

CARRETERAS

Asociación
Española de la
Carretera

4ª ÉPOCA - NÚM. 164 - MARZO/ABRIL 2009 - REVISTA TÉCNICA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

Mezcla drenante con polvo de neumático. Propiedades acústicas

Mapas de ruido de carreteras del Estado en Cantabria

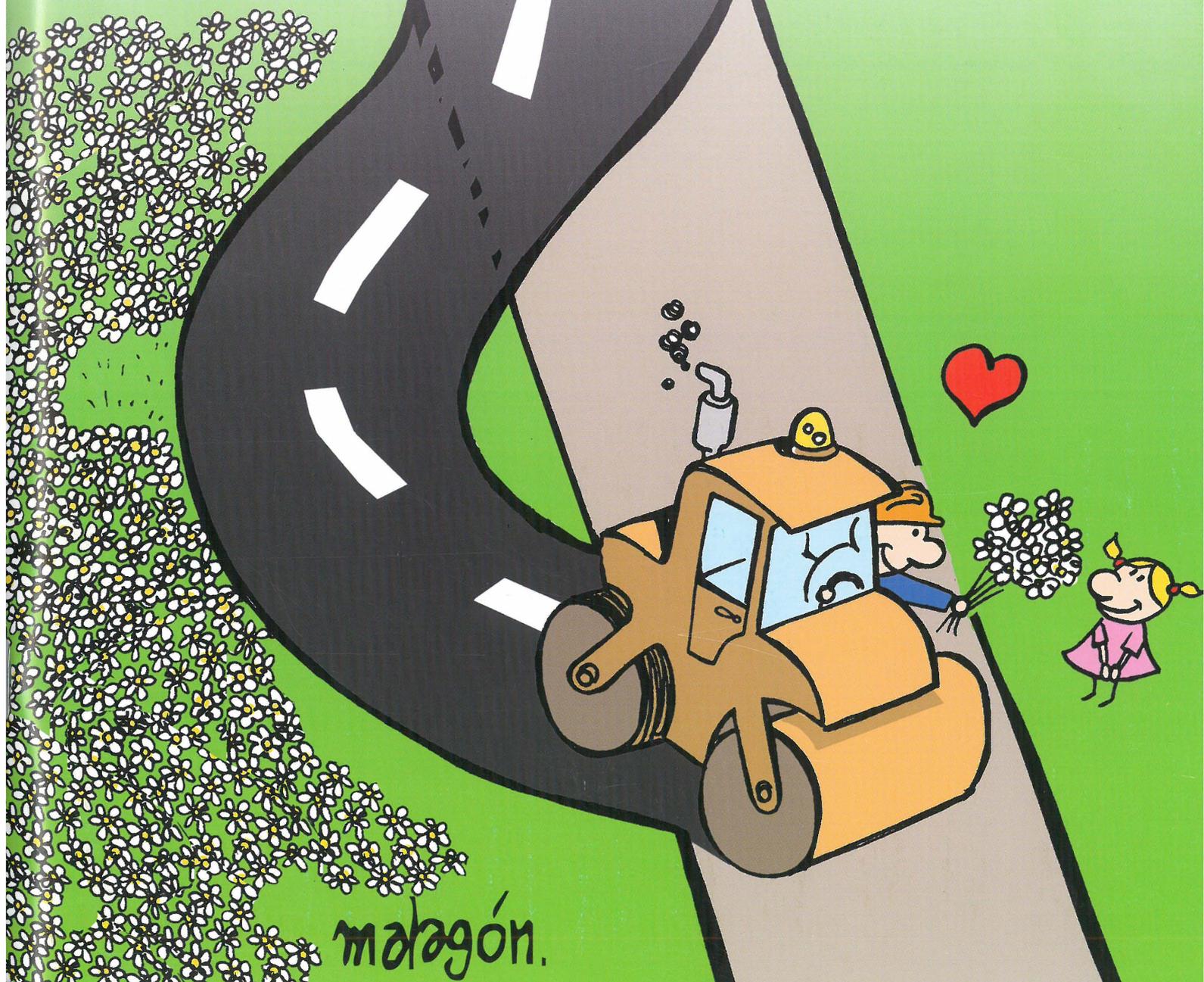
Áridos volcánicos en capas granulares no tratadas

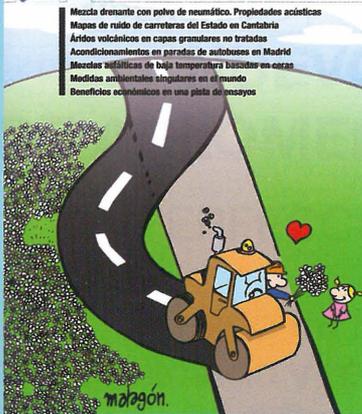
Acondicionamientos en paradas de autobuses en Madrid

Mezclas asfálticas de baja temperatura basadas en ceras

Medidas ambientales singulares en el mundo

Beneficios económicos en una pista de ensayos





Serie temática 2009:

**Carretera amable.
UNA SONRISA PARA LA REFLEXIÓN.**

CONSEJO DE REDACCIÓN:

Presidente:

Julio González de Pedroviejo

Vocales:

Mercedes Aviñó Bolinches
Luis Ayuso Sánchez
Alberto Bardesi Orúe-Echevarría
Carlos Cristóbal Pinto
Federico Fernández Alonso
Juan Gallego Medina
Francisco Gutiérrez Ferrández
José Antonio Hinojosa Cabrera
Juan José Jarillo Rodríguez
Jesús M^a Leal Bermejo
José Vicente Martínez Sierra
José Montoya Pérez
Pablo Nobell Rodríguez
Elena de la Peña González
Juan José Potti Cuervo
José Quereda Laviña
Sebastián de la Rica Castedo
Rodolfo Sáenz de Ugarte Corres
Luis Alberto Solís Villa
José Antonio Soto Sánchez
Paloma Tello Lucini
Ramón Tomás Raz
Aniceto Zaragoza Ramírez

PRESIDENTE:

Miguel M^a Muñoz Medina

DIRECTOR:

Jacobo Díaz Pineda

DIRECTORA EJECUTIVA:

Marta Rodrigo Pérez

DIRECTOR TÉCNICO:

Recaredo Romero Amich

REDACTORA JEFE:

Susana Rubio Gutiérrez

REDACCIÓN:

Iván Corzo Reino
Beatriz Rodríguez López

DISEÑO Y MAQUETACIÓN:

Jose María Gil • David Villar

EDICIÓN Y PUBLICIDAD:

COMUNICACIÓN Y DISEÑO

O'Donnell, 18 - 5^a H

28009 Madrid

☎ 91 432 43 18 Fax: 91 432 43 19

e-mail: comdis@cydiseno.com

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

Goya, 23 - 3^o y 4^o Derecha

28001 MADRID

☎ 91 577 99 72 Fax: 91 576 65 22

e-mail: aec@aecarretera.com

http://www.aecarretera.com

SUSCRIPCIÓN ANUAL (Año 2009):

España: 65 Euros (IVA incluido)

Europa: 107 Euros • América: 165 \$ / 115 Euros

IMPRIME: Gráficas Marte

Déposito Legal: M - 19.439-1975

ISSN: 0212 - 6389

Las opiniones vertidas en las páginas de Carreteras no coinciden necesariamente con las de la Asociación Española de la Carretera o las del Consejo de Redacción de la publicación.

Editorial

Público y privado

4

Artículos Técnicos

Diseño de una mezcla drenante con polvo de neumático a partir de sus propiedades acústicas

Carlos García Serrada
Julio del Cerro Iglesias
Miguel Ángel Morcillo López
José Andrés González Ganso
M^a José Hernández Echegaray

6

Elaboración de los Mapas estratégicos de ruido de las carreteras del Estado en Cantabria y Plan de Acción

David Llamas Alonso
Paulo César Ceballos Arenal

20

Áridos volcánicos en capas granulares no tratadas: control de la compactación e influencia de la rigidez del cimiento

Miguel Ángel Franesqui García
Fernando Castelo Branco

34

Acondicionamientos en las paradas del transporte público colectivo de superficie en Madrid

José Mario Villoria Noriega

48

Mezclas asfálticas de baja temperatura basadas en ceras

Thorsten Butz

62

Por las carreteras del mundo: medidas ambientales singulares

Nerea Aizpurua Giráldez

77

Beneficios económicos resultantes de la investigación de carreteras llevada a cabo en MnROAD

Benjamin J. Worel
Maureen Jensen
Timothy R. Clyne

85

Documento

Carreteras en el este de Europa (II)

100

Tribunas

El Ensayo Acelerado de Firmes como herramienta básica de investigación en carreteras

Ángel Mateos Moreno
Javier Pérez Ayuso

104

El Free-flow en las Autopistas Españolas

Raúl Berganza
Iñigo Larraondo

106

Área de Servicio

110

Desde el Arcén

¿Seguro?

Luis Ayuso Sánchez

123

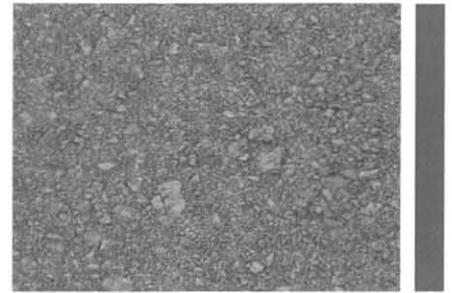
Guía Profesional de Empresas Colaboradoras

125

EMPRESAS COLABORADORAS



Áridos volcánicos en capas granulares no tratadas: control de la compactación e influencia de la rigidez del cimiento



Volcanic aggregates for unbound granular courses: control of field compaction and influence of subgrade stiffness

Miguel Ángel FRANESQUI GARCÍA

Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

Fernando CASTELO BRANCO

Ingeniero Geólogo-Máster en Ingeniería Civil (Portugal)

RESUMEN

Este trabajo experimental pretende profundizar en el conocimiento y comportamiento de los materiales granulares procedentes de rocas de origen volcánico utilizados en la construcción de explanadas y capas de firme no tratadas de granulometría continua. Se intenta clarificar algunas dudas frecuentes relativas a su adecuación para dicho uso, al cumplimiento de las prescripciones técnicas habitualmente establecidas en la normativa de diferentes países, y a la metodología y criterios que deberían utilizarse para el control de su compactación y capacidad portante.

Para ello se han recopilado también experiencias de algunas regiones insulares atlánticas europeas con terrenos similares, aportándose recomendaciones adicionales para el caso de materiales volcánicos como los de las islas Canarias o Azores. Los resultados experimentales ponen de manifiesto que es posible alcanzar con éstos materiales granulares no tratados una buena densificación y capacidad de soporte, y que los ensayos de referencia habituales también les pueden ser aplicados. La investigación in situ de los procedimientos de ejecución y de la influencia de las condiciones de su cimentación ha permitido obtener una relación entre el grado de compactación y el valor del módulo equivalente del cimiento.

Palabras clave: Capa granular no tratada, Árido volcánico, Compactación, Capa de base, Módulo equivalente, Cimiento, Explanada.

ABSTRACT

This experimental research discusses the knowledge and behaviour of the granular materials resulting from volcanic rocks used in the construction of subgrades and continuous grading unbound aggregate base courses. Some frequent doubts related to its suitability for the above mentioned use, to its observance of the technical specifications of different countries, and to the methodology and criteria to control the field compaction and bearing capacity are intended to be clarified.

For this purpose some experiences of several European Atlantic islands are compiled and additional recommendations are contributed for volcanic aggregates as those of Canaries or Azores. The experimental results reveal that it is possible to reach with these granular materials a good compaction and load-carrying capacity, and that standard tests also can be used. The "in situ" study has allowed to obtain the rate of compaction as a function of the modulus of subgrade reaction.

Key words: Unbound granular material, Volcanic aggregate, Soil compaction, Aggregate base course, Modulus of subgrade reaction, Foundation, Subgrade.

Los materiales granulares de granulometría continua, procedentes de piroclastos volcánicos o de la fragmentación natural o trituración artificial de rocas de naturaleza volcánica como basaltos o fonolitas, son frecuentemente utilizados en algunas regiones atlánticas europeas como en las islas Canarias, Azores, Madeira, Cabo Verde o Islandia para la construcción de explanadas, subbases y bases de firmes (ver Foto 1). En este trabajo se analiza un caso práctico, acompañado de un estudio experimental, de construcción de capas de base con áridos obtenidos del machaqueo de rocas basálticas para el firme de la carretera regional ER N° 2-1ª "Barreiros-Cruzamento do Salto de Cavallo" en las Islas Azores (Portugal).

Tradicionalmente las 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 bien graduada caracteriza un alta compacidad. Éstas últimas en España reciben la denominación tradicional de *zahorras* y en Portugal se suelen referir como *áridos de granulometría extensa (AGE)*. En lo que sigue, y con objeto de unificar ambas nomenclaturas, se empleará el término genérico de *capas granulares no tratadas de granulometría continua (CGGC)*.

El proyecto de construcción contemplaba la ejecución de la capa de base granular del firme en dos situaciones de cimentación diferentes:

- Sobre una explanada ejecutada con un material granular natural de tipo *lapilli* (piroclastos basálticos), formado por partículas centimétricas y de menor tamaño obtenido de los depósitos de conos piroclásticos (en Canarias recibe el nombre local de *picón* y en las Azores de *bagacina*). Su coloración suele ser rojiza (ver Fotos 2 y 3) o negra. Se trata de materiales muy característicos de estas regiones, con partículas generalmente poco densas y muy porosas, 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 0,8-1,98 g/cm³ y humedades óptimas entre 9-20%) y CBR (10-32) generalmente se corresponden

con materiales de buena calidad para explanaciones. En estos tramos estaba previsto construir nueva toda la estructura del firme, incluyendo la excavación del terreno existente y la ejecución de los rellenos y explanada con estos materiales piroclásticos compactados sobre los que se asienta la capa de base granular (CGGC).

- En otros tramos estaba previsto construir la base granular directamente sobre el pavimento existente (tras su escarificación y recompactación). Éste estaba compuesto por una capa de macadam de semi-penetración (técnica tradicional ya en desuso) sobre una capa de material granular tipo *lapilli*.

Inicialmente fueron realizados 12 tramos de prueba en obra en los que se mantiene constante el tipo de material utilizado (CGGC) y su procedencia (cantera de un productor local), variándose el procedimiento de ejecución, número y espesor de las tongadas, condiciones de cimentación de la capa de base y medios de compactación empleados, con el objetivo de establecer las condiciones y procedimiento constructivo más adecuados.

La problemática aparecida durante la ejecución de los anteriores tramos de prueba estaba relacionada con ciertas dudas relativas a la adecuación de los materiales locales de origen volcánico para su empleo como capas de base granulares no tratadas (CGGC). La Administración regional promotora del proyecto había puesto especial énfasis en destacar el no cumplimiento de forma estricta del material local de naturaleza basáltica en cuanto a granulometrías para su utilización como bases granulares según los actuales pliegos de prescripciones técnicas para carreteras portugués o español.

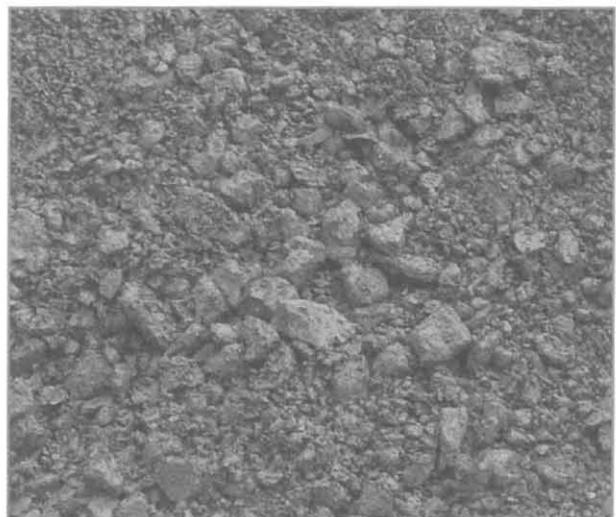


Foto 1. Aspecto del material de origen volcánico para CGGC en acopio tras humectación y homogeneización.



Foto 2. Ejecución del tramo experimental con capa de base granular de 0,20 m de espesor sobre explanada de lapilli rojo compactado (PK 0+600 a 0+700): Extensión y nivelación.

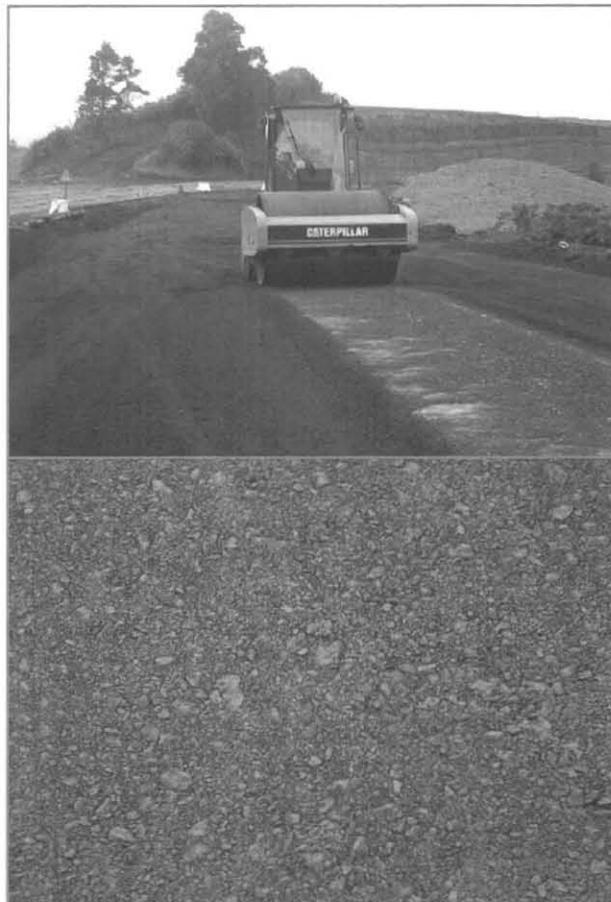


Foto 3. Ejecución del tramo experimental con capa de base granular de 0,20 m de espesor sobre explanada de material tipo lapilli rojo compactado (PK 0+600 a 0+700): Compactación y aspecto final.

Además, planteaba sus interrogantes en cuanto a la validez de utilización del ensayo Proctor como metodología y ensayo de referencia para el control de la compactación en obra, ante la posibilidad de que en el caso de materiales de origen volcánico como los basaltos no fuese estrictamente aplicable por razones de su supuesta mayor insensibilidad a las variaciones de humedad. Por otra parte, en las primeras etapas de la ejecución se constató una tendencia hacia una mayor dificultad de obtención de densidades suficientes cuando la capa de base granular se compactaba sobre el pavimento existente (independientemente del tratamiento previo de éste) comparada con la ejecución sobre nueva explanada.

El propósito de esta investigación ha sido la comprobación experimental *in situ* de la influencia de las condiciones de cimentación y del procedimiento de ejecución de las CGGC en el grado de compactación alcanzado, así como validar la utilización y adecuación de estos materiales locales de origen volcánico para este fin, y las especificaciones y ensayos para el con-

trol de su compactación. En este trabajo se presenta la metodología empleada y el análisis de los resultados experimentales en relación con los criterios de compactación utilizables para capas granulares de naturaleza volcánica.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

Se han construido adicionalmente dos nuevos tramos experimentales de ensayo sobre la traza, de aproximadamente 100 m de longitud cada uno, sobre los que se ha llevado a cabo una importante campaña de ensayos *in situ* y de laboratorio para caracterizar dichos materiales, así como la recopilación de experiencias en regiones con materiales similares.

En ambos se ha procurado mantener constantes todas las condiciones relacionadas con el material utilizado (CGGC, Foto 1), y los medios y proceso de compactación, variándose únicamente las condiciones de cimentación o apoyo de la capa de base. Se

han acompañado mediante la recogida de muestras en 3 calicatas por cada tramo para la caracterización de los materiales, y el control de los índices de huecos y densidades de la capa compactada. Además se ha realizado una campaña de medición de los módulos de compresibilidad de las explanadas sobre las que fueron ejecutadas las CGGC en los tramos experimentales mediante deflectómetro de impacto.

1. Metodología

1.1. Ejecución de tramos experimentales de ensayo

El proceso de construcción del tramo experimental ejecutado sobre nueva explanada de material granular local de tipo lapilli compactado (PK 0+600 a 0+700) ha incluido la extensión del material para la capa de base granular en tongadas de 0,20 m de espesor y la compactación en 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 y 36 pasadas simples con compactador de 18,5 t en modo vibratorio (ver Fotos 2 y 3).



Foto 4. Ejecución del tramo experimental sobre pavimento existente (PK 3+600 a 3+700): Escarificado y compactación previa, y posterior extendido y nivelación de la CGGC.

El otro tramo experimental ejecutado sobre pavimento existente previamente escarificado (PK 3+600 a 3+700) ha seguido un proceso de construcción similar al caso anterior, con la diferencia de que la preparación de la capa de asiento de la CGGC se efectúa escarificando el pavimento existente de macadam de semi-penetración y su posterior recompactación realizando 16 pasadas simples de compactador en modo vibratorio (ver Fotos 4 y 5).

1.2. Campaña de recogida de muestras y caracterización en laboratorio

La verificación de la adecuación de los materiales existentes procedentes de la trituración de rocas basálticas en plantas de productores locales para su empleo como capas de base granulares no tratadas de granulometría continua (CGGC) y del cumplimiento de las prescripciones técnicas establecidas en la normativa han sido abordados mediante una campaña de recogida de muestras y posterior caracterización en laboratorio. Además esta campaña tiene también por objetivos evaluar la posible alteración de las características del árido tras su compac-



Foto 5. Ejecución del tramo experimental sobre pavimento existente (PK 3+600 a 3+700): Humectación y compactación.

tación, su trabajabilidad y sus propiedades relacionadas con la compactación (absorción de agua, densidades máximas y humedades óptimas).

Para ello se recogieron 7 muestras: una en los acopios, después de la humectación y homogeneización, y 3 muestras por cada tramo de ensayo en otras tantas calicatas uniformemente separadas sobre la capa ya compactada. La recogida y preparación de estas muestras se efectuó según las normas portuguesas NP EN 932-1⁽¹⁾ y NP EN 932-2⁽²⁾.

Los ensayos de laboratorio realizados sobre cada una de las muestras han sido:

- Análisis granulométrico por tamizado: Norma LNEC E 233⁽³⁾. (La serie de tamices de esta norma portuguesa fue aumentada con los tamices 11,2 y 22,4 mm de la serie europea).
- Índice de lajas y de agujas: Normas británicas BS 812-105.1⁽⁴⁾ y BS 812-105.2⁽⁵⁾ (preconizadas en Portugal para estos ensayos).
- Sobre las muestras obtenidas en los tramos experimentales se han realizado:
 - Densidad de las partículas para fracciones <4,75 mm (NP 954)⁽⁶⁾, 4,75/19 mm y >19 mm (NP 581)⁽⁷⁾. (En el PG-3 español suelen prescribirse las fracciones <4 mm, 4/20 mm y >20 mm, para zahorras [Art. 510]. La norma española de ensayo es la UNE-EN 1097-6)⁽⁸⁾.
 - Absorción de agua de las partículas sólidas para fracciones <4,75 mm (NP 954), 4,75/19 mm y >19 mm (NP 581, UNE-EN 1097-6).
 - Ensayo de compactación Proctor Modificado con corrección de gruesos (LNEC E 197)⁽⁹⁾. Esto permite corregir la densidad seca máxima y humedad óptima, obtenidas a partir del ensayo, por efecto de la eliminación de las partículas más gruesas (D>19-20 mm) para la realización de éste, las cuales en cambio sí están presentes en la compactación en obra:

siendo:

$$\gamma_{d\text{máx. corregida}} = \left(\frac{100}{\frac{\%G}{\gamma_G} + \frac{\%R}{1 \cdot \gamma_{d\text{máx.}}}} \right) \quad [1]$$

$$\omega_{\text{opt. corregida}} = \frac{\%G \cdot \%A_G + \%R \cdot \omega_{\text{opt.}}}{100} \quad [2]$$

%G	porcentaje de partículas gruesas (D>19 mm [20 mm en España]);
γ_G	densidad de las partículas gruesas (D>19 mm);
%R	porcentaje de partículas restantes (D<19 mm);
$\gamma_{d\text{máx.}}$	densidad seca máxima obtenida en el ensayo PM;
%A _G	Absorción de agua de las partículas gruesas (D>19 mm); y
$\omega_{\text{opt.}}$	humedad óptima obtenida en el ensayo PM.

1.3. Ensayos *in situ* para la caracterización de las condiciones de cimentación de las capas de base granulares

Como complemento del estudio experimental, y tratando de verificar diferencias en el comportamiento estructural de la plataforma de apoyo de la capa de base granular, se ha llevado a cabo una campaña de ensayos dinámicos *in situ* con un deflectómetro de impacto Carl BRO Pri 2100.

Los ensayos se realizaron directamente sobre la explanada ejecutada con material de tipo lapilli rojo y sobre el pavimento antiguo una vez escarificado y recompactado. Se efectuaron 20 ensayos en cada tramo experimental distribuidos uniformemente en su longitud, disponiendo 9 geófonos en dos alineaciones paralelas coincidentes con los carriles de circulación. El diámetro de la placa utilizada ha sido de 450 mm y las cargas aplicadas de 20 y 40 kN.

RESULTADOS

1. Caracterización del material y comparación con las especificaciones de diferentes países europeos

Los resultados de los ensayos de laboratorio descritos se resumen en la Tabla 1.

		Muestra obtenida en acopio	Muestra de CGGC compactada sobre pavimento existente	Muestra de CGGC compactada sobre explanada de material tipo lapilli
Índice de lascas (%)		23	19	19
Índice de agujas (%)		29	25	20
Densidad de las partículas (g/cm ³)	Fracción >19 mm	-	2,67	2,68
	Fracción 4,75/19 mm	-	2,70	2,71
	Fracción <4,75 mm	-	2,76	2,76
	Media ponderada	-	2,73	2,73
Absorción de agua (%)	Fracción >19 mm	-	2,1	2
	Fracción 4,75/19 mm	-	1,9	1,8
	Fracción <4,75 mm	-	1,2	1,8
	Media ponderada	-	1,6	1,8
Ensayo de compactación PM	Densidad seca máxima (g/cm ³)	-	2,32	2,32
	Humedad óptima (%)	-	7,5	7,5
	Densidad seca máxima corregida (g/cm ³)	-	2,34	2,35
	Humedad óptima corregida (%)	-	7,1	7,0

Tabla 1. Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio sobre las muestras de CGGC obtenidas en los tramos experimentales.

Como puede verse en las curvas granulométricas medias obtenidas a partir de las muestras ensayadas (Figura 1), el material empleado es ligeramente deficitario en tamaños superiores a 9,5 mm, de acuerdo con el huso 0/31,5 de las prescripciones de Estradas de Portugal (EPE-98)(10), y de tamaños superiores a 2 mm según las del PG-3 español para una ZA25 (Art. 510).

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 dificultades en cuanto a compactación ya que los valores recomendables para alcanzar una buena densificación suelen ser: $C_u \geq 6$; $1 \leq C_c \leq 3$. Estos parámetros granulométricos son por ejemplo también exigidos (además del cumplimiento del huso) en las especificaciones portuguesas para capas de subbalasto de la red ferroviaria.

Por otra parte, si se consideran las especificaciones de las normas armonizadas portuguesa NP EN 13242⁽¹¹⁾ o española UNE-EN 13242⁽¹²⁾ en cuanto a las tolerancias admisibles en relación con la granulometría declarada por el productor, al comparar el huso granulométrico que incluya las máximas tolerancias respecto a la curva típica declarada por el suministrador para una categoría de árido GT_A20 (según esta última norma, es el más similar a nuestro caso), conjuntamente con las tolerancias máximas de la normativa del pliego portugués EPE, puede comprobarse que todas las muestras analizadas se

ajustan perfectamente dentro de dicho huso. Por tanto, es posible asegurar la conformidad en lo referente a la regularidad granulométrica del producto suministrado, si bien será preciso realizar muestreos frecuentes.

Las variaciones de las características del material granular pueden obedecer a tres causas principales:

- Alteraciones de la naturaleza de la materia prima, que pueden condicionar tanto sus propiedades granulométricas como sus características físicas, químicas y mecánicas. En este sentido es importante hacer notar que en el caso de materiales de origen volcánico las variaciones de sus características y propiedades son más frecuentes de lo habitual en otras zonas continentales. Esta heterogeneidad puede tener un impacto significativo sobre propiedades relevantes y valores de referencia a adoptar, como la porosidad, densidades y resistencia mecánica de las partículas, que pueden ser muy variables. 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. Hay que considerar además que la resistencia de las partículas influye en la compactabilidad y la deformabilidad de las capas granulares: los de partículas menos resistentes son más fácilmente com-

pactables por sufrir mayor degradación granulométrica en este proceso, pero esto también puede aumentar los asentos 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.

- Características del proceso de fabricación del árido. Las alteraciones relevantes en el proceso de producción, como las alteraciones en la trituración o el cribado, conducen habitualmente a variaciones en la granulometría pretendida. En el caso que nos ocupa, se pudo asegurar unas condiciones de producción en un nivel de regularidad adecuado gracias a un control intenso por parte del productor.
- Condiciones de almacenamiento y de manipulación en acopios. Igual que en el caso anterior pueden provocar modificaciones de la granulometría del producto que han de ser también controladas por el suministrador.

En cualquier caso, una eventual dispersión de las características granulométricas no ha de tener consecuencias significativas en cuanto a su trabajabilidad y eficacia del proceso de compactación, ya que estamos ante una granulometría suficientemente continua y extensa según se razonó anteriormente.

En la misma Figura 1 puede también apreciarse la modificación granulométrica debida al proceso de compactación en obra con relación a la que presenta el material en el acopio de la planta de producción, comprobándose que no es muy significativa (incremento de finos de un 1,5%). En cuanto a las características de forma de las partículas los resultados muestran que las diferencias son muy poco relevantes entre las muestras obtenidas de la CGGC en las dos diferentes condiciones de cimentación. Sin embargo sí se ha apreciado una mejora de los índices de lajas y agujas tras el proceso de compactación, tendencia que concuerda con lo referido anteriormente respecto a su evolución granulométrica debido

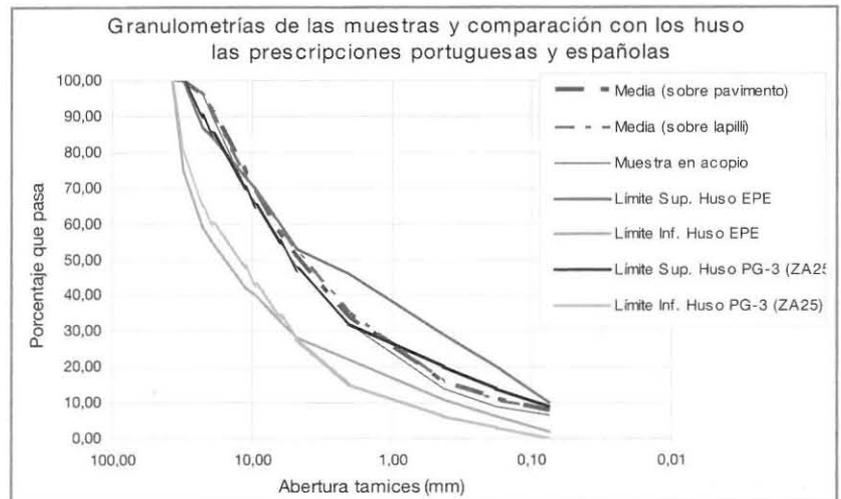


Figura 1. Resultados del análisis granulométrico de las muestras de CGGC y husos de las prescripciones para obras de carreteras portuguesas y españolas.

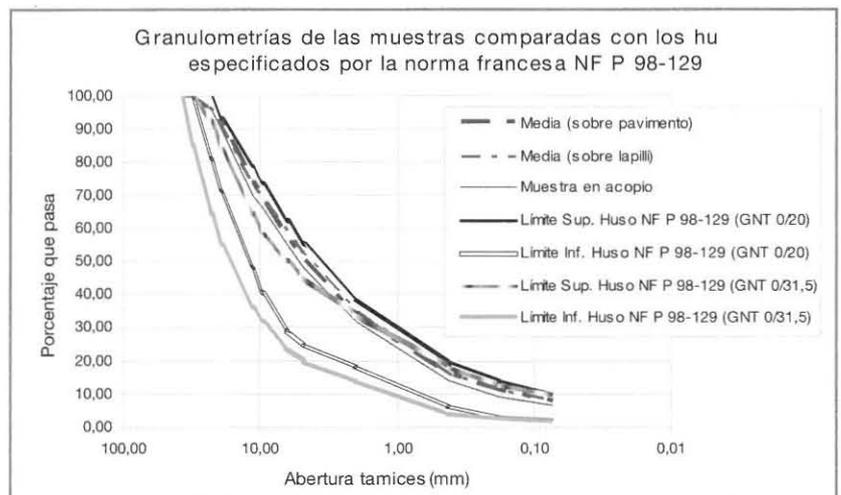


Figura 2. Granulometrías de las muestras ensayadas y husos especificados en la norma francesa NF P 98-129.

al proceso de fracturación de algunas partículas por el compactador.

Las especificaciones francesas^(13,14) para materiales granulares no tratados preconizan tres husos posibles, a saber: 0/14, 0/20 y 0/31,5. Para las clases de tráfico más exigentes (T0 a T3) se establecen los husos 0/14 y 0/20, y solamente se adopta el 0/31,5 para tráficos T4 y T5. En la Figura 2 se han representado las curvas granulométricas medias obtenidas a partir de las muestras ensayadas comparadas con los husos 0/20 y 0/31,5 de la norma francesa NF P 98-129⁽¹⁵⁾. Como puede verse en la gráfica, todas las curvas granulométricas, tanto las obtenidas en obra en los dos tramos de ensayo como sobre muestra en acopio, se ajustan aceptablemente al primero de estos husos.

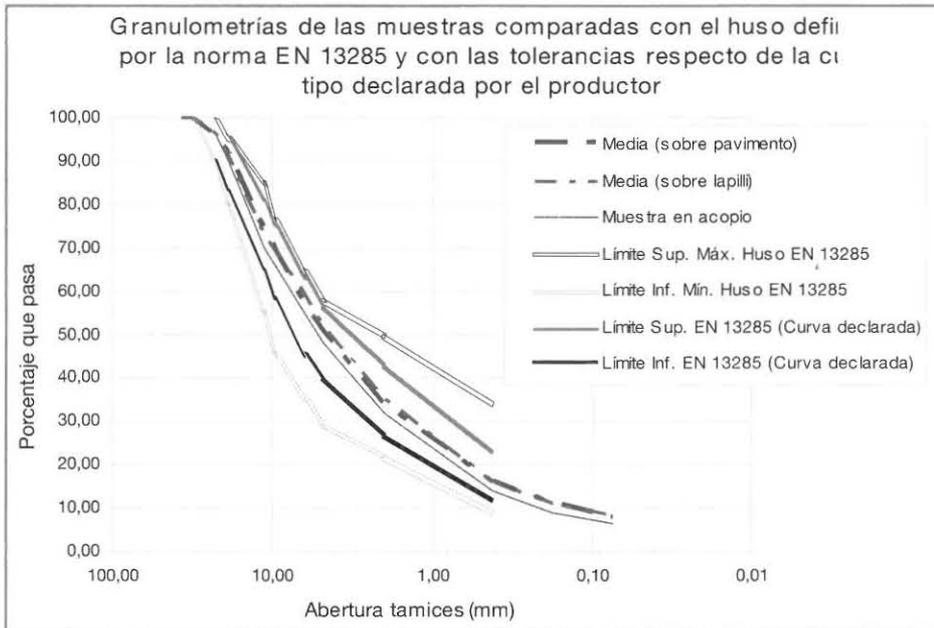


Figura 3. Granulometrías de las muestras ensayadas comparadas con el huso especificado y las tolerancias admisibles en cuanto a regularidad granulométrica para la curva típica declarada por el productor según la norma europea EN 13285.

la curva típica declarada por el productor.

Considerando las categorías más exigentes especificadas en esta norma (OC90 y GA), en la Figura 3 se han dibujado las mismas curvas granulométricas medias resultantes de los ensayos para su comparación con el huso especificado en dicha norma, así como el huso definido por las máximas tolerancias admisibles respecto a la curva típica declarada por el productor para una granulometría 0/20. De igual forma que en el caso anterior, también se evidencia del análisis del gráfico que el material usado como capa de base cumple los requisitos de la norma europea, constatando además un buen control del proceso de fabricación y almacenamiento por parte del suministrador.

2. Control del proceso de compactación: criterios y ensayos de referencia

En los dos tramos de ensayo se han efectuado pruebas de compactación con la misma maquinaria variando la energía aportada en función del número de pasadas del rodillo en modo vibratorio. El pliego de condiciones portugués para obras de carreteras (EPE) establece como valor de referencia a efectos

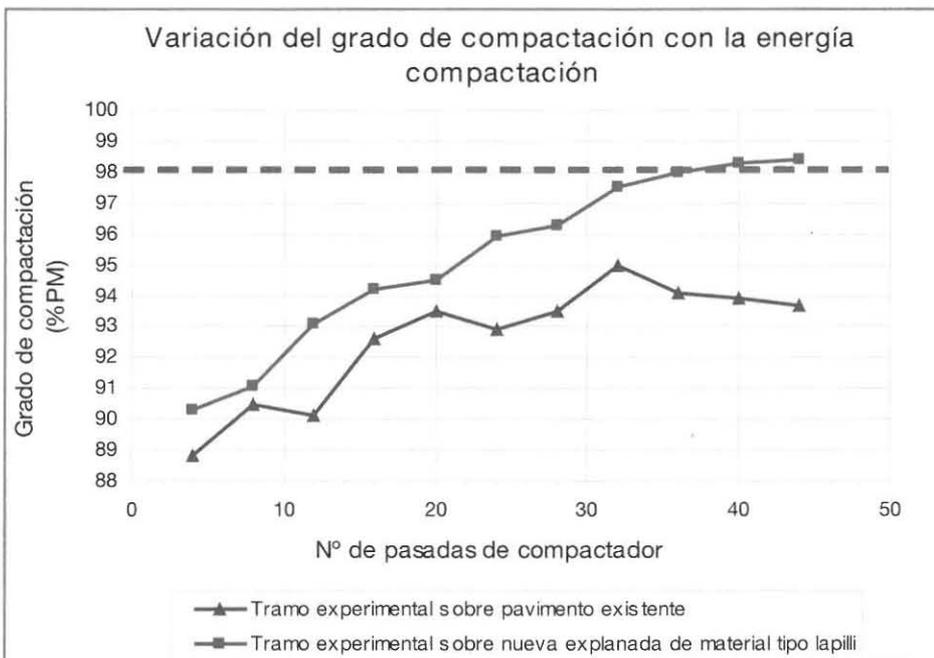


Figura 4. Variación del grado de compactación con el número de pasadas de compactador en los dos tramos experimentales de ensayo.

La norma europea EN 13285⁽¹⁶⁾ relativa a materiales granulares no tratados para su empleo en capas de base y subbase (de aplicación desde 2003) prevé la posibilidad de utilización de diversos husos granulométricos dependiendo del tipo de aplicación, función y espesor de la capa. Además establece las exigencias en cuanto a regularidad de las características granulométricas definiendo los límites de tolerancia respecto a

de validación de la compactación de las CGGC el índice de huecos equivalente a un grado de compactación del 98% respecto a la densidad seca máxima obtenida en el ensayo de compactación Proctor Modificado con corrección de gruesos.

En la Figura 4 puede verse la evolución del grado de compactación alcanzado en el proceso de compac-

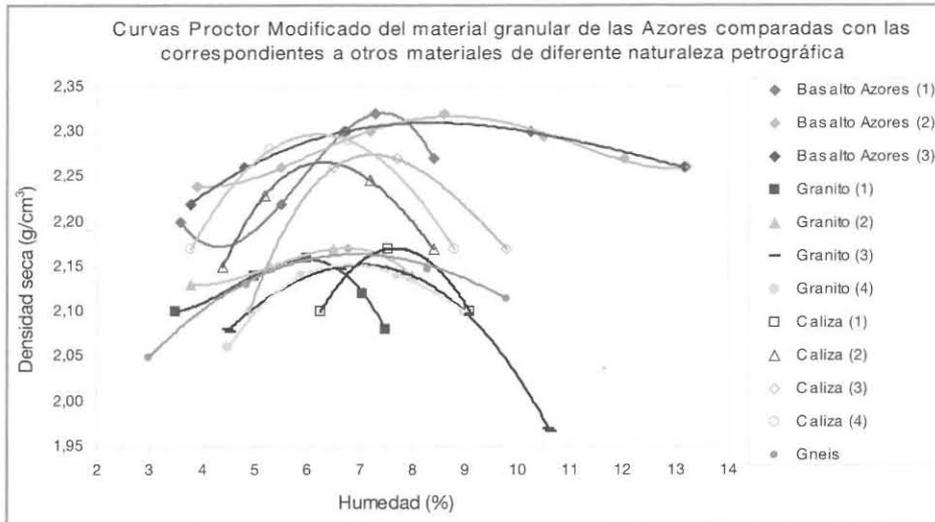


Figura 5. Curvas de compactación PM de algunos materiales granulares de regiones continentales comparadas con las de áridos basálticos de las Azores.

tación. Se evidencia una clara diferencia de comportamiento en cuanto a densificación alcanzada por la capa granular en función de sus condiciones de apoyo, llegando en uno de los casos a no alcanzarse nunca los valores de referencia obtenidos en laboratorio.

Por lo tanto, los resultados demuestran que el mismo material y bajo las mismas condiciones de ejecución responde de forma muy distinta al mismo proceso de compactación, y que la eficacia de éste se ve determinada por una nueva variable que interviene en el proceso: las condiciones de la cimentación o características mecánicas del sustrato subyacente.

2.1. Discusión sobre los criterios y ensayos para el control de la compactación de materiales de naturaleza volcánica

La Administración promotora del proyecto planteaba dudas referentes a la validez de utilización del ensayo de compactación Proctor como ensayo de referencia para el control de la compactación en obra, argumentando su experiencia con relación a algunos áridos basálticos en los que no resulta estrictamente aplicable debido a una menor sensibilidad a las variaciones de humedad, de manera que las curvas de compactación resultan mucho más abiertas (casi horizontales).

Bien 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 muy alta permeabilidad de esos materiales granulares, lo que hace que las humedades medidas en la capa compactada pueden ser bastantes inferiores a las que efectivamente han intervenido en el proceso.

En cualquier caso, y como se verá posteriormente, el ensayo Proctor Modificado se establece como criterio básico de referencia para el control de

la compactación en las especificaciones de la mayoría de los países, incluyendo también aquellos en los que pueden ser comunes los de naturaleza volcánica. De igual modo, la norma europea EN 13285 preconiza el control de la compactación por medio del ensayo Proctor, independientemente de la naturaleza petrográfica del material granular.

Por otra parte, los ensayos realizados con las muestras de los tramos experimentales y de acopio han puesto de manifiesto que los materiales empleados en este caso como CGGC sí resultan sensibles a las variaciones de humedad en su proceso de compactación, como puede verse en las curvas de los ensayos de laboratorio PM representadas en la Figura 5 junto con las correspondientes a otros materiales continentales de diferente naturaleza petrográfica. La gráfica demuestra que el material utilizado en las Azores permite incluso mayores densidades que los restantes representados.

Con respecto al control *in situ* de humedades de compactación, por el hecho de ser un material con elevada permeabilidad (muy drenante), es preciso mencionar que el contenido de agua medido sobre la plataforma en este caso tendía a infravalorar la humedad que efectivamente intervenía en el proceso de compactación. La dispersión de valores resultantes se encuentran dentro de lo habitual para este ensayo, pudiendo adoptarse como valores de referencia (corregidos por efecto de los gruesos) para el control de obra los siguientes:

$$\gamma_{d \text{ máx. correg.}} = 2,37 \text{ g/cm}^3; \omega_{\text{opt. correg.}} = 7,3\%$$

Como complemento se ha obtenido información de otros materiales granulares de naturaleza basáltica como los correspondientes a la obra viaria "Circular da Praia-

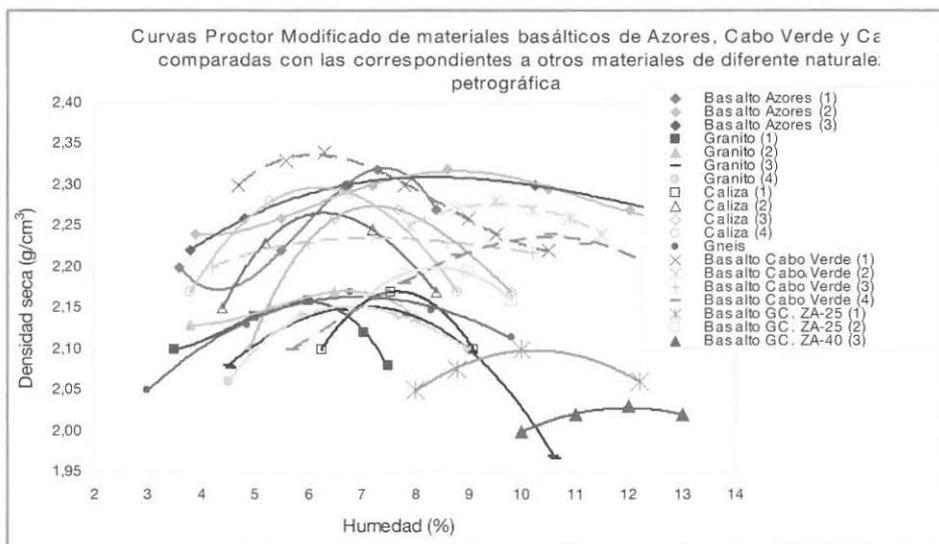


Figura 6. Curvas de compactación PM de algunos materiales granulares de origen volcánico, de distintas procedencias, comparadas con las de áridos de otras naturalezas.

Aeropuerto” de reciente ejecución en la Isla de S. Tiago (Cabo Verde [Portugal]). Las CGGC empleadas en esta obra han sido en su totalidad de naturaleza basáltica, proporcionando curvas granulométricas variables, muchas veces deficitarias de finos (como es frecuente en estos materiales, incluso en regiones continentales), con porosidades elevadas y valores medios de absorción en torno al 3%. También se han incluido curvas de compactación de materiales de la misma naturaleza utilizados en carreteras de Canarias.

Todas las curvas anteriores se han incluido en un gráfico comparativo que se representa en la Figura 6. Como se puede comprobar, éstas presentan aspectos y posiciones diferentes en el plano ($\gamma_d - \omega$), pero en cualquier caso evidencian un comportamiento normal ante un ensayo de compactación PM, lo que pone de manifiesto que, al menos para todos las muestras ensayadas en esta obra, la compactación de estos materiales de naturaleza basáltica sí resulta influenciada por el contenido de humedad.

2.2. Criterios y ensayos especificados en otros países y regiones donde se emplean estos materiales volcánicos

2.2.1 Metodología de control de la compactación de capas granulares aplicada en las Islas Canarias

Los materiales granulares de origen volcánico utilizados en Canarias para capas de base suelen obtenerse del machaqueo de rocas basálticas y fonolíticas procedentes de coladas lávicas (zahorras artificiales), ya

que las gravas de barranco de depósitos sedimentarios aluviales (zahorras naturales) tienen actualmente una muy limitada extracción por motivos medioambientales (no así en el pasado), y los materiales tipo lapilli (picones rojo y negro) sólo se emplean en la formación de explanadas (aunque existe algún caso de empleo dentro del paquete de firme, como en la carretera GC-2, con resultados satisfactorios, si bien es preciso recordar que estos piroclastos no cumplen con las especificaciones del PG-3 especialmente en cuanto a

resistencia a la fragmentación, granulometría y equivalente de arena). Por lo general, los materiales para CGGC empleados suelen presentar gran heterogeneidad, tanto en su distribución en el terreno como de la propia matriz o estructura del material, e importante porosidad.

Las condiciones generales empleadas en España se basan en el Artículo 510 del PG-3, aunque se comentarán aspectos particularizados para materiales volcánicos utilizados en carreteras, en función de nuestra propia experiencia en el caso de Canarias. Estos materiales han de cumplir, de forma general, los requisitos básicos en cuanto a limpieza (Equivalente de Arena), no plasticidad, resistencia a la fragmentación, forma y angulosidad. Los espesores de tongada no han de superar los 30 cm, evitando además las segregaciones y contaminaciones. El control de la unidad terminada se ha venido realizando siguiendo los criterios del PG-3:

- Control del grado de compactación: Para las categorías de tráfico pesado más elevadas (>200 vehículos pesados/día), la densidad no debe ser inferior al 100% de la máxima del PM. Para tráficos inferiores o en arcenes se puede admitir una densidad no inferior al 98% de la del PM.
- Control de la capacidad portante mediante ensayos de carga con placa: Se controla el módulo de deformación vertical en el segundo ciclo de carga (E_{v2}), que ha de ser superior a un valor comprendido entre 80 y 180 MPa (dependiendo de la categoría de tráfico pesado), no siendo además nunca inferior al módulo de la capa subyacente multiplicado por 1,3 (la importancia de esta

última exigencia se comprenderá con los comentarios del apartado 3). Además, nuestra experiencia nos indica que 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, la experiencia acumulada nos dicta conveniente ampliar dicho límite aceptable a 2'5, con un comportamiento deformacional de estas capas satisfactorio).

Por tanto, en general, y salvo las propiedades específicas comentadas, los criterios básicos de control de la compactación de materiales granulares también pueden ser aplicados a los materiales de origen volcánico canarios. Posiblemente, en algunos casos las curvas de compactación Proctor no proporcionen resultados demasiado relevantes, por lo que en dichas situaciones es mejor fundamentar los criterios de control basados en ensayos de carga con placa porque éstos permiten comprobar el comportamiento real en la infraestructura de los materiales compactados. La experiencia con estos materiales en el caso de Canarias nos permite afirmar que la exigencia normativa de la relación máxima entre módulos del ensayo de carga con placa resulta en ocasiones difícil de cumplir (aún estando el material adecuadamente compactado) por lo que hemos sugerido un valor algo menos restrictivo que lo que se suele exigir en los pliegos con carácter general.

2.2.2 Metodología de control de la compactación de materiales volcánicos empleados en Islandia

Según el "Icelandic Building Research Institute" (IBRI), el control se efectúa también basándose en el Proctor Modificado como ensayo de referencia, exigiéndose un valor mínimo del 98% de la densidad máxima para capas de base y del 95% para capas de subbase. También es habitual emplear el parámetro k de relación entre módulos del ensayo de carga con placa, prescribiendo un valor inferior a 2,5 para los tráficos más exigentes, lo que concuerda con nuestra experiencia ya comentada para los materiales de Canarias.

2.2.3 Metodología de control de la compactación de materiales volcánicos empleados en Hawái

Las especificaciones para carreteras del "Hawaii Department of Transportation" (HDT) establecen en su artículo 304- "Aggregate base course" (cláusula 304.03 "Construction")⁽¹⁷⁾ que el control de la compactación de capas granulares debe realizarse mediante el grado de compactación relativo al ensayo Proctor Modificado, exi-

giéndose un valor superior al 95%. Además la humedad de compactación debe estar comprendida entre $\pm 2\%$ respecto de la óptima.

3. Caracterización de las condiciones de cimentación de la capa de base granular

Teniendo en cuenta que en la realización de ambos tramos experimentales de ensayo se mantuvieron constantes todos los factores relevantes para el proceso de compactación, a saber: características del material granular, humedad, espesor de tongada, medios y energías de compactación, y que únicamente han variado las condiciones de apoyo de la capa de base, puede afirmarse que éste último factor es el que ha determinado las diferencias observadas en los resultados alcanzados por la compactación. Por ello, para caracterizar las explanadas sobre las que se ha construido la CGGC en cada caso se realizaron los mencionados ensayos con defleómetro dinámico de impacto.

En la Figura 7 se representan los módulos de deformación registrados para 20 kN de carga aplicada, comparándose los resultados para ambos tramos de ensayo. En el cálculo del valor medio y del percentil 85% se han desestimado aquellos resultados por encima del percentil 95% o inferiores al 5%. Como puede comprobarse, existe una notable diferencia en el valor de los módulos equivalentes del cimiento de apoyo de la capa granular en el caso de constituirse por una explanada de nueva construcción con material local de tipo lapilli o sobre pavimento existente, cuya reducción puede alcanzar el 45%.

En términos absolutos, los módulos obtenidos para el pavimento existente resultan muy reducidos comparados con los de un firme en servicio convencional, probablemente por una avanzada degradación de la estructura del macadam o incluso de las capas inferiores, lo que hace que la energía aplicada se disipa en dichas capas de fundación sin incrementar el grado de compactación de la nueva capa de base. En cualquier caso, los resultados ponen claramente de manifiesto la influencia de las condiciones de cimentación en la compactabilidad de la CGGC, de manera que la ineficacia detectada en este caso en el proceso de compactación del material granular sobre el firme existente está relacionada con la reducida capacidad portante de éste último.

De esto se deduce la importancia de asegurar suficiente rigidez de todas las capas granulares construidas de abajo hacia arriba en un firme (como así establecen los Pliegos) ya que cada una de ellas influye en la compacta-

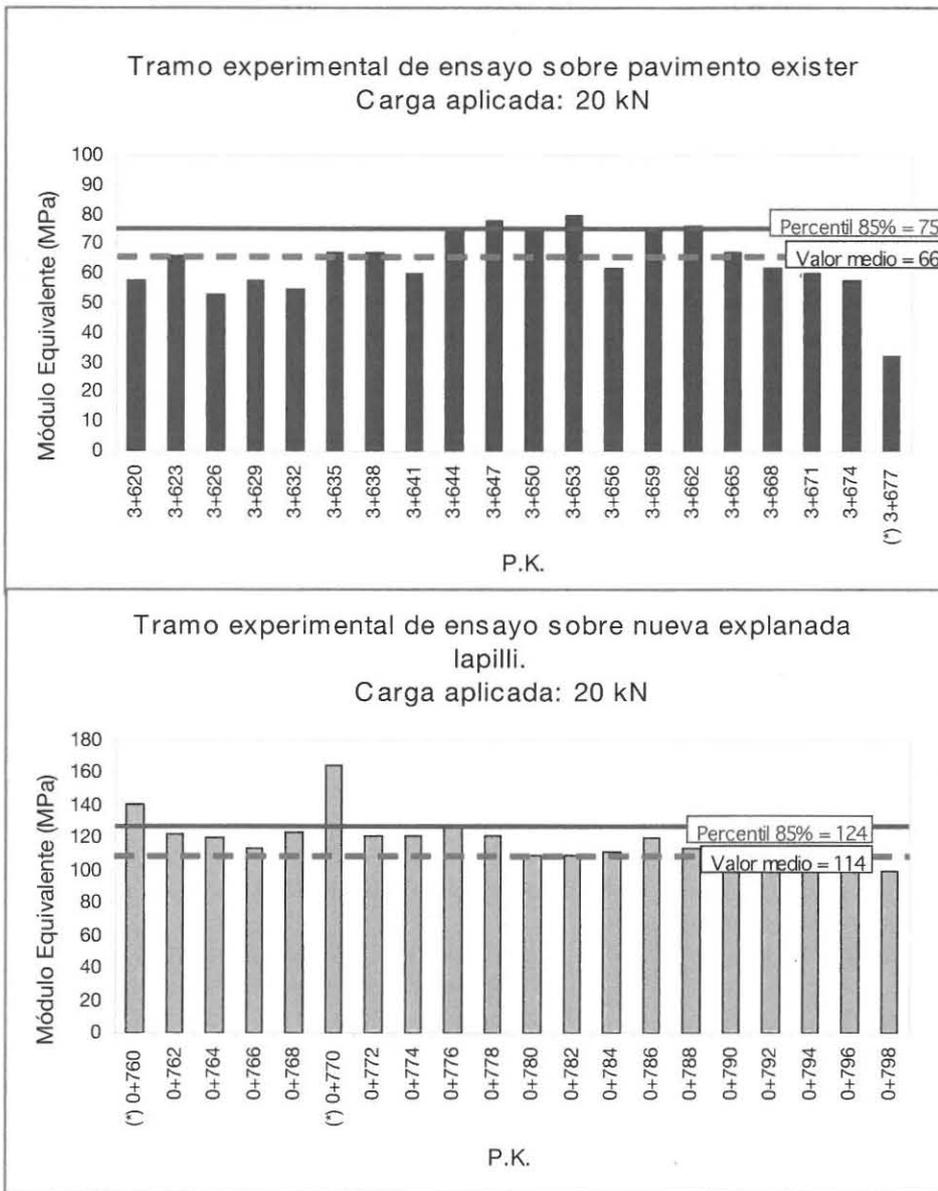


Figura 7. Módulos de deformación del cimientto de la capa de base granular obtenidos mediante deflectómetro de impacto (carga aplicada: 20 kN). [Los valores señalados con (*) no se han considerado en el cálculo de los percentiles por ser anormalmente extremos]

bilidad y comportamiento de las superiores. El problema se presenta cuando se ejecuta un nuevo firme sobre un apoyo que no ha sido controlado como es el caso de un firme existente. En estos casos resulta preciso realizar sobre éste ensayos previos (carga con placa, deflectómetro de impacto) para asegurar su suficiente capacidad portante en términos de módulo de deformación. En la Figura 8 se resume la relación deducida de esta investigación entre los valores del módulo del cimientto (obtenidos mediante deflectómetro) y el grado de compactación alcanzado para las CGGC en los tramos experimentales.

$\omega_{opt. correg.}$ entre 6-11%). La modificación granulométrica debida al proceso de compactación no ha producido incrementos de finos superiores al 1,5%, apreciándose una evolución favorable en los índices de lajas y agujas.

A pesar de algunas experiencias previas que indicaban hacia la posible menor sensibilidad de los áridos de origen basáltico ante las variaciones de humedad en su proceso de compactación, la amplia campaña de ensayos realizados y de recopilación de datos de otros materiales de la misma naturaleza petrográfica en otras regiones volcánicas atlánticas han mostrado

CONCLUSIONES

La variabilidad de las propiedades y características de los materiales granulares procedentes de rocas de naturaleza volcánica es generalmente mayor que en los de otras zonas continentales por lo que los controles por parte del fabricante y de recepción en obra deben ser más intensos. Sin embargo, los resultados de los ensayos de laboratorio han mostrado que es 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. Por ello pueden ser utilizados en estas capas estructurales incluso para las categorías de tráfico más pesado.

Además se ha constatado que por lo general es posible alcanzar con estos materiales una buena densificación al permitir una granulometría suficientemente continua y extensa ($\gamma_{d máx. correg.}$ en el intervalo 2,23-2,34 g/cm³;

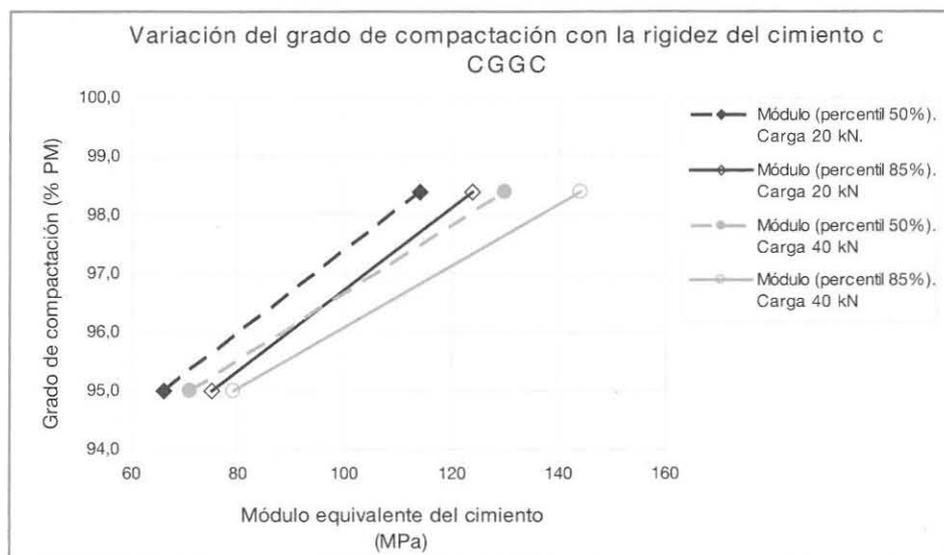


Figura 8. Relación entre módulos equivalentes del cemento (obtenidos mediante deflectómetro de impacto) y grado de compactación alcanzado para la CGGC

que normalmente estas capas granulares no tratadas de granulometría continua experimentan un proceso de compactación que puede ser estudiado a través de los ensayos de referencia convencionales (PM) y que, por tanto, en general los criterios básicos de control de la compactación de materiales granulares también pueden ser aplicados a los de origen volcánico. Con respecto al control *in situ* de humedades de compactación, por el hecho de presentar frecuentemente elevada permeabilidad, es preciso mencionar que el contenido de agua medido sobre la plataforma suele tender a infravalorar la humedad que efectivamente interviene en el proceso de compactación.

Posiblemente, en algunos casos las curvas de compactación Proctor no proporcionen resultados demasiado relevantes, por lo que en dichas situaciones es mejor fundamentar los criterios de control basados en ensayos de carga con placa porque éstos permiten comprobar el comportamiento real en la infraestructura de los materiales compactados. Nuestra experiencia, en el caso de los materiales de las islas Canarias, nos dicta que la exigencia normativa de la relación máxima entre módulos del ensayo de carga con placa resulta en ocasiones difícil de cumplir por lo que hemos sugerido un valor algo menos restrictivo ($E_{v2}/E_{v1} < 2,5$) que lo que se suele exigir en el pliego español con carácter general (2,2), habiendo tenido un comportamiento deformacional de estas capas satisfactorio.

Los tramos de ensayo en obra han puesto claramente de manifiesto que la eficacia del proceso de compactación se ve influenciada por una nueva variable: las condiciones de cimentación o rigidez del sustrato sub-

yacente. Cuando el módulo de deformación del apoyo de la capa que se compacta resulta insuficiente la energía se disipa en dichas capas inferiores sin incrementar el grado de compactación de la nueva. En la investigación se ha obtenido una relación, para el material granular de origen volcánico utilizado en los tramos de ensayo, que permite determinar el grado de compactación máximo que es posible alcanzar en una determinada capa de base granular en función del valor del módulo equivalente del cemento o capas inferiores,

comprobandose que sólo pueden cumplirse las condiciones generalmente exigidas en la normativa (grado de compactación > 98% PM) si el módulo de las capas inferiores supera los 110-120 MPa (explicada E2, según Norma española 6.1-IC).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Norma Portuguesa NP EN 932-1: 2002 - "Ensayos de las propiedades generales de los áridos. Parte 1 - Métodos de muestreo".
- (2) Norma Portuguesa NP EN 932-2: 2002 - "Ensayos de las propiedades generales de los áridos. Parte 2 - Métodos de preparación de muestras para ensayos de laboratorio".
- (3) Especificación Portuguesa LNEC E 233:1970 - "Áridos. Análisis granulométrico".
- (4) British Standard BS 812-105.1:1990 - "Testing aggregates. Part 105: Methods for determination of particle shape. Section 105.1. Flakiness index of coarse aggregate".
- (5) British Standard BS 812-105.2:1990 - "Testing aggregates. Part 105: Methods for determination of particle shape. Section 105.2. Elongation index of coarse aggregate".
- (6) Norma Portuguesa NP 954:1961 - "Áridos para hormigones y mezclas bituminosas. Determinación de densidades y absorción de agua de arenas".

- (7) Norma Portuguesa NP 581:1961 – “Áridos para hormigones y mezclas bituminosas. Determinación de densidades y absorción de agua del árido grueso”.
- (8) Norma Española UNE-EN 1097-6:2001 y UNE-EN 1097-6/A1:2006 – “Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”.
- (9) Especificación portuguesa LNEC E 197: 1967 – “Suelos. Ensayo de compactación PM”.
- (10) Estradas de Portugal – E.P.E. (1998) – Cuaderno de Encargos – Vol. 5-03 Pavimentación – Sección 14.03 – “Pavimentación: Características de los materiales” – Sección 15.3 – “Pavimentación: Métodos constructivos”.
- (11) Norma Portuguesa NP EN 13242:2005 – “Áridos para materiales no tratados con conglomerantes hidráulicos utilizados en trabajos de ingeniería civil y construcción de carreteras”.
- (12) Norma Española UNE-EN 13242:2003 – “Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas estructurales de firmes”.
- (13) Ministère des Transports, Direction des routes (1984) – “Mémento des spécifications francaises. Chaussées”.
- (14) Comité Français pour les Techniques Routiers (2006) – Cftr – info n.º 12, Mai 2006 – “Mise en application de la nouvelle norme grave non traitée NF EN 13285”.
- (15) Norma Francesa NF P 98-129: 1994 – “Assises de chaussées. Graves non traitées. Définition – Composition – Classification”.
- (16) Norma Europea EN 13285: 2003 – “Unbound mixtures. Specification”.
- (17) Hawaii Department of Transportation (HDT). Standard Specifications (2005), 304 - “Aggregate base course”. □

