterion for selecting the optimal bitumen content for each job mix formula was defined according to the PG-3 specifications for this type of mix (see Table 1). In all the tests, the quantity of bitumen used in the test specimens was this optimal percentage.

Immersion-Compression Test (NLT 162). As specified in the regulations, in order to carry out the immersion-compression test, ten test specimens were manufactured with a diameter of 101.6 mm and a height of 101.6 mm. These specimens were divided into two sets of five. One set was submerged in a water bath at 60 °C for 24 hours, whereas the other set remained dry at room temperature. After a period of 24 hours, both sets of specimens were subjected to a compression load until they broke. This determined the mean compressive strength of each set of specimens. The result of this test, which measures the imperviousness of the specimens to the action of water, is the index of retained strength. This index (expressed in %) was calculated by dividing the compressive strength of the set of specimens submerged in water at 60 °C by the compressive strength of the set that remained dry at room temperature. According to the

conservada en mezclas tipo F10 deben ser superiores al 75% (Tabla 1).

Resistencia a deformaciones plásticas mediante ensayo en pista (NLT 173). En la ejecución de este ensayo son necesarias tres probetas prismáticas de dimensiones 300x300x50 mm. El ensayo consiste en someter a las probetas al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. Según se especifica en el PG-3, la media de la velocidad de deformación en el intervalo de tiempo comprendido entre los 105 y los 120 min desde el comienzo del ensayo, determinará la validez o no de la mezcla (Tabla 1).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de los ensayos Marshall

A continuación se exponen (Figuras 1-5) los resultados obtenidos tras la realización del ensayo Marshall a cada una de las mezclas. Como hemos comentado anteriormente, en función de los resultados obtenidos en él, determinaremos el contenido óptimo de betún a adicionar en las mezclas. Si observamos en la Tabla 1 las prescripciones que presenta el PG-3 al respecto son un contenido de huecos mezclas superior al 4%, y una estabilidad superior a 7,5 kN, en este orden podemos decir que, todas las mezclas formuladas cumplen con dichos requisitos.

A la vista de los resultados podemos decir que las densidades de las mezclas estudiadas disminuyen con la cantidad de árido Silestone® incorporado (la más densa es la F10-convencional y la menos densa la F10-4 con 100% árido reciclado), esto es debido a la menor densidad que presentan los áridos Silestone® frente a los naturales.

Por otra parte todas las curvas de estabilidad presentan la misma tendencia, siendo la de la F10-2 (la que menos árido reciclado lleva incorporado) muy similar a la de la F10-convencional, tal y como era de esperar.

Las curvas de huecos en mezclas presentan también una pendiente descendente muy similar entre la F10-2 y la F10-convencional, teniendo ésta un porcentaje de huecos un tanto inferior. Por su parte las curvas obtenidas F10-1, F10-3 y F10-4 presentan una tendencia similar entre sí. Hemos de decir que, a pesar de que el PG-3 limita el porcentaje de huecos a un mínimo del 4%, la experiencia en el uso de estas mezclas nos dice que el porcentaje óptimo de huecos suele estar en el entorno del 6-9%. En nuestro caso, tanto la F10-convencional

PG-3, the values of the index of retained strength in F10 mixes should be greater than 75% (see Table 1).

Resistance to plastic deformation or wheel-tracking test (NLT 173). The wheel tracking test requires three prismatic specimens with dimensions of 300x300x50. The test consisted in subjecting the specimens to alternating passes of a loaded wheel at certain conditions of contact pressure and temperature, and periodically measuring the depth of the resulting deformation. As specified in the PG-3, the mean deformation speed in a time interval of 105-120 minutes from the beginning of the test determines the viability of the mix (see Table 1).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Results of the Marshall Tests

Figures 1-5 show the results obtained after performing the Marshall Test on each of the mixes. As previously mentioned, these results were a crucial factor in determining the optimal content of bitumen in the mixes. As shown in Table 1, the PG-3 specifications in this regard are a percent of air voids greater than 4% and a stability of more than 7.5 kN. Thus, all of the mixes evidently meet these requirements.

Based on these results, it was observed that the densities of the mixes decreased in direct relation to their content of Silestone® aggregate. Consequently, the conventional F10 mix had the highest density and the F10-4 mix with 100% recycled aggregate had the lowest density. This was due to the fact that Silestone® aggregate is less dense than natural aggregate.

Moreover, all of the stability curves showed the same tendency. As expected, the curve of the F10-2 mix (the one with the smallest quantity of recycled aggregate) was most similar to the curve of the conventional F10 mix.

The curves representing the air voids in the F10-2 mix and the conventional F10 mix were also very similar with the same downward slope, though the F10-2 mix had a slightly lower percentage of air voids. The curves obtained for the F10-1, F10-3, and F10-4 mixes were also very similar. Despite the fact that the PG-3 limits the percentage of air voids to a minimum of 4%, experience in the use of such mixes has shown that the optimal percentage of air voids lies in the realm of 6-9%. Both the conventional F10 mix and the F10-2 mix were in this

como la F10-2 se mueven en ese rango con un porcentaje de betún no demasiado alto (entre el 5 y el 5,5%), mientras que para el resto de casos se han obtenido porcentajes de huecos mezcla cercanos al 11%, lo que no ha sido un problema para cumplir el ensayo de inmersión compresión, como más adelante veremos.

Como era de esperar la curva de deformación presenta una tendencia creciente conforme se aumenta el porcentaje de betún, siendo la que menos se deforma la F10-convencional.

range with a relatively low bitumen percent (5-5.5%). In contrast, the other mixes had air void percents close to 11%. Nevertheless, it was found that this percent of voids did not pose a problem for obtaining acceptable results in the immersion-compression test.

Not surprisingly, as the bitumen percent increased, so did the slope of the deformation curve. The mix that suffered the least deformation was the conventional F10 mix.

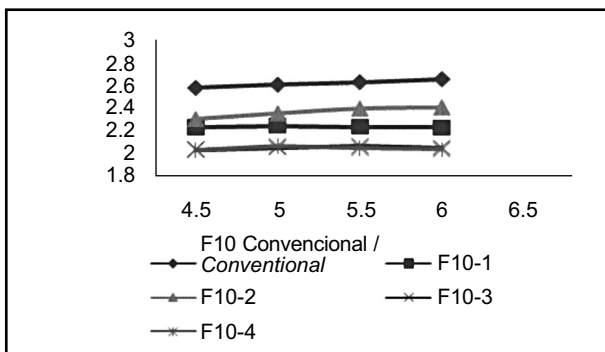


Figura 1. Densidad (g/cm³) / % betún.
 Figure 1. Density (g/cm³) / % bitumen.

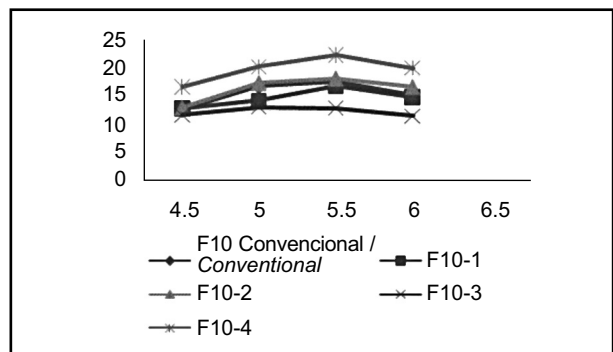


Figura 2. Estabilidad (kN) / % betún.
 Figure 2. Stability (kN) / % bitumen.

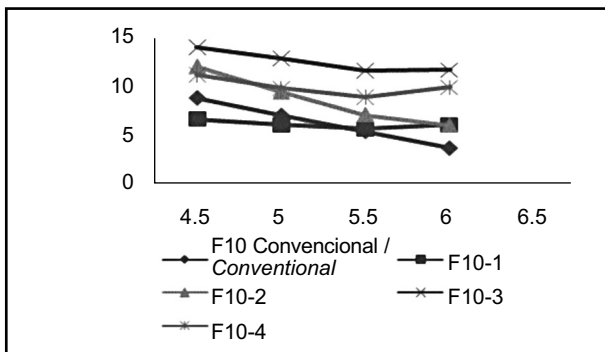


Figura 3. % Huecos en mezcla / % betún.
 Figure 3. % Air Voids in Mix / % bitumen.

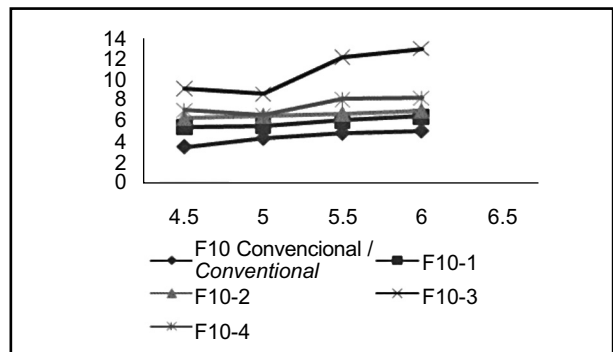


Figura 4. Deformación (mm) / % betún.
 Figure 4. Deformation (mm) / % bitumen.

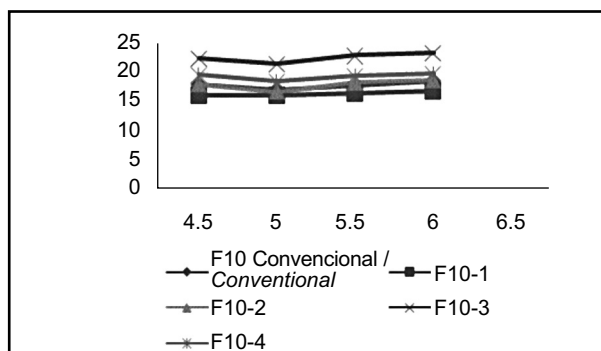


Figura 5. % Huecos en áridos / % betún.
 Figure 5. % Air Voids in Aggregates / % bitumen.

Las curvas de huecos áridos apenas presentan pendiente, de manera que parecen poco influenciadas por el contenido de betún. Una vez más en este caso podemos observar como la curva de la F10-2 es prácticamente igual que la de la F10-conventional.

En base a estos resultados se tomaron como contenidos óptimos de ligante un 5% para las mezclas F10-conventional y F10-4, un 5,3% para la F10-2 y la F10-3, y un 5,5% para la F10-1 (porcentajes sobre peso total de los áridos).

3.2. Índice de resistencia conservada

Los resultados obtenidos a partir del ensayo de inmersión-compresión realizados sobre las mezclas dosificadas con los porcentajes óptimos de betún fueron bastante superiores al mínimo de 75% que exige el PG-3. En la Tabla 5 se muestran los valores de resistencia obtenidos para cada uno de los grupos de probetas del ensayo así como la relación entre ellos (índice de resistencia conservada), para un contenido de betún igual al óptimo de la fórmula de trabajo:

Tabla 5 / Table 5
Valores de resistencia conservada.
Values of Retained Strength.

	F10-conventional / Conventional F10	F10-1	F10-2	F10-3	F10-4
Resistencia seca (kgf/cm ²) / Dry Strength (kgf/cm ²)	116.8	45.1	52.7	54.1	53.7
Resistencia húmeda (kgf/cm ²) / Wet Strength (kgf/cm ²)	97.6	44.2	44.2	49.5	50.7
Índice de resistencia conservada (%) / Index of Retained Sesistentrength	83.6	98	84	91.4	94

Si bien al inicio del proyecto teníamos dudas acerca de la adhesividad entre el ligante y el árido de Silestone® por la presencia de la resina que envuelve las partículas de sílice en este tipo de áridos, los resultados de estos ensayos parecen indicar que la resina del Silestone® no sólo no perjudica la adhesividad con el betún, sino que podría mejorarla, como se desprende del hecho de que las fórmulas con mayor porcentaje de Silestone® (F10-1, F10-3 y F10-4) son las que dan valores de resistencia conservada más altos. Además podemos destacar la contribución de los finos Silestone® en la mejora de la resistencia conservada, como se pone de manifiesto en las mezclas F10-1 y F10-4.

3.3. Deformación permanente

Como en el resto de ensayos presentados hasta el momento, los resultados obtenidos en las velocidades de deformación en el ensayo en pista (Tabla 6) cumplieron las especificaciones del PG-3 (que como en la Tabla 1 se indica, limita la velocidad de deformación en el último intervalo de 105 a 120 min a un máximo de 15 µm/min):

The curves of the aggregates with air voids hardly showed any slope at all, and thus did not appear to be affected by the bitumen content. Once again, in this case, the curve of the F10-2 mix was practically the same as that of the conventional F10 mix.

Based on results obtained, optimal binder contents were found to be the following: (i) 5% for the F10-4 mix and the conventional F10 mix; (ii) 5.3% for the F10-2 and F10-3 mixes; (iii) 5.5% for the F10-1 mix. These percentages were based on the total weight of the aggregates.

3.2. Index of Retained Strength

The results obtained for the immersion-compression test performed on the mixes with optimal percents of bitumen were clearly higher than the minimum value of 75% required by the PG-3. Table 5 shows the strength values obtained for each set of test specimens as well as their ratio (Index of Retained Strength) for a job-mix formula with an optimal bitumen content.

Although at the beginning of the project, there were certain doubts regarding the degree of adhesion between the binder and the Silestone® aggregate because of the resin covering the silica particles, the results of our study showed that the Silestone resin not only had no adverse effects on the adhesion capacity of the bitumen, but even enhanced it. This is evident in the fact that the job-mix formulas with high percents of Silestone® (F10-1, F10-3 and F10-4) were those that had the highest indexes of retained strength. Furthermore, it should be pointed out that Silestone® also improved the retained strength of the F10-1 and F10-4 mixes.

3.3. Permanent deformation

In the same way as in the other tests, the results obtained for deformation speeds in the wheel tracking test (Table 6) also met PG-3 specifications (which limit the deformation in the last time interval of 105-120 minutes to a maximum value of 15 µm/min).

Tabla 6 / Table 6
 Resultados del ensayo de deformación plástica en pista para un % de betún igual al óptimo.
 Results of the wheel tracking test for a bitumen percent equal to the optimal value.

	F10-convencional / Conventional F10	F10-1	F10-2	F10-3	F10-4
Deformación (mm) / Deformation (mm)	0.88	0.63	2.14	3.40	1.32
Vel. Def 30-45 min. (µm/min) / Deformation Speed 30-45 min. (µm/min)	2.7	4	1	1.7	7
Vel. Def 75-90 min. (µm/min) / Deformation Speed 75-90 min. (µm/min)	2.4	2	1.3	1.2	5
Vel. Def 105-120 min. (µm/min) / Deformation speed 105-120 min. (µm/min)	2.0	2	1.3	1.3	4

En todas las fórmulas de trabajo planteadas, los resultados del ensayo en pista cumplen sobradamente con las exigencias del PG-3. Como era de esperar en una mezcla tipo F10 donde el 100% del árido que la compone es de machaqueo (con un alto porcentaje de gruesos, que las dota de un elevado rozamiento interno, y con carencia de tamaños intermedios), todas las mezclas obtenidas son resistentes a las deformaciones plásticas. Destacar que, a pesar de que la forma del árido de Silestone® no es tan buena como la de la ofita (lajas del 18% frente al 5%, que podría traducirse en peores resultados del ensayo en pista), en la práctica los resultados obtenidos son muy similares. Además, la utilización de una dotación de betún modificado 3b próxima al mínimo recomendable por el PG3 y porcentajes en huecos en mezcla superiores al 7%, han contribuido a mejorar la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas formuladas.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el laboratorio ponen de manifiesto la viabilidad técnica de utilización del árido procedente del residuo Silestone® en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Las cuatro fórmulas de trabajo (F10-1, F10-2, F10-3, F10-4) cumplen las especificaciones exigidas por el PG3 para este tipo de mezclas y son sustancialmente mejores que la mezcla convencional de referencia. Las mezclas estudiadas presentan muy buen comportamiento ante la acción del agua (tres de ellas llegando a estar por encima del 90% de resistencia conservada), así como ante deformaciones plásticas (obteniéndose en tres de ellas velocidades de deformación inferiores a las de la mezcla de referencia). Destacar los resultados obtenidos tanto en la mezcla F10-1 como en la F10-4, los cuales ponen de manifiesto la contribución de los finos Silestone® en mejora del comportamiento de la mezcla. Desde el punto de vista técnico podemos decir que la mezcla con mejores características es F10-4, la cual combina altos valores de estabilidad Marshall y resistencia ante la acción del agua, así como un buen comportamiento ante deformaciones plásticas.

For all of the job-mix formulas in this study, the results of the wheel tracking test easily fulfilled PG-3 specifications. Since 100% of the aggregate in an F10 mix is the result of crushing, there is a large percent of coarse particles with a high level of internal friction, and an absence of intermediate particle sizes. This signified that all of the mixes were found to be resistant to plastic deformation. Despite the fact that the shape of Silestone® aggregate was not as good as that of ophite (i.e. with a flakiness index of 18% as compared to 5%), this was not a problem. Even though this could have led to poorer results in the wheel tracking test, in practice, the results obtained turned out to be very similar. Moreover, the use of BM3b (modified bitumen, category 3B) close to the minimum quantity recommended by the PG-3 specifications and percents of air voids in the mix greater than 7% helped to improve the resistance of the mixes to plastic deformation.

4. CONCLUSIONS

The laboratory results obtained clearly showed the technical viability of using aggregate made from Silestone® waste in hot bituminous mixes. The four job-mix formulas (F10-1, F10-2, F10-3, and F10-4) met PG-3 specifications, and obtained significantly better results than the conventional F10 mix, used as a reference. The mixes in this study performed well under the action of water. For example, three of the mixes had a retained strength of over 90%. They also had a high resistance to plastic deformation. In fact, three of the mixes had deformation speeds lower than that of the conventional F10 mix. It should be highlighted that the results obtained for both the F10-1 mix and the F10-4 mix clear showed that fine Silestone® aggregate improved mix performance. From a theoretical perspective, the mix with the best performance was the F10-4 mix, which combined high values of Marshall stability and imperviousness to water action, as well as a very satisfactory resistance to plastic deformation.

El siguiente paso a realizar serían los tramos de prueba para comprobar si los resultados en obra coinciden con los obtenidos en laboratorio.

The next phase of our project will be to carry out tests on actual highway sections to verify if the results obtained coincide with those obtained in the laboratory.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la Corporación Tecnológica de Andalucía (Conserjería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía), y al Ministerio de Industria la subvención concedida para la realización de este proyecto, así como a las empresas Sacyr, Repsol, Sondeal e Ideyco por su apoyo y colaboración.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research project was funded by the "Corporación Tecnológica de Andalucía" (Technological Corporation of Andalusia) and the Spanish Ministry of Industry. The authors would also like to thank the companies, Sacyr, Repsol, Sondeal, and Ideyco, for their cooperation and assistance.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) "Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos", BOE, nº 96 (1998).
- (2) Ministerio de Medio Ambiente: "Plan Nacional de Residuos Integrados 2007-2015".
- (3) Parlamento Europeo: "Directiva Marco 98/2008/CE de Residuos", junio de 2008.
- (4) Pérez, I.; Toledano, M.; Gallego, J.; Taibo, J.: "Mechanical proprieties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris", *Mater. Construcc.*, 2007, vol. 57, 285, 17-29.
- (5) Akbulut, H.; Güer, C.: "Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements". *Building and Environment*, 2007, vol. 42, 5, 1921-1930. doi:10.1016/j.buildenv.2006.03.012
- (6) Bairagi, N. K.; Vidyadhara, H. S.; Ravande K.: "Mix desing procedure for recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 1990, vol. 42, 4, 188-193. doi:10.1016/0950-0618(90)90039-4
- (7) De Rezende, R. L.; De Carvalho, J. C.: "The use of quarry waste in pavement construction". *Resources, Conservation and Recycling*, 2003, vol. 39, 91-105. doi:10.1016/S0921-3449(02)00123-4
- (8) Snyder, M. B.: "Use of crushed concrete products in Minnesota pavement foundations". Minnesota Departament of Tranportation, St. Paul, MN, 1995.
- (9) Çetin, A.: "Assessment of industrial wastes on asphalt concrete pavement mixtures". *M Sc Thesis*, Anadolu University, Natural Science Institute, Departament of Civil Engineering, Eskisehir, 1997 (In Turkish).
- (10) Grupo Cosentino S.A., www.silestone.com
- (11) Dirección General de Carreteras: "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3", Ministerio de Fomento, Ediciones Liteam, Madrid, 2004.
- (12) Gordillo, J.: "Panorama general de las mezclas bituminosas", Jornada sobre caracterización y control de calidad de mezclas bituminosas, Sevilla, 2001.
- (13) Dirección General de Carreteras: "Normas NLT. Ensayos de Carreteras", Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), 2ª edición, Madrid, 1992.
- (14) 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.

* * *