

Áridos de islas volcánicas para capas granulares de firmes de carretera

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)

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, Universidad de Coruña (UdC)

RESUMEN

Los materiales procedentes de piroclastos o de la fragmentación de rocas volcánicas son utilizados en muchos territorios insulares de la Macaronesia, como las Islas Canarias, Azores y Cabo Verde, para la construcción de capas granulares, incluso no tratadas, en explanadas, subbases y bases de firmes. Con frecuencia, en las aplicaciones prácticas surgen dudas sobre su adecuación para estos usos, especialmente cuando se trata de verificar el cumplimiento de las especificaciones normativas, que generalmente han sido establecidas de acuerdo con la experiencia constructiva sobre materiales procedentes de litologías continentales, así como sobre la metodología y criterios que deberían emplearse para el control de su compactación y capacidad portante.

Con objeto de profundizar en el conocimiento de su comportamiento, establecer las posibles prescripciones, validar su utilización y los ensayos para controlar su compactación y puesta en obra, se ha realizado un estudio experimental que ha incluido la ejecución de tramos de ensayo para establecer los criterios de compactación. Además, se aportan datos sobre la experiencia constructiva de capas granulares con áridos volcánicos en varias islas atlánticas.

Los resultados revelan que es posible alcanzar una buena capacidad soporte con estos materiales para su aplicación incluso con tráfico elevado, si bien, debido a la mayor variabilidad de sus propiedades geotécnicas y heterogeneidad, los controles de producción, almacenamiento y recepción deben intensificarse para asegurar una adecuada regularidad del producto suministrado. La investigación in situ ha permitido obtener una relación empírica entre el grado de compactación alcanzado y el valor del módulo de rigidez equivalente de su cimiento.

INTRODUCCIÓN

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 de la Macaronesia se emplean los áridos naturales procedentes de los depósitos piroclásticos o de la fragmentación de rocas volcánicas (generalmente basaltos y fonolitas) para construir estas capas granulares.

En este trabajo se presenta un estudio experimental llevado a cabo sobre una carretera local de Azores (Portugal) relativo a la construcción y auscultación de un tramo de ensayo con capas de base granulares no tratadas, de granulometría continua, con árido basáltico obtenido mediante machaqueo. Además, se aportan datos sobre algunas propiedades constructivas resultantes de estos materiales en obras ejecutadas en Canarias y Cabo Verde.

El proyecto de construcción de la mencionada carretera preveía la ejecución de las capas de base granulares del firme en dos situaciones de cimentación diferentes:

a) Sobre una explanada de nueva construcción con lapilli (material granular natural constituido por piroclastos basálticos de baja densidad, procedentes de conos volcánicos piroclásticos). En Canarias recibe el nombre local de "picón" y en las Azores de "bagacina"). Su



Figura 1. Aspecto en acopio del árido volcánico de litología basáltica y granulometría continua para capas de base granulares no tratadas

coloración suele ser rojiza (ver Fig. 2a) o negra. Se trata de materiales muy característicos de estas regiones, 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 7,85-19,42 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. Según el proyecto, en estos tramos de la carretera estaba prevista la construcción de una nueva estructura de firme, incluyendo la excavación del terreno existente y la ejecución de nuevos rellenos y explanada con estos materiales piroclásticos compactados, sobre los que se asienta la capa de base granular.

b) Directamente sobre un pavimento existente, tras su escarificación y recompactación, constituido éste por una capa de macadam de semi-penetración (técnica tradicional ya en desuso) sobre una explanada de lapilli.

Inicialmente se construyeron 12 tramos de ensayo con el mismo tipo de árido machacado y de la misma procedencia (cantera de un productor local), variándose únicamente el procedimiento de compactación (número de pasadas de compactador, número y espesores de tongada, condiciones de cimentación de la capa de base y equipos de compactación empleados) con el fin de establecer el procedimiento constructivo más adecuado.

La Administración regional de carreteras de Azores había cuestionado el cumplimiento de las especificaciones normativas, tanto portuguesas como españolas, por el árido basáltico local procedente de machaqueo, especialmente en lo relativo a granulometrías y a la utilización del ensayo Proctor como metodología de ensayo de referencia para el control de la compactación en obra, debido a la posibilidad de que con estos materiales volcánicos no fuese estrictamente aplicable por razones de su supuesta mayor insensibilidad a las variaciones de humedad. Además, durante la construcción de los primeros tramos in situ se observó una tendencia hacia una mayor dificultad de conseguir una suficiente densificación cuando se compactaba la nueva capa de base granular sobre el pavimento existente (independientemente del tratamiento previo de éste) en comparación con la ejecución sobre explanada de nueva construcción.

Por tanto, con el objeto de validar la utilización de estos materiales granulares volcánicos en capas de base no tratadas y establecer

los requisitos y ensayos para su compactación en obra, se realizó el presente estudio experimental que ha permitido analizar la influencia de las condiciones de cimentación y los procedimientos constructivos empleados sobre el grado de compactación que se puede obtener con ellos.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se construyeron dos nuevos tramos experimentales de ensayo de aproximadamente 100 m. de longitud cada uno, en los cuales se realizó una extensa campaña de ensayos in situ y de laboratorio. Esto se completó con la recopilación de experiencias en regiones con materiales similares. En ambos tramos de prueba se mantuvieron invariables todas las condiciones relativas al origen del material granular empleado y a los equipos y procedimientos de compactación, variando únicamente las condiciones de cimentación o de apoyo de la capa de base.

Tramos experimentales de ensayo

Uno de los tramos experimentales in situ (PK 0+600 a 0+700) incluyó la extensión de la capa de base granular sobre una explanada formada por lapilli basáltico compactado (ver Fig.2). El material granular no tratado se compactó con espesores de tongada de 20 cm. y 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 y 36 pasadas simples de compactador de rodillo liso en modo vibratorio de 18,5 t.

El otro tramo de ensayo (PK 3+600 a 3+700) ha sido construido con un proceso similar, con la diferencia de que la compactación de la capa de base no tratada se realizó directamente sobre el pavimento envejecido existente, previamente escarificado y recompactado mediante 16 pasadas simples del mismo compactador vibratorio.

Muestreo y ensayos de laboratorio

Con el fin de comprobar las características del árido basáltico local relacionadas con su compactación en obra, así como para evaluar los efectos de dicha densificación sobre propiedades como la variación granulométrica y de forma, se obtuvieron 7 muestras de árido: una de ellas en acopio, tras su humectación y homogeneización, y 3 muestras en cada uno de los tramos de ensayo.

Los ensayos de laboratorio, siguiendo las normas españolas y portuguesas han incluido análisis granulométrico por tamizado, índice de lajas y agujas, densidad de las partículas y absorción de agua (fracciones 0/4, 4/20 y >20 mm) y ensayo Proctor Modificado con corrección de gruesos. Este 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>20 mm) para su realización, las cuales en cambio sí están presentes en la compactación en obra:



Figura 2. Tramo experimental de ensayo con capa de base granular no tratada de 0,20 m de espesor sobre explanada de lapilli basáltico.



Figura 3. Tramo experimental de ensayo con capa de base granular no tratada de 0,20 m de espesor sobre pavimento existente previamente escarificado y recompactado.

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

$$\omega_{\text{ópt. corregida}} = \frac{\%G \cdot \%A_G + \%R \cdot \omega_{\text{ópt.}}}{100}$$

siendo:

- %G: porcentaje de partículas gruesas ($D > 20$ mm);
- γ_G : densidad de las partículas gruesas ($D > 20$ mm);
- %R: porcentaje de partículas restantes ($D < 20$ mm);
- γ_d máx.: densidad seca máxima obtenida en el ensayo PM;
- %AG: Absorción de agua de las partículas gruesas ($D > 20$ mm);
- $\omega_{\text{ópt.}}$: humedad óptima obtenida en el ensayo PM.

Ensayos in situ

Como complemento del estudio experimental, y tratando de verificar diferencias en el comportamiento estructural de las capas de asiento de la base granular, se ha llevado a cabo una campaña de

ensayos dinámicos in situ con un deflectómetro de impacto (FWD) 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 Y DISCUSIÓN

Caracterización del material granular y especificaciones normativas

Las propiedades físicas, químicas, mecánicas y geotécnicas de los áridos volcánicos suelen presentar una elevada variabilidad con gran dispersión estadística, 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 de los áridos resultantes sean más variables y su calidad más heterogénea que en territorios continentales (Fransqui & Castelo-Branco, 2009).

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 compactables por sufrir mayor degradación granulométrica en este proceso, 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.

Las alteraciones relevantes en el proceso de producción, como durante 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. Respecto a las condiciones de almacenamiento y de manipulación en acopios, al igual que lo referido para el proceso de tratamiento, pueden provocar modificaciones de la granulometría del producto que han de ser también controladas por el suministrador.

En la Tabla 1 se resumen algunos de los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados sobre los distintos tipos de muestras.

Como puede verse en las curvas granulométricas medias obtenidas a partir de las muestras ensayadas (Fig. 4), 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), 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 dificultades en cuanto a compactación. 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 o española UNE-EN 13242 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 GTA20 (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.

De la misma manera, las granulometrías de las muestras ensayadas también se ajustan aceptablemente al huso 0/20 de las especificaciones francesas para materiales granulares no tratados (NF P-98-129). Por tanto, es posible asegurar la conformidad en lo referente a la regularidad granulométrica del producto suministrado, si bien será preciso realizar muestreos frecuentes. 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 4 anterior 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 capa de base compactada 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 (mejora del 17,4% y del 31,0%, respectivamente), tendencia que concuerda con lo referido anteriormente respecto a su evolución granulométrica debido al proceso de fracturación de algunas partículas por el compactador.

La norma europea EN 13285, relativa a materiales granulares no tratados para su empleo en capas de base y subbase, 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 la curva típica declarada por el productor. Considerando las categorías más exigentes especificadas en esta norma (OC90 y GA), en la Figura 5 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.

Control de la compactación: criterios y ensayos de referencia

En los dos tramos experimentales de ensayo se efectuaron pruebas de compactación con la misma maquinaria variando la energía aportada en función del número de pasadas del rodillo en modo vibratorio. En la Figura 6 puede verse la evolución del grado de compactación alcanzado en el proceso de compactación y comprobarse que el mínimo grado de compactación admisible de acuerdo con el pliego de condiciones portugués para obras de carreteras (EPE) no se alcanza cuando la capa granular se ha compactado directamente sobre el pavimento existente. Esta normativa establece como valor de referencia a efectos de validación de la compactación de las capas granulares de granulometría continua el índice de poros 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. Análogamente, en España para zahorras el PG-3 especifica una densidad no inferior al 98%-100% de la máxima de referencia obtenida en el ensayo PM, dependiendo de la categoría de tráfico pesado de la carretera.

En consecuencia, se ha constatado 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 conseguirse 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 un nuevo factor que interviene en el proceso: las condiciones de la cimentación o características mecánicas del sustrato subyacente.

Como ya se indicó anteriormente, la Administración promotora del proyecto planteó objeciones 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

		<i>Muestra del acopio</i>	<i>Muestras compactadas sobre pavimento existente. (Valores medios)</i>	<i>Muestras compactadas sobre explanada de lapilli. (Valores medios)</i>
Índice de lajas (%)		23	19	19
Índice de agujas (%)		29	25	20
Densidad de las partículas sólidas (kN/m³)	>20 mm	-	26,19	26,29
	4/20 mm	-	26,49	26,59
	<4 mm	-	27,08	27,08
	Media ponderada	-	26,78	26,78
Absorción de agua (%)	>20 mm	-	2,1	2,0
	4/20 mm	-	1,9	1,8
	<4 mm	-	1,2	1,8
	Media ponderada	-	1,6	1,8
Ensayo de compactación Proctor Modificado	$\gamma_{d.m\acute{a}x.}$ (kN/m ³)	-	22,76	22,76
	$\omega_{opt.}$ (%)	-	7,5	7,5
	$\gamma_{d.m\acute{a}x.-correctada}$ (kN/m ³)	-	23,04	23,05
	$\omega_{opt.-correctada}$ (%)	-	7,1	7,0

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

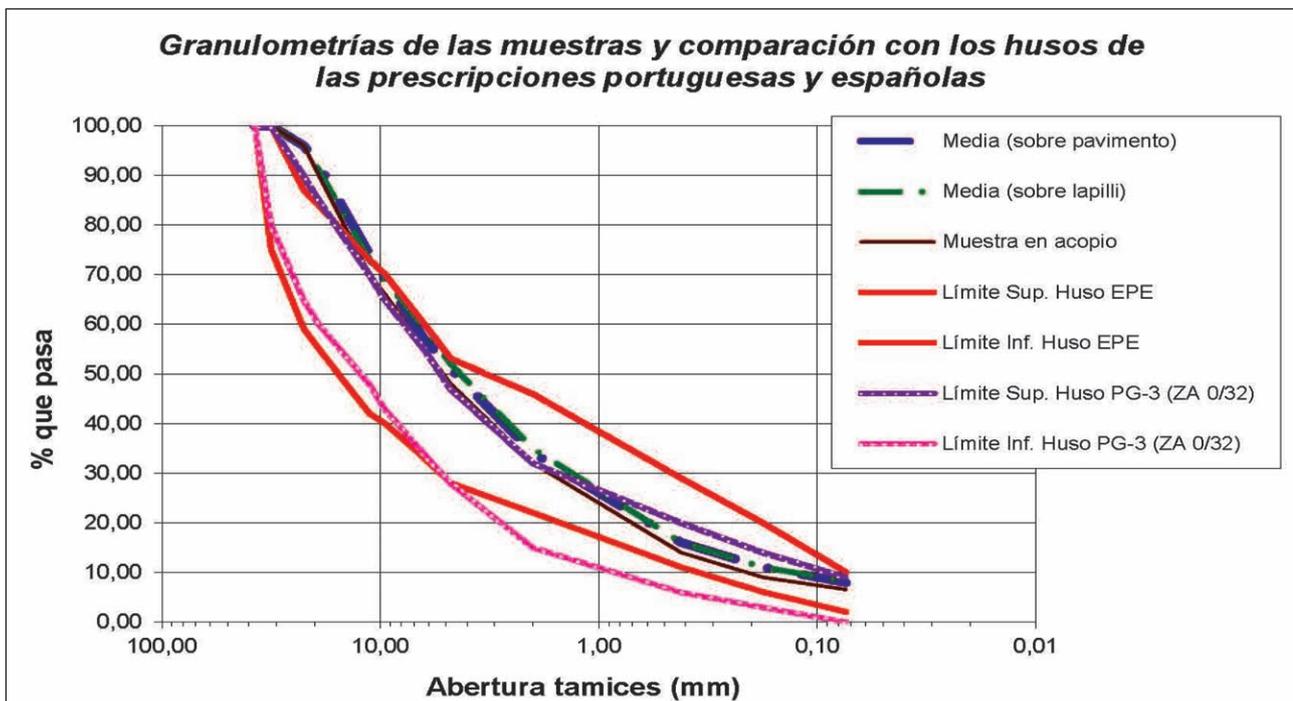


Figura 4. Granulometría de las muestras de árido basáltico local de Azores y husos de las prescripciones para obras de carreteras portuguesas y españolas.

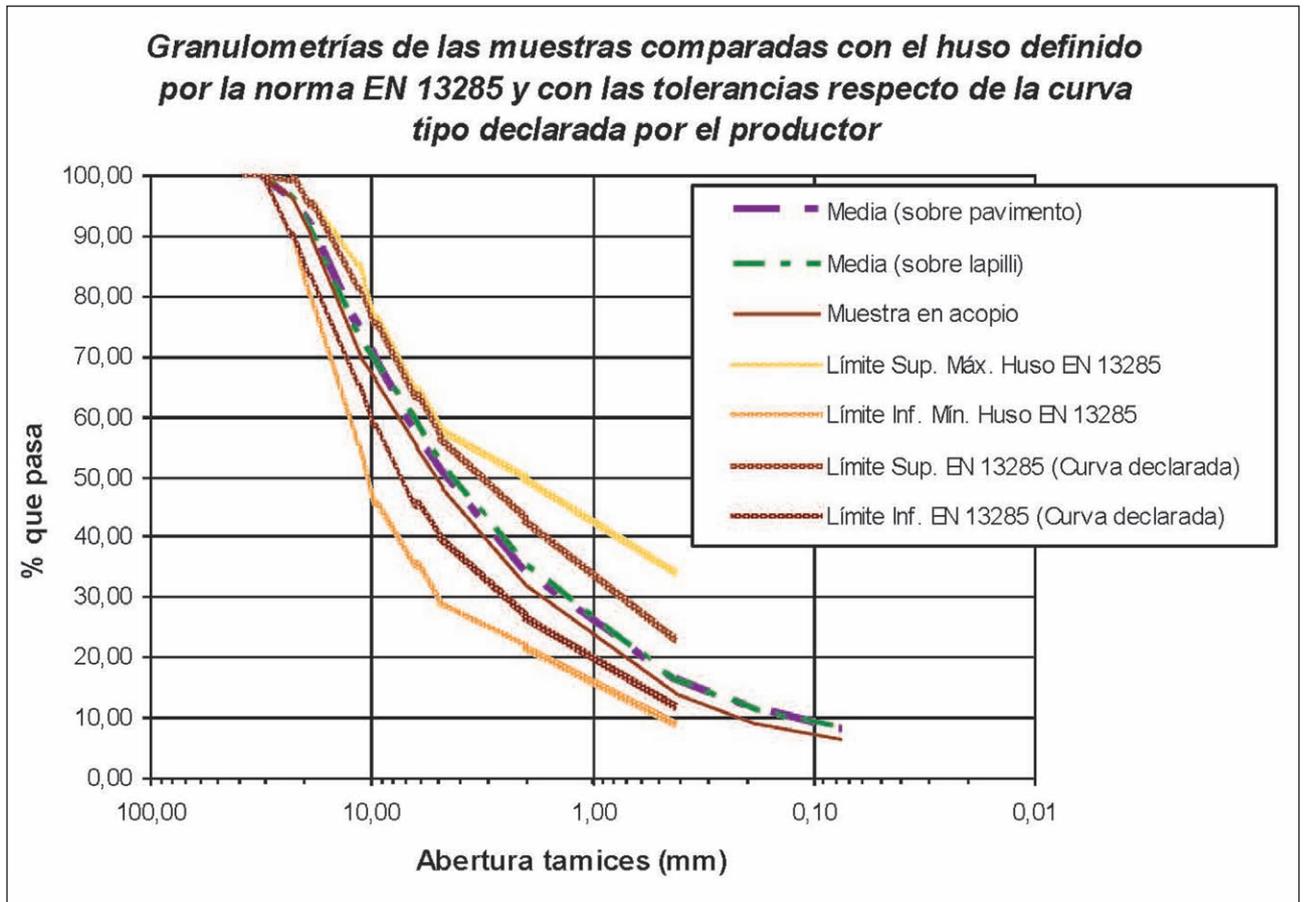


Figura 5. Granulometrías de las muestras ensayadas comparadas con el huso especificado y las tolerancias admisibles en cuanto a regularidad granulométrica para la curva típica declarada por el productor según la norma europea EN 13285.

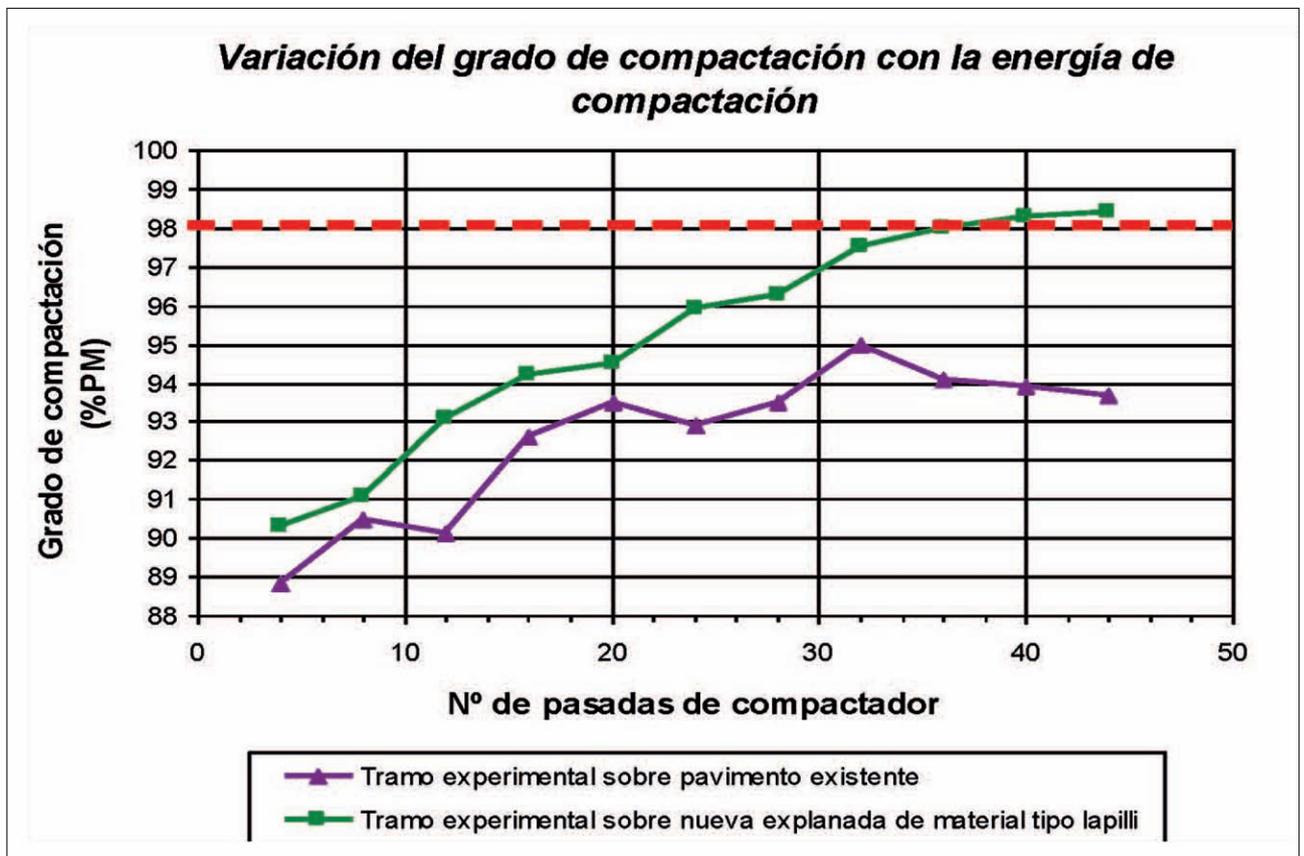


Figura 6. Grado de compactación vs. número de pasadas de compactador vibratorio, dependiendo de las condiciones de cimentación.

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.

Sin embargo, los ensayos realizados, tanto sobre las muestras recogidas en los tramos experimentales como en los acopio, han puesto de manifiesto que los materiales empleados 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 7 junto con las correspondientes a otros materiales continentales no volcánicos, a modo de comparación. La gráfica demuestra que el material utilizado en las Azores permite incluso mayores densidades que los restantes representados. 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: $d_{máx. correg.} = 22,5-22,7 \text{ kN/m}^3$; $\text{ópt. correg.} = 7,0-9,0\%$.

En la misma figura, como complemento, se han representado también curvas de compactación de otros materiales basálticos procedentes de obras ejecutadas en las islas Canarias y de Cabo Verde (carretera "Circular da Praia-Aeroporto", Isla de S. Tiago). Las capas granulares empleadas en esta última obra han sido en su totalidad de naturaleza basáltica, proporcionando curvas granu-

lométricas 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%. Como se puede comprobar, éstas presentan aspectos y posiciones diferentes en el plano (d-), pero en cualquier caso evidencian un comportamiento que podría considerarse como estándar ante un ensayo de compactación PM, pudiendo concluirse que en todos los casos, la compactación de estos materiales de naturaleza basáltica sí resulta influenciada por el contenido de humedad.

La observación de este resultado no solo permite afirmar que los ensayos de compactación Proctor también pueden ser aplicados a estos materiales volcánicos, sino que también confirma experimentalmente que la norma europea EN 13285 pueda preconizar el control de la compactación de capas granulares no tratadas aplicando el ensayo Proctor, independientemente de la naturaleza petrográfica del material granular.

Metodología para el control de la compactación en 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, ya que las gravas de barranco de depósitos sedimentarios aluviales 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 capas granulares de granulometría

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

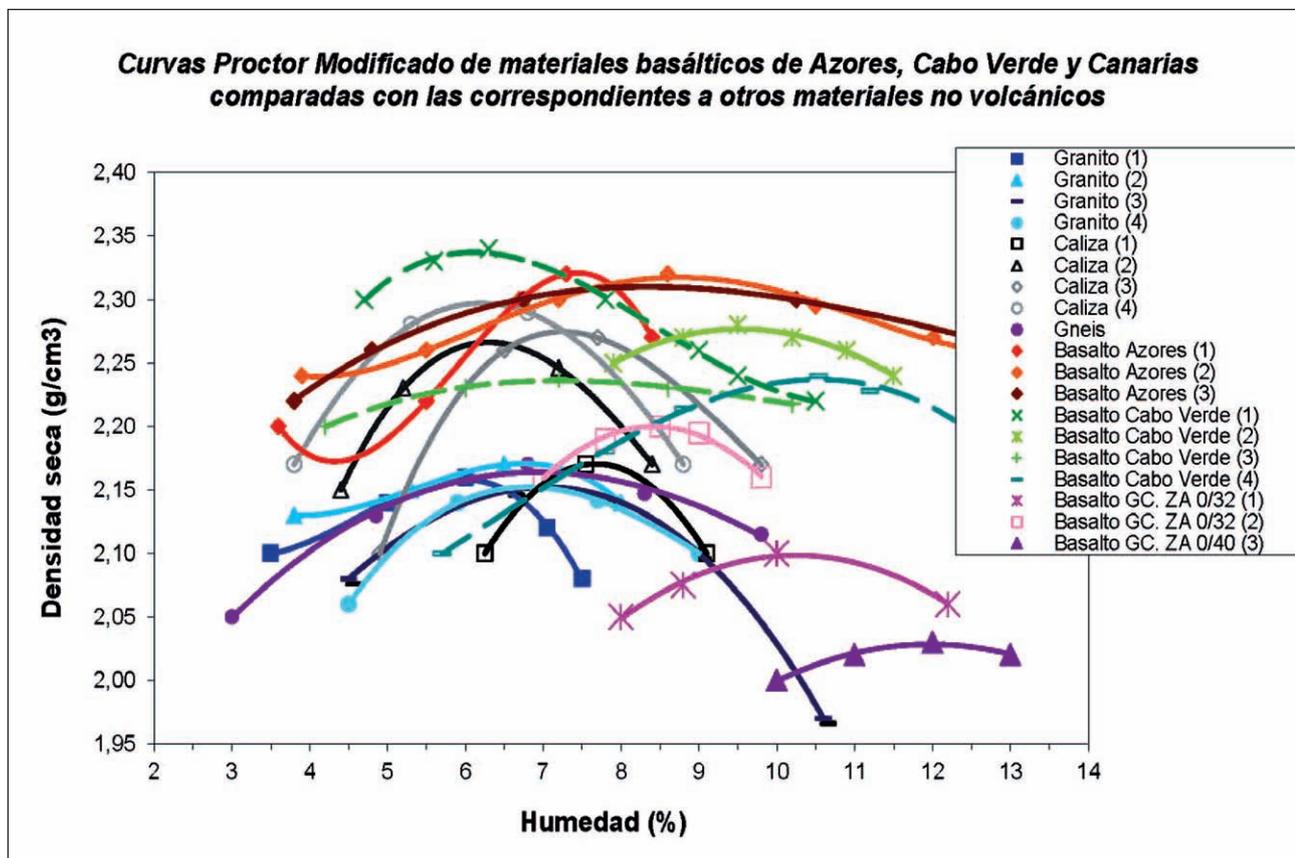


Figura 7. Curvas de compactación Proctor Modificado para algunos materiales de naturaleza basáltica de diferentes regiones insulares y comparación con otros materiales no volcánicos.

continua 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 (“Zahorras”), 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 de 300 mm de diámetro: Se controla el módulo de deformación vertical en el segundo ciclo de carga (Ev2), que ha de ser superior a un valor comprendido entre 80 y 200 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 3.3). Además, nuestra experiencia nos indica que la relación de módulos entre el segundo y primer ciclo de carga del ensayo debe cumplir: $k = Ev2/Ev1 < 2,5$ (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 (aun 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.

Metodología para el control de la compactación 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 sub-base. 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.

Metodología para el control de la compactación en Hawaii

Las especificaciones para carreteras del Hawaii Department of Transportation (HDT) establecen en su artículo 304-“Aggregate base course” (cláusula 304.03 “Construction”) que el control de

la compactación de capas granulares debe realizarse mediante el grado de compactación relativo al ensayo Proctor Modificado, exigiéndose un valor superior al 95%. Además la humedad de compactación debe estar comprendida entre $\pm 2\%$ respecto de la óptima.

Influencia de las condiciones de cimentación de las capas de base granulares

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 y procedencia 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 capa de base granular en cada caso se realizaron los mencionados ensayos con deflectómetro de impacto.

En las Figuras 8 y 9 se representan los módulos de deformación registrados para 20 y 40 kN de carga aplicada, respectivamente, 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 capa de base granular, 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 lo anterior se concluye la importancia de asegurar suficiente rigidez de todas las capas granulares construidas de abajo hacia arriba en un firme ya que cada una de ellas influye en la compactabilidad 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 10 se resume la relación deducida de esta investigación entre los valores del módulo equivalente del cimiento (obtenidos mediante deflectómetro) y el grado de compactación alcanzado para las capas de bases granulares no tratadas de granulometría continua en los tramos experimentales.

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 alma-

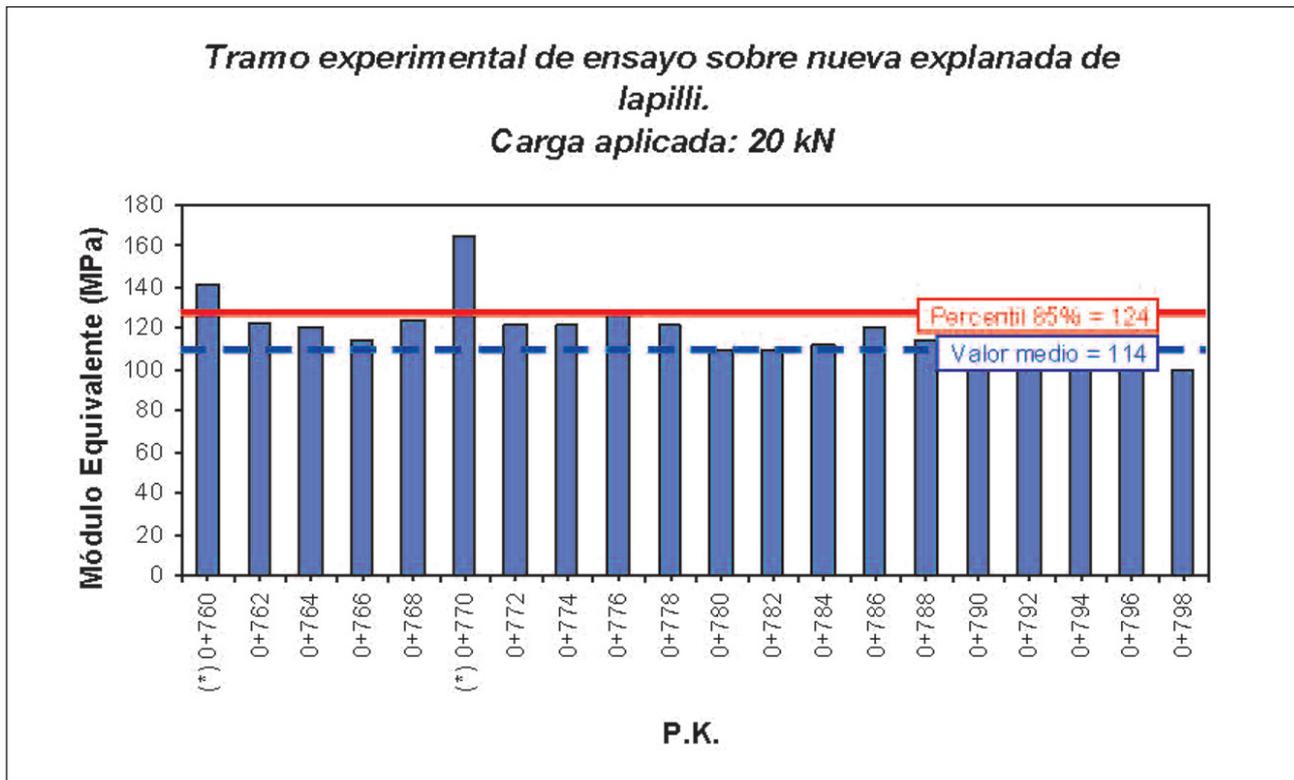
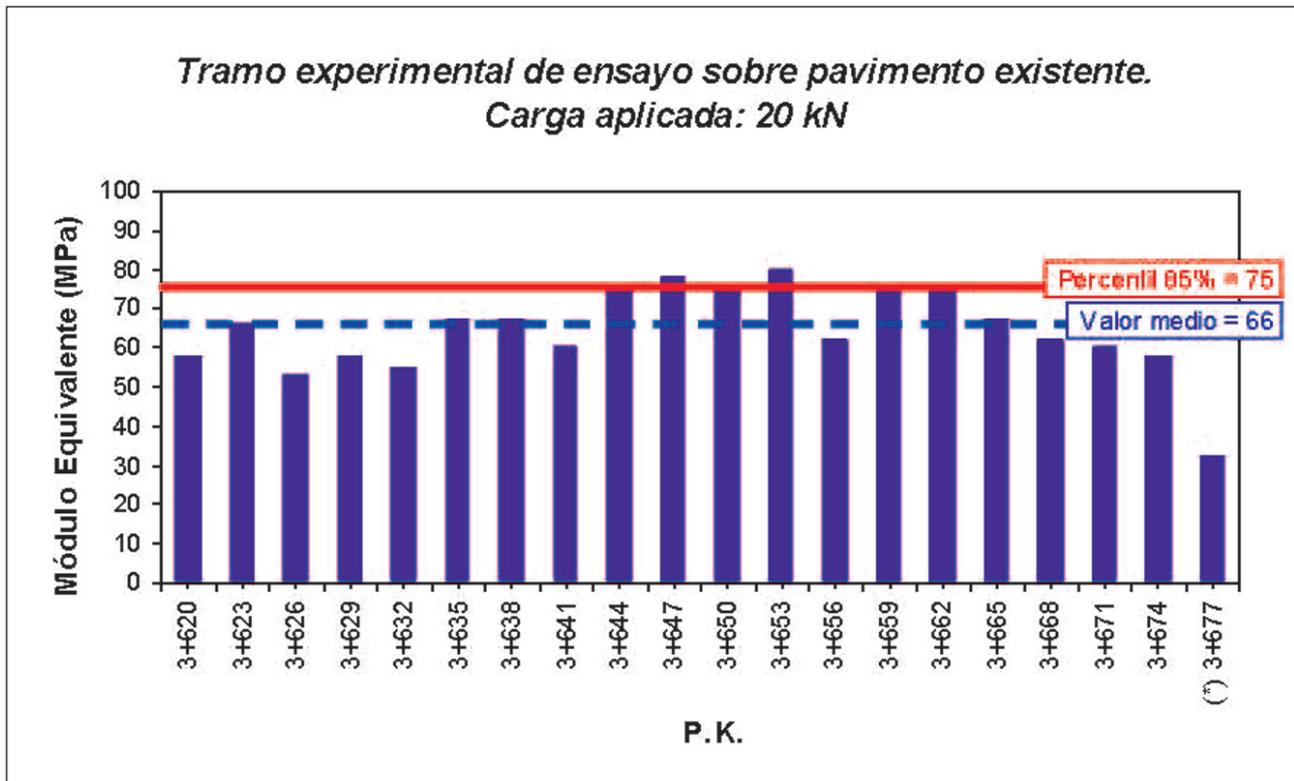


Figura 8. Módulo equivalente del cemento de la capa de base granular obtenidos mediante deflectómetro de impacto (carga aplicada: 20 kN). [Los valores señalados con (*) no se han considerado en el cálculo de los percentiles por ser anormalmente extremos].

cenamiento para garantizar una 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 (d máx. correg. en el intervalo 21,6-23 kN/m³; ópt. 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

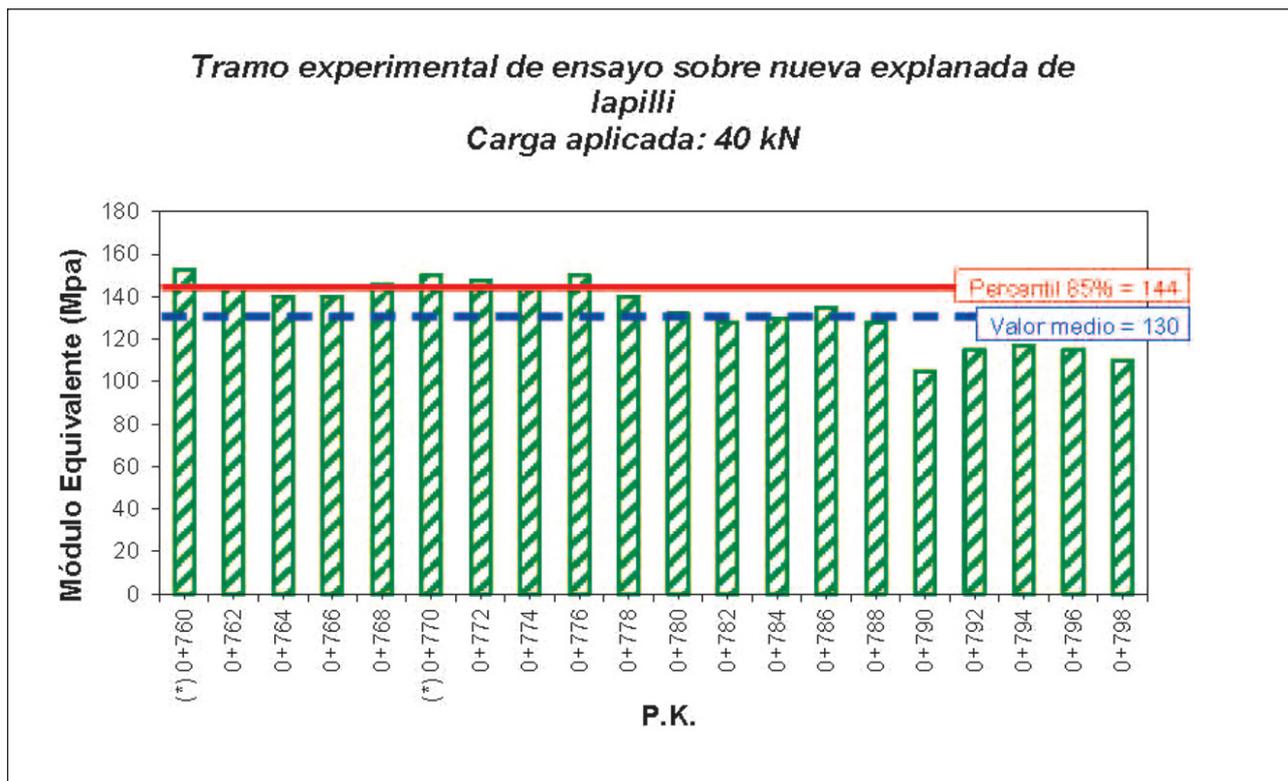
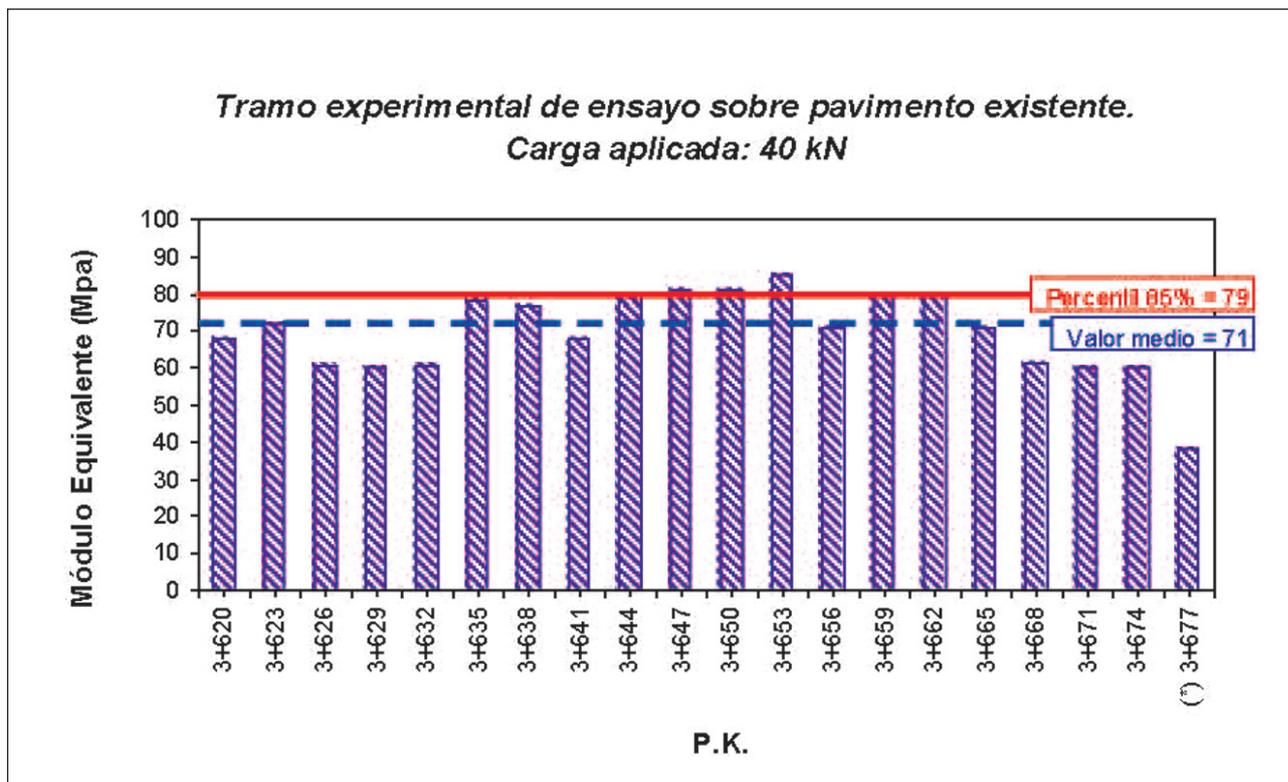


Figura 9. Módulo equivalente del cemento de la capa de base granular obtenidos mediante deflectómetro de impacto (carga aplicada: 40 kN). [Los valores señalados con (*) no se han considerado en el cálculo de los percentiles por ser anormalmente extremos].

materiales de la misma naturaleza petrográfica en otras regiones volcánicas atlánticas han mostrado 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

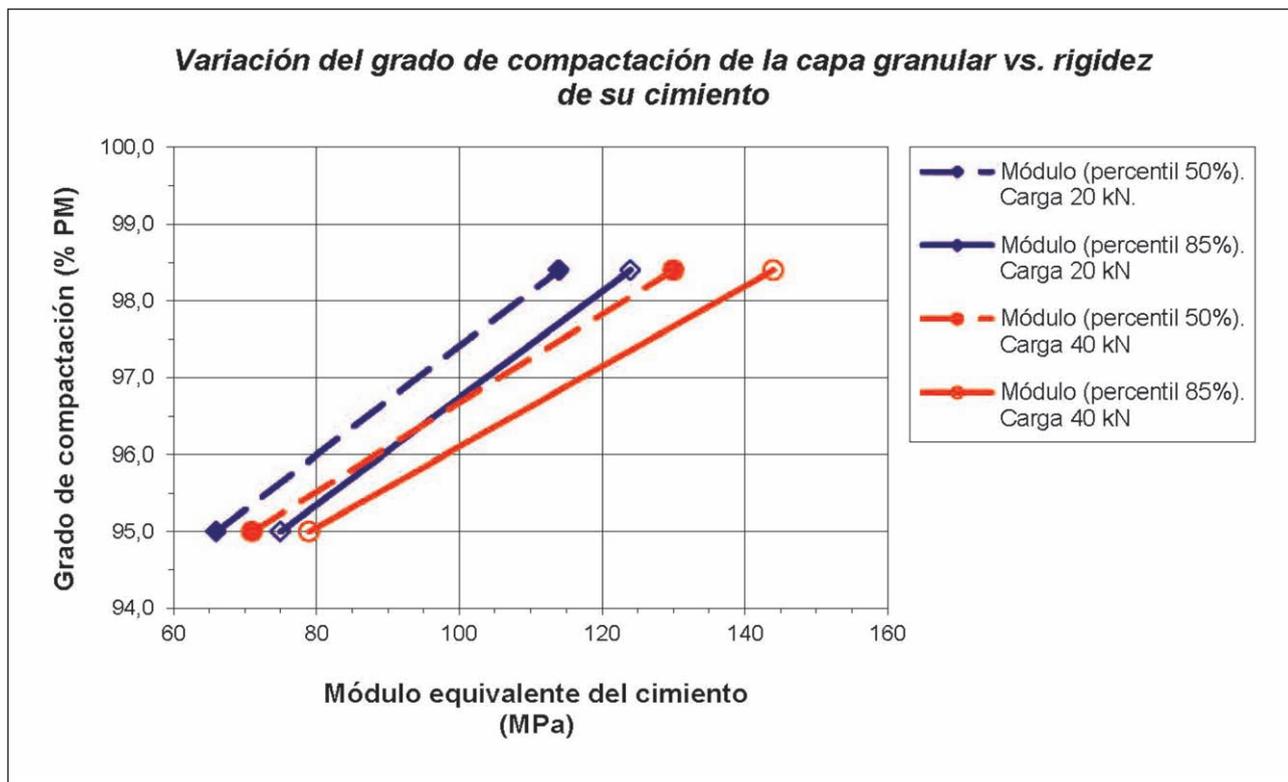


Figura 10. Relaciones empíricas obtenidas entre el módulo equivalente del cemento de la capa de base granular y el grado de compactación alcanzado.

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 subyacente. 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, comprobándose 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).

AGRADECIMIENTOS

Algunos de los resultados de laboratorio presentados en este trabajo han sido obtenidos en el marco del proyecto de I+D+i “Desarrollo sostenible de mezclas bituminosas semicalientes fa-

bricadas con NFU y áridos volcánicos de Canarias (VOLCANIC BC-WARM)” (Ref. BIA2013-47987-C3-3-R; 2014-2016). Por ello, los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación, por la financiación de este proyecto dentro del marco del Programa Estatal de I+D+i orientada a los Retos de la Sociedad (convocatoria 2013).

REFERENCIAS

- Asociación Española de Normalización AENOR. (2003). Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas estructurales de firmes. UNE-EN 13242:2003. Madrid: AENOR.
- Comité Français pour les Techniques Routières. (1994). Assises de chaussées. Graves non traitées. Définition. Composition. Classification. NF P 98-129:1994. Paris: CFTR.
- European Committee for Standardization CEN. (2003). Unbound mixtures. Specification. EN 13285:2003. Bruxelles: CEN.
- Estradas de Portugal. (1998). Cuaderno de Encargos 5-03 Pavimentação. EPE-98. Lisboa: EP.
- Franesqui, M.A. & Castelo-Branco, F. (2009). Áridos volcánicos en capas granulares no tratadas: control de la compactación e influencia de la rigidez del cemento. Carreteras 164: 34-47.
- Hawaii Department of Transportation HDT. (2005). Standard Specifications. 304-Aggregate base course.
- Instituto Português da Qualidade IPQ (2005). Agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária. NP EN 13242:2005. Lisboa: IPQ.
- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. (2014). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. Art. 510-Zahorras. FOM/2523/2014.