

Caracterización de áridos volcánicos de canarias y aplicaciones en la construcción de carreteras

Miguel A. Franesqui

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Profesor del Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles (EIIIC), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)

Jorge Yepes

Dr. en Ciencias Geológicas, Profesor del Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles (EIIIC), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)

Cándida García-González

Arquitecta e Ingeniera Civil, Investigadora del Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles (EIIIC), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC)

Javier Jubera

Ingeniero Industrial, Jefe del Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción, Consejería de Obras Públicas, Transportes y Política Territorial, Gobierno de Canarias

Luis E. Hernández-Gutiérrez

Dr. en Ciencias Geológicas, Jefe Laboratorio de Geotecnia, Consejería de Obras Públicas, Transportes y Política Territorial, Gobierno de Canarias

Juan Gallego

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras, Departamento de Ingeniería Civil-Transporte y Territorio, ETSI de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Ignacio Pérez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Profesor de la ETSI de Caminos Canales y Puertos, Universidade da Coruña (UdC)

RESUMEN

Debido a su formación geológica, en los archipiélagos de la Macaronesia los áridos utilizados son siempre de naturaleza volcánica, bien procedentes de los depósitos piroclásticos (basálticos y sálicos), bien de la fragmentación de rocas volcánicas (basaltos, traquitas, fonolitas e ignimbritas).

Algunas de estas litologías, especialmente los basaltos masivos, suelen proporcionar áridos con buenas propiedades mecánicas debido a su elevada densidad y resistencia. Sin embargo, con frecuencia, las rocas volcánicas suelen presentar estructuras alveolares y escoriáceas muy porosas, asociadas a la elevada velocidad de descompresión y de enfriamiento. En ocasiones, estos materiales han experimentado un importante proceso de alteración hidrotermal, por la prolongada exposición a un foco magmático activo. Además, su distribución espacial muestra una elevada heterogeneidad, debido a la escasa continuidad lateral de los materiales, incluso dentro de un mismo yacimiento. Por último, los valores de sus propiedades físicas ofrecen una gran dispersión estadística, debido al carácter aleatorio que tiene la fábrica mineral de las coladas. Todo ello condiciona que las propiedades de los áridos resultantes sean más variables y su calidad más heterogénea que en territorios continentales. Por otra parte, las publicaciones sobre estos materiales son escasas y los pliegos normativos no incluyen especificaciones adaptadas a estos litotipos volcánicos.

Por estos motivos, se han recopilado datos experimentales de las propiedades mecánicas en roca matriz y en áridos resultantes y se ofrecen experiencias sobre el empleo de éstos áridos en la construcción de carreteras. Esto proporciona valores de referencia para establecer correlaciones entre propiedades básicas y mejorar su caracterización. También se ofrecen recomendaciones para sus aplicaciones y para la adaptación de las especificaciones normativas vigentes.

INTRODUCCIÓN

Los áridos son uno de los materiales básicos más importantes de la industria de la construcción. Junto con el agua, constituye uno de los dos productos de mayor consumo per cápita en el mundo y una de las cuatro materias primas más importantes de la producción minera mundial después del petróleo, el gas y el carbón.

Una de las peculiaridades de los archipiélagos de la Macaronesia (Azores, Cabo Verde, Canarias y Madeira) es que presentan casi exclusivamente litologías volcánicas, a diferencia de lo que ocurre en los territorios continentales. En consecuencia, los áridos locales son de naturaleza volcánica. Si bien algunos de estos materiales presentan buenas propiedades mecánicas, con frecuencia, los macizos rocosos suelen presentar elevadas porosidades, importantes procesos de alteración hidrotermal, elevada heterogeneidad espacial de las capas litológicas e incluso dentro de cada capa. Todos estos factores condicionan que las propiedades de los áridos resultantes sean más variables y su calidad más heterogénea que los áridos de procedencia calcárea o granítica.

La protección medioambiental del territorio canario es muy elevada. El 40% de la superficie del archipiélago lo constituyen espacios naturales con algún tipo de protección ambiental. Esto restringe las posibilidades para poner en explotación canteras de áridos y materiales granulares. De hecho, el número de yacimientos existentes es limitado. Tenerife solo cuenta con una cantera autorizada para la extracción y producción de áridos. Además, los estudios sobre áridos volcánicos son escasos y los pliegos normativos no incluyen especificaciones adaptadas a las peculiaridades de estos litotipos (Fransesqui et al., 2010). Con todo lo dicho, es fácil comprender que la comercialización de áridos en las islas sea compleja.

El interés y la oportunidad de caracterizar los áridos volcánicos radica en la necesidad de su uso, dadas las condiciones que impone la insularidad. El interés por el desarrollo de guías para la construcción, que consideren la mejora de materiales marginales, radica en la necesidad de proteger el medio físico, un recurso limitado de por sí, que constituye el soporte para el turismo.

METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Este trabajo recopila, analiza y sintetiza los ensayos de laboratorio y la experiencia acumulada en obras de construcción de carreteras, relacionada con las propiedades geomecánicas de los principales litotipos de áridos volcánicos que se encuentran en las Islas Canarias. Esta información permitirá contextualizar las campañas de ensayos que se están realizando en el proyecto de I+D+i Volcanic BC-Warm.

En primer lugar se recopilaron datos de los materiales utilizados con más frecuencia en la construcción (procedencia, canteras, propiedades, aplicaciones), clasificándolos por litotipos. Con posterioridad, se compiló un inventario de ensayos realizados por el Laboratorio de Calidad de la Construcción del Gobierno de Canarias y por los principales productores de áridos de las islas. Este inventario cubre los últimos 35 años (1980-2015) y tiene datos de controles de calidad realizados para proyectos y obras de carretera.

La base de datos se complementa con los resultados obtenidos en las campañas de ensayos coordinadas por la ULPGC. En la Tabla 1 se resumen los litotipos de rocas volcánicas de las que se han recogido nuevas muestras de áridos procedentes de los acopios de las correspondientes canteras.

Clasificación y propiedades de las rocas volcánicas de Canarias

Las Islas Canarias se han formado por yuxtaposición de materiales procedentes de secuencias de ciclos efusivos independien-

tes, separados unos de otros por intensos períodos de erosión y sedimentación. Las manifestaciones lávicas suelen estar formadas por: coladas lávicas con superficies suaves, plegadas o cordadas de tipo “*pahoehoe*”; coladas lávicas con superficies irregulares y cortantes “*aa*” (conocidas en Canarias como “*malpais*”); y coladas en bloques. Los depósitos piroclásticos suelen ser también de tres tipos: plinianos (fragmentos sálicos de pómez sueltos sin soldadura); depósitos de ignimbritas, con mayor o menor grado de soldadura; conos de cinder con piroclastos basálticos de baja densidad (“*picón*” o “*jable*”), que en función de tamaño, forma y del grado de cementación se clasifican en: (a) bloques: (tamaño >64 mm) fragmentos de lava solidificada de forma angulosa; (b) bombas: (>64 mm) de forma fusiforme; (c) escorias: (>64 mm) de forma irregular; (d) lapillis (2-64 mm); cenizas (<2 mm).

Las estructuras volcánicas del archipiélago canario configuran un paisaje muy singular dentro del territorio nacional y que, incluso a nivel regional, presenta contrastes extremos desde el punto de vista litológico, medioambiental, paisajístico y climatológico.

A efectos de sus aplicaciones en construcción, la Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en Canarias, GETCAN-011, (Gobierno de Canarias, 2011) facilita una clasificación práctica para designar a las rocas, situarlas en una familia e identificar su caracterización ingenieril. En esta guía, los litotipos de clasificación para los materiales rocosos masivos de alta cohesión se establecen en función de criterios litológicos, texturales, así como por la vesicularidad de la roca matriz. En el caso de los materiales piroclásticos débilmente cementados, éstos pueden aparecer completamente sueltos o bien con una cierta cohesión entre los fragmentos debido a procesos de soldadura débil. En este caso, los criterios utilizados son litológicos, estado de cementación y tamaño de los piroclastos. (De mayor a menor tamaño, los piroclastos se clasifican en escorias, lapilli y cenizas, en el caso de los basálticos; y en pómez o cenizas, en el caso de los sálicos).

Algunas de las propiedades geomecánicas básicas de los principales litotipos de rocas de Canarias se presentan en las siguientes tablas, con carácter orientativo. En la Tabla 3 las de los materiales rocosos altamente cohesivos y las unidades geotécnicas que los agrupan. Estos valores se han obtenido sobre muestras ensayadas en laboratorio con las fracciones sanas de testigos extraídos sobre dichas rocas. En la Tabla 4 las de los materiales sueltos de tipo piroclástico.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS VOLCÁNICOS

Consecuencia de las litologías descritas, los áridos producidos en Canarias son en su totalidad de naturaleza volcánica, dándose la peculiar circunstancia de que en cada isla del archipiélago se emplean distintos litotipos de rocas, utilizándose principalmente los áridos obtenidos de tres tipos de canteras:

1) Áridos procedentes de **coladas** de composición **basáltica** y **fonolítica** (ver Figura 1). Los fragmentos fonolíticos presentan una tonalidad gris verdosa y se observa una disimetría en un porcentaje elevado de los fragmentos relacionada con el lajeado de la roca. Algunos presentan un moteado de tonalidad clara sobre el fondo verdoso. Se observa la existencia de pequeños cristales. Los fragmentos basálticos presentan en general una tonalidad oscura desde el negro hasta el gris claro, siendo muy común los tonos violáceos y grises. Generalmente son bastante porosos, apareciendo éstos rellenos de carbonato o zeolitas, creando pequeñas amígdalas. Es también común la presencia de pequeños cristales que se observan a simple vista, y que suelen corresponder a olivino, plagioclasa, anfíboles y piroxenos. En menor proporción, en algunas canteras

Litotipo	Descripción	Cantera	Isla	Fracciones en acopios	Observaciones
B-OP-M	Basalto masivo de buena calidad de color gris	Tenáridos SL - SATOCÁN (La Cisnera, T.M. Arico)	TF	0/6, 4/12, 10/20	Árido comercializado para hormigones, mezclas asfálticas y construcción en general
B-AF-M					
B-OP-M	Basalto masivo de muy buena calidad, muy denso y de color negro	Puertos de Las Palmas (Zona militar del Roque Ceniciento, La Isleta, T.M. Las Palmas de Gran Canaria)	GC	0/4, 4/10, 10/20	Actualmente su explotación ha cesado. En la pasada década se empleó para hormigones estructurales de la ampliación del puerto de Las Palmas
B-OP-M / B-AF-M	Basalto masivo de color gris	Puertos de Las Palmas (Roque Ceniciento, La Isleta, T.M. Las Palmas de Gran Canaria)	GC	0/4, 4/10, 10/20	Actualmente este basalto suele explotarse en el frente de cantera mezclado con los vacuolares y escoriáceos por lo que sólo es empleado en rellenos portuarios y banquetas de diques
B-OP-V / B-AF-V	Basalto vacuolar de color gris	Puertos de Las Palmas (Roque Ceniciento, La Isleta, T.M. Las Palmas de Gran Canaria)	GC	0/4, 4/10, 10/20	Actualmente este basalto suele explotarse en el frente de cantera mezclado con los masivos y escoriáceos por lo que sólo es empleado en rellenos portuarios y banquetas de diques
B-ES	Basalto escoriáceo de tipo marginal, de color rojizo/marrón, procedente de capas de escorias	Puertos de Las Palmas (Roque Ceniciento, La Isleta, T.M. Las Palmas de Gran Canaria)	GC	0/4, 4/10, 10/20	Actualmente este basalto escoriáceo suele explotarse en el frente de cantera mezclado con los masivos y vacuolares, por lo que sólo es empleado en rellenos portuarios y banquetas de diques
FON	Fonolita de buena calidad	Áridos Canarios SL - LOPESÁN (Piedra Grande, T.M. San Bartolomé de Tirajana)	GC	0/4, 4/10, 10/20	La empresa dispone de planta de machaqueo de áridos, de asfaltos, de hormigones y de prefabricados, todos elaborados con estos áridos
IG-S	Ignimbrita soldada	Santan Cazorla SL - LOPESÁN (Barranco de Los Vicentes, T.M. San Bartolomé de Tirajana)	GC	0/4, 4/10, 10/20	En la misma se extrae también Fonolita, que suele utilizar para áridos de hormigones y asfaltos. La empresa dispone de planta de machaqueo de áridos, de asfaltos y de hormigones

Área C
Aplicaciones de los áridos. Calidad de producción y de producto

Tabla 1. Litotipos de las muestras de áridos volcánicos recogidas para las nuevas campañas sistemáticas de ensayos de laboratorio (Nota: Se ha utilizado la denominación recogida por GETCAN-011 (ver Tabla 2), que hace referencia a materiales con un grado de meteorización I, según los criterios del eurocódigo (UNE-ENV 1997-3:2002).

se explotan **traquibasaltos** y **traquitas** como áridos, pero su extracción es menos habitual que las rocas anteriores. Las ignimbritas sólo suelen explotarse como roca ornamental.

2) Áridos procedentes de **depósitos aluviales** de fondo de barranco, que se corresponde con conglomerados constituidos por gravas de composición volcánica variada, si bien por motivos medioambientales su extracción está actualmente muy limitada.

3) Áridos procedentes de materiales granulares naturales de tipo **lapilli** obtenidos de los **depósitos de conos piroclásticos**. Su estructura es de tipo alveolar, muy porosa y su composición basáltica, con matriz vítrea básica (Lomoschitz et al., 2006). Como los anteriores, su extracción se limita por motivos medioambientales. Estos áridos, debido a su generalmente baja resistencia y densidad, no suelen utilizarse como áridos para la fabricación de hormigones o mezclas bituminosas, sino más bien como materiales para rellenos drenantes, por ejemplo en explanadas o capas

de subbase de firmes, como materiales filtrantes en trasdoses de estructuras de contención, así como rellenos ligeros o rellenos para áreas ajardinadas.

Resumen de propiedades de los litotipos de áridos canarios

En la siguiente Tabla se resumen los valores promedio obtenidos para las principales propiedades físicas, químicas y mecánicas de los diferentes litotipos de áridos estudiados.

Comportamiento de los áridos volcánicos

La diferente naturaleza de los áridos volcánicos con respecto a los más habituales en territorios continentales se traduce también en comportamientos y tratamientos singulares, tanto en los procesos constructivos como en su comportamiento.

Rocas	Basaltos (B)	Olivínico-Piroxénico (OP)	Vacuolares (V)	B-OP-V
			Masivos (M)	B-OP-M
		Plagioclásicos (PL)	Vacuolares (V)	B-PL-V
			Masivos (M)	B-PL-M
		Afaníticos (AF)	Vacuolares (V)	B-AF-V
			Masivos (M)	B-AF-M
	Escoriáceos (ES)		B-ES	
	Traquibasaltos (TRQB)		TRQB	
	Traquitas (TRQ)		TRQ	
	Fonolitas (FON)		FON	
Ignimbritas (IG)	Soldadas (S)	IG-S		
	No soldadas (NS)	IG-NS		
Piroclastos	Piroclastos Basálticos	Lapilli (LP)	Suelto (S)	LPS
			Cementado (T)	LPT
		Escorias (ES)	Suelto (S)	ESS
			Cementado (T)	EST
		Cenizas Basálticas (CB)	Suelto (S)	CBS
			Cementado (T)	CBT
	Piroclastos Sálidos	Pómez (PZ)	Suelto (S)	PZS
			Cementado (T)	PZT
		Cenizas Sálidas (CS)	Suelto (S)	CSS
			Cementado (T)	CST

Tabla 2. Litotipos de las Islas Canarias (GETCAN-011 [Gobierno de Canarias, 2011]).

Litotipo:		BOPM	BOPV	BPLV	BPLM	BAFV	BAFM	BES	TRQB	TRQ	FON	IGNS	IGS
Peso especif. aparente (KN/m ³)	X	27	22	23	24	20	26	21	24	24	24	16	21
	Ds	1.88	3.35	1.72	1.93	3.79	1.86	4.31	3.39	2.7	2.34	4.66	2.74
Velocidad ondas ultrasónicas (m/s)	X	5040	4435	3052	4071	4752	4752	2964	4513	4485	4858	2592	3649
	Ds	842.9	900.9	713.4	739.3	975	975	911.6	904.3	887.3	910.4	896.8	738.3
Índice de carga puntual (I _{s,50}) (MPa)	X	7	5	2	5	5	7	2	6	5	5	2	4
	Ds	2.6	2.2	1.2	2.6	3.2	2.6	1.9	2.8	2.4	2.2	2.0	1.8
Resistencia tracción indirecta (MPa)	X	48	28	22	25	22	50	23	47	42	45	22	33
	Ds	16.25	16.1	4.2	11.7	11.4	21.3	16.5	17.4	17.7	17.2	18.1	14.3
Resistencia compresión simple (MPa)	X	114	48	36	61	31	104	31	75	95	119	16	48
	Ds	59.8	35.7	14.8	27.9	16.0	54.8	34.2	61.1	62.8	76.8	19.5	29.1
Módulo de Young dinámico (GPa)	X	69	44	21	40	31	59	20	50	49	58	13	29
	Ds	25.34	20.48	9.52	16.65	18.90	24.70	15.37	23.82	20.93	21.08	12.37	15.35
Módulo de Young estático (GPa)	X	31	16	25	-	17	65	4	51	33	48	8	50
	Ds	5.61	5.73	-	-	3.27	-	0.57	21.39	17.84	15.28	6.15	0.00

Tabla 3. Propiedades geomecánicas de las rocas de Canarias (Fuente: elaboración propia a partir de datos de GETCAN-011 [Gobierno de Canarias, 2011]). Leyenda: (X) Promedio; (Ds) Desviación estándar.

	Litotipo:	LPT	EST	PZT	CST
Peso especif. partículas (KN/m ³)	X	29	28	25	25
	Ds	2.04	1.92	0.67	0.27
Peso especif. aparente (KN/m ³)	X	12	12	7	12
	Ds	4.03	1.67	3.20	3.79
Peso especif. aparente seco (KN/m ³)	X	13	12	7	11
	Ds	4.57	1.60	2.97	3.53
Porosidad (%)	X	54	58	72	57
	Ds	14.25	1.53	6.84	12.09
Resistencia compresión simple (MPa)	X	2	2	1	1
	Ds	1.54	0.75	0.20	0.37
Presión isotrópica de colapso (MPa)	X	7	7	1	3
	Ds	3.72	-	1.51	0.00
Módulo de Young (MPa)	X	412	240	18	297
	Ds	272.8	113.1	7.8	251.0

Tabla 4. Propiedades geomecánicas de los materiales piroclásticos de Canarias. Fuente: elaboración propia a partir de datos de GETCAN-011 (Gobierno de Canarias, 2011). Leyenda: (X) Promedio; (Ds) Desviación estandar (Ds).

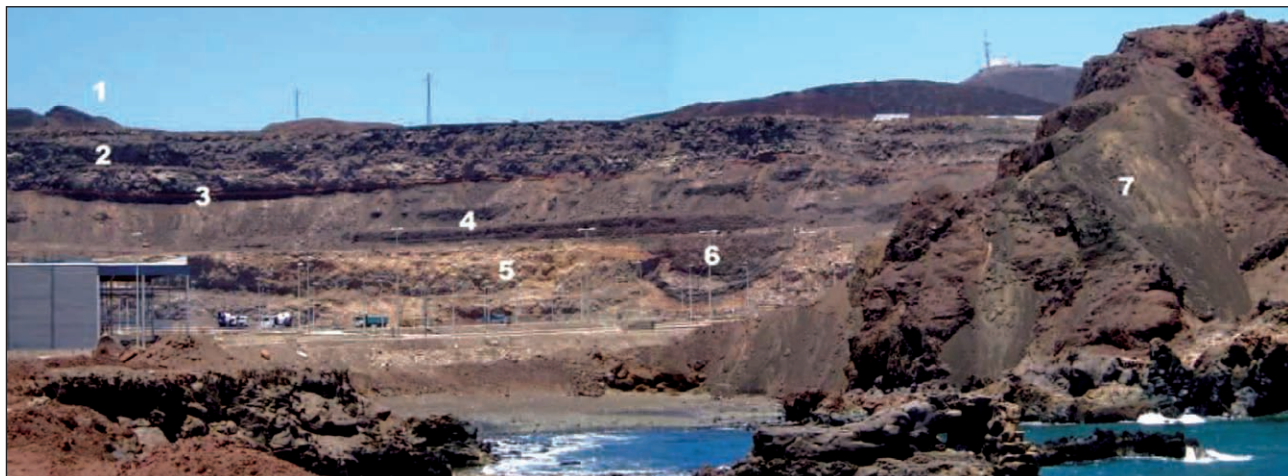


Figura 1. Cantera de La Esfinge, Las Palmas de Gran Canaria. La explotación se centra en el litotipo BOPV y BOPM, sin embargo, el frente muestra la variabilidad lateral que presentan los materiales volcánicos. Leyenda: (1) Cono de escorias reciente. (2) Serie monótona de coladas de lava basáltica. (3) Nivel de almagre. (4) Paquetes de piroclastos y escorias alternando. (5) Sedimentos. (6) Colada de canal de lava basáltica intracanyon. (7) Cono de escorias reciente.

PROPIEDADES	Uds	BOP		BAFM	BAFV	BPLM	BPLV	BES	TRQB		TRQ		FON		IGS		IGNS		LP	
		X	Ds						X	X	X	Ds	X	Ds	X	Ds	X	Ds		X
Densidad aparente	Mg/m ³	2,51	0,44	2,18	2,59	2,71	1,83	2,34	X	2,21	2,35	0,06	2,54	0,07	2,11	0,30	1,30	0,06	0,8-1	
Densidad real	Mg/m ³	2,69	0,14										2,60	0,15					1,25-1,6	
Densidad de partículas, s.s.s.	Mg/m ³	2,71	0,07										2,56	0,10						
Absorción de agua	%	3,36	1,76								0,01	0,00	1,61	0,89					21,7-33	
Índice de lajas	IL	14,61	6,45										24,50	8,47						
Partículas trituradas (Cc)	Cc	90,49	4,77										99,66	0,51						
Partículas redondeadas (Cc)	Cr	0,02	0,03										0,07	0,06						
Los Ángeles	LA	18,15	5,05	43	39	19	30	57,5		32,5	42,57	30,06	21,25	8,74	35,50	8,74	55,00	4,24		
Coefficiente micro-deval	MDV	18,40	0,00										17,67	9,18						
Coefficiente de Pulimento Acelerado	PSV	15,61	23,70										42,60	0,00						
Índice de forma	Cf	1,20	0,00										0,90	0,31						
Sonnenbrand		2,60	0,00										2,36	0,89						
Resistencia a los ciclos de hielo y deshielo	MS												18,00	0,00						
RCS	MPa	77,40	70,19	36	54,83	127,03	27,77	65,08		60,98	79,49	38,82	145,83	87,94	52,17	29,33	6,50	1,59	0,39-0,54	
Equivalente de arena	EA	73,53	18,44										75,09	12,13						
Azul metileno	AM	0,76	0,23																	
Finos	%	2,33	4,15										4,09	4,29					8,8	
Fuente		1	1	2	2	2	2	2	2	2	1 y 2	1 y 2	1	1	2	2	2	2	2	3

Tabla 5. Propiedades de los áridos canarios de los principales litotipos. Fuentes: (1) Propia. (2) Hernández-Gutiérrez et al. (2008). (3) Lomoschitz et al. (2004; 2006).

LITOTIPO ESPECIFICO	ISLA	DENOMINACIÓN	MUNICIPIO	En explotación actual
B	TF	Montaña Talavera	El Rosario	Piconera
B	LP		EL PASO	
B	LP		EL PASO	
B	LP		Villa de Mazo	
B	LP	CANTERA LA CALDERETA	FUENCALIENTE	
B	LP		LOS LLANOS DE ARIDANE	
B	LG	Charco Hondo	San Sebastián de La Gomera	
B	EH		EL PINAR	
B	EH	Fronpeca	VALVERDE	
BOP, BAF, BES	GC	ROQUE CENICIENTO	Las Palmas de G.C.	Escollera y material de relleno
BOP	GC	LA BERLANGA	Ingenio	
BOP	GC	FELIPE SUAREZ MEDINA	San Bartolomé de Tirajana	
BOP	TF	La Cisnera	Arico	Grava, gravilla y arena
BOP	FT	Andrea	LA OLIVA	
BOP	FT	El Manadero	PTO. DEL ROSARIO	Asfaltos
BOP (alterados)	FT	Tablero de las Cristinas	PTO. DEL ROSARIO	Asfaltos
BOP	LZ	Horinsa	TIAS	Hormigonera
BOP, FON	GC	ROSA SILVA	Arucas	Roca ornamental en Buen Suceso.
BOP, LP	LZ		PLAYA HONDA	Asfaltos
BOP, DB (Depósitos de Barranco)	FT	Pablo de León	ANTIGUA	Asfaltos
BOP, S	LZ	Lanzagrava	SAN BARTOLOMÉ	
BOP, S	LZ			
BOP, BAF, TRQB	TF	Los Pasitos	Sta. Cruz de Tenerife	
BOP, TRQ, FON	GC	CORRALETE-DRAGUILLO	Gáldar	Planta de machaqueo de áridos, planta de asfalto, planta de hormigón y morteros
BPL, ES	GC	ZONA FRANCA	Las Palmas de G.C.	
TRQB	TF	EXTRACSA	Guía de Isora	
TRQ, FON	GC	CHARCO DE SAN FRANCISCO	Gáldar	Producción: 90 t/hora en la planta de asfalto. 20 t/hora en planta de machaqueo.
TRQ	FT	Tindaya	LA OLIVA	
TRQ, FON	GC	MESA DEL SALINERO	San Bartolomé de Tirajana	
FON	GC	EL CORTIJO- Cantera de San Lorenzo	Las Palmas de G.C.	
FON	GC	PIEDRA GRANDE	San Bartolomé de Tirajana	Planta de machaqueo, planta de asfalto, planta de hormigón, planta de prefabricados y planta de betún.
FON	GC	MASPALOMAS	San Bartolomé de Tirajana	Planta de machaqueo, aglomerados asfálticos y hormigones.
FON	GC	TIERRAS BLANCAS	Valleseco	Machacadora (15 m3/hora) y Gravilladora
FON	GC	LAS MONJAS	Moya	Planta de tratamiento de corte de roca ornamental.
FON	GC	EL MORRETE	San Bartolomé de Tirajana	
FON	TF	El Riquel	Icod de los Vinos	
IGS	GC	BARRANCO DE LOS VICENTES	San Bartolomé de Tirajana	Planta de machaqueo, aglomerados asfálticos y hormigones.
IGNS, PZ	GC	SAN JOSÉ	San Bartolomé de Tirajana	Planta de hormigón y planta de molienda de puzolana. Fábrica de cemento.
IGNS	GC	BUEN SUCESO	Arucas	Planta de tratamiento de la Roca ornamental.
IGNS	GC	HUGO- EL SALVIAL	San Bartolomé de Tirajana	Roca ornamental en Buen Suceso.
IG, PZT	TF	La Cisnera	Arico	
LP	GC	TIO ISIDRO	Telde	Planta de machaqueo y clasificación de picón
LP	GC	LA UMBRIA	Telde	Planta de tratamiento de áridos
LP, ES	GC	MONTES DE ROSIANA	Telde	Planta de molienda y cribado
LP, ES	GC	LA BREÑA	Telde	Planta de molienda y cribado
LP, B	FT	La Capellania	LA OLIVA	Piconera
LP, ES, S	LZ	Tao	TEGUISE	
ES, LP	TF	Birmagen	El Rosario	Piconera
ES, LP	TF	La Estrella – Luceña	San Miguel	Piconera
ES, LP	TF	Montaña de Socas	Tacoronte	Prefabricados de hormigón
ES, LP	FT	Piconera de Chacón	LA OLIVA	Piconera
Arenas (S)	FT	Rosa Negra	LA OLIVA	Arenera
S	FT	Tarabates	LA OLIVA	Arenera
S	FT	Bco. de los Enamorados	LA OLIVA	Arenera
Depósitos de Barranco (DB)	GC	MACHACADORA DOMINGUEZ	Santa Lucía de Tirajana	Machacadora y Gravilladora
DB	GC	RAMOS GIL	Santa Lucía de Tirajana	Gravera y Planta de machaqueo.
DB	GC	TABAIBAL CANARIO	Santa Lucía de Tirajana	Planta de mortero, clasificadora de áridos y fabricación de mortero seco
DB	GC	NAVARRO	La Aldea de San Nicolás	Planta de Hormigón y Planta de machaqueo.
DB	GC	EL RIBANZO	La Aldea de San Nicolás	Planta de machaqueo
DB	TF	Badén	Güimar	
DB	TF	El Frenegal	Güimar	Gravera
DB	LG	Barranco de Santiago	San Sebastián de La Gomera	

Área C
Aplicaciones de los áridos. Calidad de producción y de producto

Tabla 6. Principales canteras en explotación actual o en el pasado en todas las islas del archipiélago canario, clasificadas por litotipos.

Algunos de los áridos volcánicos de Canarias, como los procedentes de rocas volcánicas de coladas lávicas altamente cohesivas, presentan elevadas densidades y buenas propiedades mecánicas, como puede comprobarse incluso en las propiedades de la roca matriz dadas en la anterior Tabla 3. Así, resultan ser los áridos más utilizados para las aplicaciones constructivas en las que se requiere importante resistencia (fabricación de hormigones y mezclas asfálticas) los procedentes de rocas basálticas, especialmente las masivas (con menor contenido de vacuolas y de elementos escoriáceos), generalmente con minerales que proporcionan textura porfídica (con cristales visibles, como los olivínico-piroxénicos o los plagioclásicos), aunque también de tipo afanítica (sin cristales visibles). También son empleados los procedentes de coladas de rocas fonolíticas (textura afanítica y composición sálica), así como los de composición intermedia como los traquibasaltos. Se corresponden con los siguientes litotipos de la anterior Tabla 2, que ordenados de mayor a menor resistencia y densidad suelen ser: B-OP-M, FON, B-AF-M, TRQB y B-PL-M.

Sin embargo, con frecuencia las rocas volcánicas suelen presentar **estructuras alveolares y escoriáceas muy porosas**, asociadas a la elevada velocidad de descompresión y de enfriamiento que experimentan las coladas. Además, en ocasiones, estos materiales han experimentado de forma aleatoria importantes procesos de alteración hidrotermal, por la prolongada exposición a un foco magnético activo. El principal problema derivado de esto es que suelen presentar una elevada porosidad, como el caso de los basaltos vacuolares y escoriáceos (ver Figura 2), con estructura vesicular por las burbujas producidas por el vapor de agua en expansión generado durante el enfriamiento y la solidificación de la lava. En ocasiones los poros aparecen rellenos de carbonato o zeolitas, creando pequeñas amígdalas. Es común la presencia de pequeños cristales que se observan a simple vista, y que suelen corresponder a olivino, plagioclasa, anfíboles y piroxenos.

Consecuencia de la elevada porosidad es la **alta absorción** que presentan muchos de los áridos volcánicos (basaltos vacuolares y escoriáceos, piroclastos, etc.). Esto se traduce en posibles problemas de alteración por los agentes externos y, también de modo especial, en un mayor consumo de materiales conglomerados y ligantes necesarios para la fabricación de hormigones o mezclas bituminosas con estos áridos (ver Figura 3).

Esta estructura produce en los litotipos de menor densidad y resistencia problemas de **degradación granulométrica en los**

procesos de compactación en obra (puede llegar a producirse un aumento de finos en su granulometría entre el 2% y el 3%, por rotura de su estructura). En el caso de los áridos empleados en rellenos compactados, hay que considerar además que la resistencia de las partículas influye en la compactabilidad y la deformabilidad de las capas granulares.

Los coeficientes de forma de muchos áridos procedentes del machaqueo de rocas volcánicas masivas de coladas lávicas no resultan demasiado adecuados, con una tendencia a elevados porcentajes de **partículas con formas de lajas y agujas**. El índice de lajas (UNE-EN 933-3) muy frecuentemente es superior a 30 y el coeficiente de friabilidad (UNE-EN 1097-2) presenta amplia variabilidad (entre 14 y 20). Las variaciones en las características de los áridos son muy dependientes de su proceso de obtención y tratamiento, de manera que con determinados procedimientos y equipos modernos de plantas de machaqueo (proyección centrífuga de las partículas) es posible mejorar el índice de lajas y el porcentaje de caras de fractura (UNE-EN 933-5) durante su producción en la planta.

Las **propiedades** físicas, químicas, mecánicas y geotécnicas de los áridos volcánicos suelen presentar una elevada variabilidad con **gran dispersión estadística**, incluso dentro de la misma capa litológica, debido al carácter aleatorio que tiene la fábrica mineral de las coladas. Además, su **distribución espacial** muestra una **elevada heterogeneidad** debido a la escasa continuidad lateral de los materiales, incluso dentro de un mismo yacimiento. También hay que tener en cuenta las posibles alteraciones que pueden experimentar durante la fragmentación y clasificación en la planta, así como en su manipulación y acopio. Todo ello condiciona que las propiedades y características de los áridos resultantes sean más variables y su calidad más heterogénea que en los territorios continentales. Por ello no ha de utilizarse un único valor de referencia en obra, sino que debe comprobarse y actualizarse permanentemente mediante el control en recepción del material empleado. El suministrador deberá también realizar un control más frecuente para asegurar una regularidad en las características de la materia prima. Los controles de recepción en obra también han de ser más intensos.

Sin embargo, a pesar de las limitaciones de algunos áridos volcánicos, el empleo de los áridos naturales de los yacimientos ya existentes en regiones insulares como Canarias, aun presentando en ocasiones propiedades no demasiado adecuadas para la formación de determinados materiales de construcción como los hormigones

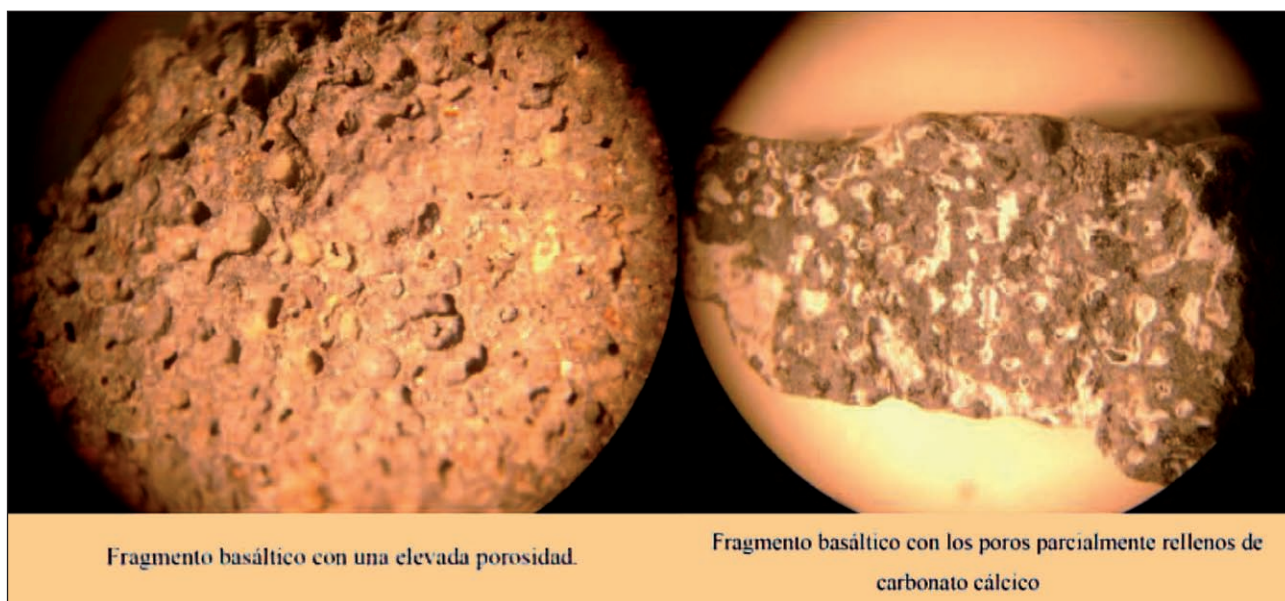


Figura 2. Estructura interna típica de basaltos vacuolares de Canarias con elevada porosidad.

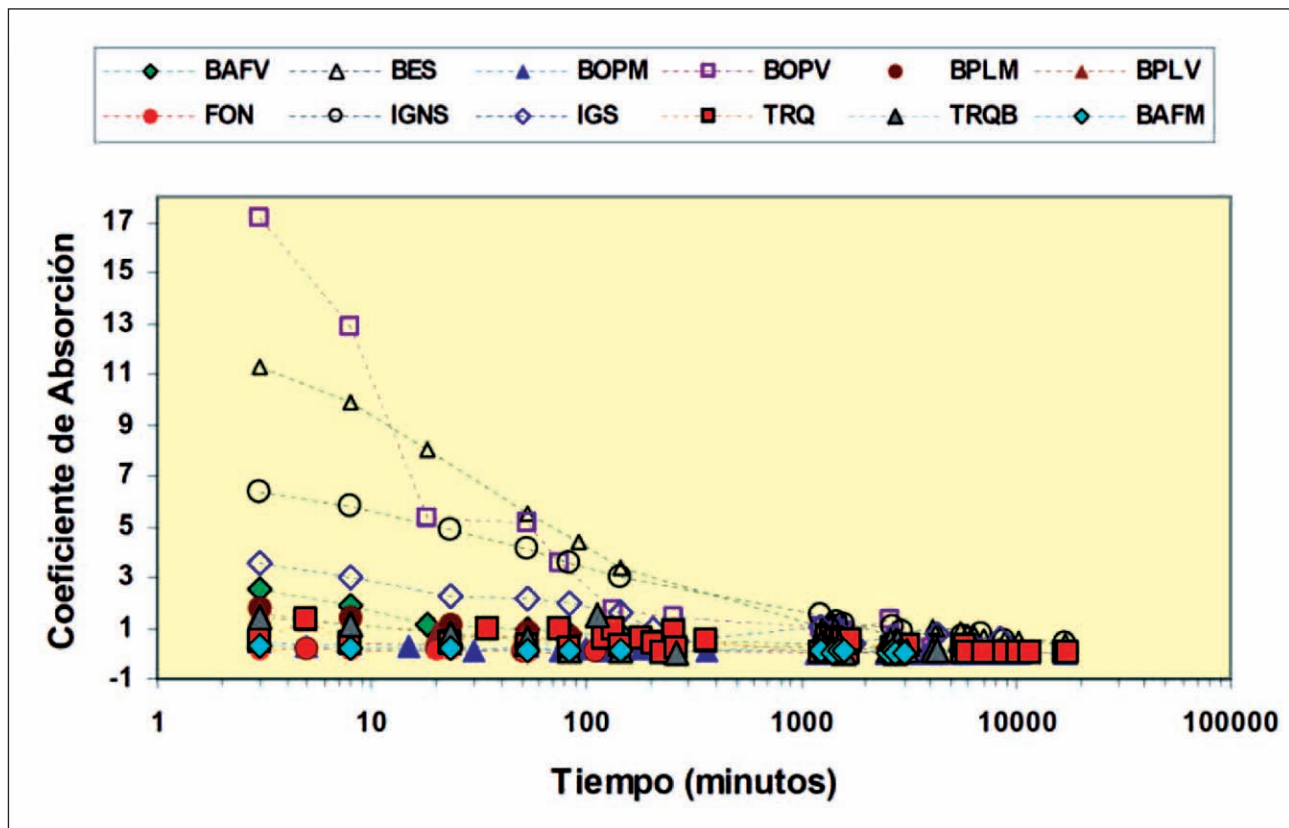


Figura 3. Coeficiente de absorción de áridos volcánicos de diferentes litotipos.

o las mezclas asfálticas de pavimentación, resulta prioritario por motivos económicos y especialmente ambientales.

Hernández-Gutiérrez et al. (2008) estudiaron las correlaciones entre la resistencia al desgaste (Coeficiente de Los Ángeles, LA) de algunos áridos de Canarias y las propiedades de resistencia a la compresión simple (RCS) y la densidad aparente (D_a) de la roca volcánica de procedencia, con objeto de poder seleccionar de forma más eficaz los áridos para diferentes aplicaciones constructivas y mejorar su control de calidad, conociendo las propiedades de la roca de origen. De los resultados obtenidos concluyen que el índice LA en los basaltos oscila entre 19 y 37. Las traquitas y fonolitas presentan valores entre 20 y 35. Las ignimbritas no soldadas presentan valores altos en torno a 55 y superiores. Las ignimbritas soldadas presentan valores alrededor de 30 y 40. Según esto, resultan adecuadas para la fabricación de hormigones y mezclas asfálticas las traquitas, fonolitas y algunos tipos de basaltos (como los masivos y afaníticos), pero se desaconseja el empleo de ignimbritas soldadas, no soldadas y de algunos tipos de basaltos (como los escoriáceos y excesivamente vacuolares). En la construcción de carreteras, se pueden emplear como capas de base granulares no tratadas prácticamente todos los litotipos estudiados a excepción de las IGNS y algunas IGS.

APLICACIONES DE LOS ÁRIDOS VOLCÁNICOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

Capas granulares no tratadas para firmes

Las explanadas y las capas inferiores de firmes de carreteras y de aeropuertos (subbases y bases) están frecuentemente constituidas por materiales granulares no tratados, es decir compactados sin ningún tipo de ligante ni conglomerante. Tradicionalmente estas capas granulares utilizadas en infraestructuras de transporte han sido bien de granulometría uniforme, como el *macadam* o el *balasto* ferroviario, bien estructuras formadas por áridos de tamaños diversos y cuya granulometría continua y bien graduada

proporciona una alta compacidad. Éstas últimas en España reciben la denominación tradicional de *zahorras*.

En las regiones volcánicas de los archipiélagos atlánticos macaronésicos se emplean los áridos naturales, bien procedentes de los depósitos piroclásticos, bien de la fragmentación natural o trituración artificial de rocas volcánicas, para construir estas capas granulares en obras de pavimentación.

Los **áridos piroclásticos** suelen utilizarse, como ya se ha indicado anteriormente, principalmente como rellenos ligeros y/o drenantes, así como para explanadas de firmes, debido a que su generalmente baja resistencia y alta porosidad no los hace muy apropiados para la formación de los exigentes y resistentes esqueletos minerales que se precisan en la mayoría de las mezclas asfálticas para firmes y en los hormigones estructurales. Generalmente se emplean los piroclastos basálticos de tipo lapilli (LP) y las escorias (ES). En Canarias recibe el nombre local de "*picón*" (en Azores se denomina "*bagacina*"). Su coloración suele ser rojiza o negra, dependiendo de su composición química. Son muy característicos de estas regiones volcánicas, con partículas generalmente poco densas y muy porosas de tamaños entre 2 y 64 mm, que en el caso de Canarias no suelen presentar un porcentaje de finos superior al 25% (Lanzarote), y en El Hierro y Fuerteventura no suelen superar el 5%, con valor promedio en torno al 9%. Sus plasticidades generalmente son bajas, aunque los equivalentes de arena también suelen serlo. Tras su compactación suele producirse un aumento de finos en su granulometría entre el 2% y el 5% (por rotura de su estructura), si bien los resultados de ensayos de compactación (densidades secas máximas PM en el intervalo 7,8-19,4 kN/m³ y humedades óptimas entre 9-20%) y CBR (10-32) generalmente se corresponden con materiales que, en ocasiones, presentan buena calidad para explanaciones.

Por el contrario, los **áridos de machaqueo de rocas volcánicas masivas** (generalmente basaltos y fonolitas), más densas y resistentes, no suelen presentar estos problemas de los áridos piroclásticos de rotura masiva de su estructura, incluso durante su compactación

en obra, por lo que son los más frecuentemente utilizados para la construcción de las capas granulares no tratadas empleadas en las bases y subbases de firmes, empleándose incluso para las categorías de tráfico más pesado. Sin embargo, en ocasiones se ha cuestionado el cumplimiento de las especificaciones normativas, por estos áridos locales, especialmente en lo relativo a:

Granulometrías: suelen presentar, por un lado, formas y granulometrías no todo lo continuas que en ocasiones resulta deseable y no cumplen generalmente bien las prescripciones normativas al respecto por ejemplo para mezclas asfálticas. Especialmente es destacable que el árido fino (arenas y polvo mineral) suelen presentar exceso de finos, lo que genera problemas en su compactación y puesta en obra. En obras de carreteras realizadas en Azores el árido resultó ligeramente deficitario en tamaños superiores a 9,5 mm, de acuerdo con el huso 0/31,5 de las prescripciones portuguesas y de tamaños superiores a 2 mm según las del PG-3 español para una ZA 0/32. Sin embargo es preciso señalar que sus coeficientes de uniformidad y curvatura ($C_u = 62$; $C_c = 1,9$ a $2,0$) indican que no ha de presentar mayores dificultades en cuanto a compactación. Las alteraciones relevantes en el proceso de producción, como durante la trituración o el cribado, conducen habitualmente a variaciones en la granulometría pretendida. Sin embargo, es posible asegurar unas condiciones de producción en un nivel de regularidad adecuado gracias a un **control intenso por parte del productor, con muestreos frecuentes**, así como de las **condiciones de almacenamiento y manipulación** en acopios. En resumen: resulta posible conseguir con ellos un adecuado ajuste a los husos granulométricos y a las tolerancias máximas admisibles con relación a una curva tipo declarada, especificados en diferentes normas europeas, siempre que el suministrador realice un buen control de producción y almacenamiento para garantizar un óptima regularidad del producto.

Metodología para el control de la compactación en obra: en ocasiones se ha cuestionado la validez del ensayo Proctor como ensayo de referencia, debido a la posibilidad de que con estos materiales volcánicos no sea estrictamente aplicable por razones de su supuesta **mayor insensibilidad a las variaciones de humedad**, de manera que las **curvas de compactación** resultan mucho más abiertas (casi horizontales). Es sabido que los áridos producidos a partir de la trituración artificial de rocas son menos sensibles a las variaciones de humedad en la compactación que los suelos, si bien esto también es indicio de una mayor facilidad de densificación con relación a las posibles desviaciones respecto de la humedad óptima. También, en general, este efecto se manifiesta más frecuentemente

en los materiales procedentes de rocas basálticas que en los áridos calizos o graníticos. En algunas ocasiones la causa de este fenómeno reside en la **alta permeabilidad** de esos materiales granulares, lo que hace que las humedades medidas en la capa compactada tienden a subestimar o infravalorar a las que efectivamente han intervenido en el proceso de compactación. Además, en ocasiones también se ha observado una tendencia hacia una mayor dificultad de conseguir una suficiente densificación cuando se compactaba la capa granular sobre otros materiales o capas de insuficiente densidad o capacidad portante.

La resistencia de las partículas influye en la compactabilidad y deformabilidad de las capas granulares: los de partículas menos resistentes son más fácilmente compactables por sufrir mayor degradación granulométrica en este proceso (ver Tabla 6), pero esto también puede aumentar los asientos del relleno debido al incremento del contenido de finos, especialmente si éstos son plásticos. En estos casos, un menor índice de poros de la capa puede no corresponder con un mejor comportamiento mecánico del relleno. Con áridos basálticos procedentes de rocas basálticas masivas en obras de carreteras realizadas en Azores se ha determinado que la **modificación granulométrica debida al proceso de compactación** en obra no suele suponer incremento de finos superiores al 1,5%. Sin embargo, sí se ha apreciado una mejora de los índices de lajas y agujas tras el proceso de compactación (mejora del 17,4% y del 22,4%, respectivamente), debido al proceso de fracturación de algunas partículas por el compactador (Tabla 7).

Los espesores de tongada empleados para lograr la adecuada compactación de las capas granulares con áridos basálticos oscilan entre 20 y 30 cm, empleando como medio de compactación el rodillo liso en modo vibratorio.

De forma general, nuestra experiencia obtenida en obras de carreteras de Canarias, Azores y Cabo Verde con áridos basálticos en capas granulares no tratadas nos permite concluir que los ensayos de compactación Proctor también pueden ser aplicados a estos materiales, siendo normalmente sensibles a los cambios de humedad en su compactación. De acuerdo con los ensayos PM, pueden adoptarse como valores de referencia (corregidos por efecto de los gruesos) para el control de obra los siguientes: $d_{m\acute{a}x. \text{ correg.}} = 19,9-23,0 \text{ kN/m}^3$; $\omega_{\text{opt. correg.}} = 6,0-12,0\%$. Además, **se propone como procedimiento de control de la compactación** en obra:

Comprobación del grado de compactación alcanzado por cada tongada, según los criterios del PG-3 español: no menor del 98-100%, dependiendo de la intensidad de tráfico pesado sobre el firme, de la densidad seca máxima del ensayo PM. (Las especificaciones)

		Muestras de acopio (Promedios)	Muestras compactadas (Promedios)	Muestras compactadas (Rango de variación)
Índice de lajas (%)		23	19	18-24
Índice de agujas (%)		29	22,5	20 - 29
Densidad de las partículas sólidas (kN/m³)		-	26,78	21 - 29
Absorción de agua (%)		-	1,7	1,0 – 7,8
Ensayo Proctor Modificado	$\gamma_d \text{ máx. (kN/m}^3)$	-	22,76	19,6 – 22,7
	$\omega_{\text{opt.}} (\%)$	-	7,5	6,4 – 12,8
	$\gamma_d \text{ máx. -corregida (kN/m}^3)$	-	23,05	19,9 – 23,0
	$\omega_{\text{opt. -corregida}} (\%)$	-	7,1	6,0 – 12,0

Tabla 7. Valores de algunas propiedades relacionadas con la compactación de áridos basálticos utilizados como capas granulares no tratadas de carreteras.

caciones para carreteras del *Hawaii Department of Transportation*, *HDT* establecen en su artículo 304-“Aggregate base course”, 304.03 “Construction”, que el control de la compactación de capas granulares debe realizarse mediante el grado de compactación relativo al ensayo PM, exigiéndose un valor superior al 95%. Además la humedad de compactación debe estar comprendida entre $\pm 2\%$ respecto de la óptima).

Determinación de la deformabilidad de cada tongada mediante ensayos de carga con placa, verificando que el valor del módulo de deformación vertical en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) satisfice los mínimos exigidos en el PG-3 español, no debiendo ser éste además nunca inferior al módulo de la capa subyacente multiplicado por 1,3. Adicionalmente, la relación de módulos entre el segundo y primer ciclo de carga del ensayo debe cumplir: $k = E_{v2}/E_{v1} < 2,5$ (El Art. 510.7.2. del PG-3 establece como límite el valor 2,2, pero dadas las particularidades de estos materiales volcánicos de escasez de finos, proponemos ampliar dicho límite aceptable a 2,5, con un comportamiento deformacional de estas capas satisfactorio. Este mismo criterio es adoptado también por las especificaciones del *Icelandic Building Research Institute*, Islandia).

Áridos volcánicos para mezclas asfálticas

Los áridos constituyen del 90% al 95% en masa (y del 75% al 85% en volumen) de la composición de las mezclas bituminosas usadas habitualmente en pavimentación al formar el esqueleto mineral de éstas, cuya función principal es otorgarles capacidad portante.

La estructura interna de muchos áridos volcánicos altamente porosa, consecuencia de sus múltiples vesículas o vacuolas, produce una **mayor absorción de ligante** en las mezclas. La experiencia en la fabricación de mezclas asfálticas con áridos de Canarias, demuestra que el empleo de áridos basálticos o fonolíticos para las mezclas asfálticas suele conducir a dosificaciones con un porcentaje de ligante **entre 0,5% y 1,5% superior** a las dosificaciones con otros tipos de áridos continentales para el mismo tipo de mezcla bituminosa.

A pesar de algunos de estos inconvenientes, de acuerdo con las propiedades exigidas a los áridos para las mezclas bituminosas, algunos áridos volcánicos como los procedentes de rocas masivas y poco porosas (B-M, FON, TRQB) pueden ser más adecuados para la fabricación de mezclas bituminosas que, por ejemplo, los áridos calizos. Sin embargo, pocos estudios han evaluado la posibilidad de emplear áridos diferentes a los convencionales de zonas continentales en mezclas asfálticas o cómo mejorar las características de una mezcla asfáltica cuando el árido disponible no es de buena calidad. Generalmente, estos trabajos se han centrado en sustituir o combinar la piedra caliza con basalto (Asi & Shalabi, 2007; Ibrahim et al. 2009; Cao et al., 2013), la utilización de cenizas volcánicas sustituyendo al árido fino o al polvo mineral (Faustino et al., 2005) o incluso la utilización de cenizas volcánicas como alternativa económica al árido convencional (Naji & Asi, 2008), pero no se ha realizado un completo estudio del comportamiento de las diferentes litologías de naturaleza volcánica en estos materiales asfálticos.

Para estas aplicaciones los áridos deben ser suficientemente resistentes a la fragmentación y al desgaste, por lo que han de provenir del machaqueo de rocas duras, deben ser no meteorizables y ser resistentes a la rotura y degradación que producen las acciones del tráfico y climáticas. Generalmente suele medirse esta propiedad mediante el Coeficiente de Desgaste de Los Ángeles (LA). Además deben estar exentos de finos plásticos (limpieza).

Tiene asimismo importancia la interacción química del árido con los betunes y la influencia de sus características superficiales en el comportamiento de las mezclas. Las propiedades de un árido dependen del origen de la roca de la que proceden y de su granulometría. Propiedades físicas tales como su comportamiento ante

alteraciones térmicas, adhesividad, porosidad, textura superficial, peso específico, forma y dureza; y químicas como la alcalinidad, contenido de cloruros, compuestos de azufre, sulfatos solubles, contaminantes orgánico ligeros, etc., son objeto de estudio para determinar la idoneidad de un árido a emplear en una mezcla bituminosa.

Uno de los posibles problemas de las mezclas bituminosas para pavimentación es la pérdida de partículas, directamente relacionado con la sensibilidad al agua de la mezcla. En este sentido, las características de los áridos (litología, textura, adhesividad con los ligantes) guardan relación con este fenómeno. Las propiedades físicas y químicas de los áridos, así como el tiempo de exposición de éstos a la intemperie en los acopios tienen un efecto significativo sobre la pérdida de partículas. Se debe evitar el uso de áridos hidrófilos, porque en caso contrario será indispensable el empleo de aditivos favorecedores de la adhesividad.

Las propiedades relacionadas con la forma de los áridos son también importantes. Una buena forma (anguloso y cúbico) es necesaria para la adecuada resistencia del esqueleto mineral y la correcta compacidad y cohesión de toda la mezcla. Por ejemplo, los áridos muy lajosos favorecen la aparición de fisuras.

En las capas superficiales del firme, éstos deben ser mucho más resistentes que los utilizados en capas inferiores debido a que están sometidos a esfuerzos más directos e intensos por las acciones del tráfico. Además de una dureza y una granulometría apropiadas, las capas superficiales requieren de ciertas características específicas generalmente más exigentes que en otras capas, entre las que se incluyen: resistencia a los esfuerzos tangenciales; resistencia al desgaste, abrasión y pulimentación; resistencia a los cambios climáticos y resistencia a los ataques químicos. La textura de la superficie y su capacidad para resistir el efecto del pulimento son esenciales para evitar el deslizamiento de los vehículos, especialmente a altas velocidades y con pavimentos mojados. A mayor dureza del árido, mayor será su resistencia al pulimento, que suele evaluarse mediante el Coeficiente de Pulimento Acelerado (PSV). También existe una relación entre la rugosidad de la rodadura y la angulosidad que presentan los áridos.

El árido fino (< 2 mm y $> 0,063$ mm) ha de ser no plástico y provenir del machaqueo de rocas de buena calidad, asegurando también una suficiente resistencia al desgaste, generalmente mediante el LA.

En cuanto al polvo mineral ($< 0,063$ mm), preferiblemente ha de ser de aportación, o proveniente del machaqueo de áridos para que no posea partículas hidrófilas y se mezclen bien con el betún para obtener un buen mástico. Para ello las partículas han de ser muy finas y no plásticas. Aunque el polvo mineral representa solo una pequeña parte del total del árido (5-7%), tiene un gran efecto sobre las propiedades de la mezcla asfáltica, ya que generalmente se utilizan para mejorar la adherencia entre el betún y los áridos, aumentar la densidad y la estabilidad de la mezcla, mejorar la durabilidad por envejecimiento y la resistencia a la fatiga.

Las especificaciones españolas para áridos en mezclas bituminosas vienen establecidas en la reciente Orden FOM/2523/2014 por la que se han actualizado los artículos al respecto del PG-3. Establecen que podrán utilizarse áridos naturales, artificiales o reciclados, siempre que cumplan con las especificaciones establecidas en dichos artículos del PG-3. Se definen tres tamaños de áridos: (a) árido grueso: material retenido por el tamiz 2 mm; (b) árido fino 0/2: material que pasa por el tamiz 2 mm y retenido por el 0,063 mm; (c) polvo mineral: material que pasa por el tamiz 0,063. Para el árido grueso se establecen requisitos en cuanto a: procedencia, grado de meteorización de las partículas, absorción, angulosidad (Porcentaje de caras de fractura), forma (Índice de lajas), resistencia a la fragmentación (Coeficiente de Los Ángeles, LA), resistencia al pulimento (Coeficiente de Pulimento Acelerado, PSV), limpieza (contenido de finos e impurezas). Para el árido fino,

las prescripciones están relacionadas con: procedencia, limpieza y resistencia a la fragmentación (LA). Finalmente, con respecto al polvo mineral, las exigencias tienen que ver con su procedencia, granulometría, finura y actividad (densidad aparente).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Principales conclusiones de este trabajo:

Los áridos volcánicos procedentes de rocas volcánicas de coladas lávicas masivas suelen presentar elevadas densidades y buenas propiedades mecánicas. Se corresponden con los siguientes litotipos, que ordenados de mayor a menor resistencia y densidad suelen ser: B-OP-M, FON, B-AF-M, TRQB y B-PL-M.

Sin embargo, con bastante frecuencia las rocas volcánicas suelen presentar estructuras alveolares y escoriáceas muy porosas, asociadas a la elevada velocidad de descompresión y de enfriamiento que experimentan las coladas, así como a procesos de alteración hidrotermal.

Consecuencia de la elevada porosidad es la alta absorción que presentan muchos de los áridos volcánicos (B-V y B-ES, piroclastos, etc.). Esto se traduce en posibles problemas de alteración por los agentes externos y, también de modo especial, en un mayor consumo de materiales conglomerados y ligantes necesarios para la fabricación de hormigones o mezclas bituminosas. La experiencia en Canarias, muestra que el empleo de áridos basálticos o fonolíticos para las mezclas asfálticas suele conducir a dosificaciones con un porcentaje de ligante entre 0,5% y 1,5% superior a las dosificaciones con otros tipos de áridos continentales para los mismos tipos de mezcla bituminosa.

Los coeficientes de forma de muchos áridos procedentes del machaqueo de rocas volcánicas masivas no resultan demasiado adecuados, con una tendencia a elevados porcentajes de partículas con formas de lascas y agujas. (El índice de lascas (UNE-EN 933-3) muy frecuentemente es superior a 25 y el coeficiente de friabilidad (UNE-EN 1097-2) presenta amplia variabilidad, entre 14 y 20).

Esta estructura produce en los litotipos de menor densidad y resistencia problemas de degradación granulométrica en los procesos de compactación en obra (puede llegar a producirse un aumento de finos en su granulometría entre el 2% y el 3%, por rotura de su estructura). Sin embargo, esta modificación granulométrica puede mejorar los índices de lascas y agujas tras el proceso de compactación (mejora del 17,4% y del 22,4%, respectivamente), debido al proceso de fracturación de algunas partículas por el compactador.

Las propiedades de los áridos volcánicos suelen presentar una elevada variabilidad con gran dispersión estadística, incluso dentro de la misma capa litológica, debido al carácter aleatorio que tiene la fábrica mineral de las coladas. Además, su distribución espacial muestra una elevada heterogeneidad debido a la escasa continuidad lateral de los materiales, incluso dentro de un mismo yacimiento.

El índice LA en los basaltos oscila entre 18 y 43. Las traquitas y fonolitas presentan valores entre 21 y 43. Las ignimbritas no soldadas presentan valores altos en torno a 55 y superiores. Las ignimbritas soldadas presentan valores alrededor de 30 y 40. Según esto, resultan adecuadas para la fabricación de hormigones y mezclas asfálticas las traquitas, fonolitas y algunos tipos de basaltos (como los masivos y afaníticos), pero se desaconseja el empleo de ignimbritas soldadas, no soldadas y de algunos tipos de basaltos (como los escoriáceos y excesivamente vacuolares). En la construcción de carreteras, se pueden emplear como capas de base granulares no tratadas prácticamente todos los litotipos estudiados a excepción de las IGNS y algunas IGS.

Los áridos volcánicos empleados en capas granulares de firmes, que no han sido tratadas por su mayor permeabilidad, pueden presentar mayor insensibilidad a las variaciones de humedad en los ensayos de compactación Proctor. Esto se debe a que las humedades medidas en la capa compactada tienden a subestimar o infravalorar a las que efectivamente han intervenido en el proceso de compactación.

Recomendaciones para la mejora del comportamiento de los áridos volcánicos:

Resulta necesario adoptar frecuentes controles de la producción, almacenamiento y manipulación de acopios para asegurar unas condiciones regulares en la fabricación del árido, así como su adecuado ajuste a los husos granulométricos y a las tolerancias máximas admisibles con relación a la curva tipo declarada. De la misma manera, se recomienda un control de la extracción en la cantera, para asegurar la separación de los diferentes materiales excavados en el propio frente de explotación.

Las variaciones en las características de los áridos son muy dependientes de su proceso de obtención y tratamiento, de manera que con determinados procedimientos y equipos modernos de plantas de machaqueo (proyección centrífuga de las partículas) es posible mejorar el índice de lascas y el porcentaje de caras de fractura durante su producción en la planta.

Posibilidad de realizar mezclas de áridos volcánicos de carácter marginal (B-V, B-ES, ciertos piroclastos) con áridos volcánicos seleccionados (B-M, FON, TRQB). Esta línea será objeto de investigación en el marco de este mismo proyecto.

Para reducir los procesos de degradación granulométrica durante la compactación, en la fabricación de mezclas asfálticas se propone investigar la adición de caucho procedente de NFU.

El comportamiento de las capas granulares de firmes pueden mejorarse mediante la estabilización o tratamiento con ligantes y conglomerantes, así como con escarificaciones sucesivas, a medida que se compactan las diferentes tongadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo adelanta algunos resultados obtenidos en el marco del proyecto de I+D+i “VOLCANIC BC-WARM, Desarrollo sostenible de mezclas bituminosas semicalientes fabricadas con NFU y áridos volcánicos de Canarias (Ref. BIA2013-47987-C3-3-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

REFERENCIAS

- Asi, I.M.; Shalabi. (2007). “Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes”. *Build Environ J.* 42 (1): 325-329.
- Cao, W.; Liu, S.; Feng, Z. (2013). “Comparison of performance of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates”. *Construction & Building Materials*, 41: 474-479.
- Faustino, R.P.; O’Connell, M.J.; Valencia, N.R.; Ford, W. (2005). “Making effective use of volcanic ash in road-building in the Philippines”. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5: 868-876.
- Franesqui, M.A.; Castelo-Branco, F.; Azevedo, M.C.; Moita, P. (2010). Construction experiences with volcanic unbound aggregates in road pavements. En: Olalla et al. (eds.). *Volcanic Rock Mechanics*. London: Taylor & Francis Group. p. 241-247.
- Gobierno de Canarias (2011). *Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias*. GETCAN-011. 114 p.
- Hawaii Department of Transportation HDT. (2005). *Standard Specifications*. 304-Aggregate base course.
- Hernández-Gutiérrez, L.E.; Rodríguez-Losada, J.A.; Hernández-Fernández, S. (2008). “Resistencia a la fragmentación de rocas volcánicas como áridos para hormigones y asfaltos”. *Geo-Temas*, 10: 887-890
- Ibrahim, A.; Faisal, S.; Jamil, N. (2009). “Use of basalt in asphalt concrete mixes”. *Construction & Building Materials*, 23: 498-506.
- Lomoschitz, A.; Jiménez, J.R.; Yepes, J.; Pérez-Luzardo, J.M.; Macías-Machín, A.; Socorro, M.; Hernández-Gutiérrez, L.E.; Rodríguez Losada, J.A.; Olalla, C. (2006). “Basaltic Lapilli Used for Construction Purposes in the Canary Islands, Spain”. *Environmental & Engineering Geoscience*, 12 (4): 327-336.

Naji, J.A.; Asi, I.M. (2008). "Performance evaluation of asphalt concrete mixes containing granular volcanic ash". ASCE - Journal of Materials in Civil Engineering, 20 (12): 754-761.

Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. (2014). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras

de Carreteras y Puentes (PG-3). Art. 542-Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso. Art. 543- Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. Orden FOM/2523/2014.