

Reutilización de residuos poliméricos para la  
fabricación de mezclas asfálticas sostenibles con  
áridos volcánicos marginales de Canarias

TESIS DOCTORAL

Las Palmas de Gran Canaria, 2020

**P.D. INGENIERÍAS QUÍMICA, MECÁNICA Y DE FABRICACIÓN**

**Autora: Cándida García González**

*Arquitecta*

*Graduada en Ingeniería Civil (Mención en Construcciones Civiles)*



**ULPGC**  
Universidad de  
Las Palmas de  
Gran Canaria

---

**Escuela de  
Doctorado**





# Reutilización de residuos poliméricos para la fabricación de mezclas asfálticas sostenibles con áridos volcánicos marginales de Canarias

TESIS DOCTORAL

**PROGRAMA DOCTORAL EN INGENIERÍAS QUÍMICA, MECÁNICA Y DE FABRICACIÓN**

*Procesado y caracterización de polímeros.*

Las Palmas de Gran Canaria, 2020

**Autora:** Cándida García González

**Directores:** Dr. Miguel Ángel Franesqui García

Dra. María Dolores Marrero Alemán



## SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

---

### Abreviaturas

---

ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AC	<i>Asphalt Concrete</i>
AR	<i>Asphalt Rubber</i>
BAFM	Basalto Afanítico Masivo
BAFV	Basalto Afanítico Vacuolar
BC	Betunes mejorados con caucho
BES	Basalto Escoriáceo
BMC	Betunes modificados con caucho
BMAVC	Betunes modificados de alta viscosidad con caucho
BOPM	Basalto Olivínico Piroxénico Masivo
BOPV	Basalto Olivínico Piroxénico Vacuolar
BPLM	Basalto Plagioclásico Masivo
BPLV	Basalto Plagioclásico Vacuolar
CBS	Cenizas Basálticas Seltas
CBT	Cenizas Basálticas Cementadas
CSS	Cenizas Sálicas Seltas
CST	Cenizas Sálicas Cementadas
CR	<i>Crumb Rubber</i>
CRMB	<i>Crumb Rubber Modified Binder</i>
EPDM	Etileno Propileno Dieno tipo M
EH	El Hierro (Isla)
ESS	Escorias Seltas
EST	Escorias Cementadas
FON	Fonolitas
FV	Fuerteventura (Isla)
GC	Gran Canaria (Isla)
GETCAN-011	Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i>
IGNS	Ignimbritas No Soldadas
IGS	Ignimbritas Soldadas
IT-CY	<i>Indirect Tensile Strength- Cylinder specimen</i>
LDPE	<i>Low Density Polyethylene</i>
LLDPE	<i>Linear Low-Density Polyethylene</i>
LPS	Lapilli Suelto
LPT	Lapilli Cementado
MB	Mezcla bituminosa
MBC	Mezcla bituminosa en caliente
MBSC	Mezcla bituminosa semicaliente
MQ	<i>Marshall Quotient</i>
NFU	Neumáticos Fuera de Uso

PCA	<i>Polymer Coated Aggregate</i>
PMB	<i>Polymer Modified Bitumen</i>
PE	Polietileno
PET	Polietileno Tereftalato
PG-3	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes
PP	Polipropileno
PVC	Policloruro de vinilo
PZS	Pómez Suelto
PZT	Pómez Cementado
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RCA	<i>Recycled Construction Aggregates</i>
r.p.m.	Revoluciones por minuto
SBS	Estireno- Butadieno-Estireno
SIS	Estireno- Isopreno-Estireno
SMA	<i>Stone Mastic Asphalt</i>
TB	<i>Terminal Blends</i>
TF	Tenerife (Isla)
TRQ	Traquitas
TRQB	Traquibasaltos
Vm	<i>Voids in mixture</i>
VMA	<i>Voids in mineral aggregate</i>
VFB	<i>Voids filled with bitumen</i>
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i>
WTT	<i>Wheel Tracking Test</i>
4PB-PR	<i>Four point bending- Prismatic specimen</i>

Símbolos	UDS	
$C_c$	%	Partículas trituradas del árido
$C_{tc}$	%	Partículas totalmente trituradas del árido
$C_r$	%	Partículas redondeadas del árido
$C_{tr}$	%	Partículas totalmente redondeadas del árido
$C_v$		Coefficiente de Variación
$D_s$		Desviación estándar
$E$		Energía de compactación
$f$	%	Contenido de finos <0.063 mm del árido
$F$	mm	Deformación de la mezcla bituminosa
$FI$	%	Índice de lajas del árido
$ITS_R$	%	<i>Indirect Tensile Strength Ratio</i>
$ITS_d$	kPa	<i>Indirect Tensile Strength in dry conditions</i>
$ITS_w$	kPa	<i>Indirect Tensile Strength in wet conditions</i>
$L$	%	Coefficiente de limpieza de los áridos
$LA$		Coefficiente de desgaste de Los Ángeles
$M_{DE}$		Coefficiente de Micro-Deval
$MQ$		Coefficiente Marshall
$N$		Número de muestras ensayadas
$NL$		<i>Noise Level</i>
$\nu$		Coefficiente de Poisson
$PRD_{(AIR)}$	%	<i>Proportional Rut Depth</i>
$R^2$		Coefficiente de determinación
$\rho_a$	Mg/m <sup>3</sup>	Densidad aparente
$\rho_B$	Mg/m <sup>3</sup>	Densidad aparente del ligante
$\rho_{geo}$	Mg/m <sup>3</sup>	Densidad geométrica
$\rho_{máx}$	Mg/m <sup>3</sup>	Densidad máxima
$\rho_{rd}$	Mg/m <sup>3</sup>	Densidad de partículas secadas en estufa
$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente
$\rho_w$	Mg/m <sup>3</sup>	Densidad del agua
$RD_{(AIR)}$	mm	<i>Ruth Depth in air</i>
$S$	kN	Estabilidad de la mezcla
$SE (10)$	%	Equivalente de arena
$SF$		Coefficiente de friabilidad de las arenas
$Sm$	MPa	Módulo de rigidez
$T$	21 Nm	Resistencia a la compactación
$t (E_2)$	mm	Espesor de la muestra compactada
$t_\infty$	mm	Espesor mínimo posible calculado de la muestra
$t_0$	mm	Espesor inicial de la muestra
$UCS$	MPa	<i>Uniaxial Compressive Strength</i>
$VFB$	%	<i>Voids Filled with Bitumen</i>
$V_m$	%	<i>Voids in mixture</i>
$VMA$	%	<i>Voids in Mineral Aggregate</i>
$WA_{24}$	%	<i>Water absorption (after 24 hours)</i>
$WTS_{(AIR)}$	mm	<i>Wheel-Tracking Slope of the Rut Depth in air</i>
$\bar{X}$		Valor promedio





## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
1.1	INTERÉS Y OPORTUNIDAD	5
1.2	OBJETIVOS	7
1.3	ORIGINALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.4	PLAN DE TRABAJO DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.4.1	Estructura general de la tesis	8
1.4.2	Descripción de las fases de investigación	11
1.5	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	15
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>17</b>
2.1	INTRODUCCIÓN	17
2.2	EL USO DE ÁRIDOS MARGINALES	18
2.2.1	Áridos volcánicos	19
2.2.2	Áridos poliméricos	23
2.2.3	Áridos reciclados	26
2.3	MEZCLAS BITUMINOSAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS	28
2.3.1	MEZCLAS BITUMINOSAS CON TERMOPLÁSTICOS	29
2.3.2	MEZCLAS BITUMINOSAS CON ELASTÓMEROS	31
2.4	MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES	35
2.5	IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE	36
2.6	CONCLUSIONES	39
<b>3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN GEOMÉCANICA DE ÁRIDOS VOLCÁNICOS PARA SU USO EN MEZCLAS BITUMINOSAS</b>	<b>41</b>
3.1	INTRODUCCIÓN	41
3.2	MARCO TEÓRICO SOBRE LOS ÁRIDOS VOLCÁNICOS	42
3.2.1	Marco geológico de los áridos en las Islas Canarias	43
3.2.2	Propiedades de los áridos	47
3.3	METODOLOGÍA	49
3.3.1	Plan de trabajo	51
3.3.2	Materiales	53
3.3.3	Instrumental empleado	56
3.3.4	Preparación de las muestras	58
3.3.5	Procedimiento operativo: ensayos de áridos	59

3.3.6	Procedimiento operativo: ensayos de roca .....	64
3.4	RESULTADOS .....	65
3.5	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	71
3.6	CONCLUSIONES .....	83
<b>4</b>	<b>DESARROLLO DE MEZCLAS CON BETÚN CAUCHO Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS.....</b>	<b>85</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	85
4.2	METODOLOGÍA.....	88
4.2.1	Materiales .....	88
4.2.2	Instrumental empleado.....	90
4.2.3	Preparación de muestras .....	91
4.2.4	Procedimiento operativo .....	93
4.3	RESULTADOS .....	98
4.4	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	100
4.4.1	Propiedades volumétricas de las mezclas.....	100
4.4.2	Propiedades mecánicas de las mezclas.....	108
4.5	CONCLUSIONES .....	116
<b>5</b>	<b>DESARROLLO DE MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES CON BETÚN CAUCHO.....</b>	<b>117</b>
5.1	INTRODUCCIÓN .....	117
5.2	METODOLOGÍA.....	119
5.2.1	Materiales .....	119
5.2.2	Instrumental empleado.....	120
5.2.3	Preparación de muestras .....	121
5.2.4	Procedimiento operativo .....	123
5.3	RESULTADOS .....	124
5.4	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	126
5.4.1	Propiedades volumétricas de las mezclas.....	126
5.4.2	Propiedades mecánicas de las mezclas.....	133
5.5	CONCLUSIONES .....	141
<b>6</b>	<b>DESARROLLO DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON RESIDUOS PLÁSTICOS Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS .....</b>	<b>143</b>
6.1	INTRODUCCIÓN .....	143
6.2	METODOLOGÍA.....	145
6.2.1	Materiales .....	145

6.2.2	Instrumental empleado.....	147
6.2.3	Preparación de muestras .....	147
6.3	RESULTADOS .....	150
6.4	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	152
6.4.1	Propiedades volumétricas de las mezclas.....	152
6.4.2	Propiedades mecánicas de las mezclas.....	159
6.5	CONCLUSIONES .....	166
<b>7</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>167</b>
7.1	INTRODUCCIÓN .....	167
7.2	COMPARATIVA DE MEZCLAS.....	168
7.2.1	Propiedades volumétricas de las mezclas.....	168
7.2.2	Propiedades mecánicas de las mezclas.....	171
7.3	IMPACTO AMBIENTAL.....	176
7.3.1	Concepto de ecoeficiencia .....	177
7.3.2	Estimación de los indicadores .....	178
7.4	CONCLUSIONES FINALES .....	181
7.5	FUTUROS TRABAJOS.....	184
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>185</b>
8.1	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	185
8.2	NORMATIVA .....	199
8.3	WEBGRAFÍA.....	202
	<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>205</b>
	<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>211</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>215</b>



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 INTERÉS Y OPORTUNIDAD

---

El reasfaltado de carreteras y vías urbanas en las Islas Canarias es fundamental para mantener en buen estado de conservación la red de carreteras insulares, únicas infraestructuras de comunicación interior existentes y fundamentales para el sistema productivo y el turismo en cada isla. La rehabilitación y reposición de capas asfálticas deterioradas, constituyen cerca del 37% del gasto total en conservación y explotación que realizan las Administraciones que las gestionan (Del Val, 2010). El elevado coste de los materiales que se emplean para este fin responde a la necesidad de utilizar materias primas procedentes de recursos limitados, utilizándose hasta el momento materia prima virgen en la mayoría de los casos.

Canarias es un territorio limitado por la insularidad y un elevado grado de protección ambiental que varía entre un 30-60% dependiendo de la isla (Gobierno de Canarias. Consejería de Educación y Universidades, 2015), por lo que la explotación de áridos para su uso en construcción supone un grave problema económico, logístico y medioambiental. Actualmente, sólo un tercio de las canteras existentes en las Islas pueden explotar sus recursos legalmente y el mayor problema que presentan es la heterogeneidad y variabilidad de los materiales que se extraen. Esto se traduce en que para obtener áridos de una calidad adecuada con los que fabricar las mezclas asfálticas se descarta parte de la producción, la cual va a parar a rellenos o escombreras. **La caracterización y conocimiento con mayor profundidad de estos áridos residuales o marginales y el estudio de su comportamiento en mezclas asfálticas**, ofrecería una alternativa más sostenible desde un punto de vista económico y técnico, al aprovechar un recurso local frecuente y abundante. Estos materiales residuales también es frecuente encontrarlos en otros territorios volcánicos (Macaronesia, Sudamérica, Sudeste asiático, etc.), por lo que el aprovechamiento de este tipo de áridos en la aplicación que aquí se presenta, resulta de interés para estas regiones, sobre todo en países donde los medios técnicos y económicos son más limitados.

Algunos de los últimos avances a nivel internacional en materiales asfálticos para pavimentación proponen la incorporación de diferentes tipos de polímeros, tanto por “vía húmeda” (modificando el ligante) como por “vía seca” (incorporándolos como un árido más de la mezcla) puesto que la presencia de polímeros en las mezclas bituminosas (MB) permite mejorar sus cualidades, aumentar su durabilidad y favorecer la sostenibilidad de estos materiales al aumentar su ciclo de vida, especialmente si la modificación de las mezclas se realiza con materias procedentes de residuos. Sin embargo, a pesar del valor potencial de los polímeros residuales como agentes beneficiosos de ciertas propiedades de las mezclas asfálticas, en la actualidad, solo un pequeño porcentaje del total de residuos poliméricos que se generan (plásticos, neumáticos, embalajes, etc.) se emplean en la construcción de carreteras o pistas de aeropuertos. Por tanto, estos residuos se acumulan rápidamente en los vertederos o se utilizan en procesos de combustión, con el consiguiente impacto en las emisiones a la atmósfera.

Hoy en día, es innegable afirmar que los polímeros plásticos y elastoméricos están presentes en casi todos los aspectos de nuestra vida diaria. Sin embargo, nuestra sociedad está obligada a

reducir su dependencia y el uso que hacemos de estos materiales, porque cada vez somos más consciente de los riesgos y las graves consecuencias medioambientales que conllevan. Diariamente, recibimos noticias sobre la aparición de microplásticos (partículas de plásticos < 5 mm) en playas, mares y océanos que no solo acaban con la vida vegetal y animal, sino que en última instancia terminan en nuestra mesa. En Canarias en el año 2018 se reciclaron alrededor de 29510 t de residuos plásticos procedentes de envases para la fabricación de nuevos productos o la producción de energía (Ecoembes, 2018). Pese a ser una cifra esperanzadora, la realidad es que esto solo es un 6.30% de todos los residuos que se producen y que los microplásticos recogidos en las playas terminan en vertederos o incinerándose para la valoración energética, no posibilitando su valorización para nuevos usos.

Por otro lado, en 2017 en Canarias se recogieron cerca de 7000 t de neumáticos fuera de uso (NFU), de las cuales el 63% se recicló como granulado de caucho y tan solo el 1.6% de estas partículas de caucho se utilizó en pavimentos asfálticos (aunque fuera de Canarias). El resto de granulado de caucho se destinó principalmente a rellenos de campos de fútbol (43.1%), exportación (27.4%) y parques infantiles (15.0%) (SIGNUS Ecovalor, 2017).

En esta investigación se propone el **aprovechamiento de los residuos poliméricos** (productos plásticos y elastómeros que han llegado al final de su ciclo de vida) **para su empleo en mezclas asfálticas fabricadas con áridos volcánicos marginales** con el objeto de valorizar estos productos residuales y reducir su impacto ambiental, a la vez que se pretende mejorar el comportamiento mecánico de los pavimentos.

El planteamiento de este trabajo surge en el marco del proyecto “*Desarrollo sostenible de mezclas bituminosas semicalientes fabricadas con NFU y áridos volcánicos de Canarias*” (Ref. BIA2013-47987-C3-3-R) desarrollado entre el 01/01/2014 y 30/06/2017, dirigido por el prof. Miguel Ángel Franesqui García (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria) bajo la coordinación del prof. Juan Gallego Medina (Universidad Politécnica de Madrid), financiado a través del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España. Las labores desarrolladas en este contexto, consistieron principalmente en la coordinación y ejecución de los ensayos de laboratorio (tanto de caracterización de áridos como de desarrollo de mezclas bituminosas) y el tratamiento y análisis de los resultados obtenidos tras cada fase experimental.

A lo largo de dicho proyecto se estudiaron, caracterizaron y finalmente se diseñaron para su uso en servicio, diferentes mezclas asfálticas con áridos volcánicos de las Islas Canarias, que actualmente son rechazados en cantera por su alta porosidad, siendo mejoradas con polímeros procedentes de materiales también residuales: polvo de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU). A través del estudio experimental, se analizó la mejora de las propiedades mecánicas de las mezclas diseñadas con respecto a las mezclas asfálticas convencionales, se evaluaron los beneficios de la incorporación de este residuo y se comprobó el ahorro de energía y reducción de emisiones del proceso de fabricación al trabajar con diferentes temperaturas de compactación.

Tras finalizar el proyecto *Volcanic BC-Warm*, se continuó el trabajo de la tesis con la incorporación a las mezclas bituminosas de otro tipo de polímero reciclado, en este caso Polietileno Tereftalato (PET) procedente de envases, para valorar la idoneidad de uno respecto a otro mediante el mismo proceso de diseño.

## 1.2 OBJETIVOS

---

El objetivo general es el **estudio y diseño de mezclas asfálticas con polímeros reciclados y áridos residuales de Canarias** para su empleo en la pavimentación de las infraestructuras viarias y aeroportuarias. A través del estudio experimental se analizarán las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas diseñadas con residuos poliméricos, se valorarán con respecto a las mezclas asfálticas convencionales y se evaluarán cualitativamente los beneficios y la eficiencia energética de los procesos de fabricación de los diferentes materiales y métodos. De esta forma, se planteará un proceso eco-eficiente que permita obtener un recurso a partir de la gestión sostenible de residuos procedentes de otros procesos.

Para intentar cumplir con el objetivo principal, se establecen los siguientes objetivos parciales:

1. **Dar solución al problema del empleo de los áridos volcánicos de elevada porosidad y estructura vacuolar o escoriácea en la fabricación de mezclas asfálticas**, que actualmente no cumplen las especificaciones normativas de las mezclas bituminosas para pavimentación, **mediante la inclusión de adiciones procedentes de polímeros que mejoren sus propiedades**. Esto permitiría la optimización de los recursos naturales y en consecuencia, una mejor preservación del medio ambiente, ya que los áridos de naturaleza masiva que se emplean actualmente son escasos o presentan mayor dificultad de obtención en estas regiones insulares.
2. **Reutilizar los residuos plásticos de envases y los neumáticos fuera de uso generados en Canarias, dándoles un nuevo uso y valorizando dichas materias residuales mediante su incorporación en las mezclas asfálticas**. Con ello se busca reducir los impactos ambientales derivados de la acumulación de estos residuos en vertederos y la contaminación (emisiones atmosféricas, agua y terreno) derivada de la eliminación de este tipo de residuos.
3. **Desarrollar nuevos procesos y aplicaciones que reduzcan los consumos energéticos mediante la optimización de las temperaturas del proceso de fabricación de las mezclas asfálticas**, evaluando los diferentes procesos de incorporación, mezclado y compactación de las capas de firme. Para ello se investigará la posibilidad de aplicar tecnologías de fabricación y puesta en obra a más bajas temperaturas, lo que redundaría en menores consumos de energía y emisiones, mayor seguridad para los trabajadores, mayores tiempos y distancias de puesta en obra y menor envejecimiento del ligante durante el proceso de fabricación de las mezclas.

### 1.3 ORIGINALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

---

Con respecto al estado actual de la cuestión, las principales aportaciones que presenta esta investigación son:

1. Una caracterización exhaustiva de los materiales volcánicos de las Islas Canarias, ante la falta de pliegos normativos específicos y de una escasa bibliografía de referencia en cuanto al uso de estos materiales como áridos de construcción.
2. Correlaciones entre las diferentes propiedades de los áridos y la roca matriz que permitan deducir el comportamiento mecánico del árido a partir de ensayos realizados sobre la roca.
3. Un análisis de caracterización de mezclas bituminosas elaboradas con polvo de caucho procedente de NFU en combinación con un árido volcánico vacuolar o vesicular marginal.
4. Una evaluación del proceso de fabricación de estas mezclas bituminosas variando la temperatura de compactación mediante el uso de un aditivo químico surfactante.
5. El desarrollo de mezclas bituminosas elaboradas con residuos PET y árido volcánico vacuolar comparando sus propiedades con las mezclas mejoradas con polvo de caucho.

### 1.4 PLAN DE TRABAJO DE LA INVESTIGACIÓN

---

#### 1.4.1 ESTRUCTURA GENERAL DE LA TESIS

A lo largo de este trabajo se investiga sobre el aprovechamiento de **dos residuos poliméricos** para su empleo en mezclas asfálticas fabricadas **con diferentes fracciones de árido volcánico marginal** con el objeto de valorizar estos productos residuales, mejorar las condiciones medioambientales de fabricación de las mezclas y aumentar la resistencia mecánica de las mismas.

Para ello, el trabajo se dividió en las siguientes fases:

1. Revisión del estado del arte.
2. Caracterización de las materias primas componentes.
3. Desarrollo de mezclas bituminosas en caliente (MBC) de referencia con áridos volcánicos marginales.
4. Desarrollo de MBC con áridos volcánicos marginales y betún mejorado con caucho.
5. Desarrollo de mezclas asfálticas semicalientes (MBSC) con áridos volcánicos marginales y betún mejorado con caucho.
6. Desarrollo de MBC con áridos volcánicos marginales y polímeros procedentes de residuos de envases plásticos (PET).
7. Difusión de resultados



### 1. Revisión del estado del arte

#### Consulta bibliográfica sobre:

- Áridos y rocas volcánicas.
- MBC modificadas con polímeros.
- La fabricación de MB semicalientes.
- El impacto medio ambiental de las técnicas empleadas.

#### Consulta a fabricantes de áridos y empresas de reciclaje de plásticos.

#### Consulta de archivos de laboratorios profesionales.

### 2. Caracterización de las materias primas componentes

#### Áridos y rocas volcánicas:

- Muestreo en distintos yacimientos y canteras.
- Ensayos de caracterización de áridos y rocas según normas UNE.

Selección del árido para su uso en MB con polímeros.

#### Betunes:

Ensayos de caracterización de betunes según normas UNE.

#### Polímeros:

Determinación de la granulometría según norma UNE-EN 933-1.

### 3. Desarrollo de mezclas bituminosas en caliente (MBC) de referencia con áridos volcánicos

#### Tipo de mezcla: AC16 surf 35/50 S.

Fabricación de probetas cilíndricas ( $\varnothing=101,6$  mm) por impacto y probetas en placa (300x300x60 mm) mediante rodillo con distintos contenidos de betún (5-7% s/peso total de muestra).

Caracterización volumétrica de las MBC según normas UNE-EN.

Caracterización mecánica de las MBC según normas UNE-EN.

Determinación del contenido óptimo de betún.

#### 4. Desarrollo de MBC con áridos volcánicos marginales y betún mejorado con caucho

**Tipo de mezcla: AC16 surf BC35/50 S.**

Fabricación de probetas cilíndricas ( $\varnothing=101,6$  mm) por impacto y probetas en placa (300x300x60 mm) mediante rodillo con distintos contenidos de betún (5-7% s/peso total de muestra).

Caracterización volumétrica de las MBC según normas UNE.

Caracterización mecánica de las MBC según normas UNE.

Determinación del contenido óptimo de betún.

#### 5. Desarrollo de MBSC con áridos volcánicos marginales y betún mejorado con caucho

**Tipo de mezcla: AC16 surf BC35/50 S semicaliente.**

Fabricación de probetas cilíndricas ( $\varnothing=101,6$  mm) por impacto y probetas en placa (300x300x60 mm) mediante rodillo a distintas temperaturas de compactación (130 a 160 °C) con aditivo químico.

Caracterización volumétrica de las MBSC según normas UNE.

Caracterización mecánica de las MBSC según normas UNE.

Determinación la temperatura óptima de fabricación.

#### 6. Desarrollo de MBC con áridos volcánicos marginales y PET

**Tipos de mezcla: AC16 surf 35/50 S y AC16 surf 50/70 S.**

Fabricación de probetas cilíndricas ( $\varnothing=101,6$  mm) por impacto y probetas en placa (300x300x60 mm) mediante rodillo con distintos contenidos de PET (0-5% s/peso del árido)

Caracterización volumétrica de las MBC según normas UNE.

Caracterización mecánica de las MBC según normas UNE.

Determinación del contenido óptimo de PET.

Figura 1.1 Esquema de la metodología seguida en la investigación

## 1.4.2 DESCRIPCIÓN DE LAS FASES DE INVESTIGACIÓN

La investigación realizada es un proyecto de naturaleza empírica realizado a través de ensayos de laboratorio normalizados. La serie de trabajos llevados a cabo se especifican en las fases descritas a continuación:

### *1.4.2.1 Fase 1: Revisión del estado del arte*

En esta primera etapa se realizó una extensa búsqueda bibliográfica de artículos de referencia, libros, comunicaciones, etc. para analizar el estado actual de la cuestión en lo relativo al uso de áridos volcánicos marginales, los ligantes mejorados con caucho, aditivos químicos para reducir las temperaturas de trabajo, la incorporación de residuos poliméricos plásticos en las mezclas bituminosas y la posible combinación entre ellos.

### *1.4.2.2 Fase 2: Caracterización de materiales componentes*

Consistió en el muestreo y caracterización de las materias primas utilizadas en la fabricación de las mezclas bituminosas: áridos volcánicos de carácter marginal, polvo de residuos plásticos, polvo de NFU y betunes asfálticos.

Se caracterizaron áridos volcánicos de diferente naturaleza procedentes de distintos yacimientos y canteras de las Islas Canarias para valorar la adecuación de cada uno de ellos para su uso en mezclas bituminosas. De todos los áridos analizados se seleccionaron los áridos volcánicos de naturaleza vacuolar y escoriácea (marginales) para su uso en las mezclas con el objeto de evaluar las posibilidades de reciclar los rechazos de canteras y obras, vertidos en terrenos y solares periurbanos diseminados por toda la geografía insular, generando un elevado impacto visual.

El uso de residuos industriales y urbanos (PET y NFU) posibilita determinar si las mezclas bituminosas experimentan una mejora significativa o una reducción asumible de sus cualidades resistentes, tal que justifique su reutilización para reducir la contaminación del territorio y dinamizar la economía regional.

Sobre estos materiales componentes de las mezclas se realizaron los ensayos de caracterización en laboratorio que permiten determinar sus propiedades básicas que se detallan a continuación:

Tabla 1.1 Relación de ensayos de caracterización de los materiales componentes de las mezclas bituminosas

1.1 Caracterización de los áridos y rocas volcánicas de las Islas Canarias

---

1.1.A Ensayos de caracterización de áridos

UNE 146130:2000 (ANEXO C)	Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas. Determinación de la limpieza superficial del árido grueso.
UNE-EN1097-6:2014	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua.
UNE-EN 933-1:2012	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
UNE-EN 933-3:2012	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
UNE-EN 933-5:1999	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.
UNE-EN 1097-1:2011	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)
UNE-EN 1097-2:2010	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
UNE-EN 933-8:2012	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
UNE 83-115:1989	Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas.

---

1.1.B Ensayos de caracterización de rocas

UNE-EN-1936:2007	Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.
UNE-EN-1926:2007	Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.

---

1.2 Caracterización de polímeros:

---

UNE-EN 933-1:2012	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
-------------------	---

---

1.3 Caracterización de ligantes:

---

UNE-EN 15326	Betunes y ligantes bituminosos. Medida de la densidad y del peso específico. Método del picnómetro de tapón capilar.
UNE-EN 1426	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la penetración con aguja.
UNE-EN 1427	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de reblandecimiento. Método del anillo y bola.
UNE-EN 13302	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la viscosidad dinámica de los ligantes bituminosos usando un viscosímetro de rotación de aguja.

---

### 1.4.2.3 Fase 3: Desarrollo de mezclas asfálticas de referencia con áridos volcánicos marginales

Para verificar la influencia de los diferentes factores experimentales que intervienen en la fabricación de las mezclas asfálticas resulta imprescindible disponer de resultados de referencia con los que poder comparar los que se obtendrán con las nuevas mezclas objeto de esta investigación. Por ello, se fabricaron en laboratorio diferentes tipos de probetas (cilíndricas, en placa y vigas prismáticas) de mezcla asfáltica convencional con áridos volcánicos marginales sobre las que se realizaron los principales ensayos de caracterización.

Tabla 1.2 Proceso de fabricación y análisis de las mezclas asfálticas de referencia

#### 2.1 Dosificación de las mezclas según huso granulométrico AC16 S (PG-3)

#### 2.2 Fabricación de mezclas de referencia

UNE-EN 12697-30	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de probetas mediante compactador de impactos.
UNE-EN 12697-33	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa.

#### 2.3 Análisis del comportamiento de las mezclas elaboradas

##### Ensayos de caracterización de las MB

UNE-EN 12697-6 Proced. B: Saturado superficie seca y Proced. D: Geométrico	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas.
UNE-EN 12697-5 Proced. A: Volumétrico	Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima.
UNE-EN 12697-8	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas.
UNE-EN 12697-10	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 10: Compactibilidad.
-	Degradación granulométrica tras compactación mediante análisis granulométrico.
UNE-EN 12697-12	Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.
UNE-EN 12697-23	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.
UNE-EN 12697-34	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 34: Ensayo Marshall.
UNE-EN 12697-22 Proced. B: en aire, dispositivo pequeño, a 60 °C y 10 <sup>4</sup> ciclos)	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura.
UNE-EN 12697-26 Anexo C: ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY)	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez.

### 2.3 Análisis del comportamiento de las mezclas elaboradas

---

#### Ensayos de caracterización de las MB

UNE-EN 12697-24	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas
Anexo D: Ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR)	bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga.

---

### 2.4 Determinación del contenido óptimo de ligante conforme a los resultados obtenidos

---

#### 1.4.2.4 Fase 4: Desarrollo de mezclas asfálticas en caliente con áridos volcánicos marginales y betún mejorado con caucho.

De manera análoga a la fase anterior, se repitió la misma serie de ensayos con mezclas elaboradas en caliente (MBC) con un betún mejorado con caucho (BC), obtenido de la trituración de neumáticos fuera de uso en una proporción del 10% sobre el peso del betún, y se compararon los resultados obtenidos con los de las mezclas de referencia previas.

#### 1.4.2.5 Fase 5: Desarrollo de mezcla bituminosas semicalientes con áridos volcánicos marginales y betún mejorado con caucho.

A partir del contenido óptimo de ligante de las mezclas con caucho anteriores (MBC-BC), se analizó el comportamiento de mezclas elaboradas con BC fabricadas a diferentes temperaturas (mezclado entre 140 °C y 170 °C) , gracias a la incorporación de un aditivo químico surfactante que contribuye a rebajar la temperatura de compactación de la mezcla.

#### 1.4.2.6 Fase 6: Desarrollo de mezcla bituminosas en caliente con áridos volcánicos marginales y polímeros procedentes de residuos de envases plásticos

Se fabricaron en el laboratorio diferentes tipos de probetas de mezcla asfáltica (cilíndricas, en placa y vigas prismáticas) con los mismos áridos marginales de las fases previas y residuos poliméricos plásticos (PET) procedentes del triturado de envases. A priori, se consideró más adecuada la incorporación del polvo de PET a las mezclas por vía seca (como fracción del árido) debido a las características termoplásticas del polímero empleado y porque su validación de uso en las mezclas permitiría que las mezclas puedan ser fabricadas por plantas ya existentes en Canarias, sin apenas modificaciones en la maquinaria.

Sobre las probetas fabricadas se realizaron los anteriores ensayos de determinación de las principales propiedades mecánicas y de comportamiento y se compararon los resultados con los estándares y especificaciones de las normativas actuales, así como con los resultados de las mezclas de las fases 3 y 4.

#### 1.4.2.7 Fase 7: Difusión de resultados.

Finalmente, los resultados obtenidos en cada una de la fases han sido publicados en diferentes revistas de impacto para obtener una revisión por pares que verifiquen la calidad, rigor científico y relevancia de las contribuciones aportadas por este trabajo al campo de la ingeniería de carreteras y la sostenibilidad ambiental.

## 1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

---

El documento actual está organizado según los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** En este capítulo se explica la relevancia de la investigación realizada, se establecen los objetivos que se pretenden cumplir, el plan de trabajo seguido para ello y se enumeran las principales contribuciones logradas.
- **Capítulo 2: Antecedentes.** A través de diferentes referencias bibliográficas se analiza el estado del arte en cuanto al empleo de áridos marginales y/o volcánicos, la incorporación de polvo de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) y residuos plásticos en las mezclas bituminosas y la aplicación de diferentes tecnologías para producir mezclas semicalientes.
- **Capítulo 3: Caracterización de áridos volcánicos para su uso en mezclas bituminosas.** Estudio de los materiales volcánicos a través de ensayos normalizados de áridos y rocas para establecer su idoneidad de uso en las mezclas bituminosas u otras aplicaciones constructivas. Caracterización exhaustiva del árido volcánico marginal que se empleará en las fases siguientes.
- **Capítulo 4: Desarrollo de mezclas bituminosas en caliente con áridos volcánicos y betún mejorado con caucho.** Fabricación y análisis del comportamiento de mezclas bituminosas elaboradas con áridos volcánicos marginales y partículas de caucho por vía húmeda en una proporción del 10% (sobre peso del betún) a una temperatura convencional de fabricación.
- **Capítulo 5: Desarrollo de mezclas bituminosas semicalientes con áridos volcánicos y betún mejorado con caucho.** Fabricación y análisis del comportamiento de mezclas bituminosas elaboradas con áridos volcánicos marginales, partículas de caucho por vía húmeda en una proporción del 10% (sobre peso del betún) y un aditivo químico surfactante para su producción a temperaturas inferiores a las convencionales.
- **Capítulo 6: Desarrollo de mezclas bituminosas en caliente con áridos volcánicos y residuos de PET.** Fabricación y análisis del comportamiento de mezclas bituminosas elaboradas con áridos volcánicos marginales y partículas de PET por vía seca en distintas proporciones.
- **Capítulo 7: Comparación entre mezclas.** Análisis comparativo de las tres mezclas bituminosas anteriores con áridos volcánicos marginales para evaluar la mejora introducida por los polímeros reciclados incorporados en las mismas.
- **Capítulo 8: Conclusiones y futuros trabajos.** Resumen de las conclusiones principales obtenidas en cada fase de trabajo y planteamiento de futuras líneas de trabajo que contribuirían a apoyar o contrastar los resultados obtenidos.
- **Capítulo 9: Bibliografía.** Recopilatorio de referencias bibliográficas y normas empleadas a lo largo de este documento, citadas conforme a la norma [UNE-ISO 690](#).





## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 INTRODUCCIÓN

El planteamiento de este trabajo de tesis doctoral gira en torno a la posibilidad de emplear **materiales residuales en la fabricación de mezclas bituminosas para pavimentos de carretera y aeropuertos**. En concreto, se evalúa la adecuación de las mezclas elaboradas con residuos poliméricos (termoplásticos y elastoméricos) mediante los ensayos característicos a los que se someten las mezclas convencionales. Dependiendo de la forma de incorporación de estos residuos a las mezclas, nos referiremos al método de la “vía seca” (sustituyendo parte o la totalidad del esqueleto mineral) o al método de la “vía húmeda” (modificando las características del ligante).



Figura 2.1 Ejemplo de adición de un residuo polimérico a las mezclas bituminosas por la vía seca y por la vía húmeda. (Bisso, 2010)

“Se define como mezcla bituminosa tipo hormigón bituminoso la combinación de un betún asfáltico, áridos con granulometría continua, polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante, cuyo proceso de fabricación y puesta en obra deben realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente” (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

La correcta combinación de estos tres componentes será la que determine la aptitud de las MB para ser usadas en las capas de pavimento, conforme a las especificaciones de la normativa vigente (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

Anualmente se consumen 16.5 billones de toneladas de árido natural en el mundo y su demanda sigue siendo creciente (Akbulut *et al.*, 2011). Esta necesidad supone un enorme problema a nivel económico y ecológico, debido a las limitaciones de los territorios y al impacto medioambiental que genera la industria extractiva. Teniendo en cuenta que el árido es cerca del 90% de la composición de las MB, debemos buscar alternativas más económicas y responsables con el medio ambiente como prioridad en la construcción de carreteras. Para ello, analizaremos diferentes opciones que permiten reducir el consumo de los áridos pétreos convencionales.

Por su parte, el ligante, generalmente un betún asfáltico, es un derivado del petróleo difícil de remplazar por otro material. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, se intenta mejorar sus prestaciones y reducir su consumo mediante la incorporación de adiciones o aditivos. De forma simplificada, si los materiales que incorporamos producen algún tipo de alteración química hablaremos de betunes modificados y si no, de betunes mejorados. Dentro de esta línea de investigación, profundizaremos en el uso de materiales poliméricos reciclados como modificadores de las características del ligante y, en consecuencia, del comportamiento de las mezclas.

A lo largo de los siguientes apartados, estudiaremos las diferentes alternativas que se están empleando o investigando para el desarrollo de mezclas asfálticas más ecológicas y sostenibles, pensando, en primer lugar, en un uso más racional de los recursos; en segundo lugar, en la búsqueda de materias primas cuyas prestaciones y vida útil mantengan los estándares de calidad de las obras de carretera y, finalmente, en la promoción del reciclado de los materiales de construcción o el aprovechamiento de materiales de fácil acceso.

## 2.2 EL USO DE ÁRIDOS MARGINALES

---

En España, en el ámbito de la construcción, al hacer referencia a **materiales marginales** hablamos generalmente de suelos que habitualmente no se emplean pero son potencialmente utilizables en la construcción de obras lineales viarias conforme al cumplimiento de las especificaciones recogidas en el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*, en adelante PG-3 ([Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014](#)). Esta normativa fue modificada en el año 2000 para incluir los suelos con materiales marginales con el objeto de procurar un mayor aprovechamiento de los materiales que eran rechazados ([CEDEX, 2013a](#)). Bajo la denominación de materiales marginales se agrupan: materiales naturales que por no cumplir los requisitos necesarios son llevados a vertedero, residuos procedentes de la actividad industrial a los que se les puede dar este uso, residuos de la construcción y demolición y otros productos artificiales.

Si bien la denominación de **materiales marginales** hace referencia a materiales destinados exclusivamente a la formación de terraplenes viarios según la normativa de carreteras (Art. 330 del PG-3; [Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, \(2014\)](#)), su definición puede ser extensible a los áridos que se emplean para la construcción de firmes. Entendiéndose, por tanto, como **árido marginal** todo aquel procedente de materiales naturales que a priori son descartados en cantera, de residuos industriales o de residuos de la construcción, susceptibles de poder ser aprovechados para la fabricación de mezclas asfálticas. En este trabajo de investigación abordaremos el empleo de áridos marginales en las mezclas bituminosas (MB) centrándonos en el **aprovechamiento de los materiales volcánicos y de los residuos poliméricos** que pueden ser susceptibles de ser empleados como áridos.

A lo largo de este capítulo iremos analizando diferentes ejemplos en los que se han empleado diferentes tipos de áridos marginales. En primer lugar, veremos el empleo de los áridos marginales de origen volcánico. Estos áridos tienen un uso localizado exclusivamente en territorios volcánicos como son los archipiélagos de la Macaronesia, y en nuestro caso particular, en las Islas Canarias. Pese a ser el único disponible en estas regiones y disponer de una amplia

experiencia constructiva, los áridos volcánicos no cuentan con la misma difusión que los áridos calcáreos continentales. Además, dentro de estos áridos observaremos que existen diferentes litologías que hacen que unos materiales sean más adecuados que otros para su uso en pavimentación. En segundo lugar, abordaremos el empleo de materiales poliméricos procedentes del reciclado de residuos plásticos que se emplean como áridos, profundizando en el uso del **Polietileno Tereftalato (PET)**. Finalmente, haremos una breve reseña al empleo de áridos procedentes de los residuos de la construcción puesto que entrarían dentro de la categoría de árido marginal pero no forman parte del objeto de la tesis.

## 2.2.1 ÁRIDOS VOLCÁNICOS

### 2.2.1.1 Áridos volcánicos comerciales

En las Islas Canarias, como en otras regiones volcánicas, el sector de la construcción está afectado por las condiciones del territorio, no solo por la insularidad, sino por la protección ambiental del paisaje y las condiciones geológicas que dieron lugar a su formación. Esto obliga, en muchos casos, al empleo de materiales locales frente a los inabordables costes de importación y distribución de materiales procedentes del resto de Europa. El hecho de estar alejados de estos recursos, ampliamente estudiados, nos obliga a conocer las características de nuestros propios materiales y su comportamiento a largo plazo. Pese a que en las Islas es frecuente el empleo de los áridos volcánicos (bloques de hormigón aligerado), la falta de conocimiento exhaustivo y la ausencia de controles rigurosos, induce a fracasos y gastos innecesarios por una inadecuada elección del material o una incorrecta puesta en obra (Guigou, 1990).

Aunque los materiales volcánicos no son exclusivos del archipiélago canario, el conocimiento y las especificaciones técnicas que existen sobre ellos son escasos, pese a que en ingeniería civil podemos encontrar diversos estudios que avalan la utilización de los áridos volcánicos en hormigones (Alonso *et al.*, 2002; Demirdag *et al.*, 2008; Tchamdjou *et al.*, 2016) y mezclas asfálticas. El interés de su uso radica principalmente en su disponibilidad, su potencial hidráulico, su rentabilidad y su bajo impacto ambiental (Cai *et al.*, 2016).

A continuación, describiremos algunas investigaciones donde se analiza **la viabilidad de utilización de los áridos volcánicos en la fabricación de mezclas asfálticas mediante la comparación con otros áridos comerciales:**

Akbulut *et al.* (2011) estudiaron la posibilidad de emplear los áridos volcánicos de la región de Afyonkarahisar-Seydiler (Turquía), para la fabricación de MB. Compararon el comportamiento de dos mezclas elaboradas con áridos naturales de composición traqui-andesítica con dos mezclas elaboradas con áridos comerciales calcáreos. Tras realizar los ensayos estándar de carreteras (ensayo Marshall seco y en condiciones de saturación, contenido de huecos de la mezcla y ensayo de pista) concluyeron que, pese a que el contenido de ligante fuera ligeramente superior al de las mezclas calcáreas debido a la porosidad que presentan los áridos volcánicos, el empleo de uno de los áridos estudiados es apto para su uso en carreteras por ofrecer un buen comportamiento mecánico. El otro árido volcánico solo se recomendó para su empleo en capas superficiales de carreteras por la buena fricción que ofrece.

Al-Khateeb *et al.* (2013) compararon la resistencia a la formación de huella o fluencia de dos mezclas *Superpave* (una elaborada con árido calizo frente a otra con árido basáltico) mediante un ensayo dinámico de deformación plástica (*Dynamic creep test*). En el caso de las mezclas con basalto se empleó, además, un polvo mineral de aportación de tipo calizo para evitar el desgaste prematuro de la mezcla resultante. Los resultados obtenidos señalaron que las muestras fabricadas con basalto mostraban mejor comportamiento mecánico que las muestras elaboradas con caliza, por lo que recomiendan este tipo de árido para evitar la deformación plástica y la aparición de roderas en la superficie de la carretera, sobre todo en aquellas que soporten tráfico pesado. En esta misma línea, Abo-Qudais y Al-Shweily (2007) analizaron la influencia de las propiedades físicas y químicas de dos tipos de áridos (basalto y caliza) sobre la deformación y la pérdida de adhesión de las MBC y más recientemente, Behiry (2016) examinó el comportamiento (sensibilidad al agua, rigidez y deformación) de las mezclas MBC, dependiendo del tipo y granulometría del árido empleado. En ambos casos se comprobó que las mezclas fabricadas con áridos basálticos logran una mayor rigidez que las mezclas con áridos calizos y que, por el contrario, los áridos calizos ofrecen mejor comportamiento frente al agua y la humedad. A partir de estos resultados se sugiere que **en regiones áridas es mejor el empleo de áridos basálticos**. Además, se señala que **los áridos con una alta absorción podrían emplearse para mejorar la cohesión de las mezclas asfálticas** (Abo-Qudais y Al-Shweily, 2007). Estas dos circunstancias pueden ser aplicables a los áridos que se emplean en la construcción de carreteras en las Islas Canarias.

Por su parte, Manal y Mohamed (2013) evaluaron la influencia del tipo de árido (calizo, basáltico y dolomítico) y del tipo de granulometría empleados en las mezclas asfálticas calientes (MBC) sobre las propiedades de deformación de las mismas. Concluyeron que, comparativamente, las dolomitas ofrecen el mejor comportamiento ante la deformación, independientemente de su granulometría, mientras que las mezclas elaboradas con basalto ofrecen los valores de estabilidad más bajos y de deformación más altos, cuando se trata de granulometrías abiertas, es decir, granulometrías con poca proporción de áridos finos. **Una baja proporción de partículas pequeñas da lugar a un mayor contenido de huecos** en la mezcla por no poder rellenar precisamente los huecos que quedan entre las partículas más grandes. **Este aspecto será significativo de cara a preparar las dosificaciones de las mezclas que se van a analizar en capítulos posteriores.**

Hasta el momento hemos comprobado que el árido basáltico ofrece mejores resultados que los áridos calizos convencionales en ciertos aspectos. Sin embargo, algo que apuntan varios de estos autores es la posibilidad de combinar el árido basáltico con un polvo mineral calizo para reducir el consumo de ligante y mejorar su comportamiento mecánico (Akbulut *et al.*, 2011; Al-Khateeb *et al.*, 2013). El comportamiento de las MB va a depender de las propiedades individuales de cada uno de sus componentes y de la proporción en la que se utilicen (Suárez y Regueiro, 1994; COAAT, 2003). Por este motivo, diferentes trabajos han dedicado sus esfuerzos a estudiar la **influencia de las características de los áridos volcánicos y las proporciones en las que se emplean.**

Asi *et al.* (2009) analizaron la posibilidad de mejorar el asfalto local calcáreo mediante la sustitución parcial o total del árido calizo por árido basáltico. Para ello elaboraron diferentes mezclas en las que se llegó a sustituir la totalidad de la fracción gruesa y la fracción fina del árido. La mezcla óptima resultó ser la combinación de árido basáltico grueso con árido calizo fino. Esta mezcla mostró los mejores resultados en estabilidad Marshall, tracción indirecta, pérdida de

partículas, módulo de elasticidad, rigidez, deformación permanente y fatiga. [Cao et al. \(2013\)](#) realizaron un trabajo similar con mezclas de tipo *Stone Mastic Asphalt (SMA)*. No obstante, en su análisis confirmaron que las mezclas donde el basalto era tanto la fracción gruesa como la fracción fina del árido, ofrecen mejor resultado a la deformación permanente y al módulo de elasticidad dinámico. Sin embargo, son ligeramente inferiores ante la fisuración y la sensibilidad al agua, sin llegar a tener una diferencia significativa. En esta misma línea de investigación, [Iskender \(2013\)](#) analizó 4 combinaciones distintas de mezclas *SMA*, en las que el árido basáltico siempre fue el árido grueso mientras que la caliza se empleó como árido fino o polvo mineral. Comprobó que la incorporación del árido calizo reduce ligeramente (0.24%-0.41%) la resistencia a la deformación permanente de las *SMA*, siendo mejor opción la combinación que emplea sólo árido basáltico.

Todos estos trabajos estudiaron diferentes combinaciones de árido basáltico y calizo para evaluar su impacto sobre las propiedades de las mezclas asfálticas resultantes. Si bien es cierto, que dependiendo de la propiedad analizada es mejor una combinación u otra, podríamos concluir que, en líneas generales, **la combinación óptima es aquella donde el basalto sea el árido grueso o fino, por su capacidad resistente, y la caliza sea el polvo mineral, por su capacidad adherente.**

#### 2.2.1.2 Áridos volcánicos marginales

Los estudios previos analizados sólo hacen referencia al empleo de áridos basálticos. No obstante, dentro de los áridos volcánicos podemos encontrar materiales que, pese a que no se destinan a la construcción de pavimentos de carreteras o a su comercialización, podrían ser aprovechables para este uso. Estos áridos son los que en adelante consideraremos como marginales al suponerse como un residuo en las canteras de explotación (**cenizas, escorias, piroclastos y rocas vacuolares**). En la bibliografía especializada encontramos varios trabajos donde se demuestra que es posible aprovechar estos materiales **tanto para la fabricación de hormigones** ([Bogas y Gomes, 2015](#); [Szilagyi et al., 2016](#); [Tchamdjou et al., 2018](#)) **como para las mezclas asfálticas.**

[Faustino et al. \(2005\)](#) emplearon las cenizas volcánicas para la construcción de la capa superficial de un tramo experimental de carretera. La ceniza volcánica se incorporó como parte del árido fino en una mezcla tipo *hot rolled asphalt* y una mezcla de tipo AC (53% y 17.5% s/árido, respectivamente). Los resultados de laboratorio mostraron una alta resistencia a la deformación para ensayo de pista y confirmaron la posibilidad de emplear la técnica *hot rolled asphalt* como alternativa a las mezclas AC. De la misma manera, [Naji y Asi \(2008\)](#) analizaron muestras elaboradas con diferentes contenidos de ceniza volcánica como parte del árido (0, 10, 20 y 30%). Los resultados experimentales señalaron que, incluso con un 20% de ceniza, los resultados del ensayo Marshall eran aceptables. No obstante, el contenido óptimo se establece en torno al 10% sobre el peso del árido, ya que ofrece los mejores resultados en cuanto a pérdida de partículas, resistencia al deslizamiento, fatiga y módulo de elasticidad. Con la incorporación de cenizas volcánicas, también se encontró que se mejoraba la resistencia al deslizamiento de los pavimentos asfálticos.

[Okogbue y Aghamelu \(2013\)](#) y [Aghamelu y Okogbue \(2015\)](#) a través de sus estudios analizaron el potencial de los piroclastos para la construcción de carreteras en Nigeria. A pesar de que los

piroclastos cumplen parte de las especificaciones de carreteras (contenido de finos, absorción de agua, etc.), fallan en su resistencia (Los Ángeles, índice de lajas, impacto), por lo que su uso en la construcción de carreteras queda sujeto a una estricta supervisión y control.

En la mayoría de los casos de estudio analizados para las Islas Canarias, los áridos piroclásticos se emplean como rellenos o elementos aligerantes (Guigou, 1990; Lomoschitz *et al.*, 2006; Franesquí *et al.*, 2010) pero hasta ahora, no se ha evaluado su potencial para ser empleado en capas de pavimento. **Basándonos en la experiencia internacional, el aprovechamiento de los áridos volcánicos marginales para su uso en mezclas asfálticas para firmes será uno de los objetivos que se pretenden desarrollar en esta tesis.**

### 2.2.1.3 Caracterización de los áridos

Cuando hablamos de la caracterización de los materiales volcánicos, resulta complicado encontrar una caracterización rigurosa de los áridos volcánicos para su uso en hormigones o mezclas asfálticas (Delmelle *et al.*, 2005; Dong, Xiaoming y Yongli, 2012; Peide *et al.*, 2018). Generalmente, los estudios realizados se centran en el análisis geotécnico de zonas concretas (Davies y Chaplow, 1998; Apuani *et al.*, 2005; Moon *et al.*, 2005) o en intentar inferir los valores de alguna propiedad de los áridos a partir del análisis de la roca matriz (Ugur *et al.*, 2010; Krutilová y Přikryl, 2017), debido al coste y dificultad de ejecución de algunos ensayos. Por ejemplo: al tratar de definir **la calidad de un árido**, es habitual recurrir al análisis de su resistencia mediante los ensayos de Los Ángeles (LA) y Micro-Deval ( $M_{DE}$ ) (Török, 2015). Son ensayos destructivos, caros, que conllevan cierta cantidad de tiempo y sus muestras deber cumplir unas características específicas. Por estos motivos, **se han buscado maneras de estimar el valor de estos índices a través de ensayos indirectos** que resulten más rápidos y económicos como puede ser el esclerómetro, la resistividad eléctrica, la velocidad de las ondas, etc.

Kahraman y Gunaydin (2007) investigaron la posibilidad de deducir el valor del ensayo de Los Ángeles a partir de los resultados obtenidos en los ensayos del martillo Schmidt, carga puntual (*Point Load Test, PLT*) y de porosidad. Para ello analizaron nueve rocas ígneas, once metamórficas y quince sedimentarias cuyos índices de Los Ángeles variaban entre el 10 y el 76%. Los análisis mostraron una gran correlación entre los resultados del ensayo de Los Ángeles y los del ensayo PLT ( $R^2=0.72$ ) y una relación aceptable con los resultados del martillo Schmidt ( $R^2=0.62$ ). Además, se observó que las correlaciones mejoraban claramente al dividir las muestras atendiendo a la porosidad ( $n < 1\%$  y  $n > 1\%$ ). En estudios posteriores (Kahraman y Fener, 2008; Kahraman *et al.*, 2013), buscaron deducir el índice LA a partir del ensayo de resistividad eléctrica, densidad y porosidad; y en una segunda fase, a partir de la medida del nivel de ruido. En este caso se analizaron veintisiete tipos de rocas diferentes, agrupadas según la clase de roca y posteriormente, atendiendo a la porosidad y la densidad. Con este análisis se determinó un buen coeficiente de correlación entre la resistividad eléctrica- LA, y el nivel de ruido NL-LA, por lo que sugieren que es posible estimar el índice LA a partir de cualquiera de los dos ensayos anteriores. Igual que en los estudios previos, se observó que las correlaciones mejoraban significativamente si las rocas se agrupaban dependiendo de su porosidad. A nivel regional destaca la investigación de Hernández-Gutiérrez *et al.* (2008) donde estudiaron la correlación entre el índice de Los Ángeles de los áridos, la resistencia a compresión simple (UCS) y la densidad aparente ( $\rho_a$ ) de varios tipos de rocas volcánicas de las Islas Canarias. Establecieron que es posible estimar la UCS a partir de del índice de desgaste (LA) y la densidad aparente ( $\rho_a$ ).

Ante la escasa información específica de los áridos volcánicos de las Islas Canarias **será necesario realizar una caracterización exhaustiva de los mismos que permita conocer la idoneidad constructiva de los diferentes litotipos presentes en las islas.** A partir de esta caracterización se intentarán establecer correlaciones básicas entre los distintos parámetros que permitan deducir el comportamiento mecánico de los áridos a fin de reducir el número, la complejidad y el coste de los ensayos.

#### 2.2.1.4 Los materiales volcánicos de las Islas Canarias

En el archipiélago canario podemos encontrar materiales volcánicos procedentes de coladas de diferente naturaleza (composición basáltica, traquibasáltica, fonolítica o tefrítica), de depósitos piroclásticos, de brechas y conglomerados volcánicos, etc. (Alonso Blanco, 1989; Bryan *et al.*, 1998; Aparicio *et al.*, 2003). Ante la gran variedad de materiales disponibles, la caracterización geomecánica ha ido adquiriendo mayor atención gracias al trabajo realizado por Rodríguez-Losada *et al.*, (2007a y 2007b) al establecer la primera clasificación de las rocas volcánicas de las islas basada en la petrología y la textura de las rocas, aportando diferentes datos sobre sus propiedades geomecánicas. Tras estos trabajos preliminares, el Gobierno de Canarias (2011) editó la *Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias* (GETCAN-011), donde facilita una clasificación práctica para designar a las rocas, situarlas en una familia e identificar su caracterización ingenieril. Esta guía será la que nos servirá de base para el estudio de los áridos volcánicos para su uso en MB.

#### 2.2.2 ÁRIDOS POLIMÉRICOS

Los polímeros son materiales presentes en muchos aspectos de nuestro día a día: envases, utensilios, mobiliario, automoción, etc. (Fig. 2.2), pero su reciclado y reutilización supone uno de los grandes retos de nuestro tiempo. Una de las ventajas que ofrecen estos materiales es su elevado poder calorífico, por lo que a priori podría pensarse que la mejor forma de aprovecharlos sea mediante la valorización energética (CEDEX, 2013b). Sin embargo, uno de los sectores donde más se están empleando los polímeros reciclados es en el de la construcción para su uso en canalizaciones (Fig. 2.3). **Esto hace pensar que una posible aplicación para los polímeros reciclados sea su introducción en la fabricación de mezclas bituminosas para firmes.** Su incorporación permitiría revalorizar este material, conseguir ciertas mejoras sobre las MB, reducir la demanda de extracción de áridos y aliviar la presión sobre el uso del territorio.

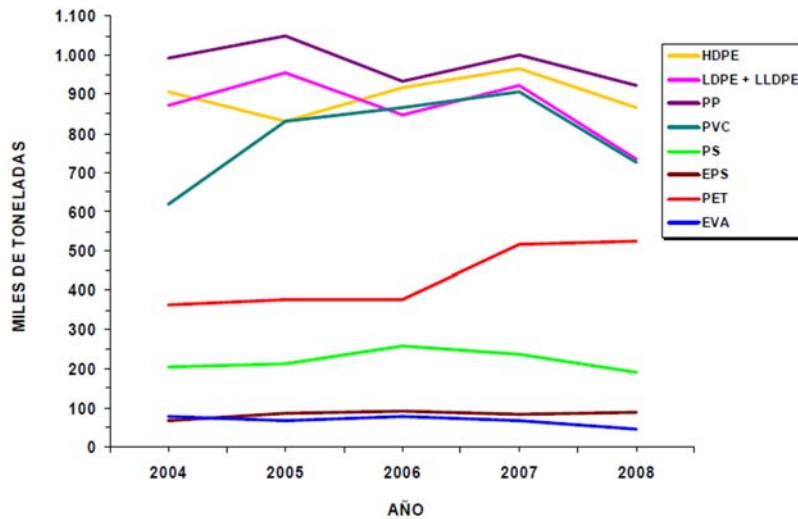


Figura 2.2 Consumo de plómeros plásticos en España por tipo. (CEDEX, 2013b)

A la hora de incorporar los plómeros reciclados a las mezclas asfálticas disponemos de dos alternativas posibles: a) introducirlos sustituyendo parcial o totalmente al árido de la mezcla (vía seca) o b) incorporarlos como modificadores del ligante (vía húmeda), es decir, introduciendo partículas que alteren las propiedades del betún. La decisión sobre qué método emplear va a estar sujeto a las características del plómero, las propiedades del ligante, las condiciones de mezclado y la compatibilidad entre materiales (Kalantar *et al.*, 2012). En este apartado consideraremos exclusivamente el método de la vía seca, puesto que nos referimos al empleo de los plómeros reciclados como partículas de áridos. Concretamente, hablaremos del uso de los materiales poliméricos termoplásticos, y más específicamente, del Polietileno Tereftalato (PET) presente en la mayoría de botellas plásticas. Los plómeros termoplásticos son uno de los residuos más accesibles y abundantes, pero tienen la ventaja de ser fácilmente reciclables. Pueden moldearse varias veces sin que sus propiedades sufran grandes alteraciones, hasta un máximo de 6-7 veces (CEDEX, 2013b).

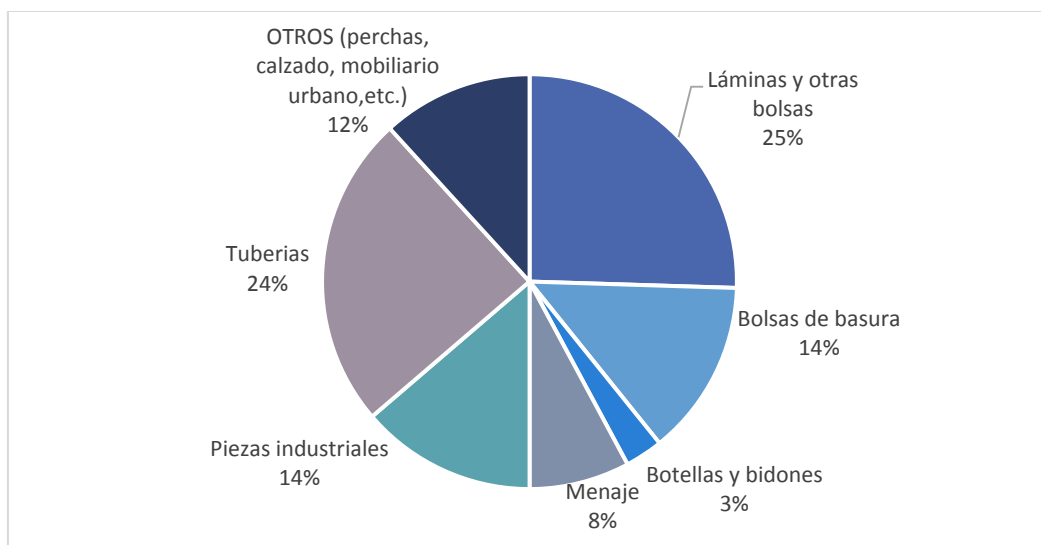


Figura 2.3 Principales aplicaciones de las materias plásticas recicladas en España (Cicloplast, 2011)



Muchos trabajos ya han explorado la posibilidad de **incorporar polímeros reciclados como áridos a las MB** (Zoorob y Suparma, 2000; Vasudevan *et al.*, 2012; Lastra-González *et al.*, 2016), pero nos centraremos en aquellos que analizan **el potencial del PET para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas** y revalorizarlo tras convertirse en residuo. Los estudios más conservadores determinan que el contenido óptimo de PET sea inferior a un 1% sobre el peso total de la mezcla (Ahmadinia *et al.*, 2011, 2012; Moghaddam *et al.*, 2013, 2014, 2015; Ahmad *et al.*, 2017) mientras que otros trabajos, muestran resultados algo más esperanzadores con contenidos de PET más altos (Hassani *et al.*, 2005; Sojobi *et al.*, 2016).

En 2005, Hassani *et al.* centraron su estudio en el análisis de la densidad y los parámetros Marshall (estabilidad, deformación y coeficiente Marshall) de MB elaboradas con PET. En su trabajo emplearon 5 contenidos de partículas PET de aproximadamente 3 mm para sustituir parte del árido grueso (2.36-4.75 mm). Los resultados obtenidos mostraron que al sustituir hasta un 20% del volumen de áridos se reduce un 2.8% la densidad de la mezcla, también se reduce la deformación, pero se mantienen la estabilidad y el coeficiente Marshall. Los resultados obtenidos permiten decir que este tipo de mezclas son aceptables para su uso en carreteras, puesto que cumplen con la mayoría de especificaciones técnicas.

Ahmadinia *et al.* (2011, 2012) analizaron el empleo de PET como aditivo en las mezclas SMA (*Stone Mastic Asphalt*). El contenido apropiado de este polímero lo estiman entre el 4-6% sobre el peso del ligante. Los resultados indicaron que la adición de este residuo polimérico tiene efectos positivos sobre el comportamiento de las mezclas resultantes: mejora la resistencia a deformación permanente (*Wheel Tracking Test, WTT*), la rigidez y la viscosidad, evitando el escurrimiento del ligante. Sin embargo, desciende la densidad de la mezcla, aumenta el contenido de huecos y aunque los valores del *ITSR* son aceptables, este índice desciende conforme se aumenta el contenido de PET. A diferencia de otros estudios, en este trabajo las partículas de PET se añadieron tras el mezclado del árido y el ligante.

Entre otros de los estudios realizados destaca la línea de trabajo llevada por Moghaddam *et al.* (2013, 2014, 2015) sobre la viabilidad de emplear plástico de botellas (PET) en los pavimentos asfálticos. A lo largo de su trabajo han incorporado diferentes contenidos de plástico PET (0-1% s/peso del árido) a las mezclas mediante la vía seca. Los resultados obtenidos muestran que al añadir PET, el comportamiento de la mezcla es distinto bajo condiciones de carga estática o dinámica. Aunque no se puede considerar adecuado su uso en condiciones de carga estática (al incrementar el contenido de plástico de la mezcla se aumenta la estabilidad pero también la deformación), los resultados muestran que en condiciones dinámicas su empleo mejora la resistencia a la deformación permanente. Ziari *et al.* (2016), confirman parte de estos resultados al evaluar los efectos del PET sobre el ensayo de rodadura (*WTT*) y el ensayo dinámico de fluencia. En su trabajo emplearon entre un 0.25% y un 1% de partículas PET (s/ peso del árido) de diferentes tamaños (10 x 2.5, 20 x 2.5, y 30 x 2.5 mm). Al aumentar el contenido de PET aumenta la resistencia a la rodadura pero a mayor tamaño peor comportamiento.

Otras consecuencias observadas sobre la incorporación de PET en las mezclas es que se reduce la rigidez de la mezcla, se aumenta la resistencia a la fatiga y comparativamente, desde el punto de vista económico, se logra reducir la cantidad de ligante necesaria para la construcción de un tramo de carretera, puesto que el contenido óptimo de betún en este tipo de mezclas es menor (Moghaddam *et al.*, 2013). En esta última línea, Modarres y Hamedi (2014), también constataron que la introducción de entre un 2- 10% de PET (s/betún) en la mezcla mejora la resistencia a fatiga y reduce la rigidez. Conforme aumenta este porcentaje se reduce la rigidez de la mezcla,

sin embargo, la rigidez aumenta hasta cierto punto si se trata de cantidades reducidas. En cualquier caso, se considera que los valores obtenidos son aceptables y que garantizan una deformación adecuada del pavimento.

Recientemente, [Sojobi et al. \(2016\)](#) compararon los efectos producidos en dos mezclas (*Bituminous Asphaltic Concrete, BAC*) al introducir PET bien como cobertura del árido (*Polymer Coated Aggregate, PCA*) o bien como un aditivo del ligante (*Polymer Modified Bitumen, PMB*). Las mezclas *PCA-BAC* tienen entre un 10-30% de PET sobre el peso total del árido mientras que en las mezclas *PMB-BAC*, el porcentaje varía entre el 5, 10 y el 20% sobre el contenido óptimo de betún. **Tras los resultados se observa que la mezcla *PCA-BAC* permite introducir satisfactoriamente un mayor porcentaje de plástico a la mezcla que las mezclas *PMB-BAC*** (16.7% sobre el total del árido+ polvo mineral, frente a un 9% sobre el contenido óptimo de betún). En ambos casos se constata un incremento en el contenido de huecos de la mezcla, en el contenido de huecos del árido y en la estabilidad Marshall.

De los trabajos anteriores se deduce que:

- el PET es un polímero que puede emplearse como árido en las mezclas bituminosas en caliente (MBC).
- Al incorporar el PET por vía seca se obtienen MB menos densas, más resistentes frente a la deformación permanente y la fatiga, pero con una menor rigidez y un mayor contenido de huecos por lo que su resistencia a la acción del agua se reduce.
- Sin embargo, como se ha podido observar, todos estos resultados están condicionados por el contenido, el tamaño, y la forma de incorporación del PET a la mezcla.

Por tanto, **uno de los objetivos que se plantean en este trabajo es seguir investigando la mejor manera de introducir el PET en las MB con áridos volcánicos, para lograr pavimentos de carreteras de iguales o mejores prestaciones.**

### 2.2.3 ÁRIDOS RECICLADOS

Entendemos como a áridos reciclados, los áridos empleados previamente en la construcción que, mediante algún tipo de tratamiento, son susceptibles de volver a ser utilizados, generalmente también en la construcción. En función de su origen (hormigón estructural, firmes, cerámicos o mixtos), las propiedades físicas y químicas de estos áridos serán diferentes, por lo que sus características van a depender de los siguientes factores ([CEDEX, 2014](#)):

- Las características de los materiales de los que proceden.
- Las características de los equipos de machaqueo utilizados en su producción.
- La naturaleza de los cribados que se hayan realizado.
- Los procedimientos empleados para eliminar impurezas.

Cada vez es más frecuente **el empleo de árido reciclado en el sector de la construcción**, pero su reutilización dependerá en gran medida de la composición del material recuperado. Los niveles de exigencia con respecto a las propiedades del árido reciclado son distintos para cada una de sus aplicaciones. De esta forma, vemos que mientras en explanaciones de carreteras se puede usar cualquier tipo de residuo de construcción, en la fabricación de hormigones solo se admiten residuos de hormigón y cerámicos ([CEDEX, 2014](#)). En cuanto a los firmes de carretera, la

incorporación de áridos reciclados podrá hacerse siempre que se cumplan las condiciones técnicas y medioambientales exigidas. Particularmente, las especificaciones que hacen referencia a la utilización de áridos reciclados en pavimentos asfálticos se encuentran recogidos en la siguiente normativa:

- UNE-EN 13043:2003/AC: 2004, Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4).

**El reciclado de las capas bituminosas es una práctica común en las labores de mantenimiento y conservación de carreteras.** A priori, parece evidente que el material procedente del fresado de firmes (*Reclaimed Asphalt Pavement, RAP*) sea el más adecuado para su reutilización en pavimentos asfálticos dado que reutiliza los materiales propios de una mezcla bituminosa. Esta opción tiene diferentes ventajas: permite incorporar hasta el 100% del árido reciclado, posibilita el reciclado del ligante y se obtienen mezclas con características similares a las de las mezclas convencionales. En consecuencia, su aplicación ha ido adquiriendo gran importancia dado los beneficios económicos y medioambientales que supone: menores consumos, menores vertidos, menores costes de transporte, etc. (Pereira, Oliveira y Picado- Santos, 2004; Widayatmoko, 2008; Celauro *et al.*, 2010; Valdés *et al.*, 2011).

Otra posibilidad a la hora de **incorporar áridos reciclados en las MB son los áridos procedentes de residuos de la construcción y demolición**, generalmente de hormigón (*recycled construction aggregates, RCA*). Esta alternativa ha ido adquiriendo mayor interés científico al ser áridos que inicialmente estaban destinados a otro fin y, por tanto, han estado sometidos a otras exigencias.

Pérez *et al.* (2012), Pasandín y Pérez (2013 y 2014) , han analizado el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente (MBC) elaboradas con áridos reciclados procedentes del hormigón. A pesar de que estos áridos muestran peores resultados en cuanto a su resistencia a la fragmentación (Los Ángeles), su combinación con áridos naturales dan lugar a un árido aceptable. En sus trabajos han remplazado hasta un 30% de los áridos naturales con estos residuos de las fracciones 4/8 mm y 8/16 mm, obteniendo resultados satisfactorios de las MBC respecto a la deformación, fatiga y rigidez. Sin embargo, el aspecto más crítico que presentan estas mezclas es la resistencia a los efectos del agua (Paranavithana y Mohajerani, 2006; Mills-Beale y You, 2010; Pérez *et al.*, 2012). Esto es debido al mortero que queda adherido a la superficie del árido que lo hace más poroso y menos denso, a las microfisuras que aparecen durante el machaqueo y a la débil unión que existe entre el mortero y el árido (Sánchez y Alaejos, 2009; Cheng-Hsiao *et al.*, 2012).

Finalmente, nos queda hablar de la **incorporación de áridos reciclados cerámicos** (residuos de tejas, ladrillos, azulejos, etc.) **en MB**. Este tipo de materiales ya se emplea en la fabricación de hormigones y como materiales granulares para bases y rellenos de carreteras. Sin embargo, su uso en pavimentos de carreteras no es tan común debido a que los áridos cerámicos suelen presentar baja densidad, alta porosidad y absorción de agua, además de un alto coeficiente de desgaste Los Ángeles (Proyecto GEAR, 2008-2011; Silvestre *et al.*, 2013). La mayoría de los estudios que emplean estos materiales se centran en su uso como polvo mineral o árido fino, pero en muy pocos se contempla su uso como árido grueso.

Krüger y Solas (2008) investigaron la reutilización de residuos procedentes de cerámica sanitaria, caracterizados por su blancura y dureza. El uso de este tipo de áridos evitó el calentamiento de la superficie del pavimento, así como la deformación y pérdida de estabilidad asociadas, debido a la capacidad del árido para reflejar la luz. Van de Ven *et al.* (2011) estudiaron la incorporación de áridos cerámicos obtenidos a partir de la trituración de aisladores eléctricos cerámicos. Para ello, se sustituyó hasta el 15% de los áridos naturales por áridos reciclados, obteniéndose MB con buenas propiedades mecánicas en el ensayo de estabilidad, tracción indirecta y sensibilidad al agua. Silvestre *et al.* (2013) evaluaron la posibilidad de utilización de áridos cerámicos, de tipo gres y porcelánico, procedentes de la industria azulejera en las MB. La incorporación de estos áridos permitió sustituir hasta un 30% del árido natural en condiciones de buen funcionamiento superficial y mecánico dependiendo de las características específicas del residuo, de la capa de firme y del tipo de mezcla bituminosa a diseñar. Feng *et al.* (2013) analizaron el comportamiento mecánico y la conductividad térmica de mezclas asfálticas con distintos porcentajes de residuo cerámico triturado procedente de la industria sanitaria. En su estudio concluyeron que las MBC con hasta un 40% de áridos cerámicos reciclados podían presentar las características adecuadas para funcionar como capas de rodadura.

En resumen, podría decirse **que los áridos reciclados procedentes de los residuos de construcción constituyen una buena alternativa a la hora de reutilizarse en MB, siendo los áridos procedentes del fresado de carreteras los más adecuados** para ello. El empleo de áridos reciclados va a depender de la naturaleza de los mismos puesto que, como se ha podido constatar, a pesar de que estos áridos cumplen satisfactoriamente las especificaciones de carreteras, no todos ofrecen las mismas garantías de calidad. El aspecto más crítico es el referente a la sensibilidad al agua al ser áridos más porosos y que pueden presentar microfisuras por la exposición previa a las cargas de tráfico.

### 2.3 MEZCLAS BITUMINOSAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS

---

Hasta el momento nos hemos centrado en **el uso de polímeros** como sustituto de parte del árido, pero, como ya hemos comentado previamente, existe otra línea de investigación que contempla la incorporación de estos materiales **como modificadores del ligante**. A pesar de su fácil disponibilidad y la abundancia de estos recursos no todos los polímeros son válidos para su uso como modificadores de los ligantes (Casey *et al.*, 2008). Existen diferentes tipos de polímeros reciclados que pueden emplearse en las mezclas bituminosas: polipropileno (PP) usado en mobiliario, envases, utensilios de usar y tirar; polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad (HDPE y LDPE) presente en botellas plásticas y envases; polietileno tereftalato (PET) también presente en las botellas plásticas; policloruro de vinilo (PVC) utilizado en tuberías, acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) usado en carcasas y dispositivos electrónicos y caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU). En la tabla siguiente (Tabla 2.1) se establece una clasificación de los polímeros más habituales que se emplean como modificadores del ligante.

Tabla 2.1 Clasificación de los polímeros empleados como modificadores del betún (Becker et al., 2001)

Tipo de polímero	Polímero
Termoplásticos	LDPE, HDPE, PP, PVC, etil-vinil-acetato (EVA), EMA, PS, PET
Cauchos sintéticos y naturales	Caucho estireno-butadieno (SBR) Polibutadieno Poliisopropeno Caucho butilo Policloropreno (neopreno) Caucho de NFU
Elastómeros termoplásticos	Estireno-butadieno-estireno (SBS) Estireno-isopreno-estireno (SIS) Etileno Propileno Dieno tipo M (EDPM)
Termoestables	Resinas Epoxi
Sistemas mixtos	-

### 2.3.1 MEZCLAS BITUMINOSAS CON TERMOPLÁSTICOS

Diferentes estudios ya han demostrado que el uso de polímeros reciclados logra mejorar las propiedades de las mezclas, casi al mismo nivel que el uso de polímeros vírgenes, consiguiendo reducir la contaminación ambiental, el consumo de polímeros vírgenes y mejorando el comportamiento de los asfaltos (Kalantar et al., 2012).

Pérez-Lepe et al. (2003) analizaron la influencia de las condiciones de mezclado de los polímeros, sobre el comportamiento reológico del ligante modificado. Para ello, analizaron diferentes ligantes elaborados con HDPE, LDPE, EPDM y SBS. De su estudio se concluye que el método empleado y el tipo de polímero afectan al comportamiento del ligante. Las mezclas elaboradas con HDPE mostraron mejores resultados que el resto.

Hinisliglu y Agar (2004) y Casey et al. (2008) evaluaron el proceso de fabricación de los betunes modificados mediante diferentes contenidos de HDPE reciclado, tiempos, temperaturas y equipos de mezclado. En ambos estudios observaron que las MB fabricadas con HDPE mostraban mayor estabilidad, resistencia a la deformación permanente y a la fatiga que las mezclas convencionales. Además, el contenido óptimo de HDPE se estableció en un 4% en los dos trabajos. Siguiendo esta línea, Awwad y Shbeeb (2007) analizaron el comportamiento de las mezclas bituminosas modificadas con diferentes contenidos de HDPE y LDPE (6-18% s/betún). Los resultados mostraron un mayor contenido de huecos en el árido y una mayor estabilidad de la mezcla, lo que se traduce en una mejor resistencia a la deformación permanente. Coincidiendo con los trabajos previos, en este estudio se concluye que la incorporación del

polietileno proporciona mayor resistencia a la deformación, a la fatiga y una mejor adhesividad entre el árido y el ligante.

Por su parte, [Polacco et al. \(2005\)](#) y [González et al. \(2006\)](#) analizaron el comportamiento de los ligantes modificados con distintos polímeros basados en el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE). Los resultados obtenidos en ambos estudios concluyen que los ligantes con LDPE muestran mejor estabilidad que los que emplean HDPE. [Al-Hadidy y Yi-qiu \(2009\)](#) investigaron el efecto del polietileno de baja densidad (LDPE) en los pavimentos flexibles. Sus resultados mostraron que los ligantes modificados con LDPE tienen un mayor punto de reblandecimiento, lo que se traduce en una mayor resistencia a la deformación de la mezcla y mayor durabilidad del ligante.

A diferencia del resto de trabajos, [Rahman et al. \(2013\)](#) estudiaron la posibilidad de incluir PVC reciclado en las mezclas bituminosas comparando su comportamiento con el de mezclas elaboradas con polietileno. En base a los resultados de densidad, deformación y contenido de huecos de las mezclas, se concluye que es posible incluir hasta un 7.5% de PVC sobre el peso del betún.

Como podemos observar, las posibilidades que ofrecen los polímeros reciclados son infinitas, pero a modo de resumen, en la [Tabla 2.2](#) se presentan las principales ventajas e inconvenientes de los polímeros más habituales en la modificación de ligantes.

Tabla 2.2 Características de los polímeros más usados para modificar los betunes ([Becker et al., 2001](#))

Polímero	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones
Polietileno (PE)	Resistencia a altas temperaturas. Resistencia al envejecimiento. Alto módulo de elasticidad. Bajo coste.	Difícil de dispersar en el betún. Problemas de inestabilidad. Sin recuperación elástica. Se requiere altos contenidos de polímero para lograr mejores propiedades.	Uso industrial Pocas aplicaciones en carretera
Polipropileno (PP)	Aumento no significativo de la viscosidad aunque se empleen altas cantidades de polímero (facilidad de manejo y extendido). Baja penetración. Amplia el rango de plasticidad y mejora la	Problemas de disgregación. No hay mejoras en la elasticidad o en las propiedades mecánicas. Baja resistencia térmica a la fisuración por fatiga.	El PP isotáctico no tiene aplicación comercial. El PP atáctico se emplea en cubiertas de tejados.

Polímero	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones
	resistencia de carga del ligante.		
PVC	Baja fisuración. Fácil disposición de PVC.	Actúa principalmente como polvo mineral	Sin aplicación comercial
Copolímero de bloque (estireno-butadieno-estireno) (SBS)	Mayor flexibilidad del ligante a bajas temperaturas. Mejor fluidez y resistencia a deformación a altas temperaturas. Fuerza y buena elasticidad. Aumenta la resistencia a la deformación permanente.	Alto coste. Baja resistencia a la penetración. Mayor viscosidad a las temperaturas de extendido. Menor resistencia al calor y a la oxidación que las poliolefinas (debido a la presencia de dobles enlaces en la cadena principal).	Pavimentos y cubiertas de tejados. En la modificación de betunes asfálticos producidos en central.
Copolímero de bloque (estireno-isopreno-estireno) (SIS)	Mayor resistencia al envejecimiento del betún. Mejor adhesividad del árido. Buena estabilidad durante el mezclado cuando se usan bajas proporciones.	Los ligantes adecuados para mezclar con SIS necesitan un bajo contenido de asfaltenos.	

### 2.3.2 MEZCLAS BITUMINOSAS CON ELASTÓMEROS

A pesar de la existencia de diferentes elastómeros (polibutadieno, poliuretano, neopreno, etc.), cuando nos referimos al usos de elastómeros reciclados en las MB, principalmente hablamos del polvo de caucho procedente de los neumáticos fuera de uso (*End-of-life-tyres, ELT*). En los últimos años, el aprovechamiento del caucho (NFU) para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente ha cobrado gran importancia debido a que su incorporación conlleva ciertas mejoras sobre el comportamiento del pavimento, resulta más económico que otras adiciones y permite reducir el depósito de este residuo. En la Fig. 2.4 se muestran los usos a los que se destina el granulado de caucho NFU, observándose que, pese a las ventajas que ofrece (Tabla 2.3), tan solo el 1,6% se aprovecha mezclas bituminosas.

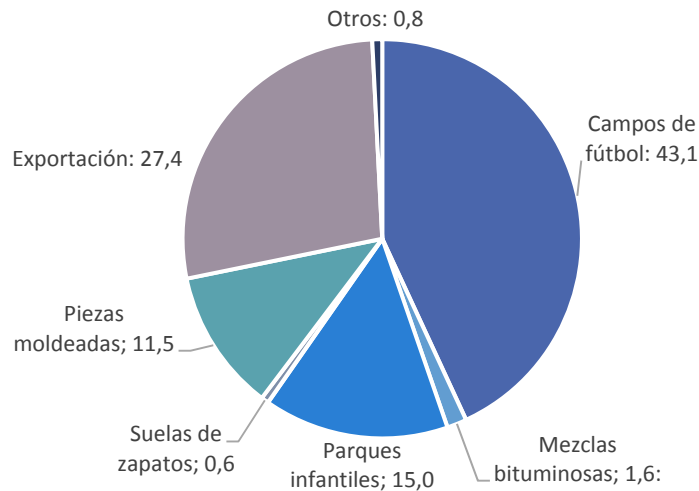


Figura 2.4 Destino del granulado de caucho (NFU). (SIGNUS, 2017)

Entre las mejoras que aporta su incorporación a las mezclas MBC encontramos: mayor poder aglomerante, tenacidad, recuperación elástica y resistencia al envejecimiento del ligante, menor susceptibilidad térmica y exudación, mejores propiedades mecánicas de las MB, reducción del ruido de rodadura, mayor durabilidad y menor consumo de betún cuando trabajamos con áridos porosos (CEDEX, 2007).

Al igual que el resto de polímeros, el polvo de caucho de NFU puede introducirse en las MB tanto por vía seca como por vía húmeda. A pesar de la existencia de estudios que analizan su comportamiento por vía seca (Selim *et al.*, 2005; Moreno *et al.*, 2013; Hamad *et al.*, 2014; Al Qadi *et al.*, 2016; Setyawan *et al.*, 2017) y que evidencian que el uso de partículas finas de polvo de caucho de NFU permite reducir el contenido óptimo de betún (4,72% frente a un 5.5%), reducir el contenido de huecos de las MB y aumentar su estabilidad (Hamad *et al.*, 2014; Al Qadi *et al.*, 2016; Setyawan *et al.*, 2017), las mezclas que usan betunes modificados con caucho ofrecen mejores resultados (CEDEX, 2007). Sin embargo, es un proceso más caro que requiere **el premezclado del betún con el polvo de caucho para lograr una correcta integración de ambos componentes y que evita la absorción del betún por parte del árido** (Al-Fraihat y Abu-Mahfouz, 2017).

En España, destaca la línea de trabajo iniciada por Gallego (1999) centrada en el estudio de las características del caucho, las condiciones de fabricación de las mezclas y su puesta en obra. Su trabajo aborda el proceso de digestión del caucho determinando que, aunque se incluya por vía seca, el caucho no es un material inerte sino que debido a las temperaturas de trabajo (más de 120 °C) interacciona con el ligante. Basándose en el concepto de digestión del caucho, recientemente Chavez *et al.* (2019) trabajaron en el desarrollo de un procedimiento intermedio entre la vía seca y la vía húmeda, consistente en el empleo del polvo de caucho pre-tratado para reducir el tiempo de digestión del caucho por vía seca y que no implicaría excesivos sobrecostes en el proceso de fabricación de las mezclas de la vía húmeda.



Tabla 2.3 Características del uso del caucho para modificar los betunes (Becker et al., 2001)

Polímero	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones
Caucho natural	<p>Mejor Resistencia a la deformación permanente</p> <p>Mayor ductilidad</p> <p>Mayor elasticidad y mejores propiedades ante procesos de carga cíclicos.</p>	<p>Sensible a la descomposición y a la absorción de oxígeno.</p> <p>Alto peso molecular (baja compatibilidad). Por tanto, debe descomponerse parcialmente y homogeneizarse mecánicamente.</p>	Pavimentos
Caucho recuperado de neumáticos fuera de uso	<p>Disponibilidad del caucho</p> <p>Material de bajo coste</p> <p>Mejora de la resistencia a fatiga</p> <p>Reduce la fisuración por reflexión.</p> <p>Mayor durabilidad usando capas más finas.</p> <p>Mayor resistencia a la deformación permanente.</p>	<p>Menor resistencia mecánica si se usa como extensor.</p> <p>Uso de productos propios.</p> <p>Necesita altas temperaturas y largos periodos de digestión en el betún. Si no desvulcaniza parcialmente, produce ligantes heterogéneos con el caucho actuando como un polvo mineral flexible.</p>	Pavimentos

En este apartado nos centraremos en el empleo del caucho como modificador de las propiedades del ligante. Dependiendo de la proporción de material incorporado, hablaremos de: betunes mejorados con caucho (BC) (8-12% s/peso del betún), betunes modificados con caucho (BMC) (12-15% s/peso del betún) y betunes modificados de alta viscosidad con caucho (BMAVC) (15-22% s/peso del betún) (CEDEX, 2007).

El primer intento de modificar el ligante mediante la adición de caucho data de 1898, cuando Guedmberg patentó su proceso de fabricación de un asfalto modificado con caucho (Mahrez, 1999). Sin embargo, no es hasta la década de los 50 cuando empiezan a documentarse casos donde en lugar de un material virgen, se emplea el polvo de neumático reciclado para la modificación del ligante (Hanson et al., 1994). Algunos trabajos destacados señalan que a la hora de incorporar este residuo al ligante, lo más importante a tener en cuenta es el tamaño y la proporción de partículas (Abdelrahman y Carpenter, 1999; Liu et al., 2009; Shen et al., 2009), puesto que esto afectará a la reología y al comportamiento del betún. Comparativamente, las partículas más finas van a producir un mayor efecto sobre las propiedades viscoelásticas del betún debido a su mayor capacidad de absorción (Shen et al., 2009; Abdelrahman y Carpenter, 1999).

Respecto a las propiedades mecánicas de las mezclas MBC, la incorporación de NFU aumenta los valores de estabilidad y del coeficiente Marshall (Samsuri, 1997; Wulandari y Tjandra, 2017). Las mezclas que incorporan polvo de caucho duplican la estabilidad y casi triplican el valor del

coeficiente Marshall con respecto a las mezclas no modificadas. El aumento va a estar condicionado por el tipo de caucho empleado y la forma de incorporarlo al betún (Samsuri, 1997). Gibreil y Feng (2017) analizaron los efectos sobre las propiedades Marshall, sensibilidad al agua y la deformación permanente tras la incorporación de NFU y HDPE por vía húmeda a las mezclas MBC. Se observó que los valores Marshall (estabilidad y coeficiente) aumentaron alrededor del 32.92% y el 57.84%, respectivamente. La resistencia a la humedad y a la deformación permanente también aumentó significativamente. Pérez y Pasandín (2017) centraron su estudio en el análisis de las propiedades volumétricas y de sensibilidad al agua (ITSR) de mezclas elaboradas con áridos reciclados y BC35/50. Los resultados mostraron que la introducción del BC35/50 no supone ninguna mejora con respecto a un betún convencional 35/50 en cuanto a la sensibilidad al agua.

La formación de rodera en los pavimentos flexibles se divide en dos fases: la consolidación de la rodera debido a la disminución del contenido de huecos por la deformación de la capa superficial y la deformación permanente de la base o sub-base. Esta deformación va a depender de las propiedades de la mezcla bituminosa empleada (Harvey *et al.*, 2001). En 2013, Moreno *et al.* analizaron la deformación permanente de mezclas elaboradas con distintas proporciones de caucho de NFU tanto por vía seca (0.5-1.5% sobre el peso de la mezcla) como por vía húmeda (8 y 20% sobre el peso del betún) y de mezclas elaboradas con un betún de altas prestaciones modificado con polímeros para intentar reducir la profundidad de la rodera. Los resultados mostraron que la incorporación del caucho de NFU (1.5% por vía seca y 20% por vía húmeda) mejora la resistencia a la deformación permanente, incluso superando en algunos casos a las muestras elaboradas con el betún modificado con polímeros. Las mezclas elaboradas con betunes modificados con caucho de NFU o SBR ofrecen mayor rigidez a 60°C, menor profundidad de rodera y mayor resistencia a la cizalladura giratoria que las mezclas convencionales (Shin *et al.*, 1996).

Desde entonces son muchos los autores que trabajan para incorporar este residuo a las mezclas asfálticas y evidenciar las mejoras que introducen a dichas mezclas. **Los beneficios que aporta la incorporación de polvo de neumático por la vía húmeda a las propiedades de las mezclas son: mejor adhesividad, mayor estabilidad térmica, mayor durabilidad, mayor resistencia a la fatiga y mejor resistencia a la deformación** (Charania *et al.*, 1991; Maupin, 1996; Brown *et al.*, 1997; Pasandín y Pérez, 2017). Por el contrario, uno de los **inconvenientes que presenta esta técnica es la pérdida de resistencia al agua cuando se emplea con áridos procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) o áridos marginales, ya que al aumentar la viscosidad del ligante se empeora la cobertura total de los áridos y al reducir el contenido óptimo de ligante, se produce un aumento en el contenido de huecos de las mezclas** (Pérez y Pasandín, 2017).

## 2.4 MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES

---

Una de las mayores preocupaciones en el sector de la construcción de carreteras **es la reducción de las temperaturas de fabricación del asfalto**, ya que esto lleva aparejado un descenso en el consumo de combustibles y la reducción de emisiones contaminantes. Para que una mezcla pueda denominarse semicaliente (MBSC) debe existir una reducción de la temperatura de fabricación en planta de, al menos, 50 °F (28 °C) con respecto a la misma mezcla MBC (Bonaquist, 2011; Epps *et al.*, 2011; Sterling, 2012). Actualmente, existen tres métodos para producir mezclas tipo MBSC: a) modificando el ligante con aditivos orgánicos, b) modificando el ligante con aditivos químicos o c) mediante la espumación del ligante.

En general, la incorporación de aditivos no tiene efectos negativos sobre el comportamiento mecánico de las mezclas sino que, por el contrario, mejora la viscosidad del ligante reduciendo la temperatura de mezclado y compactación. Los aditivos orgánicos tipo cera (*Sasobit*®, *RH*®, *Aspha-min*®, *Asphaltan A*®, *Asphaltan B*®, *Licomont SB 100*®, etc.) mejoran la fluidez del ligante pero hacen que la mezcla asfáltica sea más susceptible a la aparición de fisuras en condiciones de baja temperatura (Edwards y Redelius, 2003). Por su parte, los aditivos químicos (*Cecabase*®, *RTEvotherm*®, *HyperTherm*®, *Rediset WMX*®, *QualiTherm*® y *SonneWarmix*®) son productos comerciales compuestos por agentes surfactantes *anti-stripping*, que permiten reducir la temperatura de fabricación de las mezclas MBC entre 15-30 °C (Rondón-Quintana *et al.*, 2015). Estos aditivos reducen la viscosidad del betún, disminuyendo las temperaturas de mezclado y compactación cuando se añade entre 1.5 y un 3% sobre el peso del betún (Chowdhury y Button, 2008; Jones *et al.*, 2010; Zaumanis y Haritonovs, 2010; Xiao *et al.*, 2012). Algunas de las ventajas que ofrece su incorporación a mezclas MBSC son que la resistencia a deformación permanente o dinámica de este tipo de mezclas es similar a las de una mezcla MBC (Ouni *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2017; Syed *et al.*, 2018) y la resistencia a la acción del agua mejora debido a la presencia de polímeros en su composición (Rondón-Quintana *et al.*, 2017). Además, en el caso del RTEvotherm®, se logra disminuir un 5.8% el consumo de betún, un 13% el consumo de combustible y se alcanza una visible reducción de las emisiones de gases contaminantes (Yang *et al.*, 2017). El único inconveniente detectado en este tipo de aditivos es que los fabricantes no siempre ofrecen toda la información sobre su composición y características (Bonaquist, 2011; Sterling, 2012).

Ciertos aditivos, especialmente los que contienen ceras, pueden producir un aumento en la rigidez y en la resistencia a la rodadura de las mezclas tras la cristalización del betún (Sánchez *et al.*, 2011). Por tanto, a la hora de elegir los aditivos se recomienda tener en cuenta tanto la rigidización de la mezcla como la reducción de la resistencia a fatiga a media o baja temperatura (Rondón-Quintana *et al.*, 2015).

Dependiendo de la tecnología empleada para la fabricación por vía húmeda de las mezclas con caucho podemos encontrar distintas denominaciones: *Crumb Rubber Modified Binder (CRMB)*, *Asphalt Rubber (AR)*, *Terminal Blends (TB)*, etc. (Lo Presti, 2013). Concretamente las mezclas con CRMB son aquellas que emplean un betún modificado con polvo de caucho (*Crumb Rubber, CR*), mientras que las AR se refieren a mezclas tipo *asphalt concrete (AC)* con, al menos, un 15% de polvo de caucho y ciertos aditivos. Las TB por su parte, aglutinan a mezclas obtenidas a partir de betunes modificados con polvo de caucho cuya digestión se realiza directamente en una refinera en lugar de en plantas de asfalto.

La incorporación del caucho permite tanto reducir el volumen de residuos generados por los neumáticos fuera de uso como mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas resultantes. Esto se traduce en menores costes de mantenimiento y una mayor durabilidad de las carreteras (Lo Presti, 2013; Shu y Huang, 2014). Sin embargo, las mezclas elaboradas con polvo de caucho presentan una serie de inconvenientes: a) la durabilidad está ligada a un diseño, producción y construcción adecuados; b) no son adecuadas como MBC de alta densidad, ya que el reducido contenido de huecos de estas mezclas no permite acomodar correctamente las partículas de caucho en la mezcla y por tanto, la mejora de su comportamiento no compensa el coste de producción de la MB c) alto consumo energético debido a su temperatura de fabricación 180-210 °C, d) emisión de gases contaminantes y olores durante su fabricación, e) condiciones de almacenamiento inestables, f) difícil trabajabilidad debido a su alta viscosidad y g) alto coste inicial (Lo Presti, 2013). Todas estas dificultades están directamente relacionadas con el proceso de digestión y degradación del CR en el ligante durante la fabricación de las mezclas asfálticas (Wang *et al.*, 2017). Es por ello que sea habitual el empleo de aditivos que mejoren las condiciones de fabricación y características de los ligantes modificados con caucho y, por ende, de las mezclas asfálticas resultantes.

Recientemente podemos encontrar varios trabajos relacionados con el uso de aditivos para reducir las temperaturas de trabajo de las mezclas elaboradas con polvo de neumático sin comprometer sus características físicas y mecánicas (Cao y Liu, 2013; Ma *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2017). Algunos de estos trabajos evalúan la posibilidad de emplear áridos menos convencionales que combinados con el polvo de neumático y que los aditivos ofrezcan mezclas asfálticas con características similares o superiores a las MBC (Behroozikhah *et al.*, 2017; Lastra-González *et al.*, 2017; Saberi *et al.*, 2017). Independientemente de la fuente del árido, la incorporación de aditivos hace que el porcentaje de huecos rellenos de la mezcla aumente (VFB) y el contenido de huecos en el árido mineral (VMA) disminuya. Esto sugiere que **la incorporación de aditivos aumenta la densidad o el grado de compactación de las mezclas elaboradas con CR y, por consiguiente, se reduce el contenido óptimo de betún** (Akisetty, 2008; Topal *et al.*, 2017).

Ante el inconveniente medioambiental que se prevé (mayores consumos energéticos y emisiones contaminantes) durante el desarrollo de las mezclas con betunes modificados con caucho que se analizarán en este trabajo de tesis, **será necesario analizar la posibilidad de reducir las temperaturas de fabricación de dichas mezclas mediante algún tipo de aditivo y que lo que se busca es que tanto el proceso como el producto sean lo más ecológico y sostenible posibles.**

## 2.5 IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

---

En este apartado explicaremos brevemente las ventajas e inconvenientes del empleo de algunos de los materiales y técnicas anteriormente descritos desde el punto de vista de la sostenibilidad ya que, como objetivo global de esta tesis, se busca que el desarrollo de las MB con residuos sea realmente una alternativa eficiente en términos medioambientales.

El desarrollo de infraestructuras de carreteras tiene un gran impacto ecológico debido principalmente a la ocupación del territorio y al enorme consumo de recursos que implican su construcción y mantenimiento. El impacto que supone debe tenerse en cuenta desde la fase de

diseño hasta el final de su vida útil. Por eso, se deben considerar aspectos tales como: el uso de materiales reciclados, el ahorro en el consumo de ligantes, técnicas de fabricación que permitan reducir los consumos energéticos y emisiones o la reducción de las distancias de transporte de materiales.

En España, se estima que la producción anual de residuos procedentes del fresado de firmes se sitúa en torno a los 62.50 kg/hab. (2.5 Mt al año), de lo que tan sólo se recicla cerca del 10% en la reparación de carreteras o en la construcción de nuevas obras viales. El otro 90% se recicla en otro tipo de aplicaciones, o bien se deposita en vertederos (Peña y Almazán, 2007). Teniendo en cuenta que si estos áridos no se reciclan o se buscan fuentes alternativas, estas cantidades deberán volver a extraerse, deteriorando aún más el paisaje y asumiendo los costes de producción y transporte del nuevo material. Además, se debe considerar que la gestión del material fresado resulta complicada debido al contenido de ligante que lleva aparejado.

Por otro parte, de acuerdo con el estudio de Peilong y Zhan (2011), si se reemplazaran 1.9 Mt de áridos de carretera por áridos nuevos, desplazándolos en camión una distancia de 20 km, el total de gases contaminantes emitidos a la atmósfera serían de 185 t: 80 t CO, 70 t NO<sub>x</sub> y 35 t de CxHy.

Tabla 2.4 Emisiones de gases contaminantes según medio de transporte (Peilong y Zhan, 2011).

Medio de transporte	Emisiones (g/(t·km))		
	CO	NO <sub>x</sub>	CxHy
Camión >10t	2.10	1.85	0.92
Ferrocarril	0.6	0.4	0.02
Transporte fluvial o marítimo	0.2	0.58	0.08

Por estos motivos, el empleo de árido reciclado o de árido marginal ayudaría a (Peilong y Zhan; 2011):

- Revalorizar un residuo.
- Conservar los espacios destinados a vertederos.
- Reducir o eliminar las tasas de depósito en vertederos.
- Reducir los costes de compra de materiales nuevos.
- Reducir las emisiones de gases contaminantes.

En cuanto al uso de los plásticos, de acuerdo a los datos de Ecoembes (2016), en España se reciclaron 1.3 Mt de los envases recogidos. Aproximadamente el 66.5% fueron envases plásticos (865000 t) pero lamentablemente no se especifican las tasas de reciclaje por tipo de plástico ni sus aplicaciones comerciales. De manera aproximada, según datos del *Waste Resources Action Program*, en Reino Unido durante 2003 se generaron 0.4 Mt de residuos plásticos susceptibles de ser utilizados como áridos de construcción pero tan sólo 0.008 Mt se destinaron a este fin (Huang *et al.*, 2007). Pese a no disponer de cifras a nivel nacional al respecto, observamos que el volumen de plástico reciclado sigue siendo significativo y, desde la perspectiva de la disponibilidad de estos recursos, se evidencia su fácil acceso para ser empleados en las MB.

Tabla 2.5 Residuos generados y aplicación en pavimentos asfálticos en Reino Unido (Huang et al., 2007)

	(Mt/año)	Tasa de reciclado (%)	Uso como árido (%)	Uso en mezclas bituminosas	
				Sustituto del árido (%)	Modificador del betún (%)
<b>Polvo de caucho (NFU)</b>	0.44	21	S/D	1-3	18-22
<b>Plásticos</b>	2.8	5	0.29	15-30	8

Anualmente se emplean más de 1 millón de m<sup>3</sup> para el depósito de residuos de PET (Hassani et al., 2005). Sin embargo, se estima que para un 1 km de carretera podrían emplearse hasta 315 t de PET en sustitución de hasta 5% del árido. Esto supondría un ahorro de unas 625 t de árido y que el PET no ocupe 9450 m<sup>3</sup> de espacio en vertedero o en el paisaje (Hassani et al., 2005). A pesar de las evidentes ventajas, existen ciertas reticencias sobre su aplicación en mezclas bituminosas debido a los costes asociados a su tratamiento y a la preocupación por una posible calidad inferior del asfalto resultante (Huang et al., 2007).

Según el último informe de la empresa SIGNUS (2017), especializada en la gestión de neumáticos fuera de uso, tan sólo en España se recogieron 188367 t de NFU (en Canarias 6926 t). De esta cantidad, unas 60000 t se destinan al granulado de caucho pero sólo un 1.6% se introduce en las mezclas bituminosas (960 t). Una cifra que se aleja bastante del potencial que ofrece el polvo de neumático en las mezclas bituminosas. Su uso como árido o como modificador del ligante queda más que demostrado a través de los diferentes estudios que hemos ido analizando a lo largo de este capítulo. Independientemente de que las cantidades reutilizadas en MB no parezcan significativas, la incorporación de caucho a las mezclas introduce otras mejoras medio ambientales como son la reducción del nivel de ruido, las emisiones de gases contaminantes y residuos de producción (Peilong y Zhan, 2011). Si a esto añadimos las ventajas que ofrece la fabricación de mezclas a media temperatura (MBSC) gracias a los aditivos, en las que el consumo energético y las emisiones de gases es significativamente inferior, se observa que hay un enorme potencial para su investigación.

Tabla 2.6 Emisiones de gases tóxicos durante la fabricación en planta de las mezclas MBC y MBSC (Peilong y Zhan, 2011)

Gases	Uds.	MBC	MBSC	Tasa de reducción (%)
CO <sub>2</sub>	%	2.6	1	61.5
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	151	40	73.5
CO	mg/m <sup>3</sup>	104	91.3	12.2
SO <sub>2</sub>	104mg/m <sup>3</sup>	13	3.3	74.6
Humo y polvo	mg/m <sup>3</sup>	5.6	2.59	53.8

## 2.6 CONCLUSIONES

---

En base al anterior estado del arte se determina que esta investigación se centre en el aprovechamiento de los residuos poliméricos para mejorar las principales propiedades de las mezclas asfálticas con áridos volcánicos marginales, con el objeto de valorizar estos productos residuales, reducir su impacto ambiental y mejorar la durabilidad de los pavimentos.

Como principales conclusiones de los trabajos anteriores destacamos:

- **El empleo de áridos volcánicos basálticos ofrece buenos resultados** en las mezclas bituminosas, especialmente en regiones áridas. Sin embargo, el aprovechamiento de los **áridos volcánicos marginales** está aún **en fase de desarrollo**.
- Los áridos con una **alta vesicularidad** podrían contribuir a **mejorar la cohesión** de las mezclas, al exigir un mayor contenido de ligante.
- Será necesario realizar una **caracterización exhaustiva** de los diferentes áridos marginales presentes en las islas **para determinar la viabilidad de su uso** en las mezclas, **buscando posibles correlaciones** que permitan deducir su comportamiento mecánico.
- A la hora de elaborar las mezclas con áridos volcánicos se deberá **tener en cuenta la proporción de partículas finas** con el fin de **minimizar el contenido de huecos** presentes en las mismas.
- **La incorporación de los residuos poliméricos es posible tanto por vía seca como por vía húmeda**, la elección de un método u otro dependerá de las características del residuo polimérico que se vaya a incorporar y de la proporción a emplear.
- **El polvo de caucho aporta diversas mejoras a las MB pero debe premezclarse con el ligante** para lograr una correcta integración del caucho y evitar la absorción del betún por parte del árido.
- **El mayor inconveniente** de la incorporación de caucho al betún es que deben emplearse **altas temperaturas** para **modificar la viscosidad del ligante** y favorecer su trabajabilidad durante la envuelta del árido y mezclado.
- **El empleo de aditivos químicos permite mejorar las condiciones de mezclado** de los ligantes con el árido por lo que **se podrían reducir las temperaturas de trabajo** y por tanto, los costes y consumos de recursos.
- **EL PET es otro residuo polimérico susceptible de emplearse en las MB**. Su incorporación por vía seca permite introducir una mayor proporción de residuos **aunque se deben analizar los diferentes parámetros que intervienen durante el proceso de fabricación**.





## 3 CARACTERIZACIÓN GEOMÉCANICA DE ÁRIDOS VOLCÁNICOS PARA SU USO EN MEZCLAS BITUMINOSAS

---

### 3.1 INTRODUCCIÓN

---

Los áridos son uno de los materiales básicos en la industria de la construcción (generalmente, más del 90% en peso de la composición de los hormigones de cemento y de las mezclas bituminosas son áridos). Junto con el agua, constituye uno de los dos productos de mayor consumo per cápita en el mundo y una de las cuatro materias primas más importantes de la producción minera mundial después del petróleo, el gas y el carbón (Akbulut *et al.* 2011).

Las propiedades y el comportamiento de los materiales elaborados con áridos, como los aglomerados asfálticos, los hormigones o los morteros, dependen tanto de las proporciones de sus componentes como de las propiedades individuales de cada uno de ellos (Suárez y Regueiro, 1994). Es evidente que la calidad de los áridos debe ser aceptable para poder obtener productos que cumplan con los estándares exigibles. Sin embargo, existen numerosos condicionantes económicos o medioambientales que hacen que muchas veces los materiales disponibles no reúnan las características más apropiadas.

A diferencia del territorio continental en el archipiélago canario encontramos litologías exclusivamente volcánicas. Esto es debido fundamentalmente al proceso de formación de las propias islas. Esta circunstancia, sumada a las condiciones de insularidad, hace que el empleo de materiales volcánicos en el sector de la construcción sea muchas veces inevitable, puesto que suelen ser los únicos materiales disponibles y/o accesibles. Si bien algunos de estos materiales presentan buenas propiedades mecánicas, en el caso de los áridos las propiedades son más variables y su calidad más heterogénea que en el caso de los áridos de procedencia calcárea o granítica. La razón de ello es que los macizos rocosos suelen presentar elevadas porosidades, importantes procesos de alteración (hidrotermal, diagenético, meteorización o por contacto térmico) y elevada heterogeneidad espacial de las capas litológicas (incluso dentro de una misma capa) debida a los distintos ciclos eruptivos (efusivos o explosivos).

Paralelamente, debemos tener en cuenta que aproximadamente el 40% de la superficie de las Islas Canarias lo constituyen espacios naturales con algún tipo de protección medioambiental, variando esta proporción entre el 30% y el 60% conforme a las peculiaridades de cada una de las islas (“Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos”, 2017). Por lo cual, las posibilidades para poner en explotación nuevas canteras de materiales granulares se restringen. De hecho, el número de yacimientos existentes con permisos de explotación legales es limitado y muchos han dejado de explotarse. Con todo lo dicho, es fácil comprender que la comercialización de áridos en las islas sea compleja.

Por otro lado, la escasez de estudios referentes a áridos volcánicos y la ausencia de pliegos normativos que incluyan especificaciones adaptadas a las peculiaridades de estas litologías (Fransqui *et al.*, 2019; Fransqui *et al.*, 2010) no permiten prever el comportamiento de estos materiales, más allá de los que se vienen empleando habitualmente en base a la experiencia adquirida. Por ello, **uno de los objetivos de este capítulo es la caracterización geomecánica de**

**los áridos volcánicos de las Islas Canarias para su uso en mezclas bituminosas** mediante los ensayos contemplados en el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes* (PG-3) (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014). Estos ensayos de laboratorio tienen la finalidad de cuantificar las propiedades de los áridos para su correcta dosificación y puesta en servicio en los firmes de carreteras.

A pesar de que el trabajo se centra en el estudio de áridos locales de las Islas Canarias, se pretende que los resultados obtenidos sean extrapolables a otras regiones volcánicas de características similares como pueden ser Cabo Verde, Azores, Madeira, etc. Por tanto, esta caracterización abarcará un amplio abanico de litotipos procedentes de diferentes canteras de las islas: 5 en Gran Canaria, 1 en Tenerife, 1 en Fuerteventura y 1 en el Hierro. Además se establecerán una serie de correlaciones básicas entre las propiedades de identificación (porosidad, densidad, esfericidad, lajosidad y proporción de finos), las propiedades resistentes (resistencia a la fragmentación y al desgaste por abrasión) y las propiedades geomecánicas de la roca matriz (resistencia a compresión simple).

El otro objetivo principal de este capítulo será el estudio meticuloso de los materiales marginales procedentes de la cantera propiedad de la Autoridad Portuaria del Puerto de La Luz y de Las Palmas (La Esfinge), entre los que se encuentran unos basaltos porosos y unos piroclastos de baja densidad. Es necesario el análisis de las propiedades de estos materiales con el objeto de: ofrecer recomendaciones que permitan mejorar sus propiedades mecánicas, cumplir los mínimos recomendados por la normativa vigente (PG-3) (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014) y poder ser empleados en la fabricación de mezclas bituminosas con polímeros.

### 3.2 MARCO TEÓRICO SOBRE LOS ÁRIDOS VOLCÁNICOS

---

Llamamos áridos a *“los materiales minerales, sólidos inertes, que con las granulometrías adecuadas se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla íntima con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cales, cementos, etc.) o con ligantes bituminosos”* (López Jimeno, 1994). Los principales campos de aplicación de estas materias primas se resumen en hormigones, morteros, aglomerados asfálticos, bases y sub-bases de carreteras, balastos y sub-balastos para ferrocarriles, escolleras para protección de obras portuarias y rellenos. (Bustillo *et al.*, 2001)

Según la norma UNE 146130 los áridos pueden clasificarse en: áridos naturales, áridos artificiales y áridos reciclados. *“Los áridos naturales son los que proceden de yacimientos minerales y únicamente han estado sometidos a procesos mecánicos”* y son los más habituales en la construcción de carreteras; los áridos artificiales son los que se han sometido a algún tratamiento físico-químico; los áridos reciclados son los que proceden del procesado de material empleado previamente en construcción. La calidad y las características de los áridos son consecuencia directa de la naturaleza mineralógica de la roca de procedencia pero también de su proceso de obtención. Pues es posible producir un árido adecuado a partir de una fuente mediocre o un árido de mala calidad pese a tener una buena procedencia.

Aunque determinados materiales pétreos puedan tener cierta predisposición para ser empleados como áridos en carreteras, la elección final de su uso dependerá en gran medida de

la disponibilidad del material en las proximidades de la obra y de los costes de transporte asociados. Por tanto, es lógico que se intenten emplear áridos locales cuya idoneidad haya sido contrastada por la experiencia con el fin de reducir dichos costes. El elevado contenido de áridos en las mezclas asfálticas, de las que constituyen su esqueleto mineral, obliga a realizar estudios que certifiquen la aptitud de estos materiales conforme a las especificaciones vigentes.

### 3.2.1 MARCO GEOLÓGICO DE LOS ÁRIDOS EN LAS ISLAS CANARIAS

Por su origen las rocas se clasifican en tres grandes grupos: ígneas o eruptivas, sedimentarias y metamórficas (López Jimeno *et al.*, 2004).

Las rocas ígneas proceden de la solidificación del magma y responden a procesos que se generan en el interior de la Tierra. Prácticamente todas las rocas ígneas están formadas por minerales silíceos, cuya estructura básica son átomos de silicio y átomos de oxígeno combinados mediante enlaces covalentes.

Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación y consolidación de restos o detritus de otras rocas preexistentes, por la precipitación química de minerales solubilizados o por la acumulación de restos de orgánicos.

Las rocas metamórficas son originadas por importantes transformaciones de los componentes mineralógicos de otras rocas preexistentes, endógenas o exógenas. Se producen por la estabilización de sus minerales ante unas nuevas condiciones de temperatura, presión y alteración química.

En el caso de las Islas Canarias hablaremos de rocas ígneas o volcánicas, ya que son el origen de los áridos empleados en esta parte de la tesis.

#### 3.2.1.1 Formación y tipos de estructuras volcánicas

Desde el punto de vista litológico, el archipiélago canario presenta un paisaje de contrastes donde es posible encontrar coladas lávicas y depósitos piroclásticos de diferente naturaleza y composición, incluso a nivel regional (Fig. 3.1). Esto es debido al propio proceso de formación de las islas, en el cual se da la superposición de diferentes materiales tras varios ciclos de erupción, erosión y sedimentación.

Las manifestaciones lávicas (Fig. 3.2) pueden clasificarse en tres tipos fundamentales, con independencia del nivel volcano-estratigráfico al que pertenezcan (Rodríguez-Losada *et al.*, 2007b; GETCAN-011, 2011):

- a) **Coladas lávicas con superficies pahoehoe o lavas cordadas:** Este tipo de estructuras presentan superficies suaves y lisas, a veces con forma de pliegues, asociadas a emisiones lávicas de composición basáltica que se forman bajo una combinación de baja viscosidad y bajo régimen de emisión.
- b) **Coladas lávicas con superficies aa o malpaíses.** Son estructuras cuyas superficies son muy irregulares, agudas, cortantes y en general muy caóticas, por las cuales resulta extremadamente difícil caminar. Los malpaíses canarios están siempre ligados a pequeños edificios volcánicos denominados conos de cinder o volcanes estrombolianos.

- c) **Coladas en bloques.** Este tipo de estructuras tienen la peculiaridad de aparecer asociadas solo a lavas de composición traquítica o fonolítica.

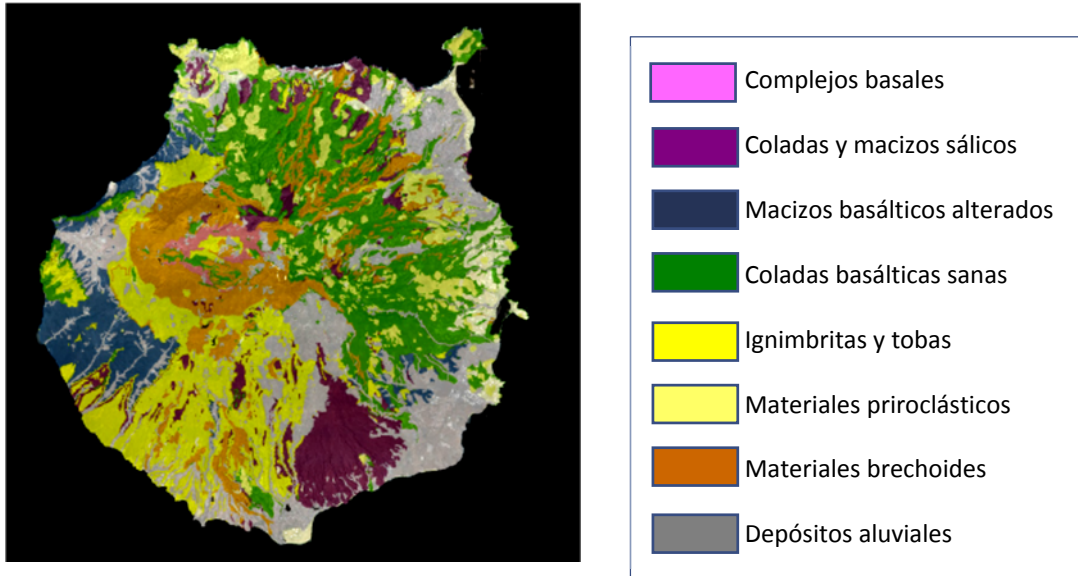


Figura 3.1 Ejemplo de mapa litológico de las Islas Canarias (Gran Canaria). (IDE Canarias visor 4.5)

En base a estas estructuras descritas es posible encontrar rocas volcánicas de composición basáltica, traquibasáltica, fonolítica o tefrítica; depósitos piroclásticos (lapilli y cenizas); brechas y conglomerados volcánicos formados a partir de coladas y oleadas piroclásticas, etc. (Irvine y Baragar, 1971; Cox *et al.*, 1979; Alonso Blanco, 1989; Le Maitre, 1989; Bryan *et al.*, 1998; Aparicio *et al.*, 2003).



Figura 3.2 Tipos de manifestaciones lávicas: a) lavas cordadas, b) malpaís, c) colada en bloques

### 3.2.1.2 Clasificación de las rocas volcánicas para su aplicación constructiva

Como vemos existe un gran abanico de materiales que, a efectos de su aplicación en la construcción, necesita una clasificación y caracterización desde el punto de vista de la ingeniería. En el año 2011, el Gobierno de Canarias publicó la *Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias (GETCAN-011)*, donde facilita una clasificación práctica para identificar a las rocas volcánicas y reconocer su caracterización ingenieril.

En esta guía, la clasificación de los materiales rocosos atiende a diferentes criterios:

- a) **Criterio litológico:** Basado en la composición químico-mineralógica de las rocas. En Canarias la litología dominante es mayoritariamente basáltica.
- b) **Criterio textural:** Basado en las características de los minerales que constituyen las rocas volcánicas, así como de sus tamaños.
- c) **Vesicularidad:** Basado en la presencia o ausencia de vacuolas en la roca matriz. Dichas vacuolas se corresponden con burbujas de gas contenidas en la lava que durante su desarrollo y migración hacia la superficie de la colada quedaron atrapadas tras completarse el proceso de solidificación.

En el caso de los materiales piroclásticos los criterios utilizados para su división son:

- a) **Criterio litológico:** Basado en la composición químico-mineralógica de los piroclastos. Se han diferenciado dos grandes grupos, los basálticos, de tonalidades oscuras o rojizas y los sálicos, de tonalidades más claras.
- b) **Tamaño de los piroclastos:** De mayor a menor tamaño de partículas (escorias > 64 mm, lapilli entre 2-64 mm y cenizas < 2 mm).
- c) **Estado de cementación:** Basado en el estado de cohesión de los fragmentos.

De acuerdo con los anteriores criterios, la clasificación final de los litotipos de rocas volcánicas en Canarias se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Litotipos de las Islas Canarias (Fuente: GETCAN-011 [[Gobierno de Canarias, 2011](#)])

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

Además de los materiales volcánicos señalados anteriormente, en la construcción de carreteras en las Islas Canarias es habitual el empleo de áridos procedentes de excavaciones en rellenos antrópicos o en depósitos de barranco (DB) que por la heterogeneidad y aleatoriedad de su naturaleza no pueden asimilarse a un litotipo concreto.

### 3.2.1.3 Propiedades geomecánicas de los litotipos de Canarias

Con carácter orientativo la Guía GETCAN-011 presenta algunos valores de las principales propiedades geomecánicas de las rocas de Canarias. Estos valores se han obtenido sobre muestras ensayadas en laboratorio mediante testigos extraídos sobre dichas rocas.

Tabla 3.2 Propiedades geomecánicas de las rocas de Canarias (Fuente: elaboración propia a partir de datos de GETCAN-011 [Gobierno de Canarias, 2011])

Litotipo:		BOPV	BOPM	BPLV	BPLM	BAFV	BAFM	BES	TRQB	TRQ	FON	IGS	IGNS
Peso específico aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Promedio	22	27	23	24	20	26	21	24	24	24	21	16
	Desviac. estándar	3.4	1.9	1.7	1.9	3.8	1.9	4.3	3.4	2.7	2.3	2.7	4.7
Velocidad ondas ultrasónicas (m/s)	Promedio	4435	5040	3052	4071	4752	4752	2964	4513	4485	4858	3649	2592
	Desviac. estándar	901	843	713	739	975	975	912	904	887	910	738	897
Índice de carga puntual (I <sub>s,50</sub> ) (MPa)	Promedio	5	7	2	5	5	7	2	6	5	5	4	2
	Desviac. estándar	2.2	2.6	1.2	2.6	3.2	2.6	1.9	2.8	2.4	2.2	1.8	2.0
Resistencia tracción indirecta (MPa)	Promedio	28	48	22	25	22	50	23	47	42	45	33	22
	Desviac. estándar	16.1	16.25	4.2	11.7	11.4	21.3	16.5	17.4	17.7	17.2	14.3	18.1
Resistencia compresión simple (MPa)	Promedio	48	114	36	61	31	104	31	75	95	119	48	16
	Desviac. estándar	35.7	59.8	14.8	27.9	16.0	54.8	34.2	61.1	62.8	76.8	29.1	19.5
Módulo de Young dinámico (GPa)	Promedio	44	69	21	40	31	59	20	50	49	58	29	13
	Desviac. estándar	20.5	25.3	9.52	16.6	18.9	24.7	15.4	23.8	20.9	21.1	15.4	12.4
Módulo de Young estático (GPa)	Promedio	16	31	25	-	17	65	4	51	33	48	50	8
	Desviac. estándar	5.7	5.6	-	-	3.3	-	0.6	21.4	17.8	15.3	0.00	6.2

Del mismo modo, con carácter orientativo, en la misma Guía GETCAN-011, se presentan también algunas propiedades geotécnicas básicas de los principales materiales piroclásticos de Canarias, correspondientes a materiales sueltos.

Tabla 3.3 Propiedades geomecánicas de los materiales piroclásticos de Canarias (Fuente: elaboración propia a partir de datos de GETCAN-011 [Gobierno de Canarias, 2011])

Litotipo		LPT	EST	PZT	CST
Peso específico partículas (kN/m <sup>3</sup> )	Promedio	29	28	25	25
	Desviación Estándar	2.0	1.9	0.7	0.3
Peso específico aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Promedio	12	12	7	12

Litotipo		LPT	EST	PZT	CST
Peso específico aparente seco (kN/m <sup>3</sup> )	Desviación Estándar	4.0	1.7	3.2	3.8
	Promedio	13	12	7	11
Porosidad (%)	Desviación Estándar	4.6	1.6	3.0	3.5
	Promedio	54	58	72	57
Resistencia compresión simple (MPa)	Desviación Estándar	14.2	1.5	6.8	12.1
	Promedio	2	2	1	1
Presión isotrópica de colapso (MPa)	Desviación Estándar	1.5	0.7	0.2	0.4
	Promedio	7	7	1	3
Módulo de Young (MPa)	Desviación Estándar	3.7	-	1.5	0.0
	Promedio	412	240	18	297
	Desviación Estándar	273	113	8	251
	Promedio				

### 3.2.2 PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS

Con el fin de realizar una correcta caracterización de los áridos volcánicos para su posterior uso en el estudio de las mezclas bituminosas con polímeros (objeto de este trabajo), tendremos en cuenta algunos aspectos respecto a las características que deben tener los mismos para conseguir una correcta integración con el ligante y un buen comportamiento mecánico. Los principales aspectos que deberemos considerar son los siguientes (López Jimeno, 1994):

- **Ausencia de impurezas:** un árido sucio puede ser la causa de la degradación prematura de un firme de carreteras.
- **Naturaleza e identificación:** evaluación de la naturaleza petrográfica, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas.
- **Propiedades geométricas:** forma y angulosidad de las partículas; distribución granulométrica.
- **Propiedades mecánicas:** parámetros básicos de resistencia a la fragmentación, al desgaste y al pulimento.
- **Adhesividad:** afinidad de los áridos con el ligante.
- **Alterabilidad:** es importante evaluar las propiedades químicas de los áridos para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar a la vida útil de las capas.

#### Limpieza

Los áridos no deben contener materia orgánica, polvo o partículas arcillosas, ya que se pretende garantizar que, en presencia de agua, la capa de firme conserve sus características resistentes y que no se produzcan problemas de adhesividad con los ligantes.

### *Granulometría*

La granulometría influye en la resistencia mecánica del conjunto de partículas. Suelen utilizarse granulometrías sensiblemente continuas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto. El tamaño máximo de los áridos viene normalmente limitado por consideraciones relativas al espesor de la capa extendida: trabajabilidad, segregación, etc. Por otra parte, la influencia de las partículas finas obliga normalmente a limitar su porcentaje y su plasticidad.

### *Forma y angulosidad*

La forma de las partículas del árido grueso afecta al esqueleto mineral del árido. Según su forma, las partículas pueden clasificarse en: redondeadas, cúbicas, lajas y agujas. Las lajas y agujas pueden romperse con facilidad durante la compactación o bajo la acción del tráfico, modificando con ello, la granulometría del árido.

La angulosidad de las partículas influye, junto a la textura superficial, en la resistencia del esqueleto mineral, por su contribución al rozamiento interno.

### *Resistencia al desgaste y la fragmentación*

La resistencia mecánica del esqueleto mineral es un factor determinante en el comportamiento de una capa de firme. Las capas del firme están sometidas a ciclos continuos de carga-descarga debidos al paso del tráfico que pueden producir un desgaste en el árido grueso, aflojando el material compactado y por tanto, perdiendo capacidad portante.

La evaluación de la resistencia de los áridos se realiza mediante ensayos que tienden a reproducir el comportamiento que tendrán los áridos en servicio. Para ello, se trabaja con granulometrías próximas a las que se pondrán en obra, someténdolas a ensayos de rotura y abrasión que, de forma indirecta, proporciona información de la resistencia mecánica del material.

### *Resistencia al pulimento*

La resistencia al pulimento de las partículas de un árido es la resistencia a perder aspereza en su textura superficial. Este aspecto es importante desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento cuando dichas partículas van a ser empleadas en una capa de rodadura.

### *Adhesividad*

La adhesividad con los ligantes es un fenómeno en el cual intervienen tanto factores físicos (textura del árido, porosidad, viscosidad, tensión superficial, etc.) como químicos. Si bien lo más importante a tener en cuenta es la presencia de agua. Es más sencillo que el ligante se adhiera a los áridos completamente secos. Sin embargo, el comportamiento es algo diferente con algo de humedad, ya que la superficie del árido se polariza dependiendo de su naturaleza ácida o básica. Si la naturaleza es ácida, consecuencia de un alto contenido en sílice, la adhesividad con los betunes no suele ser buena debido a una gran afinidad con el agua. En cambio, los áridos básicos presentan un mejor comportamiento.

### *Alterabilidad*

La alteración de los áridos puede producirse por reacciones químicas con algunos de los componentes de los ligantes o conglomerantes o por la presencia de agua. Para darse cuenta del peligro que representa el uso de un determinado árido en una capa de firme, muchas veces es suficiente con sumergirlo 24h y observar su apariencia.



En el caso del árido fino la sensibilidad a las alteraciones químicas es mayor debido a una mayor superficie específica, mayor facilidad para acumular humedad y la heterogeneidad de su naturaleza.

### 3.3 METODOLOGÍA

---

Este capítulo de la investigación puede estructurarse en tres partes diferenciadas: 1) una labor exhaustiva de documentación sobre áridos y rocas volcánicas en las Islas Canarias; 2) una campaña de ensayos de laboratorio sobre áridos y rocas; 3) el análisis de los resultados obtenidos mediante la comparación entre litotipos y la relación entre sus propiedades así como estas propiedades con las de la roca matriz.

Para la labor de documentación se recopilaron datos de los materiales utilizados con más frecuencia en las islas dentro del sector de la construcción (procedencia, canteras, propiedades, aplicaciones, etc.). En la [Tabla 3.4](#) se recoge un listado de las principales canteras que se pueden encontrar actualmente en el archipiélago canario, clasificadas según su litotipo conforme a la guía GETCAN-011. Actualmente muchas de estas canteras se encuentran fuera de servicio pero como se puede observar, gran parte de ellas trabaja con áridos basálticos y dentro de este grupo, el basalto olivínico piroxénico es el más habitual. Esto hace suponer que la presencia del litotipo BOPV es bastante frecuente por lo que su análisis para su aplicación en mezclas bituminosas será prioritario frente a otros posibles áridos marginales.

Además, se elaboró una base de datos de ensayos donde se incorporaron los informes de control de calidad de obras de carretera realizados por el *Servicio de Calidad y Tecnología de la Edificación y Obras Públicas del Gobierno de Canarias* y por los principales productores de áridos de las islas durante el período 1980-2015 ([Tabla 1.1](#), [Anexo I](#)). Esta base de datos servirá para complementar los resultados obtenidos durante la campaña de ensayos realizados en la *ULPGC*.

Tabla 3.4 Principales canteras en explotación actual o en el pasado en todas las islas del archipiélago canario, clasificadas por litotipos

LITOTIPO	EMPRESA	DENOMINACIÓN	ISLA	MUNICIPIO
B	CONDACA CANARIA SL		EH	El Pinar
B	CEPOC	Fronpeca	EH	Valverde
B	GRUPO DARIAS	Charco Hondo	LG	San Sebastián De La Gomera
B		Montaña Talavera	TF	El Rosario
BOP	ARIDOS MAXORATA, S.A. (Canary Concrete)	Andrea	FV	La Oliva
BOP	CORORASA	El Manadero	FV	Pto. Del Rosario
BOP		La Berlanga	GC	Ingenio
BOP		Felipe Suárez Medina	GC	San Bartolomé De Tirajana
BOP	HORMIGONES INSULARES, S.L.	Horinsa	LZ	Tias
BOP, BAF, BES	PUERTOS DE LAS PALMAS	Zona Franca	GC	Las Palmas De G.C.
BOP, FON	CANTERIA DE ARUCAS	Rosa Silva	GC	Arucas
BOP, TRQ, FON	FELIX SANTIAGO MELIAN, S.L.	Corralete-Draguillo	GC	Gáldar
BOP, BAF, TRQB	PUERTOS DE TENERIFE	Los Pasitos	TF	Sta. Cruz De Tenerife
BOP,DB	PABLO DE LEÓN	Pablo de León	FV	Antigua
BOP,LP	ALQUIFER, S.L.		LZ	Playa Honda
BOP	HEREDEROS DE JUAN ACUÑA, S.L.		LZ	
BOP	LANZAGRAVA, S.L.	Lanzagrava	LZ	San Bartolomé
BOPV, BES, LPS	PUERTOS DE LAS PALMAS	La Esfinge	GC	Las Palmas De G.C.
BOPV	ARIDOS RIACHUELO		LP	El Paso
BOPV	RUIZ ROMERO FIRMES Y CONSTRUCCIONES		LP	El Paso
BOPV	ARIDOS EL POCITO		LP	Villa De Mazo
BOPM	CORORASA	Tablero de las Cristinas	FV	Pto. Del Rosario
BOPM	BASE MILITAR	Roque Ceniciento	GC	Las Palmas De G.C.
BOPM	LOPESAN	La Caldereta	LP	Fuencaliente
BOPM	UNASPA (Unión de asfaltos Palmeros)		LP	Los Llanos De Aridane
BAFM	TENARIDOS, S.L. (SATOCAN)	La Cisnera	TF	Arico
TRQB	EXTRACCION DE ARIDOS CANARIOS, S.A.	Extractsa	TF	Guía De Isora
TRQ		Tindaya	FV	La Oliva
TRQ, FON	CONSTRUCCIONES Y ASFALTADOS, S.L.	Charco de San Francisco	GC	Gáldar
TRQ, FON	CANARY CONCRETE	Mesa del salinero	GC	San Bartolomé De Tirajana
FON	TRITURACION Y ASFALTOS CANARIOS, S.L.	El Cortijo- San Lorenzo	GC	Las Palmas De G.C.
FON	CABO VERDE S.A.	Las Monjas	GC	Moya
FON	GRUPO SANTANA CAZORLA	Maspalomas	GC	San Bartolomé De Tirajana
FON		El Morrete	GC	San Bartolomé De Tirajana
FON	MARTINA CABELLO	Tierras blancas	GC	Valleseco
FON		El Riquel	TF	Icod De Los Vinos
FON, IGS	ARIDOS CANARIOS, S.L. (LOPESAN)	Piedra Grande	GC	San Bartolomé De Tirajana
IGS	GRUPO SANTANA CAZORLA	Bco. de los Vicentes	GC	San Bartolomé De Tirajana
IGNS	CANTERIA DE ARUCAS	Buen Suceso	GC	Arucas
IGNS	CANTERIA DE ARUCAS	Hugo- el Savial	GC	San Bartolomé De Tirajana
IGNS, PZ		San José	GC	San Bartolomé De Tirajana
IG, PZT	GUAMARICO	La Cisnera	TF	Arico
LP	FRANCISCO MARTIN VEGA	Tío Isidro	GC	Telde
LP		La Umbria	GC	Telde
LP, B	INFRARRENTA, S.A.	La Capellanía	FV	La Oliva
LP, ES		Montes de Rosiana	GC	Telde
LP, ES		La Breña	GC	Telde
LP, ES		Tao	LZ	Teguise
ES, LP	LUIS CHACÓN NEGRÍN	Piconera de chacón	FV	La Oliva
ES, LP	EXTRACCION, ARIDOS Y PREF.GUTIERREZ,S,A	Birmagen	TF	El Rosario
ES, LP	EXPLORACIONES JUREÑA, S.A.	La estrella – Luceña	TF	San Miguel
ES, LP		Montaña de socas	TF	Tacoronte
DB		Navarro	GC	La Aldea De San Nicolás
DB		El Ribanzo	GC	La Aldea De San Nicolás
DB	MACHACADORA DOMINGUEZ S.A.		GC	Santa Lucía De Tirajana
DB	CANARY CONCRETE	Ramos Gil	GC	Santa Lucía De Tirajana
DB		Tabaibal canario	GC	Santa Lucía De Tirajana
DB	ARIDOS HERRERA S.L.	Barranco de Santiago	LG	San Sebastián De La Gomera
DB	ARIDOS DEL SUR, S.A.	Badén	TF	Güimar
DB	ÁRIDOS ATLÁNTICO SL	El Frenegal	TF	Güimar

### 3.3.1 PLAN DE TRABAJO

El plan de trabajo se ejecutó conforme al esquema de la Fig. 3.3. En primer lugar, se realizó el acopio de material procedente del machaqueo de rocas de diferentes canteras en explotación de las Islas Canarias. Principalmente se trabajó con la cantera de La Esfinge perteneciente a la *Autoridad Portuaria del Puerto de La Luz y de Las Palmas* (Las Palmas de G.C.), la cantera de Roque Ceniciento perteneciente a la zona militar de La Isleta (Las Palmas de G.C.) y la cantera de Piedra Grande (San Bartolomé de Tirajana) propiedad de Áridos Canarias SL, las tres en la isla de Gran Canaria. Posteriormente, se trajeron muestras de menor tamaño de otras islas (Tenerife, Fuerteventura, El Hierro). En cada una de las campañas se obtuvieron muestras de roca y muestras de tres fracciones de árido: 10/20, 4/10 y 0/4 mm. Puesto que la cantera de La Esfinge trabaja con fracciones superiores a las de estudio, destinadas a rellenos, escolleras y zahorras, la obtención de las tres fracciones de análisis se realizó mediante tamizado manual del material de rechazo.

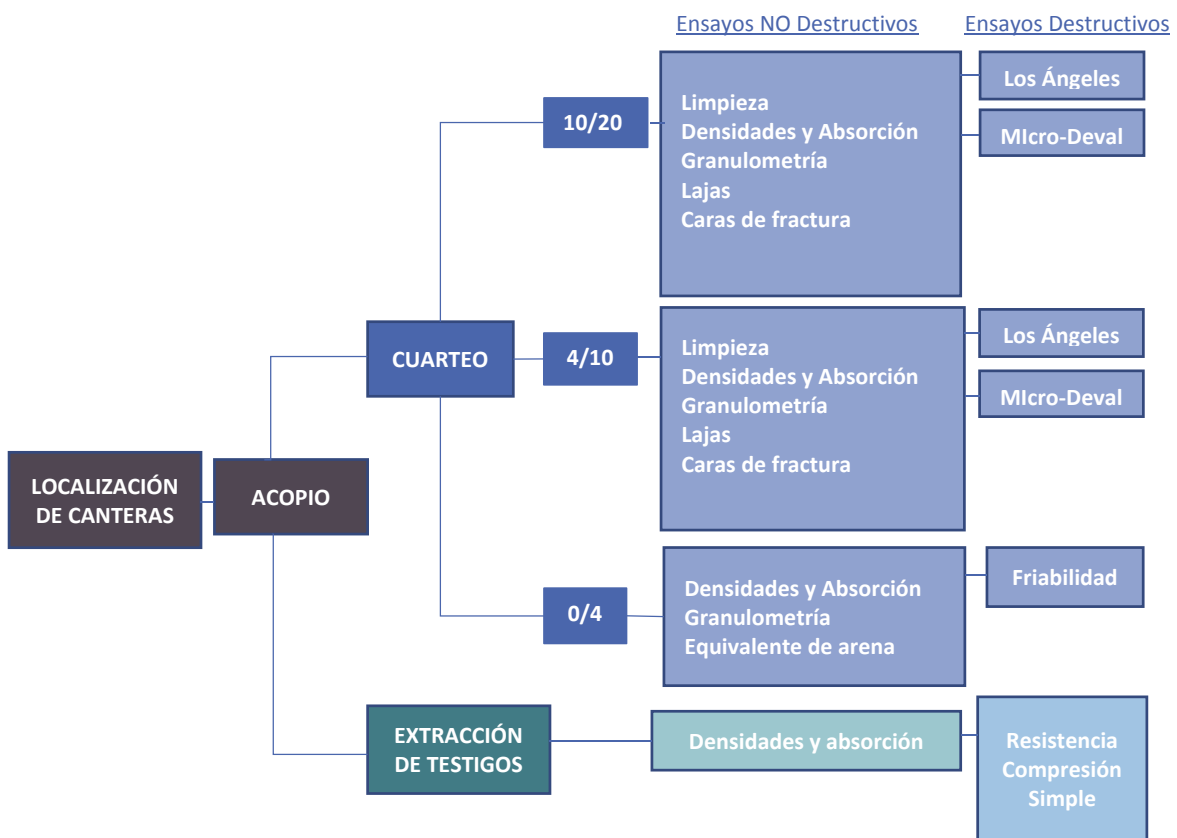


Figura 3.3 Diagrama del plan de ensayos seguido para la caracterización de áridos y rocas.

El trabajo se inició con el muestreo de áridos y rocas en diferentes canteras de las Islas Canarias (Figs. 3.4 , 3.5 y 3.6). Tras acopiar el material en el laboratorio, se realizó un cribado manual de las muestras consideradas *Todouno* separando los elementos masivos de los vacuolares, con la finalidad de caracterizar los litotipos puros. A partir de este punto se realizó toda la campaña de ensayos dividida en 4 fases: árido 10/20 mm, árido 4/10 mm, árido 0/4 mm y ensayos de rocas. La relación de ensayos llevados a cabo para determinar las propiedades mecánicas, físicas y geométricas de los áridos y los ensayos de rocas se detallan en las Tablas 3.5 y 3.6.



Figura 3.6 Cantera de la Esfinge y Roque Ceniciento (Autoridad Portuaria de Las Palmas, La Isleta, Las Palmas de Gran Canaria). Explotación de litotipos basálticos BOPV/BAFV, BOPM/BAFM, BES y LPS.



Figura 3.5 Cantera de La Cisnera (Tenáridos, S.L., Grupo SATOCÁN, Arico, Tenerife). Explotación del litotipo basalto masivo (BAFM).



Figura 3.4 Cantera de Fronpeca (Valverde, El Hierro). Antigua explotación de árido basáltico vacuolar (BOPV) procedente de coladas basálticas, basaníticas y foidíticas (actualmente inactiva).

Tabla 3.5 Ensayos de laboratorio realizados sobre áridos

<b>NORMA</b>	
<b>UNE 146130:2000 (ANEXO C)</b>	Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas. Determinación de la limpieza superficial del árido grueso.
<b>UNE-EN 1097-6:2014</b>	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua.
<b>UNE-EN 933-1:2012</b>	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
<b>UNE-EN 933-3:2012</b>	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
<b>UNE-EN 933-5:1999</b>	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.
<b>UNE-EN 1097-1:2011</b>	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)
<b>UNE-EN 1097-2:2010</b>	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
<b>UNE-EN 933-8:2012</b>	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
<b>UNE 83-115:1989</b>	Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas.

Tabla 3.6 Ensayos de laboratorio realizados sobre roca

<b>NORMA</b>	
<b>UNE-EN-1936:2007</b>	Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.
<b>UNE-EN-1926:2007</b>	Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.

### 3.3.2 MATERIALES

Todos los áridos analizados se obtuvieron de diferentes canteras y depósitos naturales situados en diferentes islas del archipiélago canario y se clasificaron conforme a la [Tabla 3.1](#). La mayoría de los áridos procedentes de canteras se obtuvieron de plantas de machaqueo donde se usan trituradoras de mandíbulas. En la [Tabla 3.7](#) y [Figs. 3.7 a 3.15](#) se identifican y describen cada uno de los materiales acopiados, su procedencia y las fracciones concretas de trabajo. En las figuras adjuntas se exponen algunas muestras de los áridos estudiados. Además, se incluye la localización geográfica de algunas de las canteras de donde se han obtenido las muestras y el frente de explotación de las mismas.

Tabla 3.7 Muestras acopiadas para los ensayos de laboratorio.

Litotipo	Descripción [Edad geológica]	Cantera	Isla	Fracciones en acopios	Aplicaciones
<b>BOPV</b>	Basalto vacuolar de color gris rojizo. [Pleistoceno]	Puertos de Las Palmas (La Esfinge, La Isleta, Las Palmas de Gran Canaria)	GC	0/4, 4/10, 10/20	Actualmente este basalto suele explotarse en el frente de cantera mezclado con los masivos y escoriáceos por lo que sólo es empleado en rellenos portuarios y banquetas de diques
<b>BOPV</b>	Basalto vacuolar de color gris	Fronpeca (Valverde, El Hierro)	EH	0/4, 4/10, 10/20	Árido comercializado para hormigones, mezclas asfálticas y construcción en general
<b>BOPV</b>	Basalto vacuolar de color gris	Morro Francisco (La Oliva, Fuerteventura)	FV	0/4, 4/10, 10/20	Árido comercializado para hormigones, mezclas asfálticas y construcción en general
<b>BOPM</b>	Basalto masivo de muy buena calidad, muy denso y de color negro. [Pleistoceno]	Puertos de Las Palmas (Zona militar del Roque Ceniciento, La Isleta, Las Palmas de Gran Canaria)	GC	0/4, 4/10, 10/20	Actualmente su explotación ha cesado. En la pasada década se empleó para hormigones estructurales de la ampliación del puerto de Las Palmas
<b>BOPM</b>	Basalto masivo alterado, de color gris. [Mioceno]	Túnel de La Aldea (San Nicolás de Tolentino, Gran Canaria)	GC	0/4, 4/10, 10/20	Material de desmonte y excavación del túnel de la Aldea, empleado para rellenos y formación de terraplenes.
<b>BAFM</b>	Basalto masivo de buena calidad de color gris. [Pleistoceno]	Tenáridos SL - SATOCÁN (La Cisnera, T.M. Arico)	TF	0/6, 4/12, 10/20	Árido comercializado para hormigones, mezclas asfálticas y construcción en general
<b>BES</b>	Basalto escoriáceo de color rojizo/marrón. [Pleistoceno]	Puertos de Las Palmas (La Esfinge, La Isleta, Las Palmas de Gran Canaria)	GC	0/4, 4/10, 10/20	Es empleado en rellenos portuarios y banquetas de diques mezclado con los masivos y vacuolares,
<b>FON</b>	Fonolita de buena calidad. [Mioceno superior]	Áridos Canarias SL - LOPESÁN (Piedra Grande, San Bartolomé de Tirajana)	GC	0/4, 4/10, 10/20	La empresa dispone de planta de machaqueo de áridos, de asfaltos, de hormigones y de prefabricados, todos elaborados con estos áridos
<b>IGNS</b>	Ignimbrita no soldada. [Mioceno superior]	CEISA (San José, Arguineguín, San Bartolomé de Tirajana)	GC	0/4, 4/10, 10/20	La empresa dispone de planta para la molienda de clínker para fabricación de cementos.
<b>LPS</b>	Lapilli suelto rojo o negro. [Pleistoceno]	Puertos de Las Palmas (La Esfinge, La Isleta, Las Palmas de Gran Canaria)	GC	0/4, 4/10, 10/20	Este lapilli únicamente se emplea como relleno ornamental de jardines y parterres del recinto portuario.



Figura 3.7 Basalto olivínico-piroxénico vacuolar de color gris/rojizo.



Figura 3.8 Basalto escoriáceo de color rojizo/marrón.



Figura 3.9 Basalto olivínico-piroxénico vacuolar de color gris.



Figura 3.10 Basalto olivínico-piroxénico masivo de color negro.

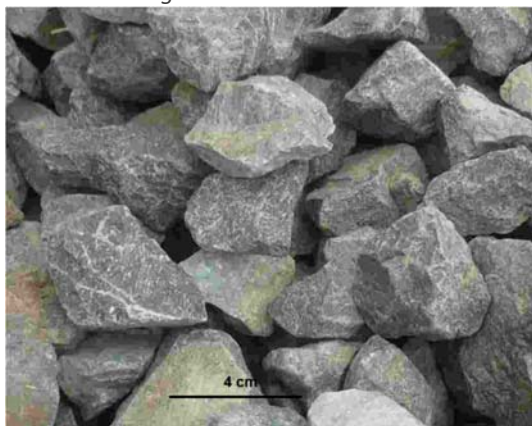


Figura 3.11 Basalto masivo de color gris.



Figura 3.12 Fonolita de color gris/verdoso.



Figura 3.13 Lapilli suelto de color rojizo.



Figura 3.14 Lapilli suelto de color negro.



Figura 3.15 Ignimbrita no soldada de color amarillo.

### 3.3.3 INSTRUMENTAL EMPLEADO

En la tabla adjunta se establece la relación de equipos e instrumental empleados en cada ensayo:

Tabla 3.8 Relación de instrumental empleado en cada ensayo de áridos

Ensayos de áridos	Instrumental
Limpieza	Tamices # 0.5 mm
Densidades y % absorción	3 Picnómetros: dos de 2 l y uno de 1 l de capacidad Equipo de vacío
Granulometrías, Índice de lajas, Caras de fractura	Tamices: # 0.063 mm, # 0.0125 mm, # 0.250 mm, # 0.5 mm, # 1 mm, # 2 mm, # 4 mm, # 8 mm, # 10 mm, # 16 mm y # 20 mm.



Ensayos de áridos	Instrumental
Índice de lajas	Tamices de barras: # 12.5 mm, # 10 mm, # 8 mm, # 6.3 mm, # 5 mm, # 4 mm, # 3.15 mm y # 2.5 mm
Coef. Micro-Deval y Coef. Friabilidad	Máquina de Micro-Deval Bolas de acero $\varnothing$ 10 mm, 18 mm y 30 mm Tamices # 1.6 mm y # 8 mm Tamices # 0.5 mm, # 1 mm y # 8 mm
Coef. Los Ángeles	Máquina de Los Ángeles Bolas de acero $\varnothing$ 45 - 49 mm Tamiz # 1.6 mm
Equivalente de arena	2 probetas cilíndricas graduadas Máquina de agitación Pistón tarado Tubo lavador

Tabla 3.9 Relación de instrumental empleado en cada ensayo de rocas

Ensayos de rocas	Instrumental
Resistencia a compresión uniaxial	Prensa hidráulica
Densidades y % absorción	Equipo de vacío

A continuación se detallan las características de los equipos específicos:

- **El equipo de vacío** se compone de: una bomba de succión MOD. BR-vacum-pump S4/03 de la marca Teslar con caudal nominal de 4 m<sup>3</sup>/h y presión límite de 3 mbar, un controlador de vacío MOD. 10.0958 de Mecánica Científica S.A., una trampa y vaso Dewards para la condensación de la humedad del aire, un depósito metálico con cierre hermético y los tubos de conexión.
- **El agitador** del ensayo del equivalente de arena está formado por un sistema de sujeción ajustable donde se coloca la probeta graduada horizontalmente y un motor con movimiento rectilíneo, periódico y sinusoidal de 200  $\pm$  10 mm y una frecuencia de 3 Hz.
- **El equipo de Micro-Deval** (Matest) se compone de: cuatro cilindros de ensayo, con un diámetro interior de 200  $\pm$  1 mm y una longitud útil de 154  $\pm$  1 mm. Los cilindros están contruidos en chapa de acero inoxidable con un espesor de 3  $\pm$  0.2 mm y una tapadera plana de 8 mm de espesor. La estanquidad se asegura mediante una junta colocada en la tapadera. Además cuenta con un motor de 1 kW para producir una velocidad de rotación de los cilindros de 100  $\pm$  5 vueltas por minuto.
- **El equipo de Los Ángeles** (Mecacisa) consta de: un cilindro de acero de diámetro interior 711  $\pm$  5mm y longitud interior de 508  $\pm$  5 mm, apoyado sobre dos bulones horizontales fijos montados en sus paredes laterales, que ejercen de eje de giro. Este cilindro dispone de una abertura longitudinal con cubierta móvil para la introducción y retirada de las muestras de ensayo.

Su motor tiene una velocidad de rotación comprendida entre 31-33 r.p.m.

- **La prensa del ensayo** consta de: un sistema hidráulico de compresión compuesto por un plato de ajuste mecánico y otro plato de carga, un control manual de ajuste de la

velocidad de carga y opciones de accionamiento de la prensa. Cuenta con capacidad de carga de hasta 1000 kN.

Para la realización de las operaciones de secado y pesada de la mayoría de los ensayos de laboratorio ha sido necesario emplear el siguiente instrumental:

- Balanza (resolución  $\pm 0.1$  g y precisión  $\pm 0.1\%$ )
- Balanza hidrostática (resolución  $\pm 0.1$  g y precisión  $\pm 0.1\%$ )
- Picnómetros de vidrio de capacidad 1.3 l, previamente calibrados ( $0.001327 \text{ m}^3$ )
- Estufas (Matest) con capacidad hasta 100 l, convección natural y control termostático hasta  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  (resolución  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  y precisión  $\pm 0.1\%$ )
- Bandejas plásticas y metálicas.

### 3.3.4 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

#### 3.3.4.1 Extracción de testigos de roca

Para los ensayos de roca ha sido necesario la extracción de testigos. Las probetas se suelen preparar a partir de los testigos de sondeos in situ, pero en este estudio se extrajeron a partir de bloques de roca mediante una sonda en el laboratorio. Estos bloques a su vez se obtuvieron de fragmentos de roca desprendidos en las canteras visitadas.

#### 3.3.4.2 Muestreo de áridos

En el caso de los áridos se actuó conforme a la norma [UNE EN 932-1 Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo](#). Las desviaciones en el muestreo debidas a la heterogeneidad del material se reducen a un nivel aceptable si se toma un número adecuado de fracciones de muestra. En este estudio se ha procurado tomar muestras aleatorias de las mismas tres fracciones: 10/20, 4/10 y 0/4 mm en diferentes puntos de los silos de acopio. Para ello, se elaboró un plan de muestreo considerando las fracciones del árido, la naturaleza del mismo, el tamaño de cada lote, las circunstancias locales y los objetivos del muestreo.

Este plan incluyó:

- El litotipo del árido a estudiar
- Un listado de las propiedades a medir
- La identificación de los puntos de muestreo
- La masa aproximada de cada fracción de muestra
- Los utensilios necesarios para su realización: cubos, palas, tamices, bolsas, etc.
- El sistema de transporte y la identificación de cada fracción.

Para determinar la masa de la muestra bruta de cada litotipo se considera la naturaleza y el número de ensayos, el tamaño y densidad del árido.

Sin embargo, como la densidad de cada árido era a priori desconocida, se decidió tomar las muestras en función de las cantidades necesarias para cada ensayo. De manera que la previsión inicial realizada fue como se detalla a continuación:

Tabla 3.10 Previsión de masa bruta necesaria para la realización de ensayos para cada litotipo

Ensayo	Fracción granulométrica		
	10/20	4/10	0/4
Coef. de limpieza superficial	4 kg x 5	2 kg x 5	-
Densidades y absorción de agua	3 kg x 5	1.5 kg x 5	1 kg x 5
Granulometría	5 kg x 5	2 kg x 5	200 g x 5
Índice de lajas			-
Coef. caras de fractura			-
Coef. de los Ángeles	15 kg x 5	15 kg x 5	-
Coef. de Micro-Deval	2 kg x 5	2 kg x 5	-
Equivalente de Arena	-	-	125 g x 10
Coef. de friabilidad	-	-	2 kg x 5
<b>TOTAL</b>	<b>29 kg x 5= 145 kg</b>	<b>22.5 kg x 5= 112.5 kg</b>	<b>17.25 kg</b>
		<b>275 kg</b>	

### 3.3.4.3 Cuarteo

La finalidad del cuarteo es obtener muestras de ensayo representativas mediante el mínimo número de etapas de división e impedir que el operador introduzca pequeñas modificaciones en la muestra de ensayo o que tenga que seleccionar las partículas que formen parte de la misma.

La norma **UNE-EN 932-2** *Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio* propone diferentes sistemas para realizar el cuarteo. En esta parte del estudio se adoptaron dos de los métodos propuestos:

- a) Reducción de muestras con un cuarteador.
- b) Reducción de muestras por paladas alternas.

## 3.3.5 PROCEDIMIENTO OPERATIVO: ENSAYOS DE ÁRIDOS

### 3.3.5.1 Determinación de la limpieza superficial del árido grueso (UNE 146130: ANEXO C).

El ensayo consiste en separar por lavado las impurezas mezcladas o adheridas a la superficie de los áridos, usando el tamiz de referencia 0.5 mm. El coeficiente de limpieza superficial representa el porcentaje de estas partículas con respecto a la masa total de la muestra.

Cálculo y expresión de resultados

El coeficiente de limpieza superficial se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\%L = \frac{M_s - m}{M_s} \times 100 \quad (3.1)$$

Siendo  $M_s$  la masa seca obtenida a partir del cálculo del índice de sequedad y  $m$  la masa de las partículas retenidas en el tamiz 0.5 mm.

### 3.3.5.2 Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua. Método del picnómetro (UNE-EN 1097-6).

La densidad de las partículas y la absorción de agua de los áridos se determinan mediante la relación entre la masa y el volumen. La absorción del árido representa el volumen de huecos accesibles al agua dado por la diferencia de peso entre el árido saturado y el árido seco. Al tratarse de materiales granulares se ha aplicado el método del picnómetro.

En el caso de la fracción fina (0/4 mm), para valorar la adecuada eliminación de la película de agua se compactó la porción de ensayo en un molde troncocónico mediante pisón (25 golpes), se retiró del molde y se observó la morfología del resultado según norma.

Cálculo y expresión de resultados

$$\text{Densidad aparente de partículas (g/cm}^3\text{)} \quad \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (3.2)$$

$$\text{Densidad de partículas secadas en estufa (g/cm}^3\text{)} \quad \rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3.3)$$

$$\text{Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente (g/cm}^3\text{)} \quad \rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3.4)$$

$$\text{Absorción de agua (\%)} \quad WA_{24} = 100 \frac{(M_1 - M_4)}{M_4} \quad (3.5)$$

Dónde:

- $M_1$  la masa de árido saturado con la superficie seca, en g.
- $M_2$  la masa aparente en el agua del picnómetro que contiene la muestra de árido saturado, en g.
- $M_3$  la masa aparente de la cesta vacía/picnómetro lleno de agua, en g.
- $M_4$  masa de la muestra de ensayo secada en estufa, en g.
- $\rho_w$  la densidad del agua a la temperatura anotada al pesar  $M_2$ , en g/cm<sup>3</sup>.

### 3.3.5.3 Granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1)

Este ensayo consiste en dividir y separar un material en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente para conocer la distribución de las partículas con respecto a la masa total.

Cálculo y expresión de resultados

La masa retenida en cada tamiz ( $R_i$ ) se representa como un porcentaje de la masa seca original ( $M_0$ ). Se calcula el porcentaje acumulado de la masa seca que pasa por cada tamiz, hasta el tamiz 0.063 mm. Además, se calcula el porcentaje de finos (f) que pasan por el tamiz 0.063 mm mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{(M_0 - M_1) + P}{M_0} \times 100 \quad (3.6)$$

Donde:

- $M_0$  es la masa seca de la muestra de ensayo, en g.
- $M_1$  es la masa seca de la muestra de ensayo tras el lavado, en g.
- P es la masa del material que queda en la bandeja de fondo, en g.

Como comprobación se determina que si la suma de las masas parciales retenidas  $R_i$  y P difiere más del 1% de la masa  $M_1$  debe repetirse el ensayo debido a la pérdida de partículas durante el ensayo.

#### 3.3.5.4 Índice de lajas (UNE-EN 933-3)

En este ensayo se pretende determinar el porcentaje de partículas planas con respecto a la masa total de ensayo. Para ello se realizan dos operaciones de tamizado: el primero divide la masa en fracciones granulométricas mediante tamices reticulares y el segundo criba dichas fracciones mediante tamices de barras conforme a la norma (Tabla 3.8).

Cálculo y expresión de resultados

El índice de lajas se calcula mediante la siguiente expresión:

$$FI = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.7)$$

Donde  $M_2$  es la sumatoria de las masas de las partículas que pasan entre las ranuras de las barras y  $M_1$  la masa total de ensayo.

#### 3.3.5.5 Porcentaje de caras de fractura (UNE-EN 933-5)

Este ensayo analiza la textura superficial del árido determinando la proporción de partículas trituradas frente a las redondeadas de una muestra de árido. Para ello se realiza una separación de las partículas del árido grueso 10/20 mm siguiendo el método para una muestra  $D \leq 2$  d según norma. Donde D es el tamaño superior y del tamaño inferior de la fracción de árido.

La muestra dividida en fracciones granulométricas se extiende y se separan manualmente las partículas trituradas ( $M_c$ ) (partículas con más del 50% de sus caras con aristas vivas), las partículas redondeadas ( $M_r$ ) (partículas con más del 50% de sus caras desgastadas o erosionadas), las partículas totalmente trituradas ( $M_{tc}$ ) (más del 90% de sus caras con aristas vivas) y las totalmente redondeadas ( $M_{tr}$ ).

Cálculo y expresión de resultados

El porcentaje C de cada grupo de partículas se calcula según la siguiente ecuación:

$$C_{(c,r,tc,tr)} = \frac{M_{(c,r,tc,tr)}}{M_1} \times 100 \quad (3.8)$$

Siendo  $M_{(c,r,tc,tr)}$  la masa de cada grupo de partículas y  $M_1$  la masa total de ensayo.

### 3.3.5.6 Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval) (UNE-EN 1097-1)

El ensayo de Micro-Deval mide el desgaste producido en los áridos por el rozamiento de una carga abrasiva en un tambor rotatorio bajo unas determinadas condiciones. El coeficiente Micro-Deval representa el porcentaje de la muestra original que se reduce a un tamaño inferior a 1.6 mm por rotación. Cuanto menor es el coeficiente mejor es la resistencia al desgaste.

La masa de la muestra debe tener una granulometría comprendida entre 10 y 14 mm, donde el 30-40% de la masa debe ser inferior al tamiz 11.2mm. Como no se disponía de los tamices de referencia, este ensayo se modificó para ajustarlo a la fracción 10/16 mm, usando como tamiz intermedio el tamiz 12.5 mm, de forma que se tuviera una proporción 40%-60%. Para los ensayos de la fracción media 4/10, se recurrió a las fracciones granulométricas alternativas 4 a 6.3 mm y 4 a 8 mm (Tabla C.1-del Anexo C UNE EN 1097-1).

En cada uno de los 4 cilindros de la máquina se introdujo una sub-muestra de 500 g (10/12.5 mm 200 g y 12.5/16 mm 300 g), una carga de  $5000 \pm 5$  g de bolas de acero y  $(2.5 \pm 0.05)$  l de agua. Se hicieron girar a una velocidad de  $(100 \pm 5)$  r.p.m. durante  $(12000 \pm 10)$  revoluciones. El contenido de los cilindros se vació, se retiró la carga abrasiva y se lavó el árido usando el tamiz 1.6 mm. El árido retenido se secó en estufa a  $(110 \pm 5$  °C) hasta pesada constante.

Cálculo y expresión de resultados

El coeficiente de Micro-Deval  $M_{DE}$  se calcula como:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5} \quad (3.9)$$

Donde  $m$  es la masa retenida por el tamiz 1.6 mm, en g.

### 3.3.5.7 Determinación de la resistencia a la fragmentación (Los Ángeles) (UNE-EN 1097-2)

El ensayo de Los Ángeles sirve para determinar la resistencia a la rotura de un árido cuando éste es sometido a una carga abrasiva mediante volteo giratorio. Análogamente, cuanto menor es este coeficiente mejor es la resistencia a la fragmentación.

Al igual que en el ensayo de Micro-Deval la masa de la muestra debe ser de al menos 5 kg con partículas comprendidas entre 10 y 14 mm (30-40% partículas < 11.2 mm). Al no disponer de los tamices de referencia, se adoptó el mismo protocolo que en el ensayo  $M_{DE}$ , usando como tamiz intermedio el tamiz 12.5 mm. De tal forma que en la máquina de Los Ángeles se introdujo una masa de árido de 5 kg (40% del peso 10/12.5mm y 60% del peso 12.5/16 mm) junto con una carga abrasiva (11 bolas de  $\phi$  45-49 mm y 400-445 g). Para los ensayos de la fracción media 4-10 mm, se recurrió a las fracciones granulométricas alternativas 4 a 6.3 mm y 4 a 8 mm según Tabla B.1-del Anexo B UNE-EN 1097-2.

La velocidad de giro del tambor empleada fue 31-33 r.p.m. durante 500 revoluciones. Tras el volteo, se vació el tambor, se retiró la carga abrasiva y se lavó el árido empleando el tamiz 1.6 mm. Finalmente el material retenido se secó en estufa a  $(110 \pm 5$  °C) hasta pesada constante.

Cálculo y expresión de resultados

El coeficiente de desgaste de los Ángeles, se calcula como:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (3.10)$$

Donde  $m$  es la masa retenida por el tamiz 1.6 mm, en g.

#### 3.3.5.8 Ensayo del equivalente de arena (UNE-EN 933-8)

El equivalente de arena sirve para determinar la cantidad de arcilla o polvo que puede contener la fracción fina del árido (< 2 mm). Para su realización empleamos un agente dispersante que separó mediante agitación las arenas del resto de partículas. Tras el proceso de agitación y reposo definido en la norma, medimos el nivel del material en suspensión  $h_1$  y la altura del sedimento  $h_2$  en la probeta graduada empleada.

Cálculo y expresión de resultados

Se calcula el equivalente de arena a partir de la expresión:

$$SE(10) = \left( \frac{h_2}{h_1} \right) \times 100 \quad (3.11)$$

$h_2$  es la altura del árido limpio en cm;  $h_1$  es la altura de las partículas contaminantes en cm respecto a la base de la probeta.

#### 3.3.5.9 Friabilidad (UNE 83-115)

Este ensayo determina la resistencia a la fragmentación de las arenas (0.1 – 2 mm) contenidas en los áridos mediante volteo giratorio.

En cada cilindro del equipo Micro-Deval se introdujo una carga de 500 g de muestra de árido, 2.5 l de agua y una carga abrasiva de bolas de acero distribuida de la siguiente manera:

- 9 bolas de  $\varnothing$  30 mm (975 g);
- 21 bolas de  $\varnothing$  18 mm (490 g);
- bolas de  $\varnothing$  10 mm hasta completar el peso total de la carga  $2500 \pm 4$  g.

La velocidad de giro de los cilindros empleada fue  $100 \pm 5$  r.p.m. durante 1500 revoluciones.

Tras 1500 vueltas, se descargó el material y la carga abrasiva sobre tres tamices superpuestos de 8 mm, 0.2 mm y 0.05 mm. El material retenido por los tamices 0.2 mm y 0.05 mm se secó en estufa a 105 °C hasta pesada constante ( $m'$ ).

Cálculo y expresión de resultados

El coeficiente de friabilidad de una arena ( $F_A$ ) se calcula mediante la expresión:

$$F_A = \frac{m}{M} \times 100 = \frac{M - m'}{M} \times 100 \quad (3.12)$$

Donde  $M$  es la masa inicial del ensayo en gramos y  $m'$  la masa de las partículas retenida por el tamiz 0.05 mm tras el ensayo.

### 3.3.6 PROCEDIMIENTO OPERATIVO: ENSAYOS DE ROCA

#### 3.3.6.1 Densidad aparente de una roca. Método de la balanza hidrostática (UNE-EN 1936)

Este ensayo se realizó previo al ensayo de resistencia a compresión simple con los testigos obtenidos para el mismo.

Inicialmente los testigos se secaron en estufa a 110 °C hasta pesada constante para eliminar su humedad y se registró la masa seca ( $m_d$ ) de cada uno de ellos. Posteriormente se introdujeron los testigos en el recipiente de vacío, se cubrieron con agua y se les redujo la presión hasta 2 kPa. Después de mantener la presión durante 2 h, se restableció la presión atmosférica y se dejaron los testigos sumergidos. Tras 24 h se pesaron los testigos bajo el agua en la balanza hidrostática ( $m_h$ ), se secaron superficialmente y se anotó su masa saturada con la superficie seca ( $m_s$ ).

Cálculo y expresión de resultados

$$\rho_a = \frac{m_d}{m_s - m_h} \rho_w \quad (3.13)$$

Donde  $m_d$  es el peso del testigo seco en gramos,  $m_s$  peso del testigo saturado en gramos,  $m_h$  peso del testigo sumergido en gramos y  $\rho_w$  es la densidad del agua en g/cm<sup>3</sup>.

#### 3.3.6.2 Resistencia a la compresión uniaxial de las rocas o a compresión simple (UCS) (UNE-EN 1926)

Se extrajeron al menos 5 probetas cilíndricas (testigos) a partir de un bloque de roca con una relación altura/diámetro de 2.5 a 3.0. El diámetro debía ser 10 veces superior al tamaño del grano mayor de la roca y no inferior a 50.0 mm.

De cada testigo se midieron dos diámetros en ángulo recto en la parte superior, media e inferior de la probeta, con un calibrador o pie de rey y se calculó la media. Igualmente se tomaron medidas de la altura y peso del testigo.

Se colocaron los testigos en la prensa hidráulica, considerando la anisotropía de la muestra. La carga se aplicó de forma continua de tal manera que la rotura se produjera entre los 2 y los 10 min con una velocidad de carga comprendida entre 0.5 y 1.0 MPa/s. Se registró la carga y la forma de rotura y se tomó una fotografía de cada probeta.

Cálculo y expresión de resultados

La carga máxima registrada en Newtons se divide por la sección de la probeta, para obtener la resistencia a compresión uniaxial de la misma, expresada en MPa.



### 3.4 RESULTADOS

A continuación se muestra el número de ensayos realizados, el valor promedio y la desviación estándar de cada una de las propiedades estudiadas para cada litotipo y cada fracción granulométrica analizada. Debido a la dificultad de obtención de las muestras, al carácter destructivo de algunos ensayos y a imprecisiones durante el procedimiento operativo, no ha sido posible proporcionar un valor característico de determinados litotipos.

Las granulometrías, al depender directamente de los procesos de producción y no de la naturaleza del árido, no es un parámetro que pueda analizarse como una característica propia del material. Sin embargo, el análisis de la distribución granulométrica del basalto vacuolar BOPV se utilizará en capítulos posteriores para la dosificación del tipo de mezcla bituminosa previsto, ajustándola al huso granulométrico deseado.

Tabla 3.11 Numero de ensayos, valor promedio y desviación estándar de las propiedades estudiadas sobre áridos (Fracción 0/4 mm)

Litotipo	Isla	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )			$\rho_{rd}$ (g/cm <sup>3</sup> )			$\rho_{ssd}$ (g/cm <sup>3</sup> )			WA <sub>24</sub> (%)			F <sub>A</sub>			SE(10) (%)		
		N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds
<b>BOPV</b>	GC	17	2.83	0.20	4	3.08	0.13	4	3.13	0.12	4	1.66	0.67	9	25.51	0.60	10	64.80	4.17
<b>BOPV</b>	EH	0			0			0			0			0			2	67.65	6.74
<b>BOPV</b>	FV	5	2.07	0.01	5	1.32	0.03	5	1.89	0.04	5	43.28	2.17	8	25.53	9.11	10	87.81	5.44
<b>BOPM</b>	GC	11	2.87	0.05	4	2.95	0.25	4	3.07	0.18	8	2.85	2.16	10	27.19	6.24	10	72.17	5.66
<b>BOPM</b>	GC	8	2.70	0.06	8	2.50	0.10	8	2.65	0.08	8	6.15	1.52	0			0		
<b>BAFM</b>	TF	2	2.99	0.03	8	2.56	0.24	2	2.78	0.13	4	4.72	4.66	0			8	74.99	6.95
<b>BES</b>	GC	10	3.01	0.05	10	2.79	0.31	9	2.91	0.24	10	4.21	4.50	8	17.19	3.33	10	96.89	1.40
<b>FON</b>	GC	16	2.62	0.05	15	2.63	0.12	15	2.69	0.13	15	2.15	0.81	8	23.51	1.24	17	75.62	8.06
<b>IGNS</b>	GC	2	2.22	0.00	2	1.55	0.02	2	1.92	0.03	2	24.03	3.41	6	55.12	5.60	0		
<b>LPS negro</b>	GC	10	2.69	0.07	10	2.39	0.34	10	2.57	0.23	10	8.39	6.84	8	15.09	0.59	10	93.26	3.73
<b>LPS rojo</b>	GC	12	2.41	0.05	12	2.02	0.13	12	2.20	0.08	12	8.69	3.31	8	12.14	1.48	10	98.88	2.02
<b>TOTAL</b>		93			78			71			78			65			87		

\*( $\rho_a$ ) densidad aparente de partículas [EN 1097-6]; ( $\rho_{rd}$ ) densidad de partículas secadas en estufa [EN 1097-6]; ( $\rho_{ssd}$ ) densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente [EN 1097-6]; (WA<sub>24</sub>) Absorción de agua tras 24 h [EN 1097-6]; (F<sub>A</sub>) Friabilidad de las arenas [UNE 83-115-89]; (SE(10)) Equivalente de arena [EN 933-8]. (N) Número de muestras ensayadas; ( $\bar{X}$ ) valor promedio; (Ds) desviación estándar.



Tabla 3.12 Numero de ensayos, valor promedio y desviación estándar de las propiedades estudiadas sobre áridos (Fracción 4/10 mm)

Litotipo	Isla	L (%)		$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )			$\rho_{rd}$ (g/cm <sup>3</sup> )			$\rho_{ssd}$ (g/cm <sup>3</sup> )			WA <sub>24</sub> (%)			FI (%)			C <sub>c</sub> (%)			M <sub>DE</sub>			LA			
		N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds
<b>BOPV</b>	GC	5	1.14	0.13	10	2.94	0.07	8	2.65	0.19	8	2.77	0.13	8	4.52	2.55	5	3.18	0.33	5	62.59	9.42	8	31.45	5.83	1	34.52	
<b>BOPV</b>	EH	2	1.72	0.25	2	2.84	0.18	2	2.18	0.17	2	2.42	0.17	2	11.13	1.22	1	7.58		2	33.02	7.78	0				0	
<b>BOPV</b>	FV	3	0.20	0.07	3	2.87	0.02	3	2.28	0.04	3	2.49	0.02	3	9.16	0.92	3	7.70	0.89	1	60.02		3	15.68	1.90	1	20.92	
<b>BOPM</b>	GC	5	0.49	0.23	9	3.04	0.06	10	2.85	0.10	10	2.94	0.08	10	2.89	0.93	5	21.35	2.36	4	83.67	9.31	8	23.08	1.73	5	18.88	2.47
<b>BOPM</b>	GC	0			10	2.76	0.05	10	2.43	0.05	10	2.62	0.03	10	7.58	1.07	3	6.66	0.53	0			16	65.38	1.95	0		
<b>BAFM</b>	TF	0			3	2.79	0.09	7	2.60	0.16	3	2.59	0.12	4	3.06	1.21	8	7.86	2.14	4	81.08	31.18	0			1	16.10	
<b>BES</b>	GC	5	1.56	0.85	13	2.95	0.12	10	2.38	0.22	9	2.58	0.17	10	8.44	4.20	5	2.01	1.17	0			8	56.85	3.41	3	54.33	2.18
<b>FON</b>	GC	6	0.47	0.16	19	2.65	0.08	16	2.52	0.12	16	2.57	0.07	16	2.73	1.65	11	19.97	3.14	1	46.00		8	9.80	0.74	4	15.56	1.65
<b>IGNS</b>	GC	0			3	2.30	0.04	3	1.38	0.02	3	1.80	0.01	3	30.62	1.05	0			0			6	78.07	1.31	4	34.75	0.93
<b>LPS negro</b>	GC	5	0.92	0.46	10	2.44	0.07	11	1.45	0.08	11	1.87	0.08	11	28.96	2.34	5	1.98	0.24	0			8	57.32	3.09	2	31.77	0.04
<b>LPS rojo</b>	GC	5	2.81	0.83	12	1.96	0.08	12	1.25	0.09	12	1.62	0.06	12	29.97	4.95	5	1.82	0.50	0			8	62.65	1.54	4	30.64	2.82
<b>TOTAL</b>		36			94			92			87			89			51			17			73			25		

\*(L) limpieza superficial [UNE 146130]; ( $\rho_a$ ) densidad aparente de partículas [EN 1097-6]; ( $\rho_{rd}$ ) densidad de partículas secadas en estufa [EN 1097-6]; ( $\rho_{ssd}$ ) densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente [EN 1097-6]; (WA<sub>24</sub>) absorción de agua tras 24 h [EN 1097-6]; (FI) índice de lasjas [EN 933-3]; (C<sub>c</sub>) partículas con más del 50% de aristas vivas [EN 933-5]; (M<sub>DE</sub>) coef. Micro-Deval [EN 1097-1]; (LA) coef. Los Ángeles [EN 1097-2]. (N) Número de muestras ensayadas; ( $\bar{X}$ ) valor promedio; (Ds) desviación estándar.

Tabla 3.13 Numero de ensayos, valor promedio y desviación estándar de las propiedades estudiadas sobre áridos (Fracción 10/20 mm)

Litotipo	Isla	L (%)		$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )		$\rho_{rd}$ (g/cm <sup>3</sup> )		$\rho_{ssd}$ (g/cm <sup>3</sup> )		WA <sub>24</sub> (%)		FI (%)		Cc (%)		M <sub>DE</sub>		LA											
		N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds							
<b>BOPV</b>	GC	5	0.72	0.14	14	2.90	0.05	14	2.59	0.12	14	2.70	0.09	14	4.5	1.7	5	3.67	1.17	5	44.30	17.37	8	15.30	2.37	5	31.29	4.05	
<b>BOPV</b>	GC	5	0.58	0.15	5	2.97	0.02	5	2.61	0.05	5	2.74	0.04	5	5.0	0.6	5	8.60	3.75	5	68.26	9.40	8	27.63	2.49	5	36.52	1.09	
<b>BOPV</b>	GC	5	1.25	0.38	6	2.87	0.06	6	2.52	0.11	6	2.67	0.09	6	6.0	1.8	5	4.07	2.21	5	53.23	11.32	8	11.68	2.07	5	32.02	3.89	
<b>BOPV</b>	EH	2	0.41	0.14	5	2.96	0.06	5	2.47	0.20	5	2.63	0.15	5	6.4	2.4	3	5.10	3.12	1	54.33					3	20.44	0.70	
<b>BOPV</b>	FV	2	0.36	0.14	4	2.76	0.05	4	2.21	0.06	4	2.42	0.05	4	9.2	0.8	2	2.48	0.19	2	62.34	0.04	8	13.61	0.77	4	19.77	0.44	
<b>BOPM</b>	GC	5	0.56	0.28	12	3.10	0.04	13	2.98	0.14	12	3.06	0.13	14	1.9	1.3	5	10.70	1.73	5	90.26	2.34	8	20.50	1.32	14	14.68	4.91	
<b>BOPM</b>	GC	0			6	2.77	0.02	6	2.58	0.03	6	2.70	0.02	6	4.7	0.9	0				0			12	53.94	4.51	11	31.84	4.36
<b>BAFM</b>	TF	0			2	2.54	0.01	6	2.50	0.21	2	2.40	0.08	4	2.8	0.8	9	6.60	2.12	9	83.89	15.10	0			5	17.88	2.93	
<b>BES</b>	GC	5	1.89	1.02	10	2.69	0.12	10	2.01	0.08	10	2.27	0.07	10	13.0	1.9	5	3.02	1.02	5	51.57	21.48	8	34.00	4.65	6	42.04	2.93	
<b>FON</b>	GC	5	0.43	0.27	13	2.61	0.07	12	2.57	0.09	12	2.59	0.03	13	1.6	1.3	12	13.48	2.71	7	78.53	10.12	9	6.36	1.41	8	12.04	2.41	
<b>IGNS</b>	GC	0			2	2.05	0.03	2	1.34	0.14	2	1.70	0.05	2	27.6	9.6	0				0			8	74.03	1.86	4	34.75	0.93
<b>LPS negro</b>	GC	4	0.71	0.31	6	2.14	0.13	6	1.41	0.04	6	1.75	0.04	6	23.9	3.4	4	3.81	1.97	4	71.51	9.88	8	25.83	0.86	5	36.81	1.84	
<b>LPS rojo</b>	GC	5	1.25	0.66	15	1.99	0.11	15	1.43	0.11	15	1.72	0.09	15	20.3	3.5	5	3.47	0.72	5	64.71	21.29	8	29.25	1.24	4	46.91	1.44	
<b>TOTAL</b>			43		100			104			99			104		60			53			93				79			

\*(L) limpieza superficial [UNE 146130]; ( $\rho_a$ ) densidad aparente de partículas [EN 1097-6]; ( $\rho_{rd}$ ) densidad de partículas secadas en estufa [EN 1097-6]; ( $\rho_{ssd}$ ) densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente [EN 1097-6]; (WA<sub>24</sub>) absorción de agua tras 24 h [EN 1097-6]; (FI) índice de lajas [EN 933-3]; (Cc) partículas con más del 50% de aristas vivas [EN 933-5]; (M<sub>DE</sub>) coef. Micro-Deval [EN 1097-1]; (LA) coef. Los Ángeles [EN 1097-2]. (N) Número de muestras ensayadas; ( $\bar{X}$ ) valor promedio; (Ds) desviación estándar.

Adicionalmente en la [Tabla 3.15](#) se ofrecen los valores obtenidos de las propiedades de rocas analizadas, organizadas según litotipo y grado de alteración, clasificadas de I a III, siendo I una roca sana y III un estado moderadamente alterado, según la clasificación establecida por la *International Society for Rock Mechanics* (Brown e ISRM, 1981), recogida en la [Tabla 3.14](#).

Tabla 3.14 Clasificación de la meteorización según el ISRM (Brown e ISRM, 1981)

Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Roca sana	No se observan signos visibles de meteorización en la roca. Quizás una decoloración leve sobre las superficies de las mayores discontinuidades.
II	Levemente meteorizada	Se presenta decoloración en la roca y en las superficies de discontinuidad. La roca puede estar decolorada totalmente por la meteorización y puede estar externamente algo más débil que en su condición sana.
III	Moderadamente meteorizada	Menos de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La roca sana o decolorada se puede presentar como capas o testigos continuos.
IV	Muy meteorizada	Más de la mitad de la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La roca sana o decolorada se puede presentar como capas testigos discontinuos.
V	Completamente meteorizada	Toda la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La estructura original del macizo rocoso aún se mantiene en gran parte intacta.
VI	Suelo residual	Toda la roca está convertida a suelo. La estructura del macizo rocoso y la fábrica del material están destruidas. Existe un gran cambio de volumen, sin embargo, el suelo no ha sido transportado significativamente.

Tabla 3.15 Numero de ensayos, valor promedio y desviación estándar de las propiedades estudiadas sobre roca.

Litotipo	Grado de alteración	Color	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )			UCS (MPa)		
			N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds
BOPV	I	Gris	105	2.58	0.16	29	36.63	30.06
BOPV	II	Gris	42	2.26	0.21	5	8.70	2.19
BOPM	I	Negro	86	3.16	0.07	20	124.67	32.75
BOPM	III	Gris	44	2.72	0.11	7	39.21	18.78
BPLM	I	Gris	2	2.97	0.07	1	122.71	
BAFV	II	Gris	3	2.42	0.08	2	26.76	1.43
BAFM	I	Gris	8	2.96	0.11	7	110.57	55.95
BAFM	II	Gris	2	2.64	0.32	1	130.27	
BES	I	Rojo				2	65.08	80.92
BES	III	Rojo	34	2.39	0.09	10	18.30	6.63
TRQB	I	Gris	2	2.21	0.44	2	60.98	57.06
TRQ	I	Gris	3	2.35	0.06	3	79.49	38.82
FON	I	Gris	6	2.37	0.23	24	126.51	69.08
IGS	I	Verde	9	2.49	0.06	13	52.71	25.86
IGS	I	Blanco	3	2.19	0.12	3	19.62	6.50
IGS	I	Rojo	23	1.88	0.20	3	7.67	3.79
IGS	I	Verde	58	2.36	0.02	14	81.06	25.55
IGNS	I	Beige	3	1.52	0.46	7	18.51	21.97
LPT	I	Negro	102	1.64	0.28	14	20.76	7.12
LPT	I	Rojo	66	1.44	0.05	16	6.84	1.76
<b>TOTAL</b>			<b>643</b>			<b>217</b>		

( $\rho_a$ ) densidad aparente de la roca [EN-1936]; (UCS) resistencia a compresión uniaxial [EN-1926]. (N) Número de muestras ensayadas; ( $\bar{X}$ ) valor promedio; (Ds) desviación estándar.

### 3.5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

---

Con el fin de ofrecer unos valores de referencia que puedan ser universales y que sirvan de guía para futuros trabajos y posibles aplicaciones dentro del sector de la construcción, se han promediado los valores para cada litotipo de todas sus fracciones granulométricas. A cada litotipo se le ha asignado un grado de alteración correspondiente con el de la roca matriz. En la [Tabla 3.16](#) se ofrece el resumen de estos valores para los que se han tenido en cuenta los valores aportados por los informes del *Servicio de Calidad y Tecnología de la Edificación y Obras Públicas del Gobierno de Canarias* y la bibliografía de referencia ([Anexo I](#) y [Tabla 3.17](#)). Estos datos suman alrededor de 460 valores distribuidos por litotipos y propiedades.

Con respecto a los valores obtenidos de los áridos marginales destacamos el comportamiento del litotipo BOPV, por ser como ya hemos visto uno de los litotipos más frecuentes y abundantes en las canteras de áridos ([Tabla 3.4](#)). Se han analizado y comparado sus valores característicos con respecto a la normativa española de la construcción y frente a dos litotipos comerciales de diferente naturaleza (sálica y básica) pero ambos masivos ([Tabla 3.18](#)). Observamos que si bien el BOPV cumple ciertos aspectos de la normativa de carreteras que hacen que su uso más idóneo sea el de capas granulares, también es posible su aprovechamiento para mezclas bituminosas con un adecuado tratamiento. Se puede apreciar que el aspecto más crítico del árido BOPV es el referido a la angulosidad del árido ( $C_c$ ) puesto que, debido a su porosidad, sus superficies son alveolares, dificultando la obtención de áridos con caras de fractura. Este aspecto que a priori consideramos como un inconveniente puede contribuir a que haya un mayor rozamiento entre las partículas y, por tanto, aporte resistencia al esqueleto mineral del firme gracias a la rugosidad superficial de las partículas. En cuanto al aspecto de la fragmentación del árido (LA), los valores obtenidos se encuentran próximos al cumplimiento de las especificaciones. Con todo lo dicho, podemos considerar la utilización del BOPV en capas de pavimento de firmes si introducimos adiciones que ayuden a mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas resultantes. Este aspecto será objeto de estudio en capítulos posteriores, analizando el efecto de la introducción de polímeros de tipo plástico y de tipo elástico en el conjunto de la mezcla asfáltica.

Tabla 3.16 Resumen de características de los áridos volcánicos analizados según litotipo y estado de alteración.

Litotipo	Alteración	Color	$\rho_{rd}$ (g/cm <sup>3</sup> )			WA <sub>24</sub> (%)			FI			C <sub>c</sub>			M <sub>DE</sub>			LA			F <sub>A</sub>			SE(10)		
			N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds	N	$\bar{X}$	Ds
BOPV	I	Gris	59	2.45	0.42	59	8.7	10.9	32	6	4	26	56	15	43	20	8	28	28	7	17	26	6	22	76	12
BOPM	I	Gris	52	2.80	0.20	62	2.88	1.68	22	16	7	16	87	8	16	22	2	34	17	6	11	28	6	14	75	13
BOPM	III	Gris	24	2.49	0.09	24	6.39	1.63	3	7	1				28	60	7	11	32	4						
BAFM	I	Gris	21	2.56	0.20	12	3.54	2.69	17	7	2	13	83	20				6	14	7				8	75	7
BES	III	Rojo	30	2.39	0.39	30	9	5	10	3	1	5	52	21	16	45	12	9	46	7	8	17	3	10	97	1
TRQB	I	Gris	2	2.68	0.02	2	2.72	0.49										2	33	16						
TRQ	I	Gris	3	2.50	0.12	3	2.50	0.85				2	82	0	1	77		4	32	12						
FON	I	Gris	69	2.55	0.11	71	2	1	40	21	8	12	72	13	22	11	6	34	18	7	8	24	1	20	77	8
IGS	I	Verde															4	36	9							
IGNS	I	Beige	7	1.42	0.11	7	28	5							14	76	3	10	39	9	6	55	6			
LPS	I	Negro	45	1.48	0.38	41	20	9	10	3	1	5	65	21	16	46	17	8	39	9	8	12	1	10	99	2
LPS	I	Rojo	27	1.79	0.52	27	20	10	9	3	2	4	72	10	16	42	16	7	35	3	8	15	1	10	93	4
<b>TOTAL</b>			<b>339</b>			<b>338</b>			<b>143</b>			<b>83</b>			<b>172</b>		<b>159</b>		<b>66</b>				<b>94</b>			

( $\rho_{rd}$ ) densidad de la muestra secada estufa [EN-1936]; (WA<sub>24</sub>) absorción de agua tras 24 h [EN-1936]; (FI) índice de lajas [EN 933-3]; (C<sub>c</sub>) partículas con más del 50% de aristas vivas [EN 933-5]; (M<sub>DE</sub>) coef. Micro-Deval [EN 1097-1]; (LA) coef. Los Ángeles [EN 1097-2]; (F<sub>A</sub>) Friabilidad de las arenas [UNE 83-115]; (SE(10)) Equivalente de arena [EN 933-8]. (N) Número de muestras ensayadas; ( $\bar{X}$ ) valor promedio; (Ds) desviación estándar.



Tabla 3.17 Referencias bibliográficas de las propiedades de rocas volcánicas

Ref. bibliográfica	Litotipo	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	WA <sub>24</sub> (%)	UCS (MPa)	LA
Hernández Gutiérrez <i>et al.</i> (2008)	BOPV	1.80			38	31
	BOPM	2.99			98	29
	BPLV	2.59			55	39
	BPLM	2.18			36	43
	BAFV	1.83			28	30
	BAFM	2.71			127	19
	BES	2.87			122	37
	BES	1.81			8	78
	TRQB	2.52			101	21
	TRQB	1.90			21	44
	TRQ	2.41			94	49
	TRQ	2.31			109	33
	TRQ	2.32			36	80
	FON	2.63			146	19
	FON	2.59			224	19
	FON	2.56			131	26
	FON	2.66			148	32
	FON	-			64	28
	FON	-			25	46
	FON	-			283	19
	IGS	2.24			50	29
	IGS	2.05			43	44
	IGS	1.72			22	42
	IGS	2.43			92	27
IGNS	1.26			5	52	
IGNS	1.34			8	58	
Santana <i>et al.</i> (2014)	FON verde		2.58	1.00	54	
	IGS verde		2.56	3.00	96	
	IGS Roja		2.49	18.00	6	
	IGNS (Pumítica)		1.99	28.00	5	
Rodríguez-Peces <i>et al.</i> (2013)	FON verde		1.99		62	
	FON verde		2.17		108	
	IGS verde		2.46	9.00	29	
	IGNS (Pumítica)		1.08		8	
	IGNS (Pumítica)		1.49		24	
	IGS Roja		1.50		5	
	IGS Roja		1.55		12	
GETCAN-011	BOPV I				33	
	BOPV I				33	
	BOPV				9	
	BOPM I				108	
	BOPM III				149	
	FON				146	

Ref. bibliográfica	Litotipo	$\rho_a$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_r$ (g/cm <sup>3</sup> )	WA <sub>24</sub> (%)	UCS (MPa)	LA
	FON				224	
	FON				87	
	FON				146	
	FON				137	
	FON				83	
	FON				283	
	FON				86	
	FON				137	
	FON				118	
	FON				137	
	IGNS (Pumítica)				66	
	IGNS (Pumítica)				14	

( $\rho_a$ ) densidad aparente de la muestra [EN-1936]; ( $\rho_r$ ) densidad de la muestra secada estufa [EN-1936]; (WA<sub>24</sub>) absorción de agua tras 24 h [EN-1936]; (UCS) resistencia a compresión uniaxial [EN-1926]; (LA) coef. Los Ángeles [EN 1097-2].

Tabla 3.18 Comparativa de los valores del BOPV analizado con respecto a otros áridos comerciales y a los valores de referencia de las especificaciones españolas de la construcción.

Propiedad	L %	$\rho_{rd}$ g/cm <sup>3</sup>	WA <sub>24</sub> %	FI %	C <sub>c</sub> %	LA	SE(10) %	F <sub>A</sub>
PG3 Art. 542: Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso	<0.5	2.65*	-	<30	>70	<25	>55	-
PG3 Art. 543: Mezclas bituminosas drenantes y discontinuas	<0.5	2.65*	-	<25	>70	<25	>55	-
PG3 Art.510: Zahorras	<1	-	-	<35	>50	<35	>30	-
PG3 Art. 330: Terraplenes	0.5<L<2			8.8<FI<51			20<SE(10)<50	10<Fr<35
EHE 08 Art.28: Áridos	-	-	<5	<35	-	<40	>70	-
EHE 98 Art.28: Áridos	-	-	<5	<35	-	<40	>75	<40
BOPV	0.72	2.58	4.47	4	55	33	65	25
BOPM	0.56	2.93	2.55	16	87	17	75	28
FON	0.45	2.58	2.16	17	78	14	76	24

(L) coef. de limpieza [EN-1936]; ( $\rho_{rd}$ ) densidad de la muestra secada estufa [EN-1936]; (WA<sub>24</sub>) absorción de agua tras 24 h [EN-1936]; (FI) índice de lajas [EN 933-3]; (C<sub>c</sub>) partículas con más del 50% de aristas vivas [EN 933-5]; (LA) coef. Los Ángeles [EN 1097-2]; (SE(10)) Equivalente de arena [EN 933-8]; (F<sub>A</sub>) Friabilidad de las arenas [UNE 83-115].

\*Valor de referencia para determinar el contenido mínimo de ligante.

### 3.5.1.1 Propiedades intrínsecas de los áridos

Paralelamente se han establecido una serie de relaciones entre las propiedades intrínsecas y las propiedades resistentes de los áridos y éstas con las propiedades de la roca matriz, con el fin de analizar si existe vinculación entre dichas propiedades y si es posible determinar los valores de unas a partir de otras.

En la Fig. 3.16 se han representado los valores promedio de la densidad aparente y la densidad de partículas secadas en estufa en función de cada litotipo. Como puede apreciarse existe una diferencia notable entre un valor u otro en el caso de los materiales piroclásticos y vacuolares, siendo superior la densidad aparente. Esta diferencia es atribuible al porcentaje de agua absorbido en cada caso, debido a las porosidades de estos últimos litotipos.

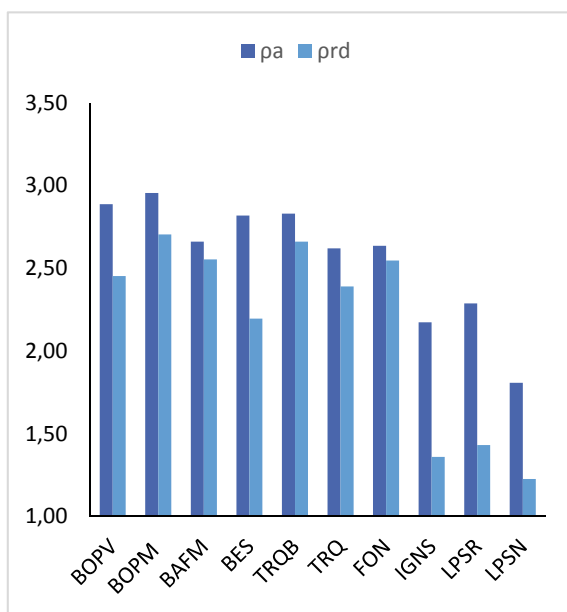


Figura 3.16 Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ) y densidad aparente del árido ( $\rho_a$ ) de cada litotipo analizado

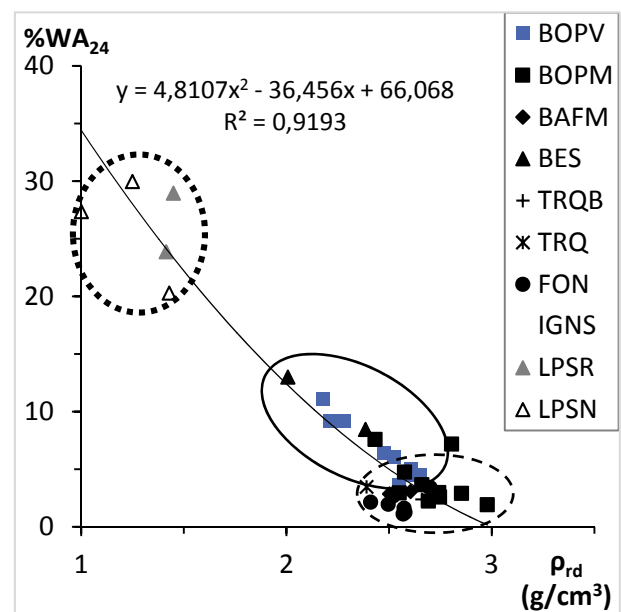


Figura 3.17 Absorción de agua ( $WA_{24}$ ) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ )

\*En la Fig.3.17 la línea discontinua agrupa los litotipos masivos, la línea continua los litotipos vacuolares y la línea de puntos los litotipos piroclásticos.

Con objeto de establecer relaciones entre las diferentes propiedades de los áridos, se ha optado por comparar el comportamiento de cada característica con respecto a la densidad de las partículas secadas en estufa en las fracciones gruesas (10/20 y 4/10 mm). Esta decisión se basa en que estamos ante materiales porosos en los que se debe tener en cuenta la cantidad de huecos accesibles que presentan. En la fracción 0/4 mm, al tratarse de partículas finas con apenas poros y debido a que el estado de saturación de las partículas depende del observador y del proceso de secado, los resultados de la densidad de las partículas secadas en estufa por el método del picnómetro son poco fiables. Por tanto, para esta fracción se emplearán los valores de la densidad aparente para establecer posibles relaciones.

El porcentaje de absorción de agua, que puede considerarse proporcional a la porosidad del árido, frente a la densidad de partículas secadas en estufa del árido se analiza en la Fig. 3.17. En

esta gráfica pueden distinguirse tres grupos diferenciados: los piroclastos, marcados en línea de puntos; los materiales vacuolares, en la zona intermedia señalados con línea continua; y los materiales masivos, en la zona baja marcados con línea discontinua. La tendencia observada es decreciente, es decir, cuanto mayor es la densidad del material menor es la absorción de agua. El ajuste de la función polinómica ( $R^2$ ) es bueno pese a que en la parte alta de la línea de tendencia exista gran dispersión en los resultados. Esto es debido a la heterogeneidad de los materiales estudiados, siendo los piroclastos los que mayor variabilidad presentan por su alto contenido en huecos y su composición mineralógica (sálicos frente a basálticos).

En cuanto a la valoración de la densidad de los basaltos vacuolares (BOPV), objeto de esta parte de la tesis, se observa que el valor de la densidad de las partículas secadas en estufa se sitúa próxima a la de los litotipos masivos siendo algo inferior ( $2.45 \text{ g/cm}^3$  frente a  $2.55 \text{ g/cm}^3$ ) y su absorción es ligeramente superior (+5%). En líneas generales puede decirse que su densidad es adecuada pero su absorción condicionará un mayor consumo de ligante con respecto a otros áridos convencionales y conducirá a una menor densidad aparente de la mezcla.

### *3.5.1.2 Propiedades geométricas del árido*

En las Fig. 3.18 y 3.19 se analiza la posible relación entre la densidad de partículas secadas en estufa y sus propiedades geométricas. Como se observa no es posible establecer una línea de tendencia debido a la heterogeneidad en la naturaleza de los materiales volcánicos. Sin embargo, sí es posible establecer unos límites acordes a las especificaciones de carreteras (PG-3) que nos permite observar que ciertos litotipos (en concreto los piroclásticos y vacuolares) cumplen con estas especificaciones .

En el gráfico del índice de lajas los valores próximos a 0 indican un bajo contenido en lajas del material, mientras que en el gráfico de las caras de fractura, los valores bajos indican un menor contenido de partículas trituradas frente a una mayor presencia de partículas redondeadas.

La presencia de materiales lajosos favorece la aparición de fracturas en el material, pudiendo provocar hundimientos en los pavimentos de carreteras. Esto es debido a que las partículas con forma de lajas y agujas se rompen con facilidad durante la compactación e incluso bajo la acción del tráfico, modificando la granulometría del árido y provocando una redistribución de las partículas del esqueleto mineral (López Jimeno, 1994).

Así pues, observamos que con respecto al índice de lajas (Fig. 3.18), los áridos menos densos, correspondientes con los piroclastos (BES, LPS) y vacuolares (BOPV) presentan un menor contenido de lajas que los materiales masivos (FON, BOPM) pero, por el contrario, en el contenido de partículas trituradas (Fig. 3.19) los materiales piroclásticos y vacuolares están por debajo del límite recomendable.

Estas dos características están relacionadas con la fábrica del material, es decir con la distribución espacial de sus componentes (huecos y minerales). Los litotipos masivos proceden de coladas lávicas en las que el material se estructura en finas bandas que definen una fábrica anisótropa con unos planos de debilidad paralelos, a favor de los cuales se rompen los clastos, dando lugar a fragmentos angulosos durante el proceso de machaqueo. Mientras que los litotipos piroclásticos (BES, LPS) y vacuolares (BOPV) procedentes de erupciones explosivas caracterizadas por una mayor existencia de gases (Vergnolle y Mangan, 2000), son materiales

que, de modo natural, tienen una estructura porosa isótropa que en el proceso de molienda da lugar a planos de fractura irregulares y, por tanto, a la aparición de partículas redondeadas.

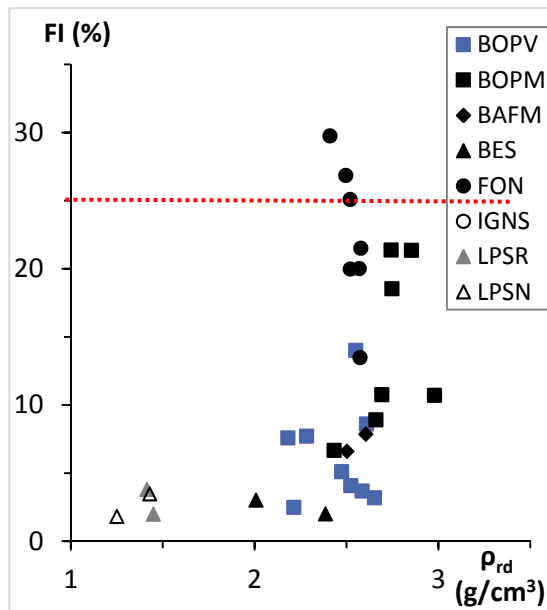


Figura 3.18 Índice de lasjas (FI) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ )

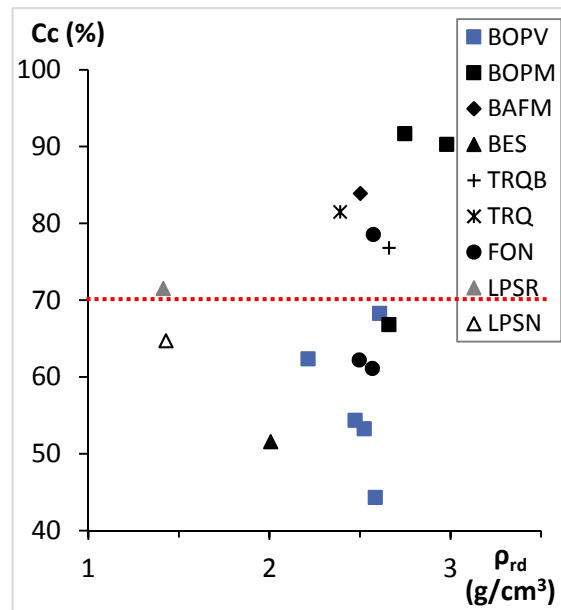


Figura 3.19 Porcentaje de partículas trituradas (Cc) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ )

\*En línea discontinua se representan los valores de referencia exigidos en la norma española de carreteras (PG-3) (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014)

Los basaltos vacuolares (BOPV) tienen un contenido de lasjas adecuado, no siendo así en el caso de las caras de fractura. Estos áridos debido a su porosidad, como ya hemos visto, no definen planos definidos de fractura pero tampoco pueden considerarse como redondeados debido a su estructura amorfa y superficie rugosa. Esta circunstancia contribuirá al rozamiento interno de la estructura mineral del firme y a aportar cierta resistencia mecánica al mismo.

En estudios previos se demostró que las propiedades relacionadas con la forma del árido está relacionada con los medios de machaqueo empleados en las plantas de fabricación de áridos (Kamani y Ajalloeian, 2020). En este sentido, la mayoría de las muestras analizadas se obtuvieron del machaqueo con trituradoras de mandíbulas, lo cual explicaría el alto contenido de lasjas de las rocas más masivas (fonolitas, FON y basaltos masivos, BOPM).

En la Fig. 3.20 se analiza el contenido de arenas de la fracción fina (0/4 mm). En este caso se relaciona la densidad aparente del árido con el valor del equivalente de arena. En términos generales, el porcentaje de finos aumenta cuanto más masivo es el material, es decir, el equivalente de arena es menor. En principio, cabría esperarse una mayor proporción de finos en los materiales más porosos. Sin embargo, los piroclastos ensayados (LPS, BES) son áridos naturales que no han sufrido machaqueo. Esto sugiere que la molienda genera un residuo de polvo que se acumula en la fracción fina. Además, un porcentaje de finos podría estar relacionado con aportes eólicos de la propia cantera. Por este motivo, esta propiedad no

depende tanto de las propiedades intrínsecas del material sino de los procesos de fabricación del árido.

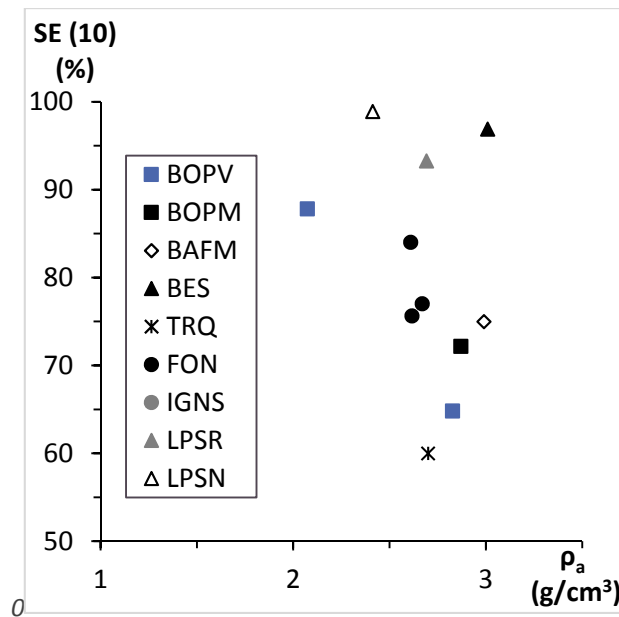


Figura 3.20 Equivalente de arena (SE (10)) vs. Densidad aparente del árido ( $\rho_a$ )

Con respecto al BOPV, el contenido de arenas es alto, situándose por encima del límite recomendable (SE (10) > 55). Por tanto, su uso será adecuado al no aportar excesivos finos a la mezcla.

### 3.5.1.3 Propiedades mecánicas del árido

En cuanto al análisis de la resistencia de los áridos recurrimos a los parámetros de desgaste por fragmentación y abrasión: Los Ángeles (LA), Micro Deval ( $M_{DE}$ ) y Friabilidad (SF). Coeficientes superiores a 30-40 corresponden a áridos de mala calidad, no aptos para la construcción de capas de firme. Coeficientes inferiores a 25 corresponden a áridos con resistencia al desgaste suficiente para cualquier posible aplicación, y en particular, para capas de rodadura bituminosas que hayan de soportar tráfico pesado, conforme a las especificaciones del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

En la Fig. 3.21 se relaciona la densidad de partículas secadas en estufa con la resistencia a la fragmentación representada mediante el coef. de Los Ángeles y en la Fig. 3.22 se analiza la relación entre la densidad de partículas secadas en estufa con la resistencia al desgaste por abrasión, representada por el coef. de Micro Deval ( $M_{DE}$ ) de las fracciones gruesas de árido (10/20 y 4/10 mm). Se observa que el índice LA disminuye conforme aumenta la densidad de las partículas secadas en estufa. De forma análoga, el coef.  $M_{DE}$  también disminuye al aumentar la densidad del árido. En ambos casos, los materiales masivos (basaltos y fonolitas) ofrecen valores similares, exceptuando las muestras procedentes de afloramientos alterados (BOPM de La Aldea) similares a los de los materiales piroclásticos. Los valores de los materiales masivos

cumplen en la mayoría de los casos con la especificación del PG-3 ( $LA < 25$ ) y ( $M_{DE} < 25$ ). Por su parte, los materiales piroclásticos (BES, LPS, IGNS) ofrecen unos resultados muy dispersos y valores de los coef. de LA y  $M_{DE}$  que no cumplen, en general, las especificaciones. Las lavas vacuolares (BOPV) se sitúan en una posición intermedia, aunque presentan dispersión en sus resultados (cumpliendo con las especificaciones en algunos de los casos), por lo que su comportamiento mecánico en mezclas asfálticas es susceptible de mejora con la introducción de los polímeros como el caucho o el PET. Estos polímeros podrán rellenar los poros del material y aportarle consistencia, para ello las adiciones deberán incluirse en un tamaño inferior al tamaño medio de los poros del árido (2-8 mm).

Los resultados obtenidos concuerdan con las relaciones estadísticas establecidas entre el coeficiente de Los Ángeles, la absorción de agua, la densidad y la porosidad de los áridos del estudio realizado por [Khaleghi et al.](#) en 2019.

Para analizar la resistencia a la fragmentación de la fracción fina del árido (0/4 mm) recurrimos al índice de Friabilidad de las arenas ( $F_A$ ). En la [Fig. 3.23](#) el coef.  $F_A$  disminuye al aumentar la densidad aparente del árido. Los materiales masivos (BOPM, FON) ofrecen valores similares ( $F_A > 20$ ), mientras que los materiales vacuolares (BOPV) presentan una gran dispersión. A diferencia de las gráficas anteriores, los materiales piroclásticos basálticos (BES, LPS) ofrecen unos resultados muy inferiores a los que cabría esperar, por lo que se deduce que la friabilidad va a depender de la composición mineralógica del litotipo y no de la estructura del material. Los materiales con un mayor contenido en hierro ofrecerán una mejor resistencia a la fragmentación.

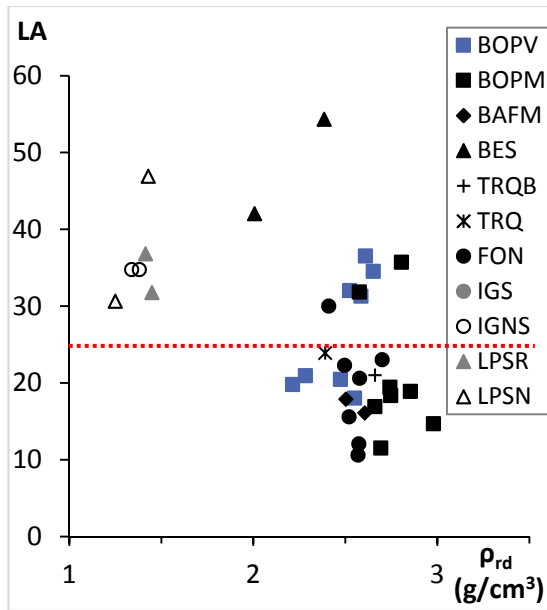


Figura 3.21 Coeficiente de desgaste de Los Angeles (LA) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ )

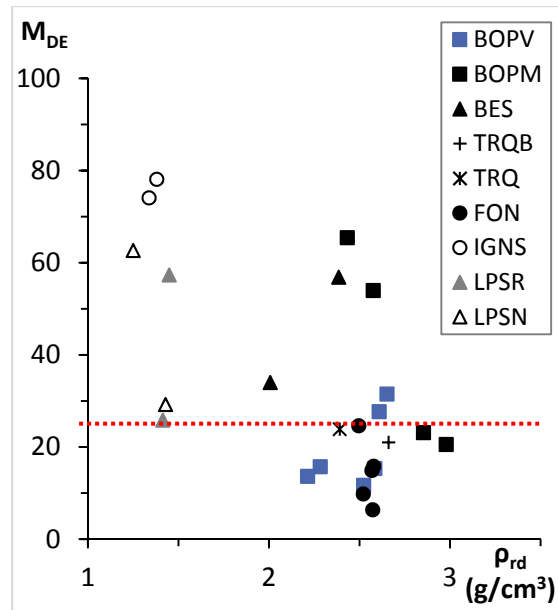


Figura 3.22 Coef. de abrasión por Micro-Deval ( $M_{DE}$ ) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ )

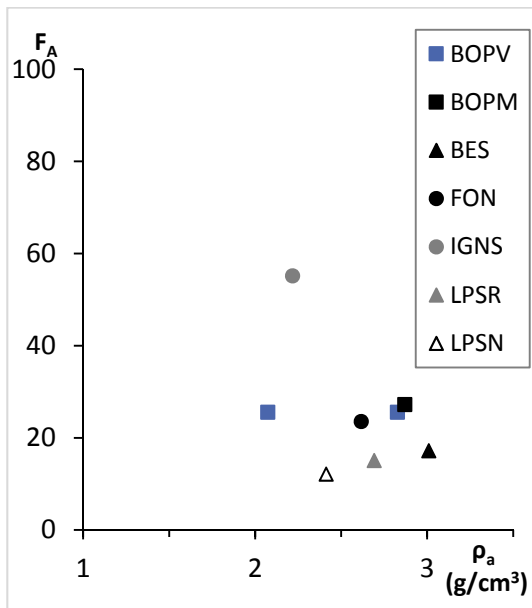


Figura 3.23 Coef. de friabilidad de las arenas ( $F_A$ ) vs. Densidad aparente del árido ( $\rho_a$ )

\*En línea discontinua se representan los valores de referencia exigidos en la norma española de carreteras (PG-3).



### 3.5.1.4 Propiedades de la roca matriz

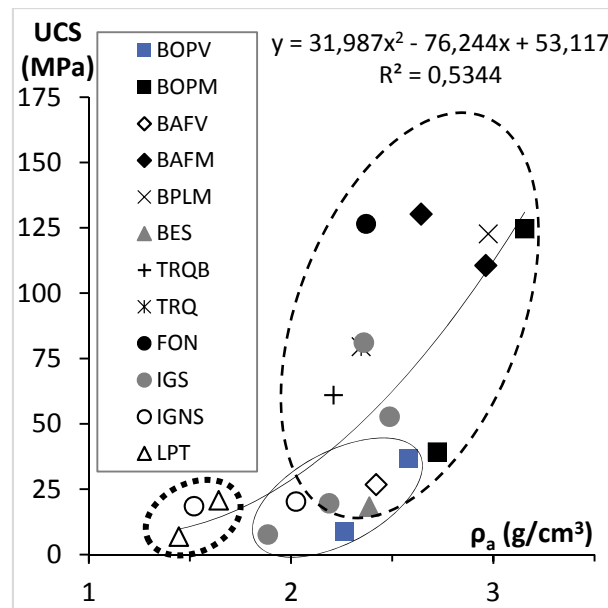


Figura 3.24 Resistencia a la compresión simple (UCS) vs. Densidad aparente de la roca ( $\rho_a$ )

\*En línea discontinua se agrupan los litotipos masivos, en línea continua los litotipos vacuolares y en línea de puntos los litotipos piroclásticos.

La relación entre la densidad aparente de la roca matriz y su resistencia a compresión simple se representa a través de la línea de tendencia de la Fig. 3.24. En este caso, cuanto mayor sea la densidad aparente, mayor será la resistencia a la compresión simple. Esto se traduce en que cuanto más compacta sea la fábrica mineral, más resistente resulta la roca matriz.

Se observa que existe una gran dispersión de la resistencia que ofrecen los litotipos con densidades superiores a  $\approx 2.3 \text{ g/cm}^3$ . La dispersión observada puede estar relacionada con varios factores: la estructura de la roca, el porcentaje de sílice contenida y el estado de alteración del material. Una estructura vacuolar ofrece peor resistencia que una estructura masiva, por la presencia de huecos que facilitan la propagación de fisuras y en consecuencia, la rotura. La presencia de sílice en las rocas volcánicas determina la existencia de enlaces atómicos fuertes y duraderos. Sin embargo, la estabilidad química de las rocas volcánicas frente a la alteración no depende solo de su composición química, sino que también está relacionada con la edad geológica de la roca. Un estado de alteración y un grado de alterabilidad bajos, permitirán ofrecer mayor resistencia a la roca.

### 3.5.1.1 Relación de las propiedades de los áridos y la roca matriz

#### Relación entre las propiedades intrínsecas

Como podemos observar en la Fig. 3.25 la densidad de partículas secadas en estufa es consecuencia directa de la densidad aparente de la roca matriz. Atendiendo al coeficiente de correlación lineal  $R^2$  podemos decir que el ajuste de la función es adecuado, pese a que en la

parte baja de la línea de tendencia exista mayor dispersión en los resultados. Esto es debido a la heterogeneidad de los materiales estudiados, siendo los piroclastos los que mayor variabilidad presentan por su composición mineralógica (sálicos frente a basálticos) y su alto contenido en huecos. Esta circunstancia también puede ser observada en los piroclastos (IGNS, LPS, BES) de las Fig. 3.16 y 3.17.

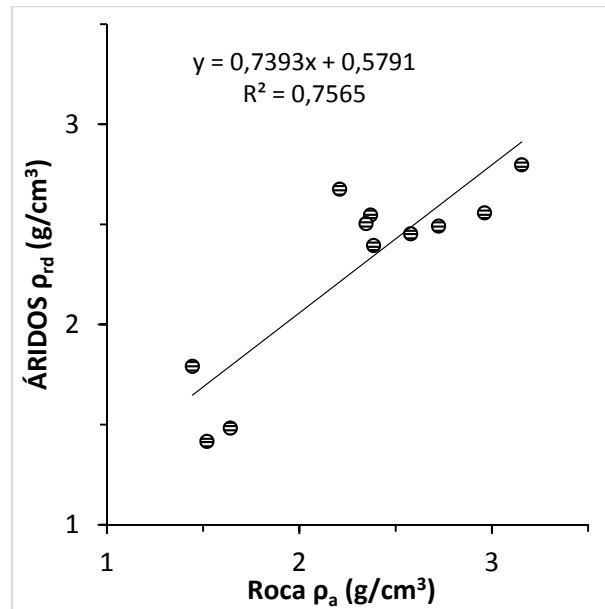


Figura 3.25 Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ) vs. Densidad aparente de la roca matriz ( $\rho_a$ ).

#### Relación entre las propiedades resistentes

En la Fig. 3.26 se relaciona el coef. de Los Ángeles de los áridos con la resistencia a compresión simple de la roca matriz. A priori, cuanto mayor es el valor de resistencia a compresión UCS, menor es el coef. LA, lo que se traduce en una mayor resistencia a la fragmentación. Parece lógico que la resistencia a la fragmentación vaya pareja a la resistencia a la compresión. Si bien, es cierto que en el equipo de LA se aplica una carga dinámica y puntual, mientras que la carga de la prensa es estática y uniformemente repartida. El hecho de que las dos resistencias (al desgaste y a la compresión) muestren una correlación directa sugiere que ambas dependen de la misma propiedad intrínseca: la porosidad. Las rocas o áridos masivos presentan un mejor comportamiento mecánico debido a la ausencia de poros que favorezcan la aparición de microfisuras que debiliten la estructura interna del material.

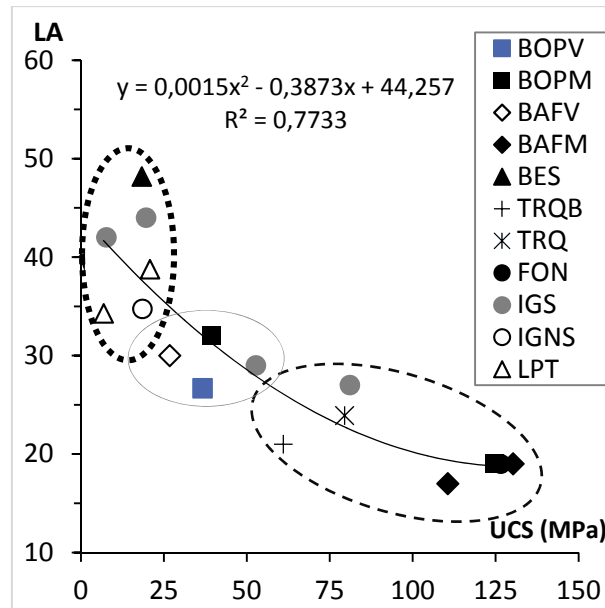


Figura 3.26 Coef. de desgaste de Los Ángeles del árido (LA) vs. Resistencia a compresión uniaxial de la roca (UCS)

\*En línea discontinua negra se agrupan los litotipos masivos, en línea fina continua los litotipos vacuolares y en línea de puntos los litotipos piroclásticos.

### 3.6 CONCLUSIONES

De esta parte del trabajo pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- **Se detectan tres comportamientos diferenciados** en cuanto a la aplicación de los áridos volcánicos en carreteras: el de los áridos **masivos**, el de los **vacuolares** y el de los **piroclastos**.
- La **amplia dispersión** de los resultados refleja que los áridos volcánicos presentan una **gran heterogeneidad**, siendo **más uniformes los resultados en los áridos masivos**.
- La **variabilidad** de los resultados está **asociada tanto a los procesos de explotación y machaqueo de los áridos como a la distribución espacial** aleatoria y discontinua de las coladas lávicas, las diferentes viscosidades del magma y el grado de explosividad de los procesos eruptivos.
- La **resistencia** de los materiales está **relacionada con la composición y la porosidad** de los mismos. Pero **también es una cuestión vinculada al grado de alteración** de los materiales.
- Existe una **relación directa entre las propiedades intrínsecas y resistentes de la roca con el árido**, por ejemplo entre sus densidades. También, **es posible estimar el índice de LA a partir de la UCS** de la roca matriz.
- Los **áridos masivos** ofrecen **excelentes propiedades para su uso en pavimentos de carreteras** ya que ofrecen ciertas garantías en cuanto a su densidad, absorción, forma y resistencia.

- Los **basaltos vacuolares y escoriáceos** presentan una **elevada porosidad**, asociada a la rápida velocidad de descompresión y enfriamiento que experimentan las coladas. Esto se traduce en que las partículas de los áridos presentan un **alto índice de absorción y un bajo contenido en caras de fractura**, además de ser **más susceptibles a los procesos de alteración** por agentes externos. Por este motivo **su uso es más recomendable en capas de base** (con tratamientos previos), que en capas de rodadura.
- Los **piroclastos sólo son recomendables para su uso en capas granulares** como rellenos ligeros y/o drenantes, en la formación de explanadas de firme, **o para su uso en hormigones aligerados** debido a su baja densidad y elevada porosidad.
- Los **basaltos vacuolares (BOPV) analizados** para el desarrollo de mezclas bituminosas con polímeros, **presentan una densidad, resistencia y contenido de finos adecuado**. Por el contrario, el **bajo porcentaje de caras de fractura y la elevada absorción de sus partículas**, ambos relacionados con la porosidad, hacen pensar que a priori el BOPV **no resulte apto para su uso en capas de firme**. Sin embargo, **la irregularidad y rugosidad que presentan las superficies de las partículas de este árido contribuyen al rozamiento interno entre partículas**. Por tanto, lo que **se intentará mediante la adición de polímeros será introducir mejoras mecánicas en la mezcla bituminosa que permitan aprovechar este material marginal**.

Tabla 3.19 Valores promedio del BOPV de la cantera de la Isleta con respecto a las prescripciones de la normativa de carreteras española PG-3

Propiedad		Uds.	Promedio	Límites PG-3
Limpieza	L	%	0.72	<0.5
Densidad de partículas secadas en estufa	$\rho_{rd}$	g/cm <sup>3</sup>	2.58	2.65*
Absorción	WA <sub>24</sub>	%	4.47	<5**
Lajas	FI	%	4	<30
Caras de fractura	C <sub>c</sub>	%	55	>75
Los Ángeles	LA		33	<30
Eq. arena	SE(10)		65	>50

\*Valor de referencia para determinar el contenido mínimo de ligante (PG-3).

\*\* Valor práctico habitual (Pavement Interactive, s.f.)

## 4 DESARROLLO DE MEZCLAS CON BETÚN CAUCHO Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS

---

### 4.1 INTRODUCCIÓN

---

El procedimiento de diseño de las mezclas bituminosas (MB) debe ser un proceso sostenible que garantice el correcto funcionamiento de las mezclas a lo largo de toda su vida útil. Su fabricación, su puesta en servicio, su mantenimiento y su recuperación deben estar sujetos a técnicas y procedimientos que permitan no sólo alargar el ciclo de vida de las capas de firme sino que además permitan reducir los costes de fabricación y mantenimiento de los mismos. En este sentido, el uso de materiales locales, la reutilización o el reciclado de desechos y el empleo de técnicas de bajo consumo que contribuyan a reducir el volumen de residuos, consumos energéticos y emisiones contaminantes, son aspectos fundamentales para lograr que las mezclas cumplan con el fin de la sostenibilidad. Para cumplir con estos requisitos el proceso de diseño puede dividirse en 4 fases de ensayos:

1. Caracterización de los componentes de las mezclas
2. Dosificación y estudio de propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas
3. Análisis del comportamiento mecánico estático de las mezclas bituminosas
4. Análisis del comportamiento mecánico dinámico de las mezclas bituminosas

La caracterización de los componentes de una MB se centra en el estudio de las propiedades de los áridos (densidad, absorción, forma, granulometría y resistencias) y el carácter reológico del ligante (penetración, punto de reblandecimiento, ductilidad, etc.) Una correcta caracterización de los componentes de la mezcla nos permitirá seleccionar los materiales más adecuados y tener en cuenta sus ventajas e inconvenientes.

En el capítulo anterior ya analizamos la importancia de los áridos volcánicos en Canarias y más concretamente de los áridos volcánicos marginales, refiriéndonos como tales a los áridos vacuolares o escoriáceos. Estos áridos pese a su abundancia y accesibilidad en los territorios volcánicos no son los que se emplean habitualmente en la fabricación de mezclas bituminosas, por no ajustarse a las especificaciones de la normativa española. Sin embargo, en la literatura científica encontramos diferentes ejemplos (Faustino *et al.*, 2005; Naji y Asi, 2008; Aghamelu y Okogbue, 2013 y 2015) que demuestran que el empleo de áridos volcánicos marginales permite obtener mezclas de una calidad adecuada bajo un estricto control de fabricación y ejecución. Por tanto, uno de los objetivos que se plantea en este capítulo y posteriores, es **el aprovechamiento de esta materia prima para su uso en las mezclas bituminosas mediante la incorporación de diversas adiciones que mejoren su comportamiento**. En particular, se evaluarán las posibilidades que ofrece el árido basáltico vacuolar (BOPV) al tratarse de uno de los áridos marginales con mejores resultados tras su caracterización y por ser además un residuo frecuente en numerosas canteras, como la de la Autoridad Portuaria de Las Palmas.

Por otro lado, en regiones con una gran protección ambiental y paisajística como es el caso del archipiélago canario, el depósito en vertedero de los neumáticos fuera de uso se convierte en una solución poco o nada sostenible dada la ocupación de grandes superficies del territorio. Es por ello que la incorporación del polvo de caucho de NFU en las mezclas bituminosas se ha

convertido en una alternativa interesante al problema generado por la acumulación de este residuo. Entre las ventajas que ofrece la adición del polvo de caucho a las MB podemos destacar la valorización de este residuo, la reducción de los niveles de ruido producidos por el tráfico y la mejora del comportamiento mecánico de las MB (Charania *et al.*, 1991; Maupin, 1996; Brown *et al.*, 1997; Pasandín y Pérez, 2017).

A la vista del problema ecológico que suponen ambos residuos se plantea la combinación del árido basáltico vacuolar y el polvo de caucho de NFU para ofrecer un producto asfáltico que pueda ser empleado en la construcción de obras de pavimentación con garantías suficientes de ofrecer un buen comportamiento mecánico. Para introducir el polvo de caucho en las MB se tendrá en cuenta que la vía húmeda es una solución más económica y que ofrece mejores resultados que la vía seca al quedar el caucho mejor integrado con el betún y al reducirse el consumo de ligante (CEDEX, 2007; Al-Fraihat y Abu-Mahfouz, 2017). Por este motivo, **se analizará el comportamiento de mezclas bituminosas elaboradas con un betún mejorado con un 10% de caucho procedente del reciclado de neumáticos fuera de uso** (50% de camiones y 50% de coches).

Para analizar el comportamiento de estas MB, normalmente el primer paso en el proceso de diseño es el estudio de sus propiedades volumétricas. Estas propiedades permiten establecer una correcta dosificación de los elementos que las conforman y poder garantizar un buen comportamiento mecánico futuro de las mismas. Entre las propiedades volumétricas a analizar, el parámetro que determina la calidad de la mezcla es el contenido de huecos esperable según el tipo de mezcla que se desea obtener (densa, semidensa, gruesa o drenante). Un contenido excesivo de huecos puede producir un deterioro acelerado de la mezcla ante la presencia de agua y una menor resistencia a fatiga (Varveri *et al.*, 2014; Ma *et al.*, 2016) mientras que un contenido muy bajo de huecos puede conllevar a deformaciones plásticas excesivas bajo condiciones de tráfico pesado.

Respecto a las propiedades mecánicas de las MB, nos interesará conocer su estabilidad, su deformabilidad y su resistencia a la acción del agua. Para esta labor, tradicionalmente se recurría al ensayo Marshall y al ensayo de sensibilidad al agua. El ensayo Marshall actualmente ha sido reemplazado por el ensayo de rodadura en pista pero se sigue empleando para establecer la dosificación óptima del ligante, basándose en la relación estabilidad/deformación de la mezcla, su densidad y contenido de huecos para distintas proporciones de betún, además de ser actualmente un ensayo característico de las MB utilizadas en aeropuertos.

La estabilidad de la mezcla va a depender de la cohesión y la fricción interna entre las partículas que la componen. La fricción, a su vez, va a depender de la forma y textura superficial de las partículas ya que cuanto más rugosas y angulares sean, más se evita que las partículas se desplacen unas respecto a otras y por tanto mayor será la estabilidad de la MB (Carrasco, 2004). Por su parte, la incorporación de adiciones como el polvo de caucho permite mejorar la cohesión de la mezcla y aumentar su elasticidad y por ende, mejorar los valores de estabilidad y disminuir la deformación de la mezcla con respecto a mezclas no modificadas (Samsuri, 1997; Wulandari y Tjandra, 2017).

El ensayo de sensibilidad al agua determina la relación entre la resistencia a tracción indirecta de probetas que ha sido saturadas en agua y la de probetas mantenidas al aire. Según el grado de compactación de la mezcla, la resistencia de las mezclas mejorará o empeorará debido a la mayor o menor presencia de huecos accesibles al agua (Carrasco, 2004; Rubio *et al.*, 2008). El

agua al penetrar en la mezcla afecta a la adhesividad en la interfaz árido-betún y a la cohesión de la misma, haciendo que sea más fácil el deterioro del pavimento.

Finalmente, el comportamiento dinámico se evaluará mediante el análisis de la deformación plástica, la rigidez y la resistencia a fatiga de las mezclas al someterlas a varios ciclos de carga. Para esta labor se recurre al ensayo de rodadura en pista, el de rigidez y el ensayo de fatiga.

La formación de rodera en los pavimentos va a depender de las propiedades de la mezcla bituminosa empleada (granulometría, volumen de huecos de la mezcla, contenido de polvo mineral, tipo y contenido de ligante, etc.)([Harvey et al., 2001](#)). Al incluir partículas de un material polimérico se consigue aumentar la rigidez de la mezcla por lo que se reduce la profundidad de la rodera ([Moreno et al., 2013](#); [Shin et al., 1996](#)). Sin embargo, el aumento de rigidez de la mezcla la hace más vulnerable a la rotura frágil a bajas temperaturas y a la fatiga ante un ciclo largo de cargas.

El módulo de rigidez dinámico se define como la relación entre el esfuerzo máximo y la deformación unitaria máxima tras un ensayo de flexión, compresión o tracción indirecta. En función de las condiciones en las que se realice el ensayo, en cuanto a temperatura y velocidad de aplicación de las cargas, este módulo se aproximará más a un comportamiento elástico o viscoso. Cuanto mayor sea el módulo de rigidez, pese a presentar una mayor capacidad portante, menor será la flexibilidad de la MB y por tanto peor será su resistencia a fatiga.

El ensayo de fatiga mide la resistencia a flexión de un pavimento asfáltico cuando se somete a las cargas cíclicas del tráfico. La presencia de huecos y la viscosidad del ligante están directamente relacionados con esta resistencia. A medida que el contenido de huecos de la mezcla aumenta, ya sea por diseño o por una mala compactación, la resistencia a la fatiga disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene un betún envejecido o endurecido tiene menor resistencia a la fatiga por pérdida de elasticidad del ligante. Las características de resistencia, el espesor de un pavimento y la capacidad portante de la explanada, tienen mucho que ver con la prevención de la fisuración o agrietamiento de los pavimentos ([Carrasco, 2004](#)).

Como se puede observar, son varios los factores que entran en juego a la hora de diseñar las mezclas. Por tanto, se buscará un equilibrio entre todas estas propiedades a partir de la selección adecuada de los materiales, una correcta dosificación y un riguroso proceso de fabricación para así poder garantizar una mezcla bituminosa adecuada y duradera.

## 4.2 METODOLOGÍA

### 4.2.1 MATERIALES

A partir de la caracterización de áridos realizada en el capítulo previo, se decidió aprovechar el árido basáltico vacuolar (BOPV) procedente de la cantera perteneciente a la Autoridad Portuaria de Las Palmas (Fig. 4.1), puesto que se trata de un árido marginal susceptible de ser empleado en las MB con un correcto tratamiento que mejore su comportamiento mecánico y que actualmente en la explotación se rechaza. En la tabla adjunta se resumen las principales características del árido usado.

Tabla 4.1 Principales características de las fracciones de árido empleado

Fracción	10/20 mm	4/10 mm	0/4 mm
Litotipo	BOPV	BOPV	BOPV
% (sobre peso total del árido)	20.93	36.27	38.88
$\rho_a / \rho_{SSD} / \rho_{rd}$	2.89 / 2.63 / 2.35	2.88 / 2.56 / 2.37	2.45 / 2.36 / 2.23
WA <sub>24</sub>	5.8	8.3	15.5
FI	6	6	-
Cc	68.3	62.6	-
SE(10)	-	-	73
LA	29	28	-
M <sub>DE</sub>	17	23	-

\*( $\rho_a$ ) densidad aparente de partículas [EN 1097-6]; ( $\rho_{rd}$ ) densidad de partículas secadas en estufa [EN 1097-6]; ( $\rho_{SSD}$ ) densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente [EN 1097-6]; (WA<sub>24</sub>) absorción de agua tras 24 h [EN 1097-6]; (FI) índice de lascas [EN 933-3]; (Cc) partículas con más del 50% de aristas vivas [EN 933-5]; (LA) coef. Los Ángeles [EN 1097-2]; (M<sub>DE</sub>) coef. Micro-Deval [EN 1097-1].



Figura 4.1 Árido BOPV procedente de la cantera de La Esfinge (Autoridad Portuaria de Las Palmas, GC): a) fracción 10/20 mm, b) fracción 4/10 mm y c) fracción 0/4 mm.

Para la fabricación del polvo de caucho, se emplearon medios mecánicos de trituración a temperatura ambiente (50% procedente de neumáticos usados de camiones y 50% de



neumáticos de coches). La distribución granulométrica del polvo de caucho se muestra en la [Tabla 4.2](#). Para asegurar una correcta consistencia del ligante solo se utilizó un lote de polvo de caucho. Los análisis termogravimétricos revelaron la siguiente composición: 57.41% polímero (caucho); 32.22% negro de carbón, 6.02% residuo y 4.67% plastificantes y aditivos.

Tabla 4.2 Distribución granulométrica del polvo de caucho tras trituración

Tamiz de referencia (EN 933-2) (mm)	Material que pasa (%)
1.0	100
0.5	94.1
0.25	23.7
0.125	3.7
0.063	0.4

En las mezclas de referencia se empleó un betún comercial de penetración 35/50, mientras que en las mezclas elaboradas con polvo de neumático se utilizó un betún con caucho, con el mismo grado de penetración (BC35/50), elaborado en laboratorio mediante la adición del polvo de caucho al ligante. Las características de ambos ligantes se muestran en la [Tabla 4.3](#).

Tabla 4.3 Principales características de los ligantes empleados

Tipo de mezcla		Mezcla de ref.	Mezcla con polvo de caucho
Tipo de betún		35/50	BC35/50*
Contenido de ligante (sobre peso total de la mezcla)	%	5.0–7.0	5.5 – 7.0
Densidad [EN 15326]	(Mg/m <sup>3</sup> )	1.042	1.028
Penetración a 25 °C, 100 g, 5s [EN 1426]	(x10-1 mm)	44	38
Punto de reblandecimiento [EN 1427]	(°C)	51.6	64.2
Viscosidad dinámica, viscosímetro rotacional Brookfield [EN 13302]	(cP)	a 60 °C	51,000
		a135 °C	600
		a 150 °C	250
			215,000
			2,100
			890

(Mezcla de ref.) mezcla de referencia sin caucho; (Mezcla con polvo de caucho) mezcla mejorada con polvo de caucho reciclado procedente de NFU.

(\*) Composición del BC35/50: 10% polvo de caucho, 90% betún de penetración 50/70.

#### 4.2.2 INSTRUMENTAL EMPLEADO

Para la caracterización de los áridos empleados en las mezclas se utilizó el instrumental descrito en el apdo. 3.3.3 de este documento. Por su parte, para la fabricación del ligante mejorado con caucho se empleó:

- una **unidad dispersadora** (IKA Ultra-Turrax T50 digital, con un agitador de hélice), 600-15000 r.p.m., viscosidad máxima 5000 mPa·s
- un baño de aceite (máx. 225 °C, con control de temperatura, estabilidad y precisión de  $\pm 1.0$  °C)
- un contenedor metálico de 1 L de capacidad.

Para la fabricación y ensayo de las muestras de MB desarrolladas se utilizaron los siguientes equipos y dispositivos:

- **Mezclador de materiales bituminosos** (Mecacisa), 60-390 r.p.m., capacidad 30 L, control de temperatura, estabilidad  $\pm 1.0$  °C.
- **Termómetro de infrarrojos** (Testo 830-T4), rango de -30 a 400 °C, resolución  $\pm 0.1$  °C y precisión  $\pm 1.0$  °C (entre -0.1 y 400 °C), calibrado previamente.
- **Termómetro digital por sonda** (Mecacisa), rango de -50 a 200 °C, resolución  $\pm 0.1$  °C y precisión  $\pm 1.0$  °C (entre -20 y 180 °C), calibrado previamente.
- **Compactadora Marshall** (Mecacisa) estandarizada para probetas cilíndricas MBC conforme a la norma EN 12697-30 y EN 12697-10.
- **Compactadora de rodillo** (Matest) para la fabricación de placas MBC conforme a la norma EN 12697-33 y ASTM D8079.
- **Estufa refrigeradora** con capacidad de hasta 150 L y circulación de aire forzada, rango de 4 a 65 °C, resolución  $\pm 0.1$  °C y precisión  $\pm 1.0$  °C.
- **Estufas de laboratorio** (Matest), capacidad 100 L, aire por convección natural y control termostático hasta 250 °C resolución  $\pm 0.1$  °C y precisión  $\pm 1.0$  °C.
- **Máquina de ensayo en pista** (Mecacisa), conforme a las normas EN 12697-22 y BS 598:110.
- **Máquina de ensayo universal** (10 t), con capacidad para ensayos de carga dinámica y control de temperatura automático.
- **Picnómetros** de vidrio, capacidad 1.3 L, calibrados previamente ( $0.001327$  m<sup>3</sup>).
- **Equipo de vacío** (Teslar 2-F7) 3.33 Pa, para la saturación con agua del volumen de huecos de las muestras.
- **Equipo hidráulico** (Servosis MUF 401), para ensayo de fatiga a flexión en 4 puntos con capacidad de carga entre 10 Y 500 kN, velocidad de ensayo hasta 200 mm/min y frecuencia empleada 10 Hz. Distancias entre apoyos extremos 36 cm y entre los apoyos centrales 12 cm.

### 4.2.3 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Para poder comparar el efecto del ligante mejorado con caucho en las mezclas bituminosas se elaboraron dos mezclas de tipo hormigón asfáltico semidenso (*Asphalt Concrete, AC*): a) una mezcla de referencia (*AC16 surf 35/50 S*) con un betún convencional de penetración 35/50; b) una mezcla (*AC16 surf BC35/50 S*) con un betún mejorado con caucho. En ambas mezclas se empleó la misma dosificación de árido BOPV según [Tabla 4.4](#) y los mismos contenidos de ligante. El ligante mejorado con caucho se produjo previamente en laboratorio mezclando el polvo de neumático triturado con un betún convencional de penetración 50/70. Al mezclar el polvo de neumático con el betún se consigue tener una consistencia similar a la del betún convencional 35/50 dado que al introducir el caucho la viscosidad del ligante aumenta.

Tabla 4.4 Distribución granulométrica del árido empleado conforme al huso granulométrico de una mezcla semidensa AC16 S (PG-3)

Tamiz de referencia (EN 933-2) (mm)	Material que pasa (%)	Límites del huso granulométrico (material que pasa) (%)
22	100	100-100
16	96.98	90-100
8	68.85	60-75
4	44.71	35-50
2	30.24	24-38
0.5	15.53	11-21
0.25	10.07	7-15
0.063	3.92	3-7

Para producir el betún caucho BC35/50, cada muestra de betún 50/70 de 600 g se calentó a 180 °C, se le añadió un 10% de polvo de caucho (s/peso total del betún) y se mezcló durante 60 min a 4000 r.p.m. con la mezcladora para que los inhibidores ultravioletas, los anti-oxidantes y otros elementos químicos se transfirieran del caucho al betún, incluyendo las propiedades elastoméricas. Para conservar la temperatura del ligante a 180 °C se empleó un baño de aceite donde se introdujo el recipiente de mezclado.

La mezcla de referencia se fabricó en el laboratorio primero calentando el betún 35/50 y los áridos BOPV a 170 °C. Los áridos y el polvo mineral se precalentaron unas 8 h para garantizar la eliminación de la humedad y el betún se precalentó unas 3 h para asegurar que la temperatura fuera homogénea en toda la masa del ligante. A continuación, ambos se mezclaron manualmente durante 1 min para realizar la envuelta del árido y posteriormente, se mezclaron mecánicamente durante 2 min más a 170 °C. La temperatura final tras el mezclado varía entre 165-170 °C y la temperatura de compactación se mueve en el rango entre 155-160 °C. Este mismo proceso se empleó con las mezclas elaboradas con BC35/50 pero modificando las temperaturas de trabajo debido al cambio de viscosidad del ligante por la adición del polvo de caucho. En este caso los áridos se precalentaron a 175 °C y el betún a 180 °C. La temperatura final de mezclado varió entre 175-180 °C y la temperatura de compactación entre 165 °C y 170 °C. Las probetas cilíndricas se compactaron de acuerdo al método Marshall [UNE-EN 12697-30](#) con 50 o 75 golpes por cara, en función del ensayo posterior a realizar. Las probetas tipo placa

de 300 x 300 x 60 mm para el ensayo de pista o las placas para el ensayo de fatiga fueron compactadas mediante rodillo conforme a la norma [UNE-EN 12697-33](#).

Las muestras compactadas y sin compactar se sometieron a tres series de ensayos de caracterización para cada una de los tipos de mezcla y contenido de betún.

Tabla 4.5 Relación de ensayos realizados con las MB

<b>PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS</b>	
EN 12697-6 Proced. B: Saturado superficie seca y Proced. D: Geométrico	Densidad aparente
EN 12697-5 Proced. A: Volumétrico	Densidad máxima teórica
EN 12697-8	Contenido de huecos
EN 12697-10	Compactibilidad
EN 933-1	Degradación granulométrica tras compactación mediante análisis granulométrico
<b>COMPORTAMIENTO MECÁNICO ESTÁTICO</b>	
EN 12697-12	Sensibilidad al agua
EN 12697-23	Resistencia a la tracción indirecta
EN 12697-34	Ensayo Marshall
<b>COMPORTAMIENTO MECÁNICO DINÁMICO</b>	
EN 12697-22 Proced. B: en aire, dispositivo pequeño, a 60 °C y 10 <sup>4</sup> ciclos)	Ensayo de rodadura
EN 12697-26 Anexo C: ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY)	Rigidez
EN 12697-24 Anexo D: Ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR)	Resistencia a la fatiga

En total se ensayaron 331 muestras y probetas, con un total de 83 ensayos para las mezclas de referencia y 91 para las mezclas con BC35/50. En la siguiente tabla se define el número de probetas y ensayos realizados para cada tipo de mezcla.



Figura 4.2 Muestra de una probeta cilíndrica fabricada con un 6.0% de BC35/50

Tabla 4.6 Número de muestras y ensayos realizados para la caracterización de las MB

ENSAYO	Nº PROBETAS			Nº ENSAYOS	
	MÍN/ensayo	35/50	BC35/50	35/50	BC35/50
Densidad máxima	2	22	16	15	8
Densidad aparente	3	30	18	15	20
Contenido de huecos	-	-	-	-	-
Ensayo Marshall	-	-	-	10	8
Compactibilidad	3	12	15	4	8
Degradación granulométrica	-	-	-	12	12
Sensibilidad al agua	3+3	60	66	12	16
Módulo de rigidez dinámico	3	12	24	4	8
Ensayo de rodadura	2	16	16	8	8
Resistencia a la fatiga	4	12	12	3	3
<b>TOTAL</b>		<b>164</b>	<b>167</b>	<b>83</b>	<b>91</b>

En caso necesario, las diferentes muestras de ensayo se acondicionaron previamente en estufa refrigeradora durante el tiempo requerido para alcanzar la temperatura normal de ensayo conforme a las especificaciones de la normativa.

#### 4.2.4 PROCEDIMIENTO OPERATIVO

##### 4.2.4.1 Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5, Procedimiento A: volumétrico).

Este ensayo permite determinar la densidad de una muestra no compactada de MB sin considerar los huecos de aire, lo que equivale a la densidad máxima teórica de la MB. Para este ensayo se empleó el procedimiento volumétrico mediante el uso del picnómetro.

De manera análoga a como se mide la densidad aparente de los áridos, este ensayo establece la densidad de la muestra mediante la relación entre su masa seca y su masa sumergida.

Cálculo y expresión de resultados

$$\text{Densidad máxima} \quad \text{Mg/m}^3 \quad \rho_{m\acute{a}x} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w}} \quad (4.1)$$

Donde:

- $m_1$  es la masa del picnómetro vacío en g.
- $m_2$  es la masa del picnómetro con la muestra de MB seca en g.
- $m_3$  es la masa del picnómetro con la muestra de MB y enrasado con agua en g.
- $V_p$  es el volumen del picnómetro en  $\text{m}^3$ .
- $\rho_w$  es la densidad del agua en función de la temperatura en  $\text{Mg/m}^3$ .

#### 4.2.4.2 Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas (UNE-EN 12697-6, Procedimiento B: Superficie saturada seca (SSD) y Procedimiento D: método geométrico).

El objetivo de este ensayo es determinar la densidad aparente de las probetas compactadas de MB teniendo en cuenta el volumen previsible de huecos accesibles de la probeta. Este ensayo se realizó conforme a dos métodos: el método SSD y el método geométrico. El método SSD establece la densidad conforme a la relación de masas de la probeta en distintos estados de saturación (seca, sumergida y saturada con la superficie seca). Para su realización es necesario el empleo de la balanza hidrostática. Por su parte el método geométrico establece la densidad aparente como una relación directa entre el volumen geométrico  $V$  de la probeta y su masa.

Cálculo y expresión de resultados

$$\text{Densidad aparente SSD} \quad \text{Mg/m}^3 \quad \rho_{ssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \rho_w \quad (4.2)$$

Donde:

- $m_1$  la masa seca en g.
- $m_2$  la masa sumergida en g.
- $m_3$  la masa saturada superficialmente seca en g.
- $\rho_w$  es la densidad del agua en función de la temperatura en  $\text{Mg/m}^3$ .

$$\text{Densidad aparente geométrica} \quad \text{Mg/m}^3 \quad \rho_{geo} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} h d^2} \quad (4.3)$$

Siendo  $m_1$  la masa seca en g,  $h$  la altura media en mm y  $d$  el diámetro medio en mm.

#### 4.2.4.3 Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8).

El contenido de huecos se determina en función de la densidad máxima y la densidad aparente de las MB. Mediante la relación de estos dos parámetros se puede conocer el volumen de huecos de aire, rellenos y presentes en el árido mineral. Su valor vendrá limitado según el tipo de mezcla y la capa de firme donde se vaya a emplear.

Cálculo y expresión de resultados

$$\text{Contenido de huecos de aire} \quad \% \quad V_m = \frac{\rho_{max} - \rho_a}{\rho_{max}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

$$\text{Contenido de huecos del árido mineral} \quad \% \quad VMA = V_m + B \cdot \frac{\rho_a}{\rho_B} \quad (4.5)$$

$$\text{Contenido de huecos rellenos con ligante} \quad \% \quad VF B = \frac{B \cdot \rho_a}{VMA \cdot \rho_B} \cdot 100 \quad (4.6)$$

Donde:

- $\rho_{max}$  es la densidad máxima de la MB en  $\text{Mg/m}^3$ .
- $\rho_a$  es la densidad aparente de la MB en  $\text{Mg/m}^3$ .
- $\rho_B$  es la densidad aparente del ligante en  $\text{Mg/m}^3$ .
- B: el contenido de ligante de la probeta en%.

#### 4.2.4.4 Compactibilidad (UNE-EN 12697-10, Compactación por impacto).

Este ensayo permite conocer la variación de densidad aparente que experimenta una MB en función de la energía de compactación aplicada, en este caso, mediante el número de impactos. Para su determinación se ha empleado una compactadora de impacto tipo Marshall y un dispositivo de control que va midiendo la variación de altura de las probetas conforme se aplica el número de golpes previsto (100 por cada cara).

Cálculo y expresión de resultados

$$\frac{1}{t(E_2)} = \frac{1}{t_\infty} - \left[ \frac{1}{t_\infty} - \frac{1}{t_0} \right] \exp\left(\frac{-E_2}{T}\right) \quad (4.7)$$

Donde:

- $t(E_2)$  es el espesor de la muestra compactada en mm.
- $t_\infty$  espesor mínimo posible calculado de la muestra en mm.
- $t_0$  espesor inicial de la muestra en mm.
- $E_2$  energía de compactación, siendo su valor numérico el número de golpes aplicados a la probeta.
- $T$  resistencia a la compactación, expresada considerando 21 Nm como unidad.

#### 4.2.4.5 Degradación granulométrica.

Para llevar a cabo este ensayo fue necesaria la incineración en horno a 520 °C (UNE-EN 12697-39) de las probetas compactadas a 100 golpes por cara. A esta temperatura lo que se consigue es la ignición del ligante y quedarnos solo con el árido. Este procedimiento permite determinar el contenido de ligante de las probetas por diferencia de pesos, pero dado que el contenido de ligante es un dato conocido, este método lo podemos aplicar para determinar si ha habido alguna variación en la distribución granulométrica del árido con respecto a la usada inicialmente, tras el proceso de compactación. Para este fin, se realizó un análisis granulométrico del material resultante y se comparó con el usado en la dosificación de las probetas.

#### 4.2.4.6 Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34).

El ensayo Marshall permite analizar la deformación plástica de las mezclas bituminosas en función de la carga que se vaya aplicando. Para este ensayo se emplean tres probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara. Dichas probetas se acondicionan en agua a 60 °C entre 40-60 min antes de su rotura. Tras el acondicionamiento se colocan en una mordaza que rodea perimetralmente las probetas y se les aplica una carga constante de compresión a una velocidad de 50 mm/min hasta su rotura.

Cálculo y expresión de resultados

Coeficiente Marshall

$$MQ = \frac{S}{F} \quad (4.8)$$

Siendo  $S$  la carga de estabilidad de la mezcla en kN y  $F$  la deformación de la mezcla en mm, tras aplicar las correspondientes correcciones según norma.

#### 4.2.4.7 Sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12, Ensayo de tracción indirecta UNE-EN 12697-23).

Este ensayo compara la capacidad resistente a tracción indirecta de una MB en condiciones de saturación frente a su resistencia en condiciones secas. Para su realización es necesario la fabricación de 6 probetas divididas en dos subconjuntos: seco y saturado. El subconjunto seco se almacena a temperatura ambiente  $20 \pm 5$  °C mientras que el otro subconjunto se satura mediante aplicación de vacío a 6.7 kPa durante 30 min. Tras esto las probetas saturadas se dejan sumergidas a 40 °C entre 68 y 72 h. Pasado este tiempo ambos subconjuntos se deben acondicionar a 15 °C durante al menos 2h, aislando las probetas secas de las saturadas que deben permanecer sumergidas. Finalmente, se colocan en el bastidor de compresión donde se les aplicará una carga a una velocidad de 50 mm/min hasta su rotura.

Cálculo y expresión de resultados

Sensibilidad al agua	%	$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100$	(4.9)
----------------------	---	---	-------

Resistencia a tracción indirecta	kPa	$ITS = \frac{2 P}{\pi dh}$	(4.10)
----------------------------------	-----	----------------------------	--------

Donde:

- $ITS_w$  es la resistencia a tracción indirecta en condiciones saturadas e  $ITS_d$  es la resistencia en condiciones secas en kPa.
- P carga máxima de rotura en N.
- h altura media de la probeta en mm.
- d diámetro medio de la probeta en mm.

#### 4.2.4.8 Rigidez (UNE-EN 12697-26, Ensayo de tracción indirecta (IT-CY))

Este ensayo busca determinar el módulo de rigidez de las MB mediante la aplicación de series de carga de tracción indirecta a temperaturas y tiempos de aplicación concretos.

Las probetas cilíndricas a ensayar se acondicionan según norma hasta alcanzar la temperatura de ensayo (2 °C, 10 °C o 20 °C). En nuestro caso la temperatura de ensayo establecida será de 20 °C. Tras el acondicionamiento, se coloca la probeta diametralmente sobre el soporte de carga, ajustando los transductores y el sistema de medición, se le aplica 10 impulsos de acondicionamiento para ajustar la carga y su duración y finalmente se aplican 5 impulsos de carga adicionales. Durante estos impulsos se realiza la medición de la variación de carga aplicada y la deformación diametral horizontal. La frecuencia empleada ha sido de 2.2 kHz.

Cálculo y expresión de resultados

Módulo de rigidez	MPa	$S_m = \frac{F (v + 0.27)}{z h}$	(4.11)
-------------------	-----	----------------------------------	--------

Donde:

- F es el valor máximo de la carga vertical aplicada en N.
- z es la amplitud de la deformación horizontal obtenida tras el ciclo de carga en mm.
- h es el espesor medio de la probeta en mm.
- v es el coeficiente de Poisson (0.35 para todas las temperaturas, según norma).



#### 4.2.4.9 Ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22, Dispositivo pequeño: procedimiento B en aire).

El objeto del ensayo de pista es determinar la deformación permanente de una MB al someterla a un ciclo de cargas dinámicas simulando el paso de una rueda. Se analiza la susceptibilidad a la formación de roderas de las mezclas. Para ello, el ensayo consistirá en colocar una probeta de tipo placa (300x300x60 mm) sobre la mesa móvil del dispositivo de ensayo, acondicionarla a 60 °C durante al menos 4 h y tras este periodo, realizar 10<sup>4</sup> ciclos hacia delante y atrás bajo una rueda cargada de Ø 200-205 mm y 50 ± 5 de anchura.

Cálculo y expresión de resultados

$$\text{Pendiente de deformación en pista} \quad \text{mm} \quad WTS_{(AIR)} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (4.11)$$

Siendo  $d_{10000}$  y  $d_{5000}$  la profundidad de la rodera después de 10000 y 5000 ciclos en mm.

Además deberá calcularse la profundidad media de la rodera (*Ruth Depth, RD*) y el porcentaje de la profundidad media de la rodera, (*Proportional Ruth Depth, PRD*) para el material sometido a ensayo como el valor medio de las probetas ensayadas para un mismo tipo de mezcla.

#### 4.2.4.10 Resistencia a la fatiga (UNE-EN 12697-24, Ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR))

El objetivo de este ensayo es medir la deformación por fatiga de una MB que ha sido sometida a cargas periódicas de flexión en 4 puntos.

Las probetas prismáticas (410 x 50 x 50 mm), preparadas y acondicionadas según norma (20 °C durante al menos 1 h), se sujetan mediante cuatro mordazas colocadas simétricamente con respecto al centro de la probeta. Las mordazas exteriores permanecen fijas mientras que sobre las dos mordazas interiores se aplican cargas constantes e iguales, en sentido vertical y perpendicular al eje longitudinal de la probeta, creando un momento flector constante sobre la probeta hasta que se produce el fallo por fatiga de la misma.

El ensayo se debe realizar como mínimo a tres niveles de carga con un mínimo de 6 repeticiones por nivel. Los niveles se deben seleccionar de manera que las vidas hasta la fatiga estén dentro de la gama de 10<sup>4</sup> a 2x10<sup>6</sup> ciclos.

El criterio de fallo elegido es la reducción del módulo de rigidez de la probeta al 50% de su valor inicial, la temperatura de ensayo 20 °C y la frecuencia de carga 10 Hz.

Durante el proceso de carga se registra la fuerza aplicada, la deflexión y el desfase entre la fuerza y la deflexión después de 100 ciclos y luego periódicamente.

Cálculo y expresión de resultados

Según el criterio de fallo elegido y el conjunto de condiciones elegido, se analiza la capacidad de deformación de las probetas hasta que se produce la rotura por reducción del módulo de rigidez.

### 4.3 RESULTADOS

En las Tablas 4.7 y 4.8 se resumen los valores promedios y la dispersión de los resultados de cada propiedad analizada según el contenido de betún de cada tipo de mezcla.

Tabla 4.7 Parámetros estadísticos de cada propiedad analizada para las mezclas de referencia

Tipo de mezcla			AC16 surf 35/50 S						
Propiedad de la mezcla			$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	Ds	Cv
Contenido de betún		%	5	5.5	6	6.5	7%		
Densidad máxima	$\rho_{m\acute{a}x}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.52	2.51	2.49	2.48	2.46	0.10	3.98
Densidad aparente (SSD)	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.25	2.32	2.34	2.35	2.35	0.06	2.74
Densidad aparente (Geo.)	$\rho_{geo}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.12	2.22	2.28	2.28	2.30	0.07	3.03
Contenido de huecos de aire	$V_m$	%	10.76	7.28	5.87	4.90	4.31	2.57	38.81
Contenido de huecos del árido mineral	VMA	%	21.56	19.54	19.36	19.59	20.10	0.90	4.49
Contenido de huecos rellenos con ligante	VFB	%	50.11	62.77	69.69	75.00	78.54	11.26	16.76
Estabilidad Marshall	S	kN	5.11	5.85	6.91	8.32	6.71	0.87	12.75
Deformación Marshall	F	Mm	2.61	2.65	2.97	3.03	3.08	0.29	9.99
Coeficiente Marshall	MQ	%	1.97	2.17	2.30	2.61	2.19	0.31	13.23
Sensibilidad al agua	ITSR	%	-	66.98	64.33	66.96	84.83	6.53	9.32
Resistencia a tracción indirecta en condiciones secas	$ITS_d$	MPa	-	1.29	1.70	1.70	1.91	0.44	27.89
Resistencia a tracción indirecta en condiciones saturadas	$ITS_w$	MPa	-	0.87	1.13	1.13	1.63	0.37	33.19
Profundidad de rodera	$RD_{(AIR)}$	mm	-	4.98	6.04	6.47	7.10	1.66	26.53
Porcentaje de la profundidad media de la rodera	$PRD_{(AIR)}$	%	-	9.23	11.08	14.37	13.84	2.51	21.95
Pendiente de deformación en pista	$WTS_{(AIR)}$	mm/1000 ciclos	-	0.25	0.34	0.47	0.44	0.17	46.47
Módulo de rigidez	Sm	MPa	-	7213	6830	6119	4676	375	5.98

Tabla 4.8 Parámetros estadísticos de cada propiedad analizada para las mezclas con BC35/50

Tipo de mezcla			AC16 surf BC35/50 S					
Propiedad de la mezcla			$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	Ds	Cv
Contenido de betún		%	5.5	6	6.5	7		
Densidad máxima	$\rho_{m\acute{a}x}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.58	2.54	2.52	2.48	0.03	0.99
Densidad aparente (SSD)	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.34	2.38	2.37	2.38	0.04	1.73
Densidad aparente (Geo.)	$\rho_{geo}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.22	2.28	2.28	2.31	0.04	1.58
Contenido de huecos de aire	$V_m$	%	9.13	6.30	5.73	4.21	2.05	32.39
Contenido de huecos del árido mineral	VMA	%	21.67	20.21	20.73	20.41	0.64	3.11
Contenido de huecos rellenos con ligante	VFB	%	57.88	68.82	72.36	79.36	8.96	12.87
Estabilidad Marshall	S	kN	13.16	17.42	18.04	20.37	2.06	12.24
Deformación Marshall	F	mm	2.36	2.40	2.49	3.04	0.29	10.93
Coeficiente Marshall	MQ	%	5.44	7.41	7.26	6.85	1.23	18.36
Sensibilidad al agua	ITSR	%	77.36	88.46	87.45	96.41	12.72	14.32
Resistencia a tracción indirecta en condiciones secas	ITS <sub>d</sub>	MPa	1.21	1.61	1.68	1.81	0.11	7.48
Resistencia a tracción indirecta en condiciones saturadas	ITS <sub>w</sub>	MPa	1.07	1.43	1.46	1.74	0.21	15.78
Profundidad de rodera	RD <sub>(AIR)</sub>	mm	1.67	1.59	2.16	1.98	0.58	32.08
Porcentaje de la profundidad media de la rodera	PRD <sub>(AIR)</sub>	%	3.03	2.92	4.09	3.45	1.33	40.93
Pendiente de deformación en pista	WTS <sub>(AIR)</sub>	mm/1000 ciclos	0.06	0.05	0.11	0.09	0.05	58.87
Módulo de rigidez	Sm	MPa	6024	6044	7029	6285	522	8.48

## 4.4 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 4.4.1 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS

#### 4.4.1.1 Densidades y contenidos de huecos

La Fig. 4.3 representa la densidad máxima en función del contenido de betún empleado. Se observa que **las mezclas con BC35/50 muestran densidades superiores** a las de las mezclas de referencia para cada contenido de betún. A medida que **el contenido de ligante aumenta la densidad máxima disminuye** proporcionalmente, debido fundamentalmente a que el betún tiene una densidad inferior a la del árido. Las densidades obtenidas en ambos tipos de mezclas han resultado ser bastante homogéneas, con baja dispersión estadística ( $Cv \leq 1.7\%$ , para la mezclas con BC;  $Cv \leq 3.0\%$ , para las mezclas de referencia (Tablas 4.7 y 4.8)).

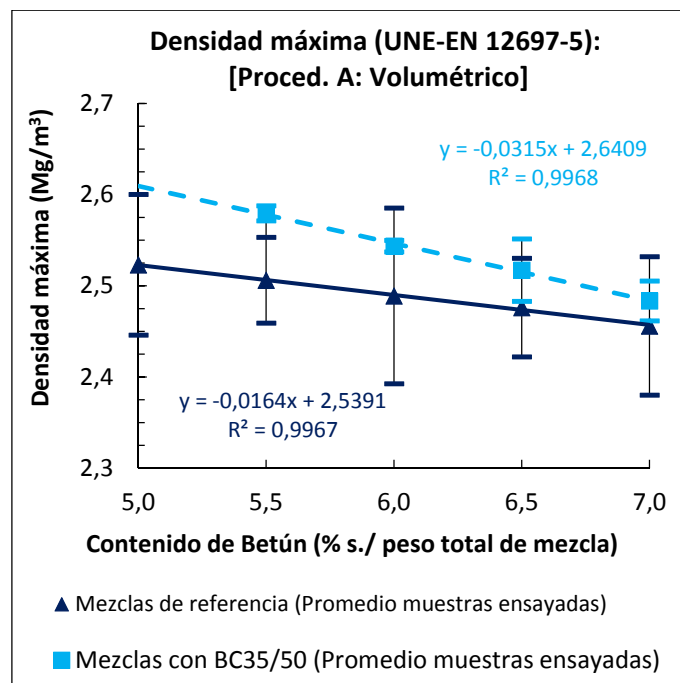


Figura 4.3 Densidad máxima de las muestras no compactadas según contenido de ligante

Con respecto a todos los contenidos de betún analizados, **las densidades aparentes** de las probetas compactadas a 75 golpes por cara **de las MB con BC35/50 son similares** (variando entre 0.3-1.3% en el caso del procedimiento geométrico) **o ligeramente superiores** (con una diferencia de 0.8-1.6% según el procedimiento SSD) con respecto a los valores obtenidos para **la mezcla de referencia** con un betún convencional (Figs. 4.4 y 4.5).

La **mayor densidad aparente** se obtuvo en las mezclas con un **6.5% y un 7% de betún** (sobre el peso total de la mezcla) en la mezcla de referencia y la mezcla con caucho, respectivamente. Estos contenidos tan altos de ligante se justifican por la absorción ejercida por el árido vacuolar. En el caso de las mezclas con BC35/50 el contenido de ligante es ligeramente superior debido al aumento de la viscosidad del betún por la adición del caucho que dificulta la cobertura total del árido durante la fase de mezclado.

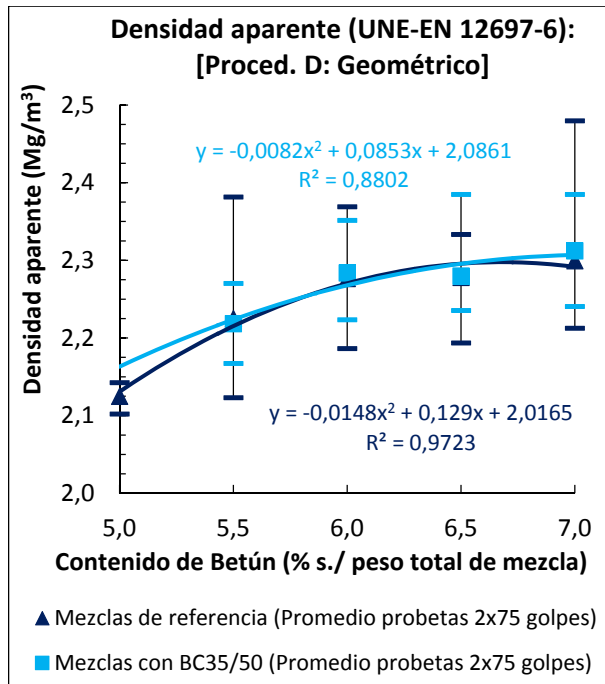


Figura 4.4 Densidad aparente geométrica de las probetas compactadas a 75 golpes por cara.

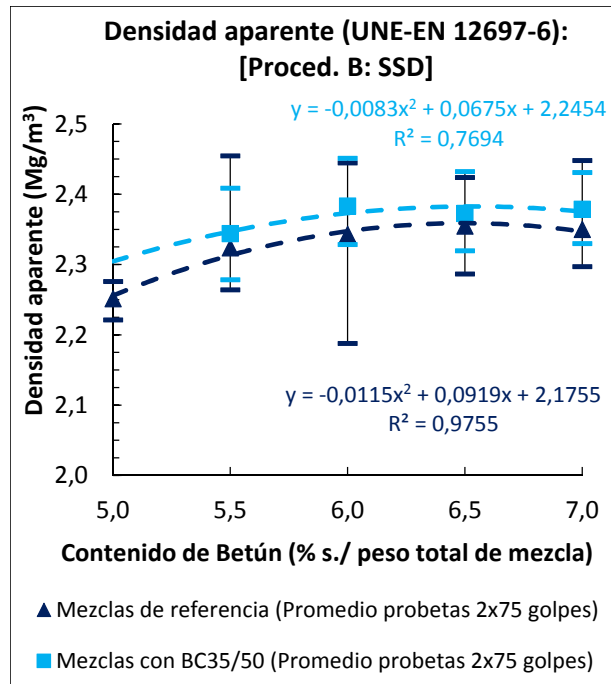


Figura 4.5 Densidad aparente SSD de las probetas compactadas a 75 golpes por cara.

En las Figs. 4.6 y 4.7 se analiza el contenido de huecos de las mezclas calculados a partir de la densidad máxima y aparente de cada tipo de mezcla. **El contenido de huecos de la mezcla ( $V_m$ ) y el contenido de huecos del árido mineral (VMA) de las mezclas con caucho son ligeramente superiores** a los contenidos de las mezclas de referencia para la misma energía de compactación aunque las densidades aparentes de las mezclas con caucho sean mayores. Esto se debe a que la densidad máxima teórica de las mezclas con BC35/50 se sitúa por encima de la mezcla de referencia (1.1%-2.9%).

Las diferencias entre las mezclas de referencia y las elaboradas con caucho en cuanto al contenido de huecos  $V_m$  varían entre el 0.2-2.3% por el procedimiento geométrico (Fig. 4.6a) y el 0.1-1.4% por el procedimiento SSD (Fig. 4.7a). Respecto al contenido de huecos en el árido mineral VMA, esta diferencia varía entre el 0.8-2.9% por el procedimiento geométrico (Fig. 4.6b) y entre el 0.3-2.1% por el procedimiento SSD (Fig. 4.7b). La superioridad en huecos de las mezclas con caucho está relacionada con las dificultades encontradas durante la compactación debido a una mayor viscosidad del ligante aunque se compactaran a una temperatura 10 grados por encima de la de las mezclas de referencia. Este hecho ya fue observado por Pérez y Pasandín (2017), obteniendo resultados similares con áridos reciclados. En las Figs. 4.6c y 4.7c se representa el contenido de huecos rellenos con ligante según el procedimiento geométrico y SSD respectivamente. Se observa que este porcentaje de huecos es ligeramente inferior en las mezclas con caucho.

Las características referentes al contenido de huecos cumplen con las especificaciones ( $4 \leq V_m \leq 6\%$  y  $VMA \geq 15\%$ , para capas superficiales con mezclas tipo AC) del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014), tanto para las mezclas de referencia como para las mezclas con caucho a partir de un contenido de ligante superior al 6.0-6.25%. Este alto contenido betún demuestra la gran absorción que ejercen los áridos volcánicos empleados.



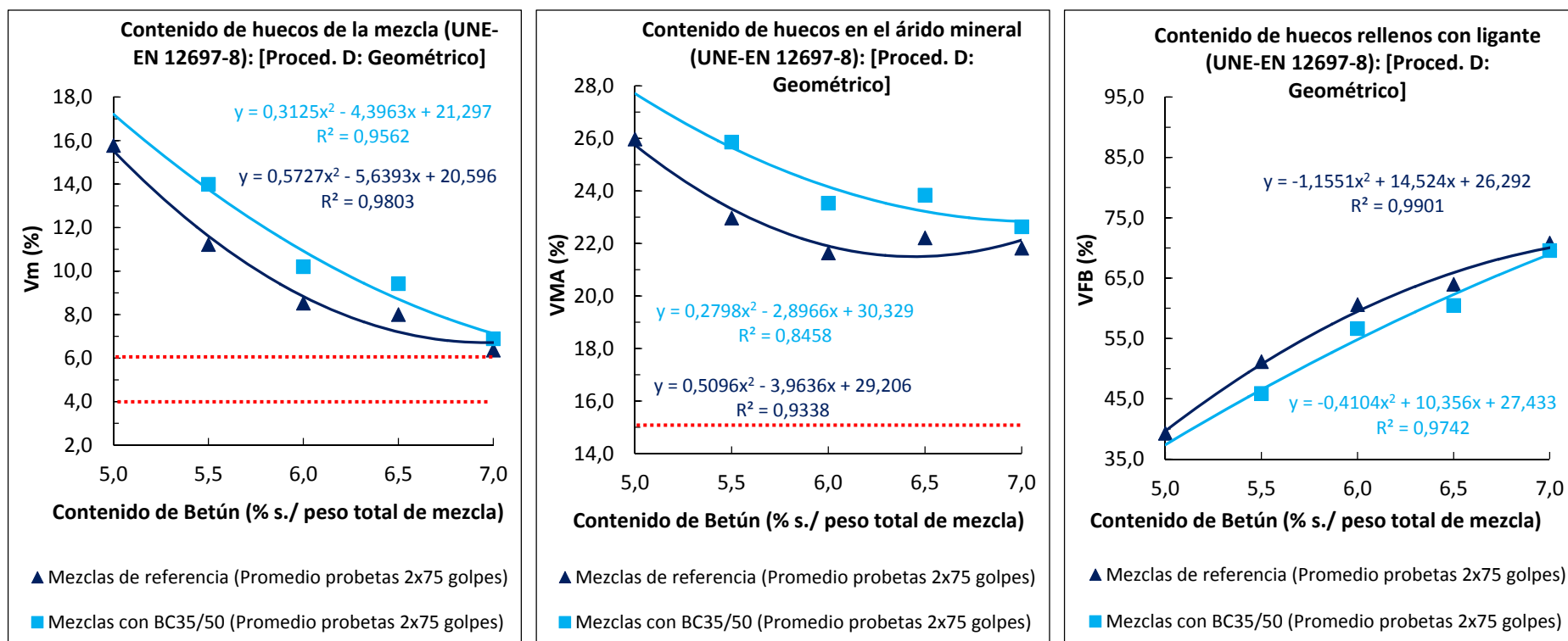


Figura 4.6 Contenido de huecos por el procedimiento Geométrico según contenido de ligante y tipo de mezcla: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante.

\*Las líneas rojas discontinuas de puntos representan los límites establecidos ( $4\% \leq Vm \leq 6\%$  y  $VMA \geq 15\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

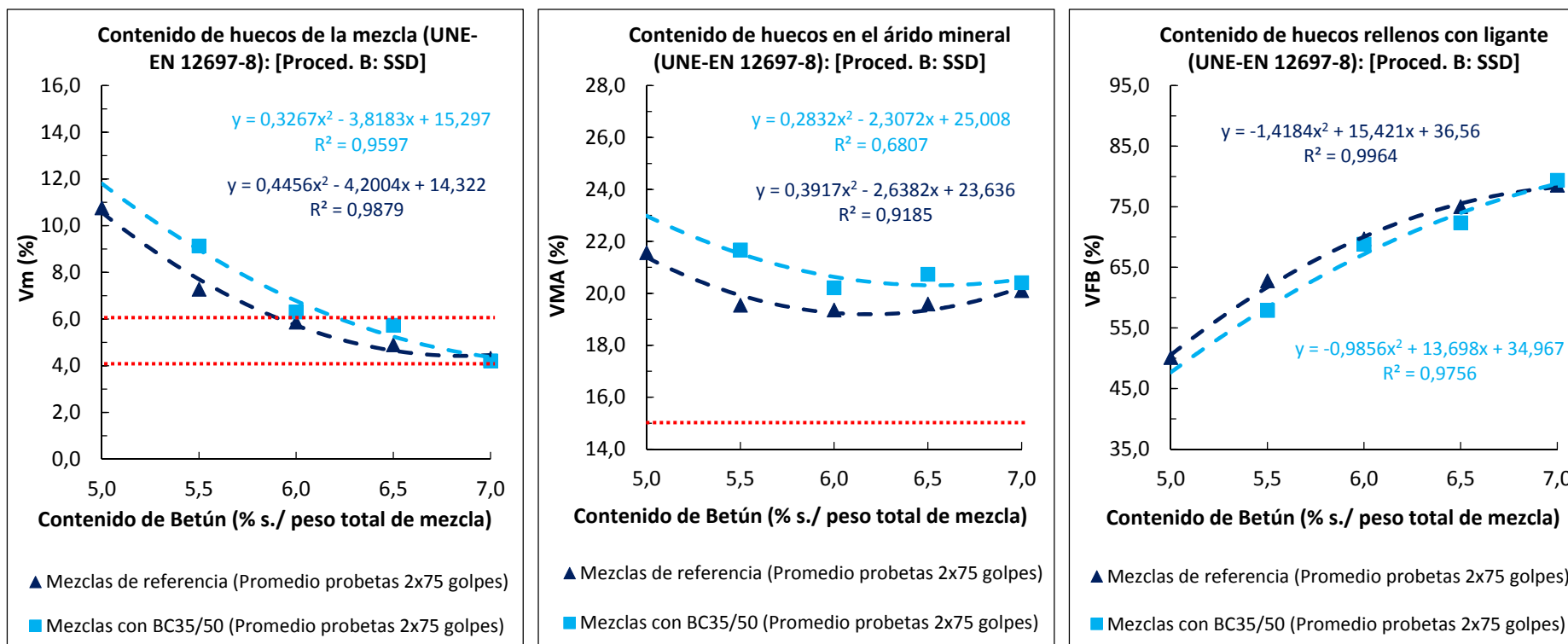


Figura 4.7 Contenido de huecos por el procedimiento SSD según contenido de ligante y tipo de mezcla: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante.

\* Las líneas rojas discontinuas de puntos representan los límites establecidos ( $4\% \leq V_m \leq 6\%$  y  $VMA \geq 15\%$ ) para mezclas tipo AC en capas superficiales del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).



#### 4.4.1.2 Compactibilidad

En las Figs. 4.8, 4.9, 4.10 se analiza el comportamiento de las mezclas durante el proceso de compactación de las probetas cilíndricas sometidas a 100 golpes por cada cara. En la Fig. 4.8 se muestra la relación entre la densidad aparente geométrica de las probetas y el contenido de betún empleado. Al aumentar el contenido de ligante, la densidad de las probetas aumenta en el caso de las mezclas con caucho (con una diferencia de un 4.3%) siendo más estable la densidad en el caso de las mezclas elaboradas sin caucho (la variación se sitúa en el 1%). La densidad aparente de las mezclas sin caucho es entre un 4-7% inferior a la de las mezclas de referencia, lo cual pone de manifiesto el efecto amortiguador del caucho y la dificultad de una correcta compactación de estas mezclas. De la misma manera, en la Fig. 4.10 se muestra la evolución de la densidad aparente geométrica de cada tipo de mezcla (según contenido de betún) a medida que se aplican los golpes de compactación. Como fácilmente se aprecia, las mezclas sin caucho presentan una mayor densidad que las mezclas fabricadas con el betún-caucho.

Finalmente, en la Fig. 4.9 se expone la relación entre la resistencia a la compactación y el contenido de ligante empleado. La resistencia a la compactación que ofrecen las mezclas de referencia es menor que la de las mezclas con BC conforme aumenta el contenido de ligante.

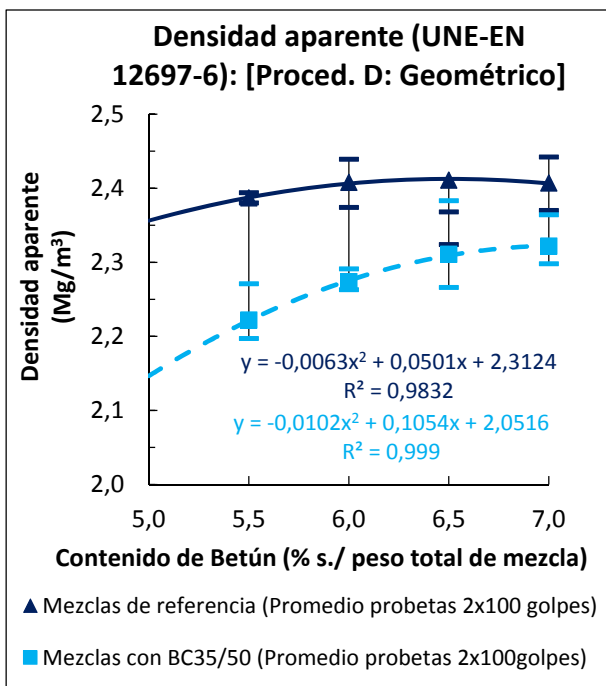


Figura 4.8 Densidad aparente según procedimiento geométrico de probetas compactadas a 100 golpes por cara (Mg/m³).

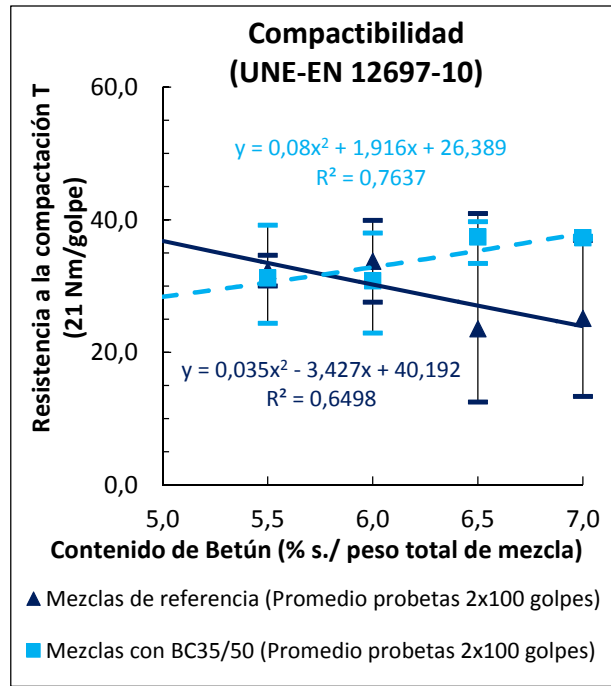


Figura 4.9 Resistencia a la compactación de probetas compactada a 100 golpes por cara (21 Nm/golpe).

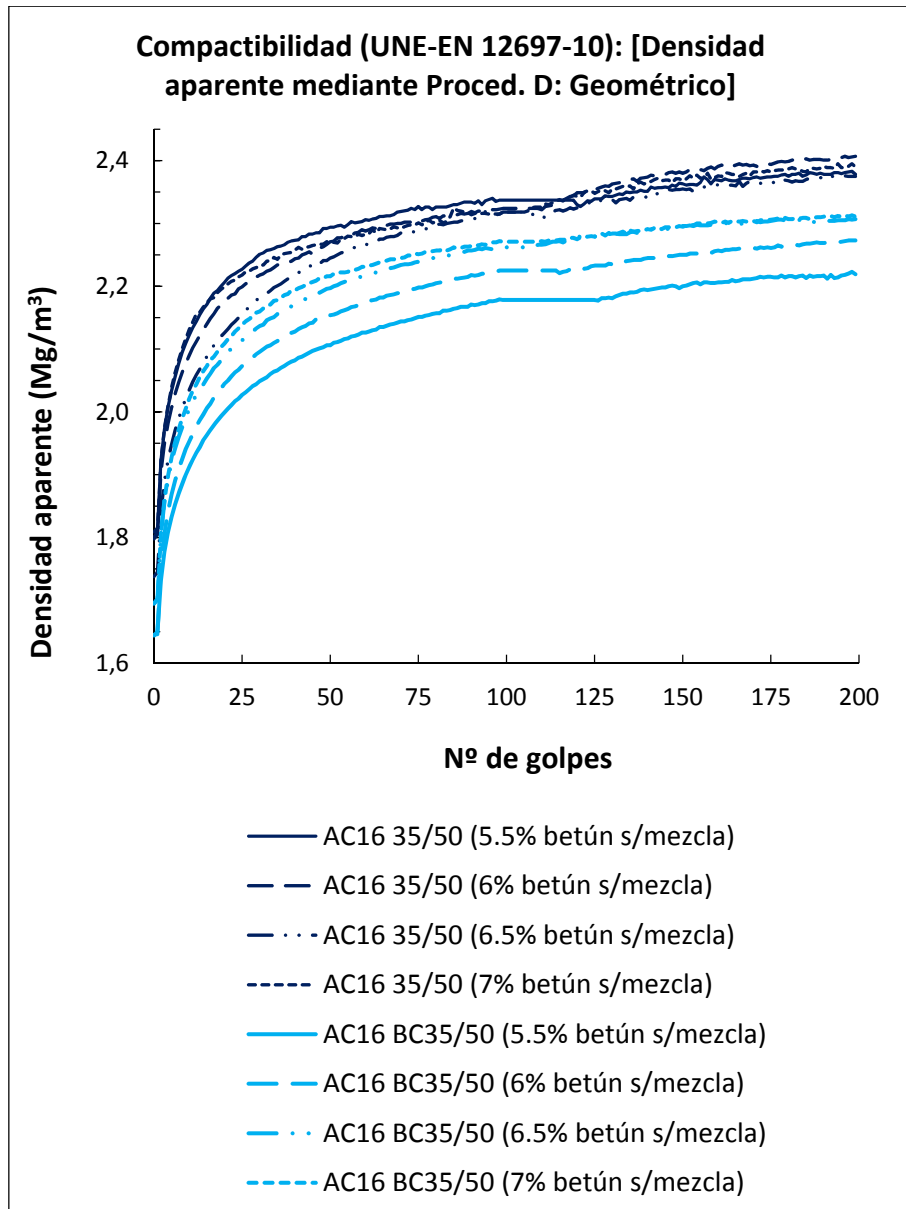


Figura 4.10 Evolución de la densidad aparente geométrica de las mezclas conforme al número de golpes aplicados (según contenido de ligante).

#### 4.4.1.3 Degradación granulométrica

En la Fig. 4.11 se muestra la variación de la granulometría de las probetas cilíndricas (2x100 golpes) para cada tipo de mezcla y cada fracción granulométrica empleada. En líneas generales se aprecia que, debido al proceso de machaqueo de los áridos durante la compactación, se reduce el contenido de partículas gruesas e intermedias (2.77-6.93%) mientras que la proporción de partículas finas aumenta (10.00-14.32%). Esta circunstancia es lógica debido a que durante los impactos de la compactación el árido más grueso se va fracturando y por tanto se reduce tu tamaño, a favor de la fracción fina. La disminución del contenido de polvo mineral (2.4-4.4%) no es significativa porque se debe a la volatilidad de estas partículas tipo polvo durante el proceso de ignición de las probetas cilíndricas.

En cuanto a la comparación entre tipos de mezcla (mezclas de referencia vs. mezclas con caucho), se observa que las mezclas que incorporan caucho tienden a tener un menor aumento de partículas finas (10.0-11.6%) que las mezclas de referencia (10.7-14.3%). La diferencia, aunque no es significativa debido al reducido porcentaje de caucho incorporado en la MB (sólo un 10% sobre el peso del betún), confirma que **el caucho ejerce de elemento amortiguador durante el proceso de compactación**, evitando en cierta medida el desgaste por fragmentación del árido.

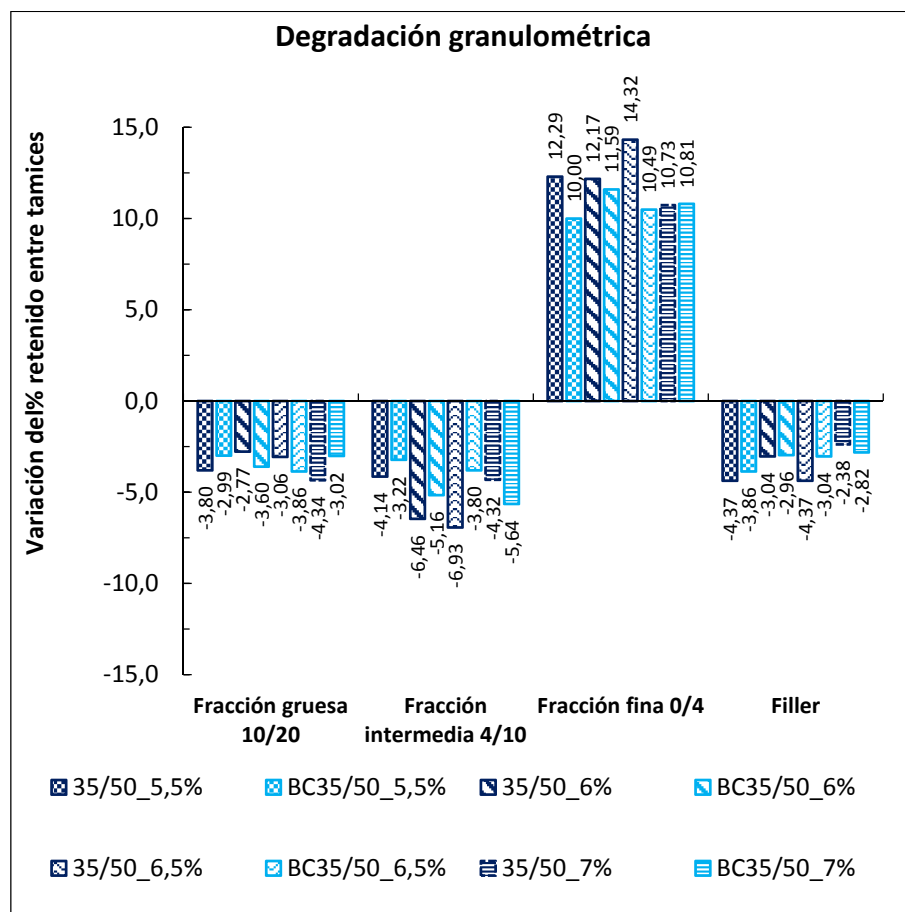
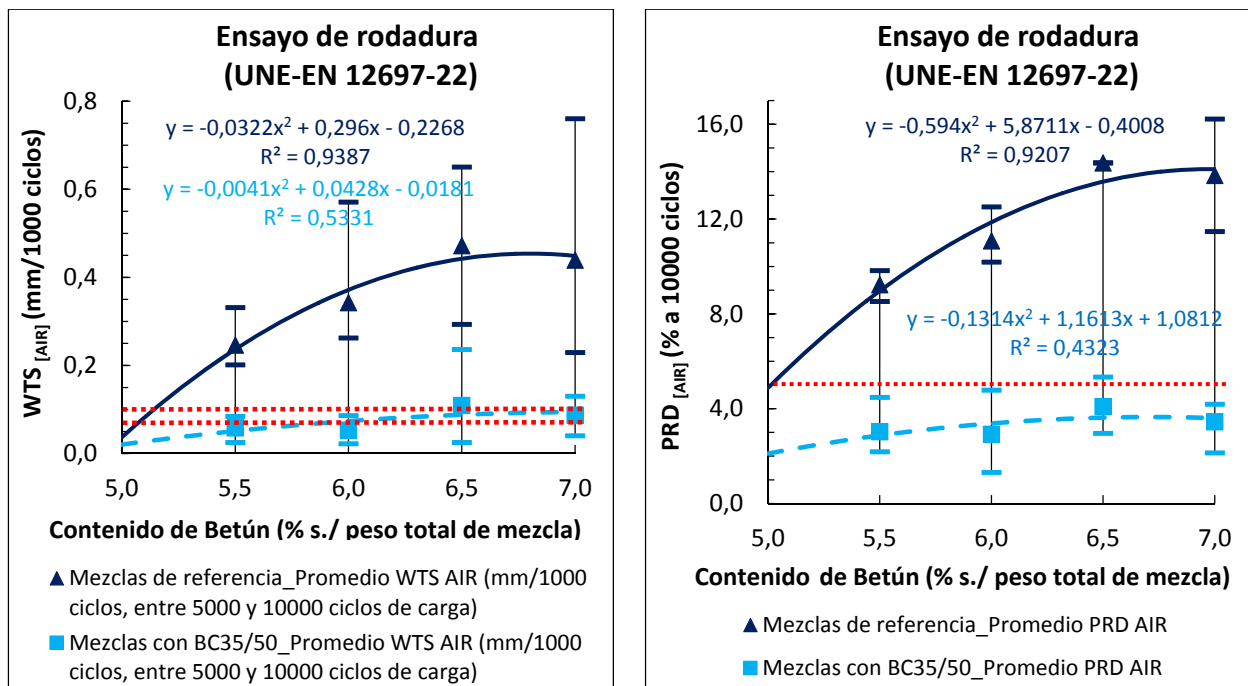


Figura 4.11 Variación del contenido de áridos de las probetas cilíndricas tras ser compactadas a 100 golpes por cara para cada fracción granulométrica.

## 4.4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS

### 4.4.2.1 Resistencia a la deformación permanente

A simple vista se aprecia una mejora notable de la resistencia a la deformación plástica de las mezclas con polvo de caucho con respecto a las mezclas de referencia según el ensayo de rodadura en pista (proced. B: al aire, dispositivo pequeño, a 60 °C y  $10^4$  ciclos). En la Fig. 4.12a se muestra la variación de la pendiente de la deformación ( $WTS_{(AIR)}$ ) de las probetas de placa compactadas mediante rodillo en función del contenido de betún, mientras que en la Fig. 4.12b se expone la variación del porcentaje de la profundidad media de la rodera ( $PRD_{(AIR)}$ ) según la proporción de ligante.



\*Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $WTS_{(AIR)} \leq 0,10$  mm/1000 ciclos;  $PRD_{(AIR)} \leq 5\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

Figura 4.12 Ensayo de rodadura en pista por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos para cada mezcla según contenido de ligante y tipo de mezcla: a)  $WTS_{(AIR)}$  (mm/1000ciclos); b)  $PRD_{(AIR)}\%$

En la gráfica de la Fig. 4.12a se observa que la pendiente de la profundidad de rodera ( $WTS_{(AIR)}$ ) se reduce entre el 322.8-546.0% (dependiendo del contenido de betún) y en la Fig. 4.12b la profundidad de rodera proporcional ( $PRD_{(AIR)}$ ) desciende entre el 6.2-10.4%. Estos resultados permiten afirmar que **el uso del BC como ligante en mezclas con áridos volcánicos marginales mejora significativamente la deformación plástica de la MB** debido a las propiedades elásticas del caucho. Además **el aumento del contenido de betún no afecta significativamente a la reducción de la profundidad de rodera** de las mezclas fabricadas con betún-caucho.

Los resultados obtenidos de **las mezclas mejoradas con caucho permiten cumplir las especificaciones de carreteras** ( $WTS_{(AIR)} \leq 0,10$  mm/1000 ciclos;  $PRD_{(AIR)} \leq 5\%$ ), lo que no sucede con las mezclas de referencia, quedando éstas fuera de los límites establecidos en la regulación española para cualquier contenido de ligante analizado.

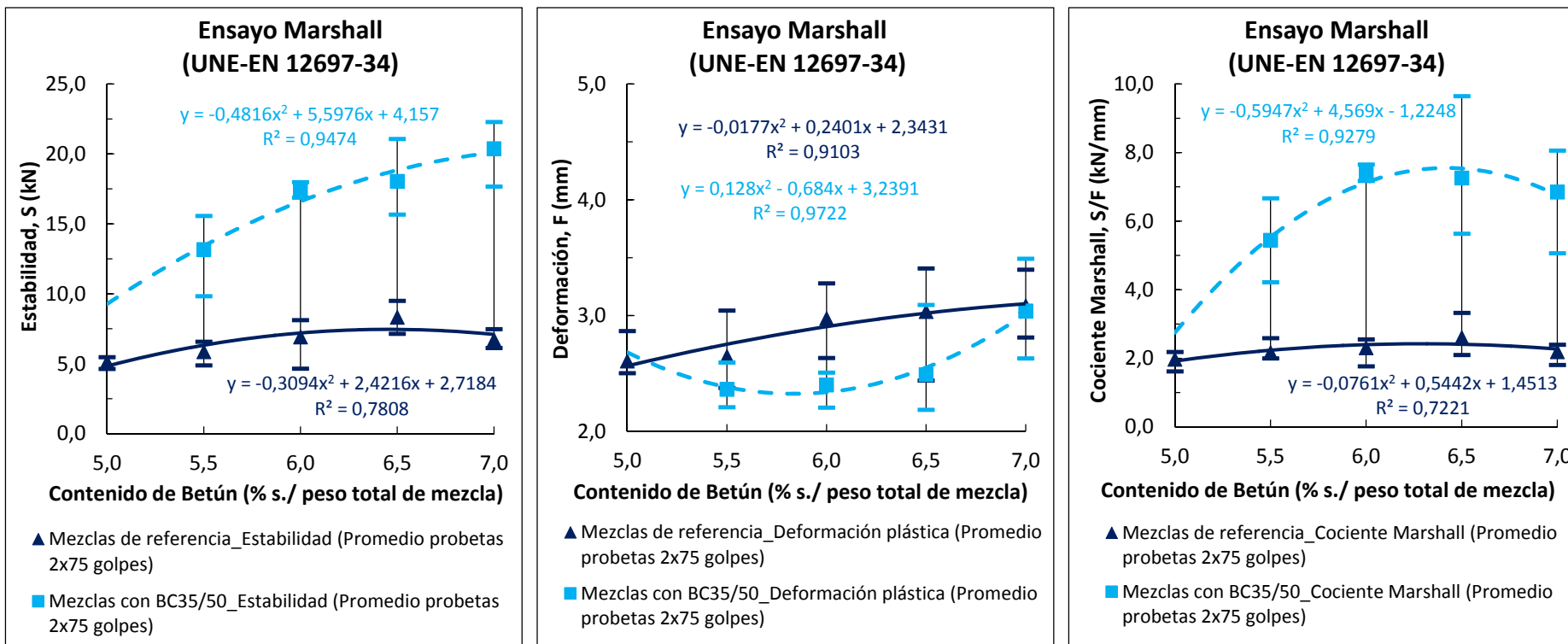


Figura 4.13 Resultados del ensayo Marshall según contenido de ligante y tipo de mezcla: a) Estabilidad máxima; b) Deformación plástica; c) Cociente Marshall

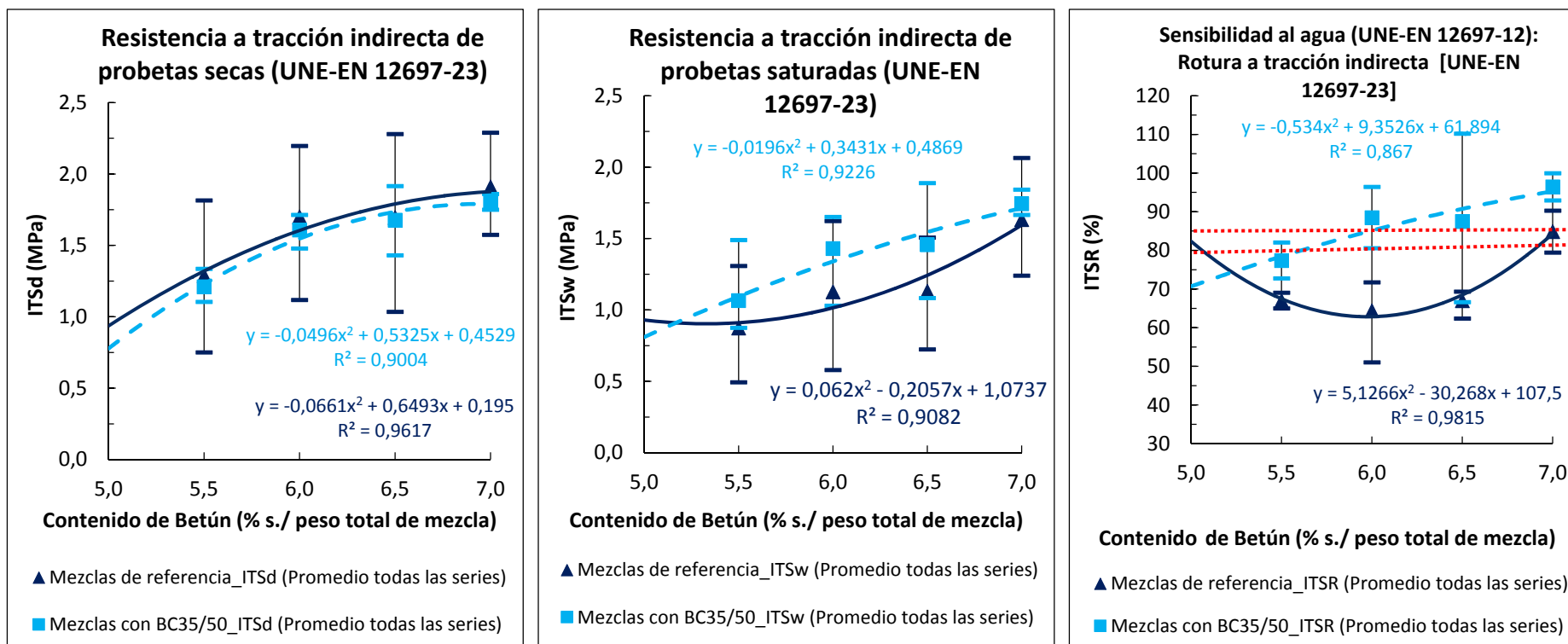


Figura 4.14 Resultados del ensayo de sensibilidad al agua según contenido de ligante y tipo de mezcla: a) ITSd en condiciones secas; b) ITSw en condiciones de saturación; c) ITSR

\*Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $80\% \leq ITSR \leq 85\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

La desviación estándar de estos resultados es menor en el caso de las mezclas con caucho mientras que el coeficiente de variación fue mayor dado que los valores promedio fueron más reducidos (Tabla 4.8).

En la Fig.4.13 se pueden apreciar resultados similares medidos mediante el ensayo Marshall realizado sobre probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara. Se observa un incremento de la estabilidad en las mezclas con BC35/50 con respecto a las mezclas de referencia que varía entre el 145.0-197.6% (dependiendo del contenido de betún), una reducción del valor de deformación Marshall (0.2-19.4%); y por tanto, un incremento del coeficiente Marshall que varía entre el 162.8 y 242.0%. En este ensayo, la dispersión estadística de los valores obtenidos fue similar en ambos tipos de mezclas (Tablas 4.7 y 4.8).

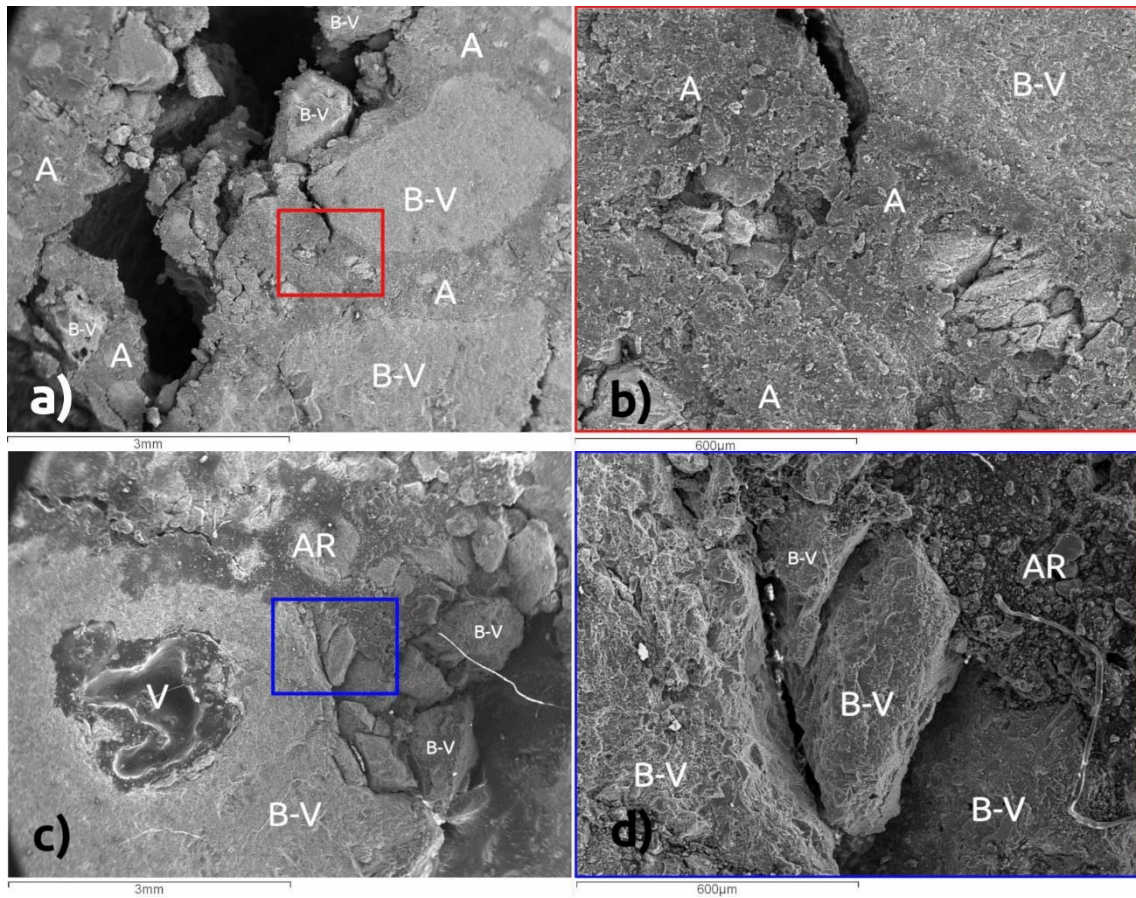
#### 4.4.2.1 Sensibilidad al agua

La resistencia a tracción indirecta a 15 °C de las probetas cilíndricas sometidas a condiciones de saturación ( $ITS_w$ ) (72h a 40 °C) de las mezclas con caucho fue siempre superior (6.8-28.8%) comparado con el mismo subconjunto de probetas de las mezclas de referencia para cualquier contenido de ligante (Fig. 4.14b). Sin embargo, la resistencia a tracción indirecta del subconjunto de probetas secas ( $ITS_d$ ) es similar en ambos tipos de mezclas (Fig. 4.14 a). A pesar de que las mezclas con caucho presentan un mayor contenido de huecos (Figs. 4.6 y 4.7), estos resultados prueban la **mejora frente a la acción del agua** que aporta el betún BC35/50 a las mezclas con áridos volcánicos vacuolares y reflejan un importante aumento (10.4-24.1%) en la relación entre ambos índices de resistencia ( $ITSR$ ) como puede observarse en la Fig. 4.14c.

Esta mejora está estrechamente relacionada con una mayor tensión interfacial entre el betún-caucho y las partículas de árido. Este hecho puede observarse en las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de alta resolución de la Fig. 4.15 (c y d), donde aparecen fisuras en las partículas del árido pero la unión árido-ligante se mantiene estable debido a una mejora de la adhesividad. Mientras que por el contrario, en la mezcla de referencia con betún convencional, las fisuras se extienden principalmente entre los contactos de las partículas (Fig. 4.15 a y b).

De acuerdo con Mull et al. (2002), los betunes mejorados con caucho pueden aumentar la tensión interfacial del betún y los áridos creando crestas microscópicas muy finas y hoyuelos muy pronunciados que dan lugar a superficies de fractura menos lisas. Este mayor grado de trabazón entre los componentes de la mezcla podría explicar el comportamiento micromecánico y, por lo tanto, la mejora de la resistencia a tracción de las mezclas con caucho.

Estos resultados son significativos para el uso de los áridos volcánicos marginales puesto que al contrario que los resultados obtenidos por Pérez y Pasandín (2017) con áridos marginales procedentes de residuos de la construcción, las mezclas con BC35/50 y este tipo de árido logra mejorar la resistencia frente a la acción del agua.



\*(B-V) Clasto de árido del litotipo basalto vesicular (BOPV); (V) Poro, hueco; (A) Betún convencional; (AR) Mezcla de betún-caucho.

Figura 4.15 Imágenes SEM de la superficie de rotura de 2 probetas de MBC tras el ensayo de tracción indirecta: una con betún convencional (imágenes a y b) y otra con betún-caucho (imágenes c y d).



#### 4.4.2.2 Contenido óptimo de ligante

En base a los resultados obtenidos hasta este punto, se ha buscado determinar el contenido óptimo de ligante en función de los límites establecidos en el PG-3 para una mezcla tipo AC en la capa de rodadura de un pavimento asfáltico. Comparando ambas mezclas se observa que el contenido óptimo de betún se sitúa entre el 6.00-6.50%, cumpliendo en la mayoría de las propiedades en el caso de las mezclas con BC35/50 para un contenido de betún del 6.25%.

Tabla 4.9 Determinación del contenido óptimo de ligante en función del cumplimiento de las especificaciones para cada propiedad analizada.

Propiedades	Especificaciones para una mezcla AC en capa de rodadura	Contenido de Betún% (sobre peso total de la mezcla)									
		5.00	5.25	5.50	5.75	6.00	6.25	6.50	6.75	7.00	
Volumétricas	Máximo valor $\rho_{ssd}$										
	$4 \leq V_m \leq 6\%$										
	$VMA \geq 15\%$										
Sensibilidad al agua	ITSR $\geq 85\%$										
Deformación permanente	$WTS_{(AIR)} \leq 0.07-0.10$										
	$PRD_{(AIR)} \leq 5\%$										
Estabilidad Marshall	Máximo valor S										
	Máximo valor S/F										

\* En azul oscuro se representa las mezclas de referencia, en azul claro las mezclas BC35/50.

#### 4.4.2.3 Rigidez

Para el análisis del comportamiento mecánico de las mezclas analizadas, se evaluó el módulo dinámico de rigidez mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara (IT-CY, factor de carga superficial  $k=0.6$ , a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ). Las probetas elaboradas con polvo de caucho proporcionan un valor promedio del módulo de rigidez de 6537 MPa y las mezclas de referencia de 6474 MPa. Esto implica que **ambas mezclas proporcionan una rigidez adecuada** para el tipo de mezcla diseñada (AC Densa o Semidensa  $S_m \geq 6000\text{ Mpa}$ ) (Consejería de Obras Públicas y Transportes-Sevilla, 2007).

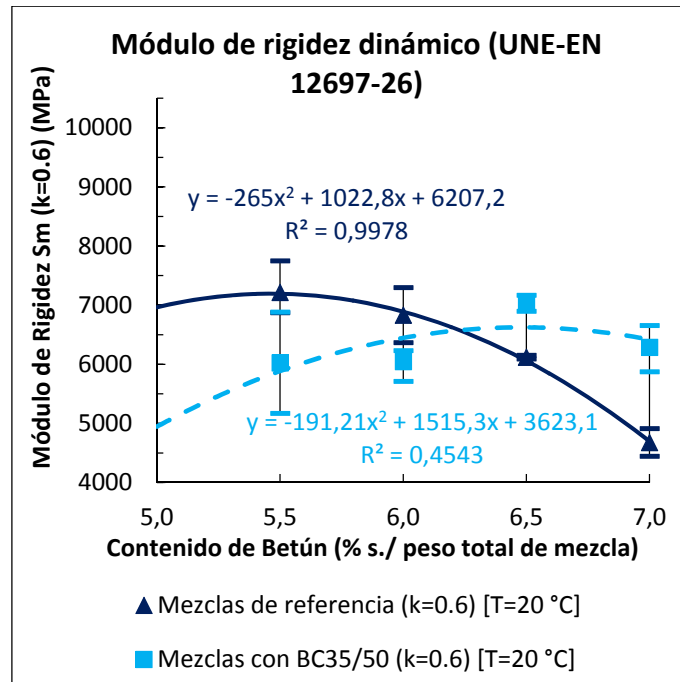


Figura 4.16 Valores del módulo de rigidez dinámico obtenido mediante ensayo de tracción indirecta en función del contenido de ligante y tipo de mezcla.

En la Fig. 4.16 se representa el valor del módulo de rigidez dinámico frente a los distintos contenidos de betún de las mezclas. En el caso de la mezclas de referencia sin caucho se observa que el módulo de rigidez disminuye al aumentar la proporción de ligante ( $\leq 35.2\%$ ). Por el contrario, este módulo aumenta conforme aumenta el contenido de betún en las mezclas con caucho ( $\leq 16.7\%$ ). Comparando ambos tipos de mezclas, con contenidos de betún del 5.5% y 6.0% el módulo de rigidez de las mezclas BC35/50 fue inferior al de la mezcla de referencia (19.7% y 13.0%, respectivamente). Sin embargo para mayores contenidos de betún, el módulo de rigidez de las mezclas BC35/50 fue superior (14.9% y 34.4% para un 6.5% y 7% de betún, respectivamente). La máxima rigidez de las mezclas con caucho se obtuvo para un contenido de betún del 6.5% (s/total de la mezcla) mientras que para las mezclas de referencia se obtuvo para un 5.5% de betún, un contenido de ligante un 1% inferior.

El cambio en la rigidez de la mezcla se justifica por el cambio de viscosidad del ligante con la introducción del caucho que actúa como espesante (Rodríguez-Alloza y Gallego, 2017).

Otros estudios confirman que las mezclas con BC35/50 presentan un mayor módulo de rigidez (Pasandín y Pérez, 2017). No obstante, en nuestro caso se observa que para contenidos de betún inferiores a un 6.5%, las mezclas elaboradas con caucho tiene un menor módulo de rigidez que las mezclas sin caucho. Esto puede atribuirse a la influencia que ejerce el árido vacuolar empleado, ya que debido a su estructura porosa la mezcla tiene un mayor contenido de huecos, una peor cobertura de los áridos y una mayor absorción del ligante hacia los poros, lo que conlleva a una menor rigidez de la mezcla.

Los resultados obtenidos muestran una mayor dispersión estadística en el caso de las mezclas BC35/50 (Cv: 8.5% para las mezclas BC35/50 y Cv: 6.0% para las mezclas de referencia) (Tablas 4.7 y 4.8).

#### 4.4.2.4 Fatiga

El ensayo de fatiga se realizó con probetas prismáticas tipo vigas a flexión sobre 4 puntos (a 20 °C,  $10^6$  ciclos y 10 Hz). Para este ensayo sólo se trabajó con un contenido de betún (6% sobre el peso total de la probeta) basándonos en los resultados obtenidos en el resto de ensayos (Tabla 4.9).

En la Fig. 4.17 se muestran los resultados obtenidos de cada una de las vigas ensayadas tanto para la mezcla de referencia como la mezcla con BC35/50. En ella se relacionan cada nivel de deformación con el número de ciclos resistidos por la probeta. Se observa que **ambas mezclas tienen comportamientos similares, siendo ligeramente superior la resistencia a fatiga de la mezcla BC35/50**. Los resultados de la mezcla con caucho muestran un mejor ajuste de la recta de regresión ( $R^2$ : 0.822 para la mezcla BC35/50 y  $R^2$ : 0.744 para la mezcla de referencia).

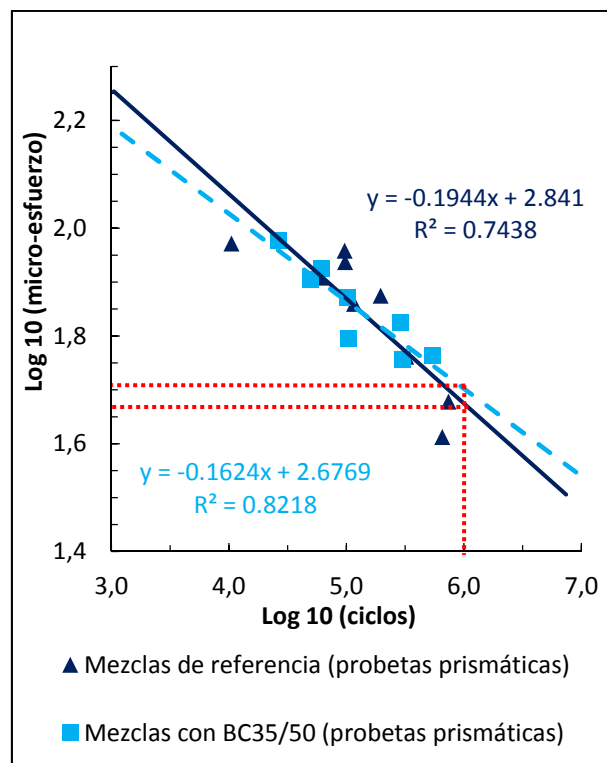


Figura 4.17 Valores obtenidos durante el ensayo de fatiga mediante flexión en 4 puntos para un contenido de ligante del 6% (s/peso total de la mezcla).

## 4.5 CONCLUSIONES

---

A raíz del análisis de las propiedades de caracterización de las MB puede concluirse que:

- **La utilización del betún-caucho** en mezclas con áridos volcánicos vacuolares **es un método eficiente para mejorar el comportamiento de este tipo de áridos, ya que permite que permite obtener MB que cumplen con las exigencias** de la normativa española de carreteras (PG-3).
- **El contenido de huecos (Vm) y el contenido de huecos en el árido mineral (VMA)** de las mezclas con BC35/50 **son ligeramente superiores** a los valores obtenidos para las mezclas de referencia (el Vm es hasta un 25% superior y el VMA hasta un 11% por el procedimiento SSD), debido a las **dificultades para lograr un mezclado y compactación adecuados** por el **cambio de viscosidad del ligante** al introducir el caucho. Sin embargo, **los contenidos de huecos analizados cumplen con las especificaciones normativas** para mezclas con contenidos de betún  $\geq 6.0-6.25\%$  (sobre el peso de la mezcla).
- **El contenido óptimo de betún** para lograr la máxima densidad aparente se sitúa en el **7.0% para las mezclas con BC35/50** mientras que en **las mezclas con betún convencional** se sitúa en el **6.5%**. **El alto contenido de ligante** en ambas mezclas se justifica por la **alta absorción** ejercida por el **árido vacuolar**.
- **Las mezclas con BC35/50 aumentan la resistencia a la sensibilidad al agua** en comparación con las mezclas de referencia. **La resistencia a la acción del agua** medida por tracción indirecta en probetas cilíndricas (50 golpes por cara) **aumenta** entre un 10.4% y un 24.1% en las mezclas con BC35/50 dependiendo del contenido de betún. Estas mezclas cumplen las especificaciones normativas a partir de un contenido de ligante  $\geq 6.0\%$  (sobre el peso de la mezcla). **El empleo de este tipo de ligante aporta impermeabilidad y mejora la adhesividad en la interfaz árido-betún en el caso de mezclas con áridos con una alta porosidad** como son los áridos volcánicos empleados.
- **La resistencia a deformación permanente mejora notablemente** en el caso de las mezclas con BC35/50 con respecto a las mezclas convencionales, al reducirse las deformaciones plásticas en el ensayo de rodadura. **La pendiente de la deformación en pista disminuye** entre un 322.8-546.0% (dependiendo del contenido de ligante) **y la profundidad de la rodera disminuye** entre el 197.7–279.6%, cumpliendo con las especificaciones de pavimentos asfálticos.
- De forma similar, las probetas cilíndricas empleadas **en el ensayo Marshall muestran mejores resultados** en el caso de las mezclas con caucho. **La estabilidad Marshall aumenta** entre un 145.0-197.6% mientras que **la deformación disminuye** entre un 0.2-19.4%, por lo que el coeficiente Marshall aumenta entre un 162.8-242.0%.
- Los resultados prueban que **las mezclas con áridos volcánicos ofrecen rigidez suficiente** para su uso como mezcla tipo AC bajo condiciones de carga dinámica. Las mezclas con un contenido de BC35/50 del 6.25% (sobre el peso de la mezcla) ofrecen un módulo de rigidez de 6537 MPa a 20 °C, superior al de la mezcla convencional 6474 MPa.
- **La introducción del caucho contribuye ligeramente a alargar la vida en servicio de las mezclas** frente a esfuerzos de fatiga antes de la rotura.

## 5 DESARROLLO DE MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES CON BETÚN CAUCHO

### 5.1 INTRODUCCIÓN

El polvo de caucho reciclado empleado por vía húmeda en las mezclas bituminosas conlleva un gran número de ventajas tanto a nivel económico y medioambiental, como desde el punto de vista mecánico (Liu *et al.*, 2009; Moreno *et al.*, 2013; Shu y Huang, 2014; Kakar *et al.*, 2015; Gibreil y Feng, 2017). Sin embargo, uno de los grandes inconvenientes que presenta esta técnica es el incremento de las temperaturas de mezclado y compactación con respecto a las temperaturas de fabricación de las mezclas convencionales.

A partir de las tecnologías disponibles para la producción de las mezclas en función de su temperatura de mezclado podemos establecer la siguiente clasificación (Bueche, 2009; EPA, 2014):

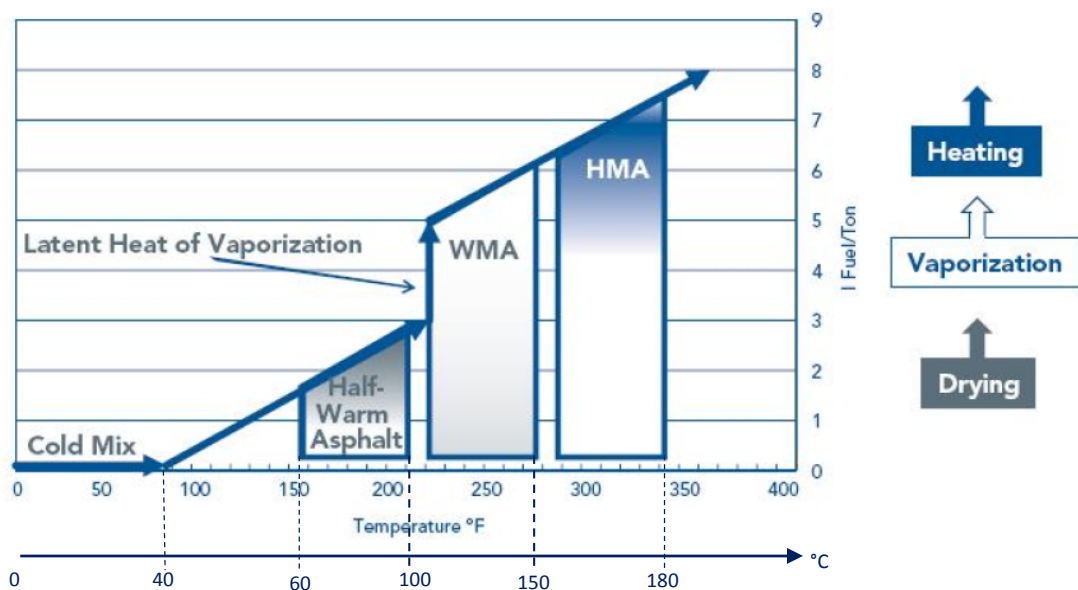


Figura 5.1 Clasificación de las mezclas bituminosas en función de su temperatura de trabajo con su gasto de combustible (aproximado) por tonelada de producción (D'Angelo *et al.*, 2007).

- **Mezclas frías (Cold Mixes):** se trata de aquellas mezclas bituminosas producidas a temperatura ambiente (hasta los 40 °C) que para conseguir la trabajabilidad adecuada utilizan emulsiones o betunes espumados.
- **Mezclas templadas (Half-Warm Mix Asphalt):** este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún momento la temperatura de ebullición del agua (100 °C), usando para ello en la mayoría de los casos la humedad de los áridos, calentando los áridos y la emulsión por encima de los 40 °C (generalmente unos 60 °C).

- **Mezclas semicalientes** (*Warm Mix Asphalt*): se mueven en un rango de producción que varía desde temperaturas poco superiores a los 100 °C, hasta cerca de los 150 °C. Este tipo de mezclas serán el objetivo de este capítulo.
- **Mezclas calientes** (*Hot Mix Asphalt*): son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los 160 °C. Requieren temperaturas tan elevadas para conseguir una manejabilidad adecuada de las mezclas, así como una mejor envuelta de los áridos.

Al incorporar el polvo de caucho de NFU a las mezclas se requieren temperaturas de trabajo al menos 10-15 °C superiores a las convencionales debido al incremento de la viscosidad del ligante por el proceso de digestión del caucho en el betún (Wang *et al.*, 2017). El ligante, al perder fluidez, pierde también facilidad de manejo, obliga a reducir los tiempos de mezclado y compactación y, en consecuencia, a aumentar los costes de producción (Lo Presti, 2013). Este aumento de las temperaturas implica un aumento en los consumos energéticos (0.5-1 l/t más) asociados a mayores costes de producción y una mayor emisión de gases contaminantes a la atmósfera (1.3-2.5 kg CO<sub>2</sub>/t superiores) derivados del calentamiento de los betunes. Por lo tanto, para poder garantizar que las mezclas elaboradas con caucho sean eco-eficientes es inevitable asociarlas a tecnologías vinculadas al desarrollo de mezclas bituminosas a más bajas temperaturas (*Warm mix asphalt, WMA*) que permitan conservar sus prestaciones pero a menores temperaturas de producción.

Actualmente existen diversos productos comerciales y técnicas que permiten una reducción efectiva de las temperaturas de trabajo. A pesar de que cada producto tiene unas características particulares, podemos agruparlos en función del principio de funcionamiento en el que se basan: a) procesos de espumación, b) aditivos orgánicos y c) aditivos químicos (Ministerio de Ciencia e Innovación, 2011). De estos tres grupos, las técnicas que usan productos orgánicos, como las ceras microcristalinas para reducir la viscosidad del ligante, son las que han sido estudiadas con mayor profundidad. Muchas de estas técnicas emplean productos patentados para mejorar la fluidez del ligante y reducir la temperatura de producción entre 20-30 °C (Kakar *et al.*, 2015; Rondón-Quintana *et al.*, 2015) mejorando ciertos aspectos del comportamiento de las mezclas bituminosas (sensibilidad al agua, resistencia a fatiga y resistencia a la deformación permanente), a la vez que se ahorra energía y se reducen las emisiones contaminantes (Rodríguez-Alloza *et al.*, 2015). Sin embargo, los aditivos orgánicos son caros ya que requieren ser empleados en grandes cantidades (alrededor del 2-4% sobre el peso del betún) y en algunos casos cristalizan por debajo de determinadas temperaturas (Sánchez *et al.*, 2011), haciendo más rígida la mezcla y, por ende, más complicado el proceso de compactado, por lo que la mezcla bituminosa se vuelve más susceptible a la fractura a baja-temperatura (Edwards y Redelius, 2003).

Por su parte, los aditivos químicos tenso-activos aumentan la capacidad surfactante del ligante con los áridos. Estos productos contribuyen a lograr una cobertura eficiente de los áridos al reducir la tensión superficial del betún, aumentando la trabajabilidad de la mezcla y disminuyendo la temperatura de compactación entre 15-30 °C (Yang *et al.*, 2017). Como consecuencia del uso de estos productos, se reducen las emisiones contaminantes y, en algunos casos, el consumo de betún. A pesar de que los fabricantes no ofrecen suficiente información relativa a la composición y características de sus productos (debido a las políticas de patentes) (Bonaquist, 2011; Rondón-Quintana *et al.*, 2015), se ha comprobado que su uso permite conservar o mejorar la resistencia a deformación permanente y la resistencia bajo cargas dinámicas de las mezclas (Ouni *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2017). Además, muchos de estos aditivos

también pueden aumentar la resistencia a la acción del agua debido a la presencia de polímeros en su composición (Rondón-Quintana *et al.*, 2015).

Basándonos en estas premisas, y con objeto de cumplir el reto medioambiental que suponen las mezclas con caucho, nuestro estudio se centrará en el empleo de un aditivo tenso-activo químico con propiedades surfactantes con las siguientes características: a) utilizable en pequeñas dosis (no superiores al 0.5% del peso del ligante) para que pueda ser económicamente viable en la producción de pavimentos a gran escala; b) dosificable en estado líquido para mayor facilidad de manejo; c) no causante de cristalización por debajo de ciertas temperaturas, como ocurre con las ceras, logrando densidades más altas y mejores propiedades para las mezclas

En este capítulo **se analizará el efecto de dicho aditivo en el proceso de fabricación de mezclas bituminosas con betún-caucho semicalientes**. Para ello se evaluarán las principales propiedades de MB elaboradas con betún mejorado con caucho en **diferentes rangos de temperaturas pero con la misma dosificación de áridos y ligante** (6% de betún sobre el peso total de la mezcla). La reducción de temperatura se realizará mediante el empleo del aditivo químico líquido, por ser más sencillo de dosificar que los productos granulares sólidos, en una proporción reducida (0.5% sobre el peso del betún). Los resultados obtenidos para estas mezclas se compararán con los obtenidos previamente para una mezcla con betún-caucho (MBC BC35/50) compactada a la temperatura convencional (170 °C) y una mezcla con ligante convencional sin caucho (MBC 35/50) compactada a 160 °C, ambas fabricadas con el mismo tipo y proporción de áridos y ligante.

## 5.2 METODOLOGÍA

---

### 5.2.1 MATERIALES

Para la fabricación de las diferentes mezclas MBSC se continuaron empleando los áridos volcánicos marginales (BOPV) procedentes de la cantera de la Autoridad Portuaria de Las Palmas, en las tres fracciones de estudio (10/20, 4/10 y 0/4 mm) que se utilizaron anteriormente en la fabricación de las mezclas bituminosas en caliente (MBC) con o sin caucho. Los datos referentes a las características de estos áridos se encuentran detallados en el apdo. 4.3.1 de este documento (Tabla 4.1).

En la mezcla de referencia sin caucho se empleó un betún comercial con un grado de penetración 35/50, mientras que en las mezclas mejoradas con caucho se usó un ligante equivalente con el mismo grado de penetración (BC35/50) fabricado en laboratorio mediante la adición del polvo de neumático. Este polvo se obtuvo de la trituración mecánica a temperatura ambiente de neumáticos fuera de uso (50% de camiones, 50% coches). Para asegurar la homogeneidad y consistencia, sólo se usó un lote de NFU. Los datos sobre su granulometría y composición son los que se describen en el apdo. 4.3.1 de este documento (Tabla 4.2). Las características de los dos ligantes empleados están recogidas en la Tabla 4.3.

Por su parte, el aditivo químico surfactante empleado para reducir la temperatura de mezclado y compactación fue el *Cecabase RT®* (Arkema Innovative Chemistry, Francia), un líquido comercial tensoactivo compuesto de al menos un 50% de elementos renovables. Sus principales características son:

- Viscosidad a 25 °C: 600 cP
- Punto de inflamación: > 200 °C
- Densidad: 0.997 Mg/m<sup>3</sup>
- Fácilmente soluble en el ligante

Como polvo mineral de aportación se empleó un cemento Portland con adición de tipo puzolana CEM II/B-P 32.5 R (#< 0.063 mm).

## 5.2.2 INSTRUMENTAL EMPLEADO

El equipo empleado para el mezclado del betún mejorado con caucho y el aditivo químico fue:

- una **unidad dispersadora** (IKA Ultra-Turrax T50 digital, con un agitador de hélice), 600-15000 r.p.m, viscosidad máxima 5000 mPa·s
- un contenedor metálico de 1 L de capacidad
- un baño termostático controlado automáticamente (Selecta), rango entre 5 y 200 °C, estabilidad y precisión de  $\pm 1.0$  °C, relleno con parafina líquida.



Figura 5.2 Unidad mezcladora para preparar el betún mejorado con caucho y el aditivo de las mezclas semicalientes. En el lateral del equipo, el aditivo químico empleado.

El resto de equipos empleados durante la fabricación y ensayo de las MB son los mismos que los descritos en el apartado 4.3.2. de este documento.



### 5.2.3 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Para poder analizar el efecto de la reducción de temperatura por la incorporación de un aditivo químico en mezclas bituminosas semidensas con árido basáltico poroso (BOPV), se compararán los resultados de varias mezclas semicalientes con betún-caucho fabricadas a diferentes temperaturas con dos mezclas bituminosas calientes elaboradas en la fase anterior de la tesis:

- a) MBC AC16 surf 35/50 S
- b) MBC AC16 surf BC35/50 S

Estas dos mezclas se fabricaron con el mismo tipo de árido (BOPV), misma distribución granulométrica (Tabla 4.4) e igual contenido de betún (6% sobre el peso total de la mezcla). El contenido de ligante empleado fue el que se determinó como óptimo tras el análisis de las propiedades volumétricas, estabilidad y deformación de las mezclas. La mezcla MBC AC16 surf 35/50 S empleó un betún convencional 35/50 mientras que la mezcla MBC AC16 surf BC35/50 S empleó un betún 50/70 que, al ser modificado por el polvo de caucho, su grado de penetración es equivalente a un BC35/50 por el cambio de consistencia y viscosidad del ligante. Para fabricar este ligante se calentaron unos 600 g de betún 50/70 a 180 °C a los que se añadió un 10% de polvo de caucho (sobre el peso del ligante) que se mezcló durante unos 60 minutos a 4000 r.p.m. manteniendo la temperatura de 180 °C mediante un baño de aceite para que todas las propiedades del caucho fueran transferidas al betún.

Como se describe en el Capítulo 4, la mezcla de referencia MBC AC16 surf 35/50 S se fabricó en el laboratorio calentando los áridos y el betún 35/50 a 170 °C (los áridos se calentaron al menos durante 8h y el ligante unas 3 h para alcanzar la temperatura de trabajo deseada). Posteriormente ambos se mezclaron, primero manualmente durante 1 minuto y luego mediante mezclador mecánico durante 2 min. La temperatura final tras el mezclado fue de 170 °C (en ningún caso menor a 165 °C) y la temperatura de compactación fue de 160 °C (no menor a 155 °C). En el caso de la mezcla de referencia MBC AC16 surf BC35/50 S, debido a que la viscosidad del betún mejorado con caucho es superior, la temperatura de calentamiento de los áridos y el ligante fue de 180 °C. La temperatura final tras el mezclado fue de 180 °C (no menor a 175 °C) y la compactación a 170 °C (no menor a 165 °C).

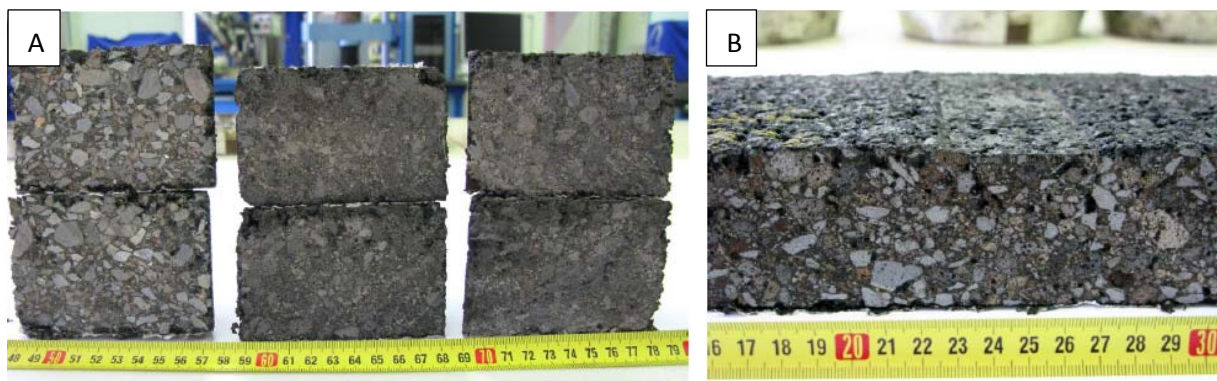


Figura 5.3 a) Secciones de las probetas cilíndricas: izqda.: MBC 35/50; centro: MBC BC35/50; drcha.: MBSC BC35/50 compactada a 140 °C. b) Sección probeta prismática de una probeta MBSC BC35/50 compactada a 140 °C.

Para producir las mezclas semicalientes se empleó la misma dosificación, tipo de áridos y de ligante que para la mezcla de referencia MBC AC16 surf BC35/50 S. En este caso, se añadió un 0.5% (sobre el peso del betún) de aditivo líquido *Cecabase RT*® al ligante calentado a 180 °C y se mezcló durante 10 minutos a 4000 r.p.m. a temperatura constante, para asegurarnos que el aditivo quedara correctamente incorporado en el betún.

Las MBSC se mezclaron en un rango de temperaturas que varía entre 140 °C y 170 °C y se compactaron entre 130 y 160 °C gracias al aditivo químico (Fig. 5.3). La compactación se realizó siempre 10 °C por debajo de la temperatura de mezclado. Tanto los áridos como el betún mejorado con caucho (con el aditivo incorporado) fueron precalentados a la misma temperatura, equivalente a la temperatura requerida para el mezclado y envuelta de los áridos. La envuelta se realizó manualmente durante 1 minuto y posteriormente se continuó el mezclado durante 2 minutos más mecánicamente.

Las probetas cilíndricas (D = 101.6 mm; h = 63.5 mm) se fabricaron usando la compactadora de impactos tipo *Marshall* conforme a la norma UNE-EN 12697-30 con 50 o 75 golpes por cara según el ensayo posterior a realizar. Las probetas tipo placa se compactaron mediante rodillo conforme a la norma UNE-EN 12697-33.

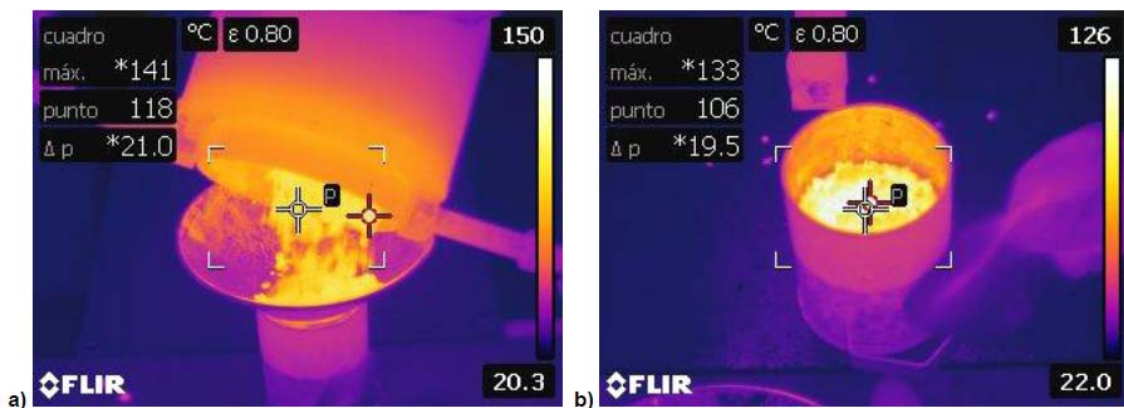


Figura 5.4 Imágenes infrarrojas de la fabricación de las probetas cilíndricas de las mezclas MBSC BC35/50: a) Temperatura de mezclado: 140 °C; b) Temperatura de compactado: 130 °C.

En caso necesario, las muestras fueron previamente acondicionadas en estufa durante el tiempo requerido para alcanzar la temperatura normalizada del ensayo y se mantuvieron a lo largo del ensayo en caso obligatorio.

En total en el laboratorio se fabricaron 83 probetas cilíndricas, 24 probetas de tipo placa, 36 probetas tipo viga y 12 muestras no compactadas de MBSC de tipo hormigón bituminoso semidenso con BC35/50 (MBSC AC16 surf BC35/50 S). Este tipo de mezclas asfálticas generalmente se emplean en la capa superficial de diferentes carreteras, tráfico y climas, con mejor macrotextura superficial, menor sensibilidad a las deformaciones permanentes y menor coste que las mezclas bituminosas densas. Las probetas y muestras de referencia fueron elaboradas en la fase anterior de la tesis y se describen en el capítulo anterior.

Tabla 5.1 Muestras y probetas realizadas según temperatura de mezclado

ENSAYO	MÍN/ensayo	MBC 35/50	MBC BC35/50	MBSC BC35/50			
		170°C	180°C	140°C	150°C	160°C	170°C
Densidad máxima	2	5	4	3	3	3	3
Densidad aparente	3	6	3	6	5	3	3
Contenido de huecos							
Ensayo Marshall							
Compactibilidad	3	3	3	3	3	3	3
Sensibilidad al agua	3+3	18	12	6	6	6	12
Módulo de rigidez dinámico	3	3	6	6	6	6	6
Ensayo de rodadura	2	4	4	4	4	2	2
Resistencia a la fatiga	4	12	12	12	6	6	12
<b>TOTAL</b>		<b>51</b>	<b>44</b>	<b>40</b>	<b>33</b>	<b>29</b>	<b>41</b>

#### 5.2.4 PROCEDIMIENTO OPERATIVO

De forma análoga al capítulo previo, las muestras sin compactar y las distintas probetas se sometieron a tres series de ensayos de caracterización para cada tipo de mezcla y temperatura agrupados según: a) propiedades volumétricas, b) propiedades mecánicas estáticas y c) propiedades mecánicas dinámicas. Los ensayos realizados son los recogidos en la [Tabla 5.2](#) y vienen descritos en el apdo. 4.3.4 de este documento.

En total, se ensayaron 238 muestras, con un total de 17 ensayos para la mezcla de referencia sin caucho MBC 35/50, 17 para la mezcla de referencia con caucho MBC BC35/50 y 59 para las mezclas MBSC con caucho.

Tabla 5.2 Número de ensayos realizados para la caracterización de las MB

ENSAYO	MBC 35/50	MBC BC35/50	MBSC BC35/50			
	170°C	180°C	170°C	160°C	150°C	140°C
Densidad máxima	2	2	1	1	1	1
Densidad aparente	3	4	4	4	3	3
Contenido de huecos						
Ensayo Marshall	2	1	2	2	1	1
Compactibilidad	1	1	1	1	1	1
Sensibilidad al agua	3	2	1	1	1	2
Módulo de rigidez dinámico	1	2	2	2	2	2
Ensayo de rodadura	2	2	2	2	1	1
Resistencia a la fatiga	3	3	3	3	3	3
<b>TOTAL</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>13</b>	<b>14</b>

### 5.3 RESULTADOS

En las Tablas 5.3 y 5.4 se resume los valores promedios y la dispersión de los resultados de cada propiedad analizada según la temperatura de compactación de cada tipo de mezcla.

Tabla 5.3 Parámetros estadísticos de las propiedades analizadas para las mezclas calientes (MBC) de referencia

Tipo de mezcla			MBC 35/50			MBC BC35/50		
Temperatura de mezclado			170°C			180°C		
Temperatura de compactación			160°C			170°C		
Propiedad de la mezcla			$\bar{X}$	Ds	Cv	$\bar{X}$	Ds	CV
Contenido de betún			%	6		6		
Densidad máxima	$\rho_{m\acute{a}x}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.49	0.14	5.48	2.54	0.01	0.35
Densidad aparente (SSD)	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.34	0.09	3.85	2.38	0.04	1.51
Densidad aparente (Geo.)	$\rho_{geo}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.28	0.08	3.33	2.28	0.04	1.60
Contenido de huecos de aire	$V_m$	%	5.87	-	-	6.30	-	-
Contenido de huecos del árido mineral	VMA	%	19.36	-	-	20.21	-	-
Contenido de huecos rellenos con ligante	VFB	%	69.69	-	-	68.82	-	-
Estabilidad Marshall	S	kN	6.91	1.58	22.82	17.42	0.78	4.50
Deformación Marshall	F	mm	2.97	0.32	10.83	2.40	0.17	7.07
Coficiente Marshall	MQ	%	2.30	0.37	15.99	7.41	0.34	4.56
Sensibilidad al agua	ITSR	%	64.33	11.57	17.98	88.46	11.22	12.69
Resistencia a tracción indirecta en condiciones secas	ITS <sub>d</sub>	MPa	1.70	0.43	25.20	1.61	0.11	6.75
Resistencia a tracción indirecta en condiciones saturadas	ITS <sub>w</sub>	MPa	1.13	0.42	37.44	1.43	0.28	19.92
Profundidad de rodera	RD <sub>(AIR)</sub>	mm	6.04	0.95	15.77	1.59	0.69	43.49
Porcentaje de la profundidad media de la rodera	PRD <sub>(AIR)</sub>	%	11.08	1.25	11.30	2.92	1.75	59.85
Pendiente de deformación en pista	WTS <sub>(AIR)</sub>	mm/1000 ciclos	0.34	0.15	44.47	0.05	0.03	56.60
Módulo de rigidez	Sm	MPa	6830	658	9.63	6044	291	4.81

Tabla 5.4 Parámetros estadísticos de las propiedades analizadas para las mezclas semicalientes (MBSC)

Tipo de mezcla			MBSC BC35/50				Ds	CV
			140°C	150°C	160°C	170°C		
Temperatura de mezclado			130°C	140°C	150°C	160°C		
Temperatura de compactación								
Propiedad de la mezcla			$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$		
Contenido de betún			%	6	6	6	6	
Densidad máxima	$\rho_{m\acute{a}x}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.56	2.55	2.54	2.56	0.02	0.62
Densidad aparente (SSD)	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.34	2.37	2.38	2.42	0.05	1.90
Densidad aparente (Geo.)	$\rho_{geo}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.25	2.28	2.29	2.31	0.05	2.02
Contenido de huecos de aire	$V_m$	%	8.49	7.31	6.15	5.68	1.26	18.2
Contenido de huecos del árido mineral	VMA	%	22.16	21.12	20.06	19.80	1.08	5.21
Contenido de huecos rellenos con ligante	VFB	%	61.70	65.39	69.33	71.33	4.28	6.39
Estabilidad Marshall	S	kN	9.84	10.58	13.77	14.08	2.03	16.79
Deformación Marshall	F	Mm	5.53	4.00	3.35	2.75	1.11	28.89
Coeficiente Marshall	MQ	%	1.78	2.69	4.16	5.13	1.37	38.85
Sensibilidad al agua	ITSR	%	71.36	84.52	87.85	94.54	9.74	11.52
Resistencia a tracción indirecta en condiciones secas	ITS <sub>d</sub>	MPa	1.33	1.03	1.29	1.27	0.24	19.63
Resistencia a tracción indirecta en condiciones saturadas	ITS <sub>w</sub>	MPa	0.95	0.87	1.15	1.19	0.11	10.31
Profundidad de rodera	RD <sub>(AIR)</sub>	mm	3.20	3.54	2.94	2.63	0.62	19.34
Porcentaje de la profundidad media de la rodera	PRD <sub>(AIR)</sub>	%	6.10	5.54	5.09	4.59	1.07	19.24
Pendiente de deformación en pista	WTS <sub>(AIR)</sub>	mm/1000 ciclos	0.20	0.17	0.18	0.16	0.07	35.91
Módulo de rigidez	Sm	MPa	7007	7687	9183	7745	623	7.84

## 5.4 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 5.4.1 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS

#### 5.4.1.1 Densidades y contenidos de huecos

En la Fig. 5.5 se analiza la densidad máxima teórica de los tres tipos de mezclas ensayadas. Aunque todas las mezclas se fabricaron con el mismo contenido de betún (6% sobre el peso de la mezcla), la densidad máxima teórica de la mezcla de referencia MBC BC35/50 fue un 2.2% superior a la de la mezcla de referencia MBC 35/50. Por su parte, la densidad máxima teórica de las mezclas MBSC BC35/50 no varía significativamente con el cambio de temperatura (Cv: 0.6%) y se mantuvo siempre superior a la densidad de las mezclas de referencia (Tablas 5.3 y 5.4).

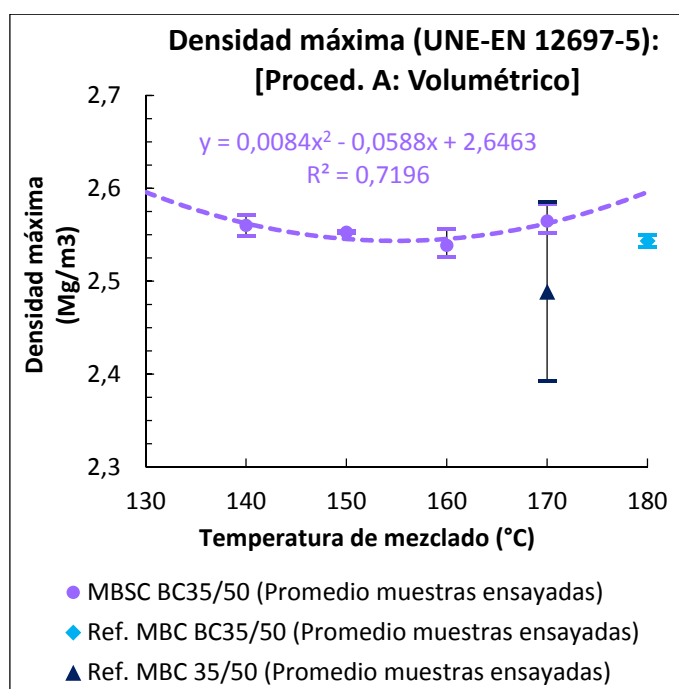


Figura 5.5 Densidad máxima de las muestras no compactadas según temperatura de mezclado

En las Figs. 5.6 y 5.7 se representa la densidad aparente de los tres tipos de mezclas en función de la temperatura de compactación de cada mezcla. La densidad aparente de las probetas cilíndricas (mezcladas a 180 °C y compactadas a 170 °C con 75 golpes por cara) de la mezcla de referencia con caucho (MBC BC35/50) es similar o ligeramente superior a la densidad de las probetas cilíndricas de la mezcla de referencia con betún convencional (mezcladas a 170 °C y compactadas a 160 °C con 75 golpes por cara). La diferencia existente es de +1.7% por el método SSD mientras que por el método geométrico la diferencia es de +0.3%. Además, se puede observar que la densidad aparente de las MBSC disminuye conforme desciende la temperatura de mezclado y compactación. Las densidades aparentes de las MBSC son inferiores a la densidad de la mezcla de referencia MBC BC35/50 cuando se compacta por debajo de 150 °C, mientras que se mantiene por encima de la densidad de la mezcla de referencia sin caucho MBC 35/50 cuando la compactación se realiza por encima de 135-140 °C. En general, las densidades

calculadas por el procedimiento SSD fueron superiores a las obtenidas por el método geométrico.

La densidad aparente obtenida para los tres tipos de mezclas ensayados ha demostrado ser homogénea, siendo más evidente en el caso de las mezclas con BC35/50 ( $C_v \leq 2.0\%$  para las MBSC BC35/50;  $C_v \leq 1.6\%$  para Ref. MBC BC35/50;  $C_v \leq 3.8\%$  para Ref. MBC 35/50).

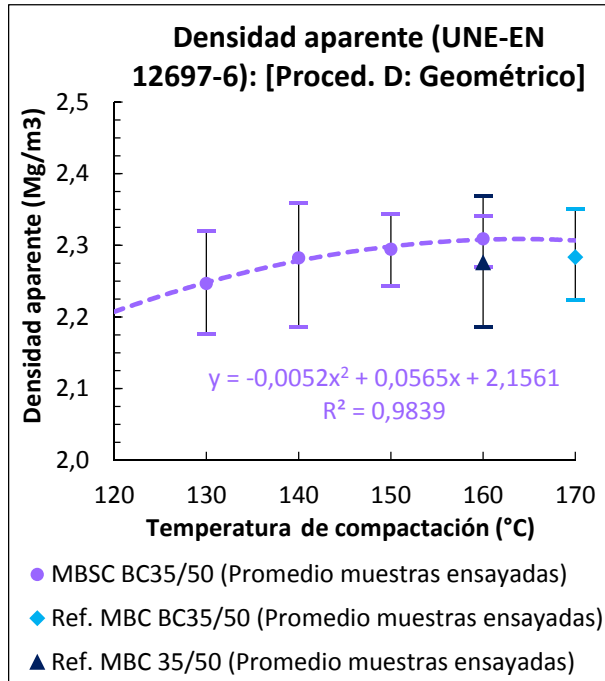


Figura 5.6 Densidad aparente geométrica de las probetas compactadas con 75 golpes por cara.

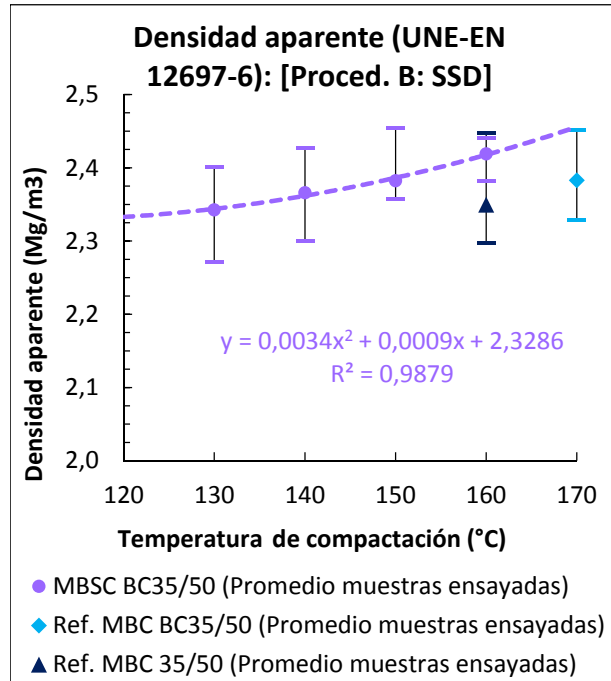


Figura 5.7 Densidad aparente SSD de las probetas compactadas con 75 golpes por cara.

En las Figs. 5.8 y 5.9 se representan las proporciones de huecos de las probetas cilíndricas (compactadas con 75 golpes por cara) calculadas a partir de la densidad geométrica y SSD, respectivamente. El contenido de huecos de aire en la mezcla ( $V_m$ ) y el contenido de huecos en el árido mineral (VMA) de la mezcla MBC BC35/50 son ligeramente superiores a los contenidos de la mezcla de referencia MBC 35/50 aunque la densidad aparente sea mayor en la primera mezcla. Esto se debe a que la densidad teórica máxima es superior en las mezclas con caucho como vimos anteriormente. El incremento del contenido de huecos de aire  $V_m$  varía entre +19.7% por el procedimiento geométrico (Fig. 5.8a) y +7.4% por el procedimiento SSD (Fig. 5.9a). Esta superioridad en el contenido de huecos sugiere una mayor dificultad de compactación de las probetas debida a una mayor viscosidad del ligante aunque se hayan compactado a una temperatura 10 °C por encima que las probetas de la mezcla de referencia sin caucho. Las Figs. 5.8c y 5.9c muestran el contenido de huecos rellenos con ligante ( $V_{FB}$ ), este porcentaje es ligeramente inferior en el caso de la mezcla MBC BC35/50 (6.5%–1.3%, respectivamente) lo que confirma una mayor dificultad de penetración del ligante en los poros de la mezcla.

Al observar los resultados de las MBSC, en la Fig. 5.9 se muestra que tanto el índice  $V_m$  como el VMA aumentan conforme desciende la temperatura de compactación. Sin embargo, se observa

que los contenidos de huecos son similares o inferiores a los de las mezclas de referencia cuando la temperatura de compactación se mantiene por encima de 150 °C. Es destacable que el ajuste de la función de los resultados obtenidos experimentalmente sea casi perfecta, lográndose un coeficiente de regresión  $R^2$  muy cercano a 1. Si se observan estos mismos índices para los resultados obtenidos mediante la densidad aparente por el procedimiento geométrico (Fig. 5.8), en todos los casos los valores son superiores a los obtenidos por el procedimiento SSD, lográndose el menor valor para las mezclas MBSC a 150 °C.

Las MBSC compactadas por encima de 150 °C cumplen las especificaciones de la normativa española de carreteras (PG-3) al respecto de los contenidos de huecos admisibles para capas de rodadura ( $4 \leq V_m \leq 6\%$  y  $VMA \geq 15\%$ ) en probetas cilíndricas compactadas con 75 golpes por cara.



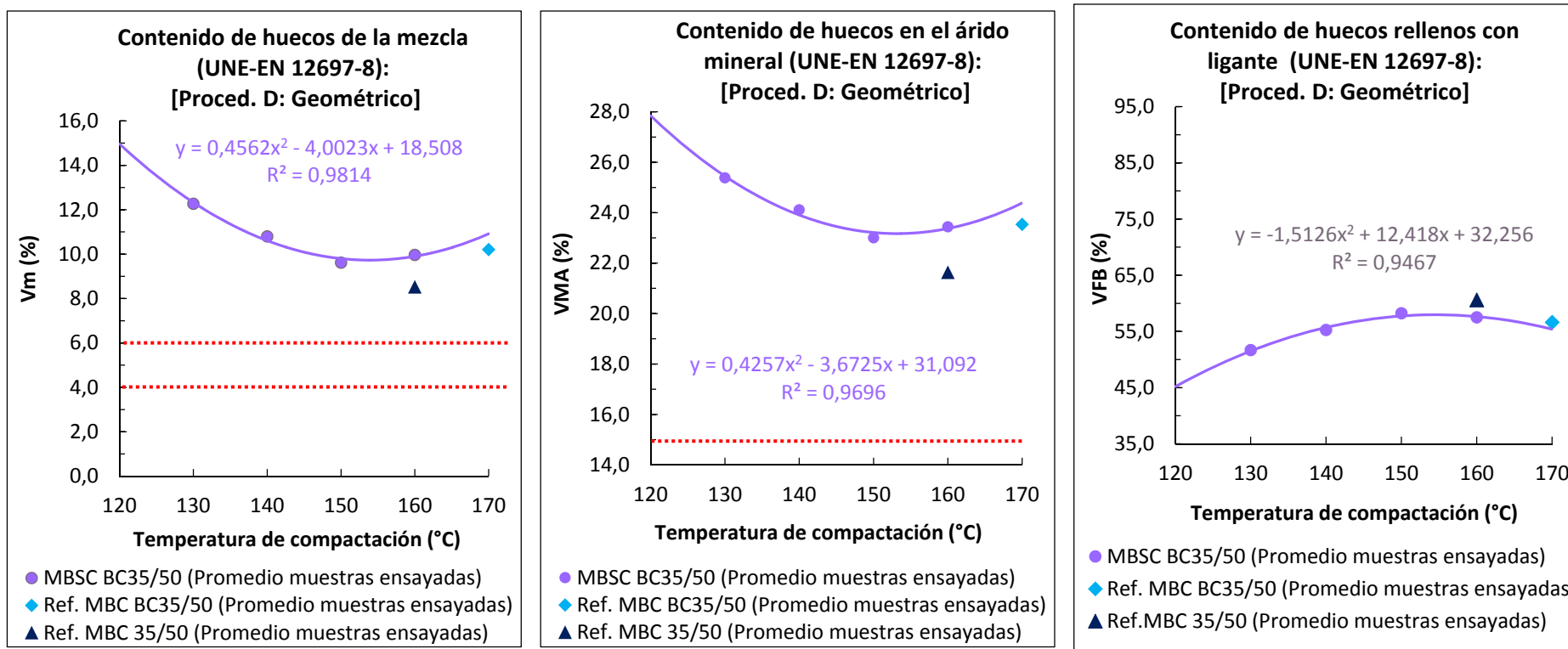


Figura 5.8 Contenido de huecos por el procedimiento Geométrico según temperatura de compactación: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla (Vm); b) Contenido de huecos en el árido mineral (VMA); c) Contenido de huecos rellenos con ligante (VFB).

\*Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $4\% \leq Vm \leq 6\%$  y  $VMA \geq 15\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

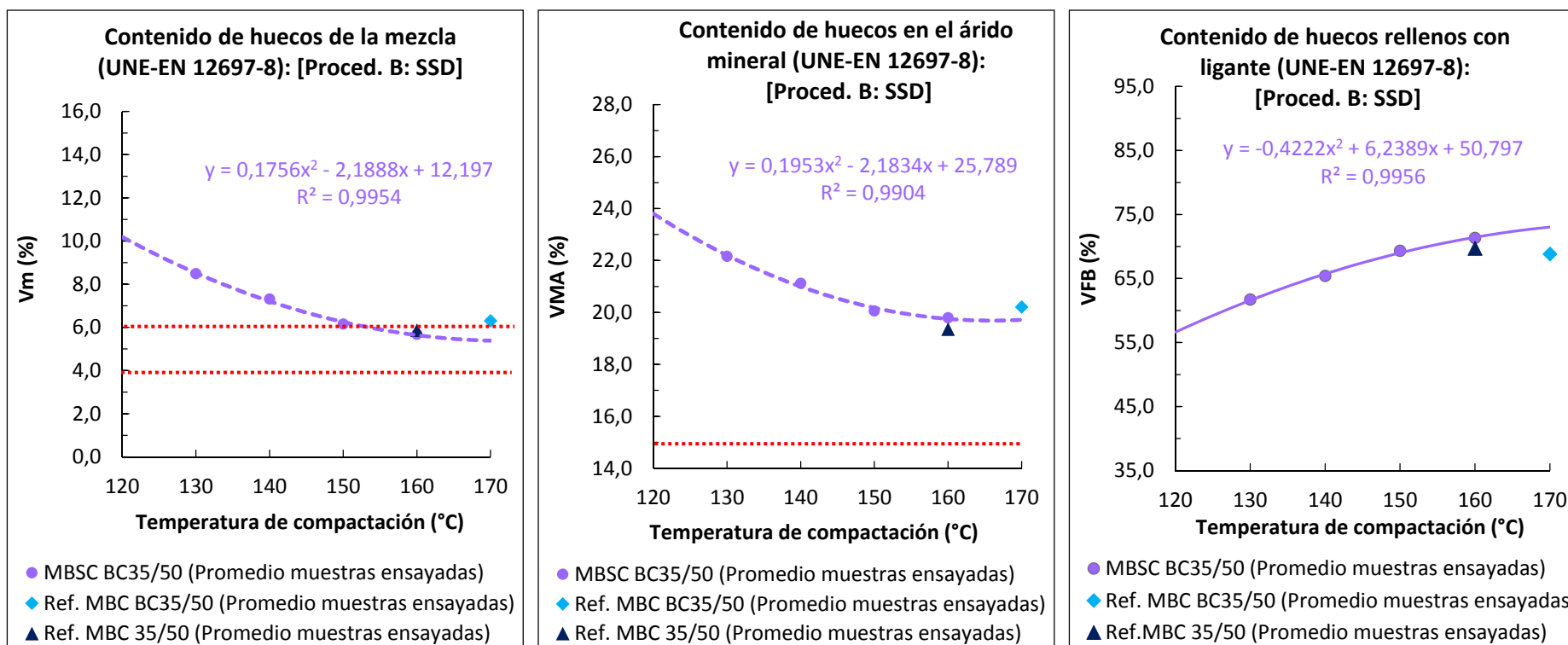


Figura 5.9 Contenido de huecos por el procedimiento SSD según temperatura de compactación: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante.

\*Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $4\% \leq V_m \leq 6\%$  y  $VMA \geq 15\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

#### 5.4.1.2 Compactibilidad

En la Fig. 5.10 se representa la variación de densidad aparente geométrica de las probetas cilíndricas (compactadas a 100 golpes por cara) tras el proceso de compactación a diferentes temperaturas, calculada a partir de la variación del espesor de las probetas conforme se aplican los impactos. En la Fig. 5.11, se representa la resistencia que ofrecen las mezclas a la compactación calcula por el método de mínimos cuadrados y en la Fig. 5.12, la variación de la densidad aparente geométrica en función del número de golpes aplicados.

La densidad aparente de la mezcla de referencia MBC 35/50 (compactada a 160 °C) es superior a cualquiera de las mezclas elaboradas con caucho (+5.56% con respecto a la mezcla de referencia MBC BC35/50 y > 3.42% con respecto a las MBSC). La máxima densidad aparente de las MBSC se logra en torno a los 150 °C de compactación, permaneciendo con apenas dispersión en los resultados entre los 140 °C y los 160 °C y siendo en todos los casos igual o superior ( $\geq 2.22\%$ ) a la densidad de la mezcla de referencia MBC BC35/50 compactada a 170 °C. Estos mismos resultados también pueden apreciarse en las curvas de compactación de la Fig. 5.12. Por tanto, es posible afirmar que **el aditivo surfactante permite mejorar las condiciones de compactación de las mezclas** al reducir la viscosidad del ligante.

En la Fig. 5.11, se aprecia que la menor resistencia a la compactación se obtiene con las MBSC compactadas a 150 °C. En comparación con las mezclas de referencia, la resistencia a la compactación disminuye  $\leq 17.76\%$  si la temperatura de compactación se mantiene superior a 140 °C.

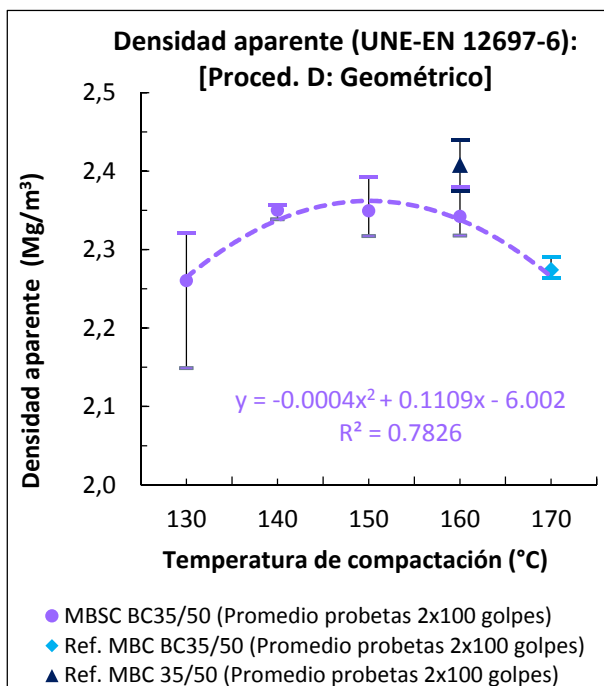


Figura 5.10 Densidad aparente según procedimiento geométrico de probetas compactadas a 100 golpes por cara

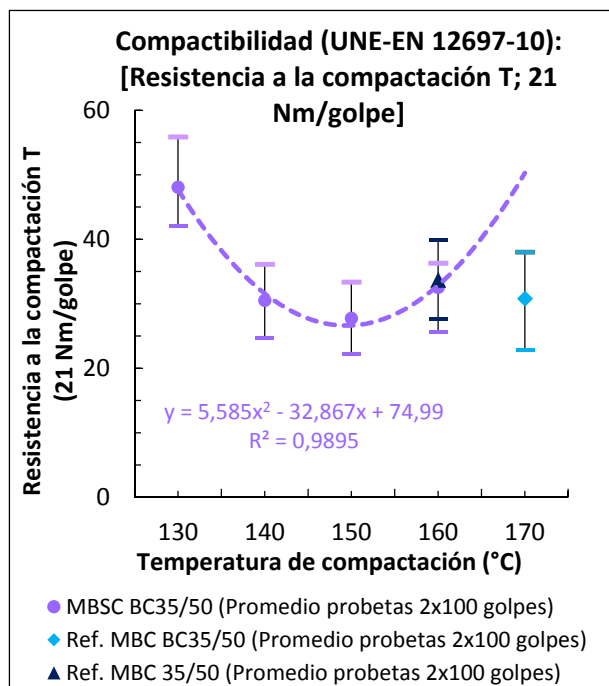


Figura 5.11 Resistencia a la compactación T (21 Nm/golpe)

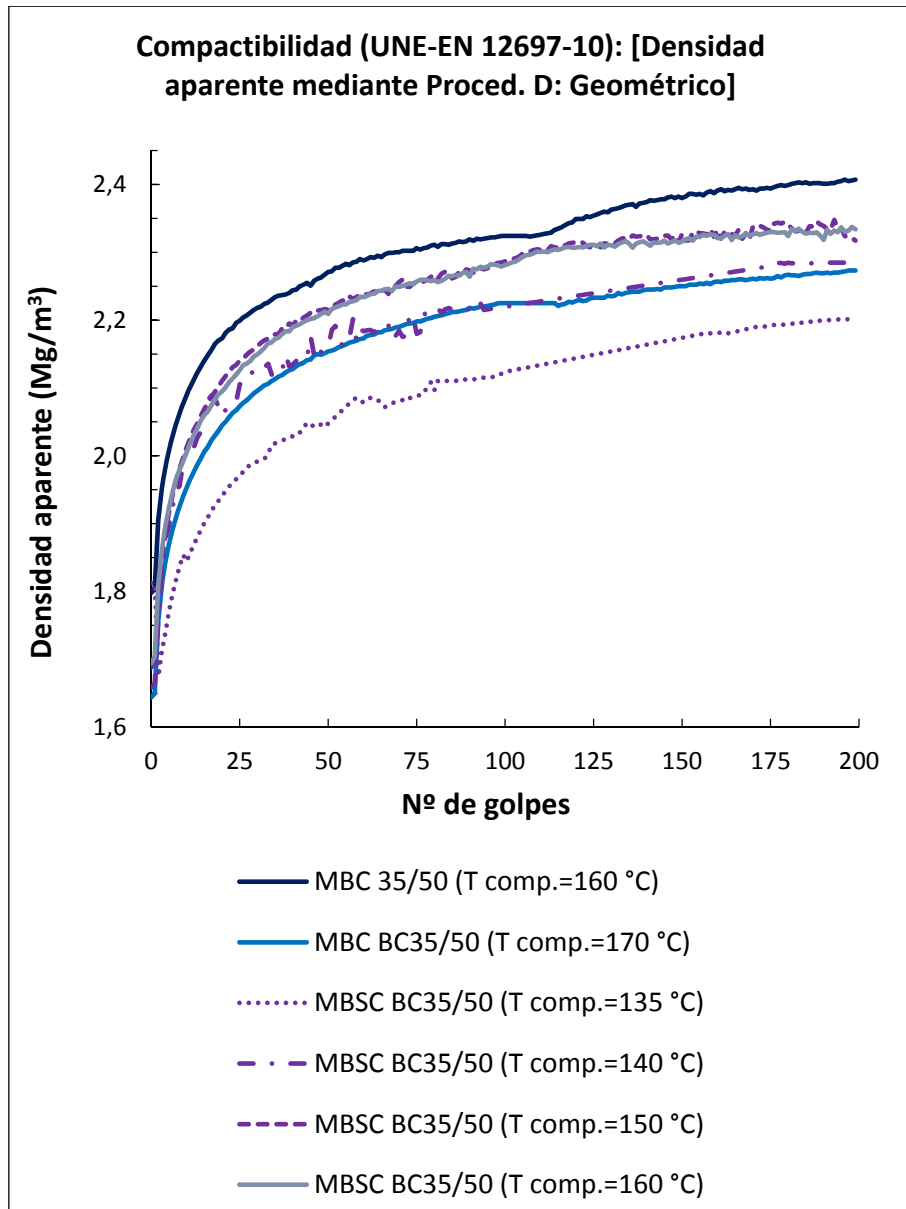
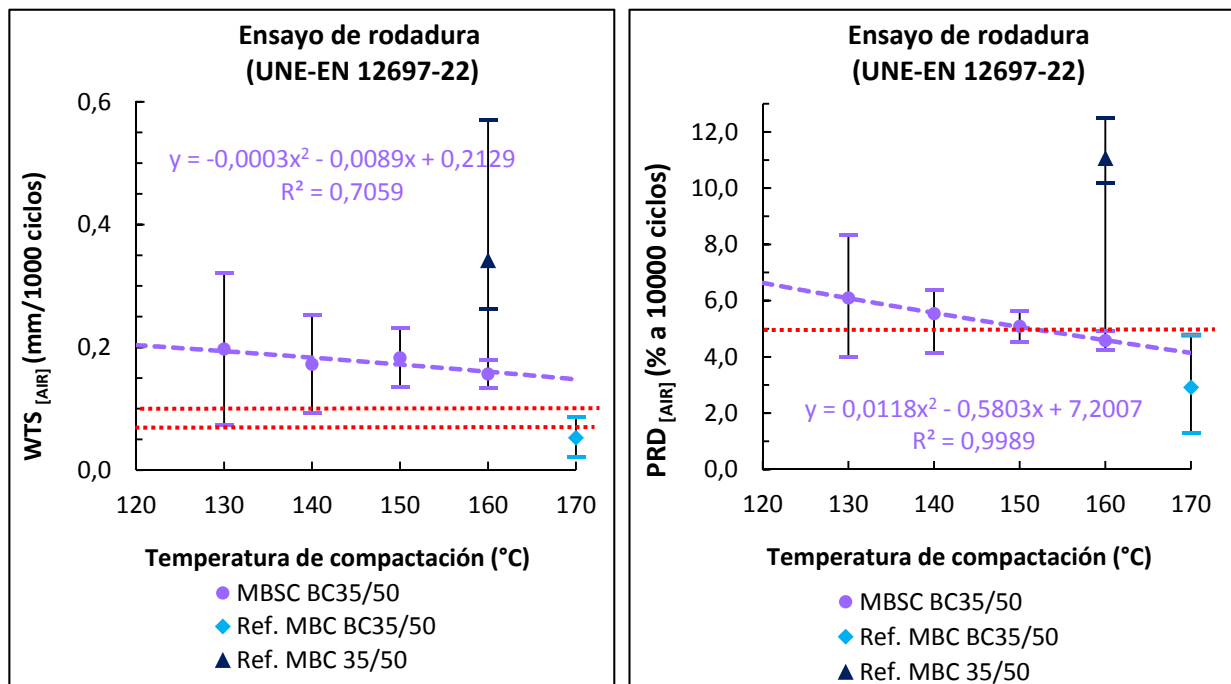


Figura 5.12 Evolución de la densidad aparente de las mezclas conforme al número de golpes aplicados (según la temperatura de compactación).

## 5.4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS

### 5.4.2.1 Resistencia a la deformación permanente

En la Fig. 5.13 se muestra la evolución de la pendiente de la rodera conforme varía la temperatura de compactación de las probetas prismáticas (ensayadas mediante el procedimiento B: al aire, en un dispositivo pequeño a 60 °C y 10<sup>4</sup> ciclos). La mejora de la mezcla de referencia con caucho MBC BC35/50 con respecto a la mezcla sin caucho MBC 35/50 es evidente: la pendiente de la deformación en pista  $WTS_{[AIR]}$  disminuye un 84.5% (Fig. 5.13a) y la profundidad proporcional de la rodera  $PRD_{[AIR]}$  un 73.6% (Fig. 5.13b). Estos resultados demuestran que **el uso del betún mejorado con caucho con áridos volcánicos mejora notablemente la resistencia a la deformación plástica de las mezclas debido a las propiedades elásticas del caucho**. Además, en la Fig. 5.13a y 5.13b también están representados los resultados de las probetas de las MBSC en comparación con las mezclas de referencia. Tanto la pendiente de deformación en pista ( $WTS_{[AIR]}$ ) como la profundidad proporcional de rodera ( $PRD_{[AIR]}$ ) aumentan conforme desciende la temperatura de compactación de las probetas. Es destacable el buen ajuste ( $R^2$ : 0.9989) de la línea de tendencia de la profundidad proporcional de rodera a 10<sup>4</sup> ciclos (Fig. 5.13b).



\* Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $WTS_{[AIR]} \leq 0.10$  mm/1000 ciclos;  $PRD_{[AIR]} \leq 5\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

Figura 5.13 Ensayo de rodadura en pista por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos para cada mezcla según temperatura de compactación: a)  $WTS_{[AIR]}$  (mm/1000ciclos); b)  $PRD\%$

Por tanto, a partir de los resultados obtenidos se puede afirmar que **las MBSC cumplen las especificaciones de carreteras para capas de rodadura** cuando la temperatura de compactación es  $\geq 155$  °C ( $WTS_{[AIR]} \leq 0.10$  mm/10<sup>3</sup> ciclos;  $PRD_{[AIR]} \leq 5\%$ ), cumpliendo el requisito de la pendiente

de deformación en pista  $WTS_{[AIR]}$  sólo por encima de 170 °C. En cualquier caso, **la mejora de la deformación plástica en las mezclas con BC35/50 y árido volcánico poroso se mantiene en todos las temperaturas analizadas al compararla con la mezcla MBC 35/50 sin caucho**. Por ejemplo, a 160 °C el índice  $WTS_{[AIR]}$  fue 54.2% menor que la mezcla MBC 35/50 y el  $PRD_{[AIR]}$  fue un 58.6% menor (Fig. 5.9 a y b), lo cual es una situación favorable porque indica que la mezcla es más resistente frente a la deformación plástica. Aunque estos resultados son favorables, no debemos olvidar que **la mejora de la resistencia disminuye conforme se reduce la temperatura de compactación**.

La desviación estándar del  $PRD_{[AIR]}$  es menor en el caso de las mezclas con BC35/50 ( $D_s \leq 1.1\%$ , para las MBSC BC35/50;  $D_s \leq 1.8\%$ , para la mezcla MBC BC35/50;  $D_s \leq 1.3\%$ , para la mezcla MBC 35/50) (Tabla 5.3 y 5.4). También conviene señalar la reducción de la dispersión de los resultados de las MBSC conforme aumenta la temperatura de compactación (Fig. 5.13).

Los resultados obtenidos en el ensayo Marshall en probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara son similares a los obtenidos en el ensayo de pista (Fig. 5.14). Se aprecia un notable aumento de la estabilidad (152.1%), una reducción de la deformación Marshall (19.3%) y por consiguiente, un aumento del coef. Marshall (221.5%) de la mezcla de referencia MBC BC35/50 en comparación con la mezcla de referencia sin caucho. Con respecto a los resultados de **las MBSC se aprecia una disminución de la estabilidad y un aumento de la deformación Marshall conforme desciende la temperatura de compactación** (Fig. 5.14). De forma análoga a los resultados del ensayo de pista, **la mejora de la estabilidad de las mezclas con BC35/50 y áridos volcánicos porosos se mantiene en todas las temperaturas estudiadas**. A 160 °C la estabilidad de las MBSC fue 103.9% superior a la mezcla MBC 35/50, la deformación un 7.5% menor y el coeficiente Marshall un 68.9% mayor. Aunque como en el ensayo de pista, la mejora de **la resistencia a deformación plástica disminuye conforme desciende la temperatura**.

En este ensayo los parámetros de dispersión estadística fueron superiores en las mezclas MBSC ( $C_v \leq 38.8\%$  para las MBSC BC35/50;  $C_v \leq 7.1\%$  para la mezcla MBC BC35/50;  $C_v \leq 22.8\%$  para la mezcla MBC 35/50) (Tablas 5.3 y 5.4).

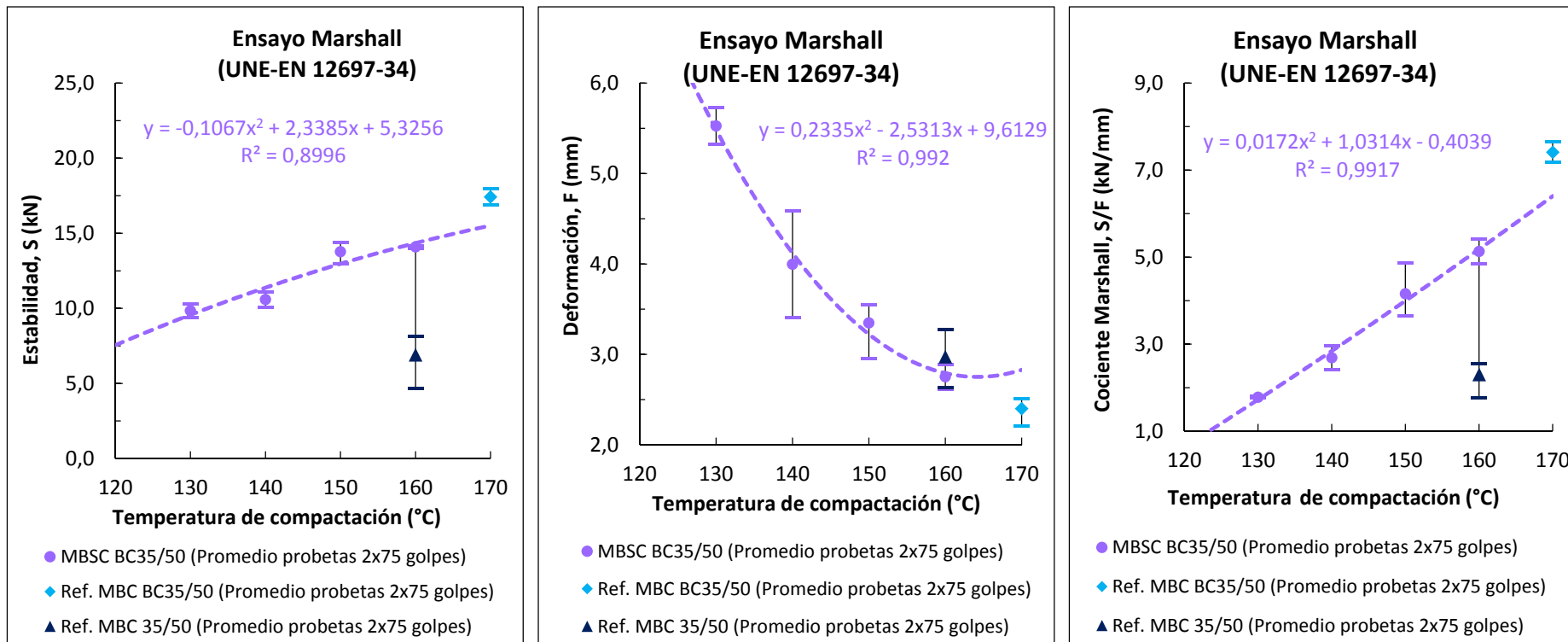


Figura 5.14 Resultados del ensayo Marshall según temperatura de compactación de la mezcla: a) Estabilidad máxima; b) Deformación plástica; c) Cociente Marshall

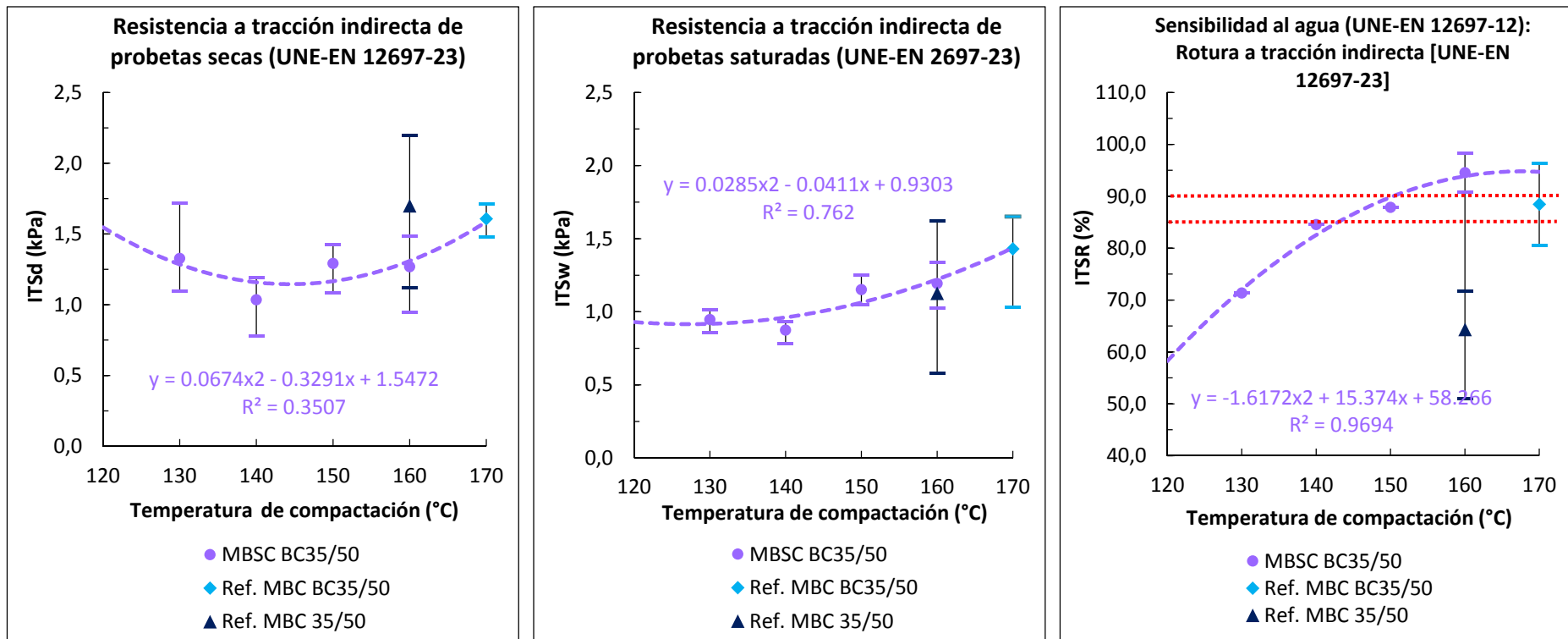


Figura 5.15 Resultados del ensayo de sensibilidad al agua según temperatura de compactación de la mezcla: a)  $ITS_d$  en condiciones secas; b)  $ITS_w$  en condiciones de saturación; c) ITSR.

\*Las líneas rojas discontinuas de puntos representan los límites establecidos ( $80\% \leq ITSR \leq 85\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).



#### 5.4.2.2 Sensibilidad al agua

La Fig. 5.15c muestra la mejora de la resistencia a la acción del agua a partir del índice *ITSR* de las probetas cilíndricas compactadas a 50 golpes por cara. Este índice relaciona la resistencia a tracción indirecta a 15 °C en condiciones secas (*ITS<sub>d</sub>*) y en condiciones de saturación (*ITS<sub>w</sub>*) (72h a 40 °C), conforme la norma de ensayo UNE-EN 12697-17. El *ITSR* de la mezcla MBC BC35/50 (mezclada a 180 °C y compactada a 170 °C) ha resultado un 37.5% mayor que el índice de la mezcla MBC 35/50 (mezclada a 170 °C y compactada a 160 °C). La resistencia a tracción indirecta de las probetas saturadas (*ITS<sub>w</sub>*) de la mezcla MBC BC35/50 fue un 26.9% superior al de la mezcla MBC 35/50 (Fig. 5.15b). No obstante, la resistencia de las probetas secas (*ITS<sub>d</sub>*) de ambas mezclas fue similar (Fig. 5.15a). Estos resultados demuestran que las mezclas con caucho ofrecen mayor resistencia a la acción del agua en el caso de mezclas elaboradas con áridos volcánicos porosos.

Observando los resultados de las MBSC, el índice *ITSR* se reduce conforme desciende la temperatura de compactación, cumpliendo los requisitos de la normativa española de carreteras (para mezclas AC en capas de rodadura: *ITSR* ≥ 85%) siempre que la temperatura de compactación permanezca por encima de 140 °C (Fig. 5.15c). La mejora del *ITSR* por la presencia del caucho se mantiene en todas las mezclas en comparación con la mezcla de referencia sin caucho. Sin embargo esta mejora es menor cuanto menor es la temperatura de compactación. A 160 °C el índice *ITSR* es superior en las MBSC que en las mezclas MBC (+47.0% en comparación con la mezcla MBC 35/50 compactada a 160 °C y + 6.8% con respecto a la mezcla MBC BC35/50 compactada a 170 °C), debido a las propiedades adherentes aportadas por el aditivo surfactante.

El índice *ITS<sub>w</sub>* de las MBSC BC35/50 se mantiene similar al de las mezclas MBC de referencia para temperaturas no inferiores a 150-160 °C (Fig. 5.15b). Por el contrario, el índice *ITS<sub>d</sub>* de las MBSC BC35/50 fue inferior en comparación con las dos mezclas de referencia para cualquier temperatura de compactación (Fig. 5.15a). Por lo tanto, el aditivo químico empleado logra mantener parcialmente la mejora de la resistencia a la acción del agua de las mezclas elaboradas con áridos volcánicos vacuolares a baja temperatura debido al efecto combinado del polvo de caucho y las propiedades surfactantes del aditivo. Esta mejora se conserva mientras la temperatura de compactación no sea inferior a 150 °C.

La dispersión estadística de los resultados de laboratorio son menores en el caso de las mezclas con caucho ( $C_v \leq 19.6\%$ , para MBSC BC35/50;  $C_v \leq 19.9\%$ , para MBC BC35/50) que la mezcla sin caucho ( $C_v \leq 37.4\%$ ) conforme a las Tablas 5.3 y 5.4. Además, se aprecia que en las MBSC los resultados de la resistencia a tracción indirecta en condiciones de saturación (*ITS<sub>w</sub>*) tienen menor dispersión que los resultados en condiciones secas (*ITS<sub>d</sub>*) ( $C_v$ : 10.3% y  $C_v$ : 19.6% respectivamente) (Fig. 5.15a y b).

### 5.4.2.3 Rigidez

Con el fin de analizar el comportamiento mecánico de estas mezclas se evaluó también el módulo de rigidez dinámico de probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara (IT-CY, factor de carga superficial  $k = 0.6$ , a  $20\text{ °C}$ ) conforme a la norma EN 12697-26. La muestra de referencia MBC BC35/50 mostró un módulo de rigidez en torno a 6044 MPa mientras que el valor de la mezcla MBC sin caucho fue superior (6830 MPa). Aunque ambas mezclas (con el mismo contenido de ligante 6%) muestran valores aceptables en cuanto a su rigidez para mezclas tipo hormigón bituminoso (AC), el módulo de la mezcla que incluye caucho sufre una reducción del 13% debido al aumento de la porosidad por el cambio de viscosidad del ligante con caucho (Fig. 5.16).

En cuanto al comportamiento de las MBSC en la Fig. 5.16 se observa que el módulo de rigidez no sigue una tendencia lineal con respecto a la temperatura de compactación, sino que se ha observado un máximo de la rigidez para una temperatura de compactación de  $150\text{ °C}$  (9183 MPa). Además, se aprecia que todas las MBSC muestran un módulo de rigidez adecuado (AC Densa o Semidensa  $\geq 6000\text{ MPa}$ ) (Consejería de Obras Públicas y Transportes-Sevilla, 2007) siendo sus valores superiores a los de las mezclas de referencia ( $\geq 2.59\%$  para la mezcla MBC 35/50 y  $\geq 15.93\%$  para la mezcla MBC BC35/50). Esto es atribuible al cambio de viscosidad de la mezcla al disminuir la temperatura de trabajo.

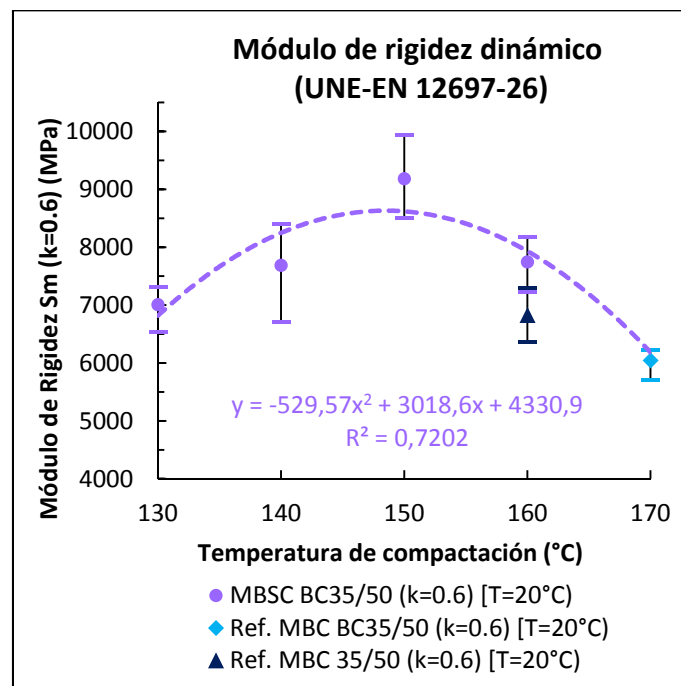


Figura 5.16 Valores del módulo de rigidez dinámico obtenido mediante ensayo de tracción indirecta en función de la temperatura de compactación de la mezcla.

#### 5.4.2.4 Fatiga

En la Fig. 5.17 se representa la ley de fatiga de cada una de las mezclas ensayadas con probetas prismáticas tipo vigas a flexión sobre 4 puntos (a 20 °C, 10<sup>6</sup> ciclos y 10 Hz). En dicha figura se relaciona el nivel de deformación con el número de ciclos resistidos hasta la rotura por fatiga. Si bien, como ya vimos en el capítulo previo, no es posible hacer diferenciaciones significativas entre la mezcla MBC 35/50 y MBC BC35/50, si ambas se comparan con las MBSC es posible apreciar que estas últimas tienen un peor comportamiento a fatiga que las fabricadas a temperaturas convencionales. Esto confirmaría que **a pesar de cumplir las especificaciones en cuanto al módulo dinámico de rigidez, el aumento de la rigidez de las mezclas perjudica su comportamiento a fatiga.**

Analizando las tendencias de las MBSC se puede observar que cuanto menor es la temperatura de compactación menor es su ciclo de vida y menor su resistencia frente a esfuerzos de fatiga. Las mezclas de menor temperatura (130 °C y 145 °C) muestran una menor dispersión de sus resultados ( $R^2=0.81$  y  $R^2=0.77$  respectivamente) que las mezclas elaboradas a 160 °C ( $R^2: 0.58$ ).

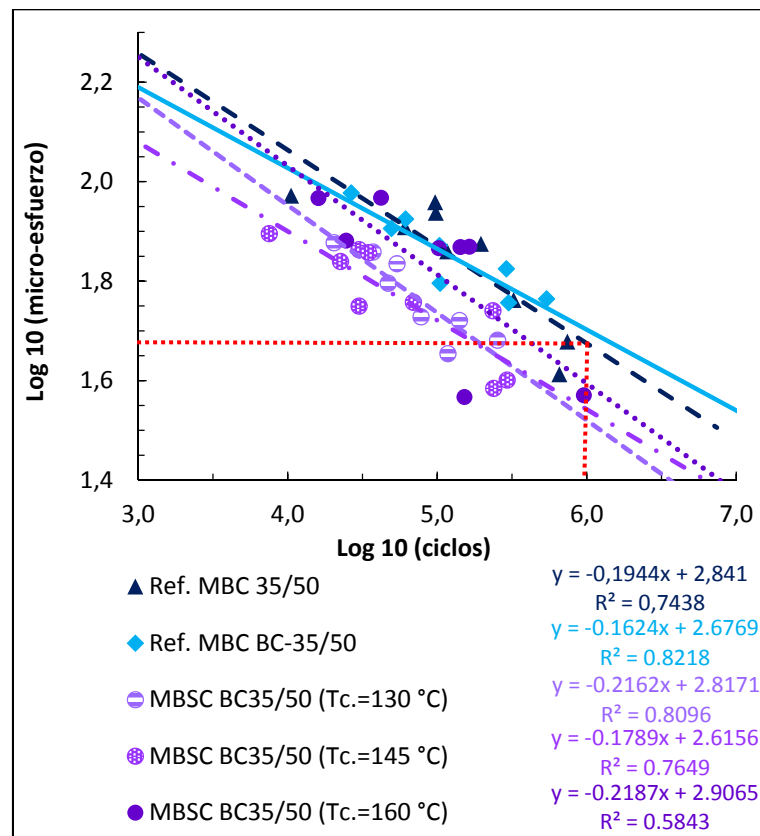


Figura 5.17 Valores obtenidos durante el ensayo de fatiga mediante flexión en 4 puntos para un contenido de ligante del 6% (s/peso total de la mezcla) para mezclas elaboradas a distinta temperatura de compactación



## 5.5 CONCLUSIONES

---

Basándonos en los resultados obtenidos y el análisis realizado podemos extraer las siguientes conclusiones para mezclas bituminosas semidensas con áridos volcánicos de tipo basaltos porosos, producidas a temperaturas semicalientes:

- La densidad aparente de las mezclas con caucho fabricadas a alta temperatura (MBC-BC) es similar o ligeramente superior (0.7-1.6%) a la de la mezcla convencional de referencia (MBC) aunque la densidad máxima teórica de ésta es mayor (2.2%). Con respecto a **las mezclas semicalientes con caucho (MBSC BC), la densidad aparente disminuye conforme se reduce la temperatura de mezclado y compactación**, manteniéndose similar a la de la mezcla de referencia (mezclada a 180 °C y compactada a 170 °C) siempre que la temperatura de compactación no esté por debajo de los 150 °C y similar a la mezcla convencional MBC de referencia (mezclada a 170 °C; compactada a 160 °C) si la temperatura no desciende por debajo de 135-140 °C.
- En consecuencia, el contenido de huecos de aire ( $V_m$ ) y el contenido de huecos en el árido mineral ( $VMA$ ) de la mezcla de referencia MBC BC resultaron ser ligeramente superiores a los de la mezcla MBC de referencia (diferencia de  $V_m$  entre 0.6-1.4%). La fabricación de las mezclas con caucho en el laboratorio también sugiere una compactación más difícil por impacto debido a la mayor viscosidad y propiedades elastoméricas del ligante BC. Tanto **el  $V_m$  como el  $VMA$  de las mezclas semicalientes con caucho aumentaron a medida que se redujo la temperatura de fabricación**. Se logró un contenido de **huecos similar al de las mezclas de referencia MBC cuando las temperaturas de compactación fueron iguales o superiores a 155 °C, cumpliendo así con las especificaciones** para carreteras con respecto a las características de huecos para las capas superficiales.
- Se aprecia una mejora significativa de la resistencia a la acción del agua al usar el ligante mejorado con caucho. El coeficiente  $ITSR$  a 15 °C de las probetas cilíndricas fabricadas con betún mejorado con caucho (compactadas a 50 golpes por cara) mejoran un 24.1% con respecto al mismo tipo de probetas fabricadas con una mezcla MBC convencional. **El  $ITSR$  en las mezclas semicalientes MBSC claramente disminuye conforme se reduce la temperatura de compactación, cumpliendo las especificaciones** técnicas para obras de carretera para capas superficiales cuando las **temperaturas son superiores a 140 °C**. Incluso a esta temperatura, la mejora del  $ITSR$  se mantiene alrededor del 20%.
- Los resultados de laboratorio muestran claramente la mejora que supone la introducción del caucho en cuanto a la resistencia a formación de rodera (ensayo de pista al aire a 60 °C) al comparar la mezcla con caucho MBC-BC y la mezcla MBC convencional. La pendiente de deformación en pista ( $WTS_{[AIR]}$ ) disminuye un 546%, la profundidad de rodera ( $RD_{[AIR]}$ ) un 279.6% y la profundidad de rodera proporcional ( $PRD_{[AIR]}$ ) un 8.2% debido a las propiedades elásticas del caucho.
- En general, **al disminuir las temperaturas se produce una pérdida en la resistencia a la deformación permanente de las mezclas MBSC BC**, lo que aumenta los tres parámetros mencionados anteriormente. En este sentido, **sólo cumplen las especificaciones de carreteras para capas superficiales las mezclas compactadas por encima de 155 °C**. Sin embargo, la mejora de la resistencia a deformación permanente se mantiene en todas

las temperaturas analizadas (a 155 °C, la mejora se mantiene en 101% para el  $WTS_{[AIR]}$  y 6.2% para el  $PRD_{[AIR]}$ ).

- Se pueden extraer conclusiones similares del ensayo Marshall (con probetas cilíndricas compactadas con 75 golpes por cara): un aumento significativo de la estabilidad (152.2%), reducción del valor de deformación (23.9%) y un mayor coeficiente Marshall (221.5%) para las mezclas BC35/50 con respecto a la MBC sin caucho. En cuanto a **las mezclas MBSC, la mejora de la resistencia a la deformación plástica disminuye a medida que la temperatura disminuye, aunque a la temperatura de producción de las mezclas convencionales la mejora sigue siendo significativa** (a 160 °C, la estabilidad Marshall de las mezclas MBSC fue un 103.9% más alta que la MBC y el valor de deformación un 8.0% menor, mientras que el coeficiente Marshall continuó siendo 122.6% superior).
- Con respecto a la rigidez de las mezclas MBSC, **al descender la temperatura de fabricación**, con respecto a las mezclas de referencia MBC, **se produce un aumento del módulo de rigidez dinámico** ( $\geq 2.59\%$  para la mezcla MBC 35/50 y  $\geq 15.93\%$  para la mezcla MBC BC35/50), alcanzando su máximo valor las MBSC compactadas a 150 °C. Sin embargo, se cumple con las especificaciones para cualquiera de las temperaturas de trabajo.
- Al aumentar la rigidez de la mezcla según **desciende la temperatura de compactación se perjudica la resistencia a los esfuerzos de fatiga** de las mezclas compactadas por debajo de 160 °C.
- **El uso de un aditivo surfactante permite reducir** las temperaturas de fabricación de las mezclas **entre 5-10 °C para capas superficiales y entre 25-30 °C** para capas inferiores (por tener especificaciones técnicas menos restrictivas). Esta reducción haría posible la **reducción de emisiones y del consumo energético** empleado para calentar el ligante con caucho.

## 6 DESARROLLO DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON RESIDUOS PLÁSTICOS Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS

---

### 6.1 INTRODUCCIÓN

---

Los polímeros termoplásticos son materiales sintéticos derivados del petróleo que se caracterizan por su alta temperatura de fusión y descomposición, así como su elevada resistencia a la radiación ultravioleta. Por contra, estas características hacen que su degradación sea excesivamente lenta convirtiéndolos en un problema ecológico a gran escala (Guru *et al.*, 2014). En julio de 2017, se estimó que el volumen total de plástico generado a nivel mundial hasta ahora ascendía a 8.300 Mt. De esa enorme cantidad, unos 6.300 Mt se han convertido en residuos de los que tan sólo un 9% de ellos han sido reciclados. El resto de residuos ha acabado incinerado (12%) o depositado en vertederos o en el medio natural (79%). De seguir por este camino, se estima que para 2050 la cantidad de residuos plásticos generados alcance los 12.000 Mt (Geyer *et al.*, 2017).

Dos de las principales fuentes de esos residuos plásticos son las botellas plásticas (PET) y las bolsas de un solo uso (HDPE) (White y Reid, 2018). En 2016, se vendieron alrededor de 480.000 millones de botellas de plástico en todo el mundo, a razón de 1 millón de botellas por minuto (20.000 botellas por segundo), de las cuales únicamente el 7% fueron recicladas como nuevas botellas (Trowsdale *et al.*, 2017). El mayor problema que presenta el uso de este tipo de envases es el elevado tiempo que tardan en bio-degradarse (450 años en el caso de las botellas plásticas). En consecuencia, sin un adecuado tratamiento, la sobreacumulación de estos residuos es inevitable. Por lo tanto, buscar alternativas sostenibles que permitan su recuperación tras ser desechados se convierte en un reto medioambiental de la Humanidad.

El tratamiento y reciclado de los residuos plásticos (piezas industriales, botellas, envases, bolsas, etc.) es un reto medioambiental significativo debido al gran volumen de residuos que se genera a nivel mundial (16.3 Mt sólo en la Unión Europa (“Packaging waste statistics”, 2019)). La incorporación de estos residuos en el sector de la construcción ha despertado un creciente interés en desarrollar materiales con mejores prestaciones o más económicos (ladrillos, hormigones, pavimentos, etc.) sobre todo en países en vías de desarrollo donde los recursos sean más limitados.

Muchos de los estudios recientes llevados a cabo sobre la incorporación de los residuos plásticos en las mezclas bituminosas se centran en su uso como sustituto parcial del árido (Hassani *et al.*, 2005; Moghaddam *et al.*, 2012 y 2014) a pesar de que también es posible agregarlos a las mezclas como modificadores del ligante (Awwad y Shbeeb, 2007; Al-Hadidy y Yi-qiu, 2009; Rahman *et al.*, 2013). Esta segunda vía requiere tratamientos químicos previos del polímero que permitan un adecuado proceso de mezclado con el ligante, además de un estudio pormenorizado del comportamiento reológico del nuevo betún modificado. Por estos motivos, además de por razones económicas (la adaptación de las plantas de asfalto sólo requeriría la incorporación de una tolva para la adición del polímero durante la dosificación y se podría incluir una mayor cantidad de plástico), el objetivo de esta fase de la tesis se centrará en el uso de un residuo plástico como parte de la estructura mineral de la mezcla bituminosa.

El estudio sobre la viabilidad de uso de polímeros termoplásticos reciclados en las mezclas bituminosas es bastante más limitado, si se compara con la amplia literatura existente sobre el uso del polvo de caucho (NFU). Esta diferencia puede estar motivada por las características termoestables de los polímeros plásticos. El PET se considera un polímero rígido cuyo punto de fusión se sitúa en torno a los 260 °C (transición vítrea a los 61°C) ([“Transiciones térmicas de los Polímeros”, 2014](#)). Por tanto, no es habitual que polímeros como el PET se empleen, sin un tratamiento previo, como modificadores de los ligantes, sino que su uso en mezclas asfálticas es más conveniente dentro de la estructura mineral ([Casey et al., 2008](#)).

A la hora de incorporar el PET por vía seca se observa que existen dos alternativas posibles: a) mezclarlo en seco con el árido caliente antes de incluir el ligante y el polvo mineral ([Sojobi et al., 2016](#)); b) añadirlo tras el mezclado de los áridos y el ligante ([Ahmadinia et al., 2011](#); [Moghaddam et al., 2014](#)). Hasta la fecha, no se ha realizado una comparación que establezca las ventajas que ofrece una metodología frente a otra pero se cree que el PET al calentarse y fundirse recubre parcialmente el árido y empeora la adherencia árido-ligante ([Moghaddam et al., 2014](#)), por lo que para este trabajo se ha optado por emplear el segundo método.

En cuanto a la proporción de PET a incorporar, se establece un rango que varía entre el 0.6% y el 5% sobre el peso del árido basado en los resultados del estudio de [Hassani et al. \(2005\)](#). En dicho estudio se analiza una proporción de PET que varía entre el 5% y el 15% (sobre el peso de la mezcla) determinando como contenido óptimo el porcentaje más bajo. Para ello emplearon partículas PET # $\leq$  3 mm mezcladas con un 6.6% de betún 50/70 calentado a 180 °C, características similares a las de los materiales empleados en esta investigación (partículas de PET # $\leq$  2 mm y betún 35/50 y 50/70 cuyas temperaturas de mezclado se ajustan a la norma [UNE-EN 12697-35](#)).

En este capítulo se abordará el **desarrollo de mezclas bituminosas con residuos plásticos procedentes de la trituración de envases de polietileno tereftalato (PET) en combinación con los áridos basálticos vacuolares (BOPV)**. Para ello, se incluirán partículas de PET # $\leq$  2 mm mediante la vía seca, reemplazando parcialmente el árido fino de la mezcla en una proporción que varía entre el 0.6-5% del peso del árido. Se emplearán además dos tipos de ligantes comerciales, cuyo grado de penetración son 35/50 y 50/70, con una dosificación del 6% sobre el peso total de la mezcla. Con objeto de poder comparar los resultados obtenidos con los resultados de las mezclas elaboradas con caucho procedente de NFU se decidió incluir el contenido del 0.6% de PET sobre peso total de la mezcla (equivalente al 10% sobre peso total del betún) similar al contenido de polvo de caucho empleado en las mezclas previas.



## 6.2 METODOLOGÍA

### 6.2.1 MATERIALES

Continuando con la línea de trabajo para el desarrollo de mezclas bituminosas con áridos volcánicos marginales, el árido empleado ha sido de nuevo el árido basáltico vacuolar (BOPV) procedente de la cantera de la Autoridad Portuaria de Las Palmas, cuyas características vienen recogidas en la [Tabla 4.1](#) del presente documento. Conforme ha avanzado el proceso de investigación, han sido necesarias varias fases de acopio de áridos, por lo que la distribución granulométrica inicial empleada en las mezclas con caucho ([Tabla 4.4](#)) ha podido sufrir ligeras variaciones con respecto a la actual. En la tabla adjunta se muestra la granulometría empleada en esta fase de la investigación.

*Tabla 6.1 Distribución granulométrica del árido basáltico vacuolar según fracción de acopio*

Tamiz de referencia (EN 933-2) (mm)	Material que pasa (%)		
	BOPV 10/20	BOPV 4/10	BOPV 0/4
22	100.0	100.0	100.0
16	86.72	100.0	100.0
10	18.14	98.02	100.0
8	2.84	79.63	100.0
4	0.23	7.89	99.10
2	0.20	0.64	69.13
0.5	0.18	0.07	17.96
0.25	0.17	0.06	8.98
0.125	0.17	0.05	4.07
0.063	0.17	0.05	1.83

Con respecto a los betunes empleados para la elaboración de las mezclas bituminosas, se han utilizado dos betunes de penetración comerciales: un betún 35/50 y un betún 50/70 cuyas características se muestran en la tabla que sigue a continuación.

*Tabla 6.2 Principales características de los ligantes empleados*

Tipo de betún		35/50	50/70
Contenido de ligante (sobre peso total de la mezcla)	%	6.0	6.0
Densidad [EN 15326]	(Mg/m <sup>3</sup> )	1.042	1.045*
Penetración a 25 °C, 100 g, 5s [EN 1426]	(x10 <sup>-1</sup> mm)	44	65
Punto de reblandecimiento [EN 1427]	(°C)	51.6	47.5
Punto de fragilidad Fraass [EN 12593]	(°C)	≤-5	≤-8

\*Dato suministrado por el fabricante.

Las partículas de PET seleccionadas provienen de la planta de reciclado PLASCAN, T.M. de Telde, donde se emplearon medios mecánicos de trituración a temperatura ambiente sobre los

residuos de envases plásticos para la obtención de las mismas (Fig. 6.1). Las partículas trituradas y tamizadas  $\# \leq 4$  mm, se utilizaron sin ningún tratamiento previo en una proporción de 0.6%, 1%, 2%, 3%, 4% y 5% (s/árido). Dichas partículas presentan las características recogidas en la Tabla 6.3 y la distribución granulométrica se recoge en la Tabla 6.4.



Figura 6.1 Partículas de PET  $\# \leq 4$  mm empleadas para la fabricación de las MBC.

Tabla 6.3 Principales características de las partículas de PET de la planta de PLASCAN

Propiedad	Ud	
Color		Azul claro
Densidad	(Mg/m <sup>3</sup> )	1.34 – 1.39
Absorción de agua	%	< 1%
Temperatura de fusión	°C	245 – 255
Resistencia al calor	°C	80 – 120
Alcalinidad	pH	12
Impurezas: metal	ppm	< 10
Impurezas: papel	ppm	< 50
Impurezas: PVC	ppm	< 300
Poliiolefinas	%	0.5 – 0.6

Tabla 6.4 Distribución granulométrica del polvo de PET tras trituración en planta de reciclado

Tamiz de referencia (EN 933-2) (mm)	Material que pasa (%)
4.0	100
2.0	87.90
1.0	11.60
0.5	0.90
0.25	0.50
0.125	0.40
0.063	0.40

## 6.2.2 INSTRUMENTAL EMPLEADO

Para la fabricación y ensayo de las muestras de MB desarrolladas se utilizaron los mismos equipos y dispositivos empleados en la fabricación de mezclas con caucho procedente de NFU, descritos en el apartado 4.3.2 del presente documento.

## 6.2.3 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Con el fin de evaluar el efecto producido por la incorporación del PET se fabricaron dos mezclas semidensas de tipo hormigón asfáltico (*Asphalt Concrete, AC*): a) una mezcla *AC16 surf 35/50 S* con un betún convencional 35/50; b) una mezcla *AC16 surf 50/70 S* con un betún convencional 50/70. En ambas mezclas se empleó el mismo contenido de ligante (6% sobre peso total de la mezcla) establecido como óptimo en el capítulo 4 del presente documento. El contenido de partículas de PET # $\leq$  2.0 mm varió entre el 0% – 5% sobre el peso total del árido.

La dosificación en frío de las diferentes fracciones de árido empleadas fueron las descritas en la [Tabla 6.5](#), obteniéndose las distribuciones granulométricas reflejadas en la [Tabla 6.6](#).

Tabla 6.5 Dosificación en frío de las distintas fracciones de áridos.

Fracción (mm)	% (sobre el peso del árido)						
PET 0/2	0.0	0.6	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
BOPV 10/20	21.5	21.4	22.1	21.4	20.5	22.7	22.4
BOPV 4/10	38.0	37.8	37.2	38.6	39.8	37.7	37.2
BOPV 0/4	32.9	32.7	31.6	30.5	28.5	28.0	27.6
CEM < 0.063	7.6	7.6	8.0	7.5	8.3	7.7	7.8

Tabla 6.6 Distribución granulométrica del árido empleado conforme al huso granulométrico de una mezcla semidensa AC16 S ([Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014](#))

Tamiz de referencia (EN 933-2) (mm)	% PET (s./peso total del árido)							Límites del huso granulométrico (material que pasa) (%)
	0%	0.6%	1%	2%	3%	4%	5%	
	PET (%)	PET (%)	PET (%)	PET (%)	PET (%)	PET (%)	PET (%)	
22	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100-100
16	97.6	97.6	97.5	97.6	97.7	97.4	97.5	90-100
8	71.2	71.4	70.8	71.2	71.9	70.1	70.5	60-75
4	43.2	43.6	43.3	42.7	42.5	42.3	43.0	35-50
2	30.6	30.9	31.0	30.6	30.8	30.8	31.6	24-38
0.5	13.6	13.5	13.8	13.1	13.4	12.8	12.9	11-21
0.25	10.6	10.6	10.9	10.3	10.9	10.3	10.4	7-15
0.063	8.3	8.2	8.7	8.1	8.8	8.2	8.4	3-7*

\*En el caso de los áridos volcánicos vacuolares es necesario superar este límite para poder cumplir la relación f/b  $\geq$  1.2 del Art. 542, PG-3 ([Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014](#)), debido al elevado contenido de betún que incorporan estas mezclas (6% s./peso total de mezcla).

Para poder incorporar el PET a las mezclas bituminosas, éstas se fabricaron siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

1. En primer lugar se calentaron los áridos y el polvo mineral a una temperatura de 170 °C por un periodo aproximado de 2h para la eliminación de la humedad de los áridos.
2. El betún seleccionado 35/50 o 50/70 se calentó en estufa a una temperatura de 170 °C y 160 °C respectivamente, durante  $\geq 1$ h, según norma [UNE-EN 12697-35](#).
3. Se añadió la cantidad de betún establecida como óptima (6% sobre peso de la mezcla) sobre el árido mineral y se mezcló todo manualmente durante 1 min a 170-160 °C para realizar la envuelta del árido.
4. A continuación, se incorporaron las partículas de PET (0.6-5% sobre peso del árido) y se continuó mezclando mecánicamente durante 3 min a 170-160 °C.



Figura 6.2 Mezclado del árido cubierto con ligante y las partículas de PET

5. Finalmente, las probetas cilíndricas se compactaron a 165-155 °C de acuerdo al método Marshall [UNE-EN 12697-30](#) con 50 o 75 golpes por cara, en función del ensayo posterior a realizar. Las probetas tipo placa de 300 x 300 x 60 mm para el ensayo de pista o las placas para el ensayo de fatiga fueron compactadas mediante rodillo conforme a la norma [UNE-EN 12697-33](#).

Las muestras compactadas y sin compactar se sometieron a tres series de ensayos de caracterización para cada una de los tipos de mezcla y contenido de betún.

Tabla 6.7 Relación de ensayos realizados con las MB

<b>PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS</b>	
<b>EN 12697-6</b> <b>Proced. B: Saturado superficie seca y Proced. D: Geométrico</b>	Densidad aparente
<b>EN 12697-5</b> <b>Proced. A: Volumétrico</b>	Densidad máxima teórica
<b>EN 12697-8</b>	Contenido de huecos
<b>EN 12697-10</b>	Compactibilidad
<b>COMPORTAMIENTO MECÁNICO ESTÁTICO</b>	
<b>EN 12697-12</b>	Sensibilidad al agua
<b>EN 12697-23</b>	Resistencia a la tracción indirecta
<b>EN 12697-34</b>	Ensayo Marshall

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DINÁMICO**

EN 12697-22 Proced. B: en aire, dispositivo pequeño, a 60 °C y 10 <sup>4</sup> ciclos)	Ensayo de rodadura
EN 12697-26 Anexo C: ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY)	Rigidez
EN 12697-24 Anexo D: Ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR)	Resistencia a la fatiga

En total se realizaron 313 muestras y probetas de mezcla bituminosa distribuidas en 141 muestras para las mezclas MBC AC16 surf 35/50 S y 172 para la mezclas MBC AC16 surf 50/70 S. En la [Tabla 6.8](#) se define el número de probetas y muestras realizadas para cada tipo de mezcla según el contenido de PET sobre el peso total del árido.

En caso necesario, las diferentes muestras de ensayo se acondicionaron previamente en estufa refrigeradora-cafactora durante el tiempo requerido para alcanzar la temperatura normal de ensayo conforme a las especificaciones de la normativa.

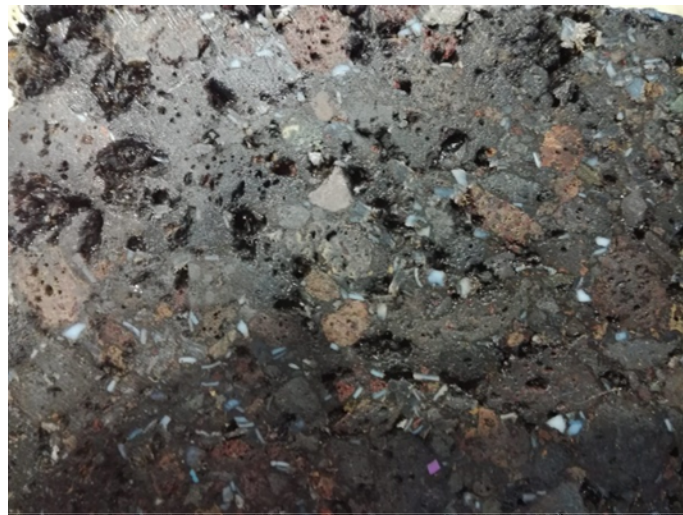


Figura 6.3 Muestra de una probeta cilíndrica fabricada con betún 35/50 +2% de PET (75 golpes por cara).

Tabla 6.8 Número de muestras y probetas realizadas para la caracterización de las MB con PET según contenido de plástico (s./peso del árido)

ENSAYO	MBC AC16 surf 35/50 S							
	MÍN	0%	0.6%	1%	2%	3%	4%	5%
Densidad máxima	2	4	4	4	4	4	4	4
Densidad aparente								
Contenido de huecos	3	6	4	7	7	7	6	6
Ensayo Marshall								
Compactibilidad	3	6	-	6	6	6	6	6
Sensibilidad al agua	3+3	6	6	6	12	6	6	6
Módulo de rigidez dinámico	3	-	4	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>22</b>	<b>18</b>	<b>23</b>	<b>29</b>	<b>23</b>	<b>22</b>	<b>22</b>

ENSAYO	MBC AC16 surf 50/70 S							
	MÍN	0%	0.6%	1%	2%	3%	4%	5%
Densidad máxima	2	2	2	2	2	2	2	2
Densidad aparente								
Contenido de huecos	3	4	3	3	3	3	3	3
Ensayo Marshall								
Compactibilidad	3	3	-	3	3	3	3	3
Sensibilidad al agua	3+3	6	6	6	12	12	6	6
Módulo de rigidez dinámico	3	4	4	4	4	4	-	-
Ensayo de rodadura	2	2	2	2	2	-	-	-
Resistencia a la fatiga	4	9	9	9	9	-	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>30</b>	<b>26</b>	<b>29</b>	<b>35</b>	<b>24</b>	<b>14</b>	<b>14</b>

### 6.3 RESULTADOS

En las Tablas 6.9 y 6.10 se resumen los valores promedios y la dispersión de los resultados de cada propiedad analizada según el contenido de PET de cada tipo de mezcla.

Tabla 6.9 Resultados y parámetros estadísticos de las propiedades de las mezclas con betún 35/50.

Tipo de mezcla			AC16 surf 35/50 S							Ds	CV
Propiedad de la mezcla			$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$		
		%	0	0.6	1	2	3	4	5		
Contenido de PET		%									
Densidad máxima	$\rho_{m\acute{a}x}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.58	2.54	2.54	2.50	2.48	2.47	2.44	0.05	1.93
Densidad aparente (SSD)	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.45	2.47	2.35	2.28	2.26	2.23	2.18	0.10	4.36
Densidad aparente (Geo.)	$\rho_{geo}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.35	2.42	2.28	2.21	2.16	2.13	2.08	0.11	5.05
Contenido de huecos de aire	$V_m$	%	4.89	3.06	7.48	8.85	8.56	9.53	10.5	2.67	35.3
Contenido de huecos del árido mineral	VMA	%	19.0	17.3	21.0	22.0	21.6	22.4	23.1	2.07	9.88
Contenido de huecos rellenos con ligante	VFB	%	74.3	82.3	64.4	59.7	60.3	57.4	54.4	10.0	15.5
Estabilidad Marshall	S	kN	10.7	10.5	9.63	6.96	7.23	7.35	7.48	1.77	21.3
Deformación Marshall	F	Mm	2.18	3.43	3.83	4.36	4.70	4.97	5.71	1.21	28.1
Coefficiente Marshall	MQ	%	5.02	3.12	2.09	1.53	1.46	1.51	1.25	1.28	59.7
Sensibilidad al agua	ITSR	%	70.1	92.8	93.6	90.0	98.2	96.6	95.0	9.11	10.0
Resistencia a tracción indirecta en condiciones secas	ITS <sub>d</sub>	MPa	1.87	2.42	1.64	1.44	1.38	1.11	1.20	0.41	26.5
Resistencia a tracción indirecta en condiciones saturadas	ITS <sub>w</sub>	MPa	1.31	2.25	1.54	1.30	1.36	1.08	1.15	0.36	25.7
Módulo de rigidez	Sm	MPa	-	4584	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 6.10 Resultados y parámetros estadísticos de las propiedades de las mezclas con betún 50/70.

Tipo de mezcla			AC16 surf 50/70 S								Ds	CV
			$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$		
Propiedad de la mezcla												
Contenido de PET		%	0	0.6	1	2	3	4	5			
Dens. máxima	$\rho_{m\acute{a}x}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.57	2.54	2.52	2.52	2.50	2.47	2.43	0.04	1.79	
Dens. aparente (SSD)	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.43	2.39	2.37	2.32	2.21	2.17	2.15	0.11	4.79	
Dens. aparente (Geo.)	$\rho_{geo}$	Mg/m <sup>3</sup>	2.34	2.32	2.29	2.23	2.13	2.09	2.07	0.10	4.59	
Contenido de huecos de aire	$V_m$	%	5.60	5.57	6.04	8.11	11.9	11.9	11.6	3.04	35.1	
Contenido de huecos del árido mineral	VMA	%	19.6	19.4	19.7	21.5	24.6	24.4	24.0	2.40	11.0	
Contenido de huecos rellenos con ligante	VFB	%	71.4	71.2	69.4	62.2	51.7	51.3	51.7	9.58	15.6	
Estabilidad Marshall	S	kN	8.49	8.21	8.18	7.84	6.41	6.58	5.98	1.27	16.8	
Deformación Marshall	F	mm	2.88	3.55	4.51	4.69	5.24	5.50	5.47	1.12	25.4	
Coefficiente Marshall	MQ	%	2.96	2.38	1.82	1.69	1.22	1.17	1.09	0.70	39.2	
Sensibilidad al agua	ITSR	%	96.2	95.1	93.4	90.5	91.2	99.5	89.3	6.10	6.56	
Resistencia a tracción indirecta en condiciones secas	$ITS_d$	MPa	1.45	1.53	1.53	1.34	1.26	0.97	0.94	0.22	16.9	
Resistencia a tracción indirecta en condiciones saturadas	$ITS_w$	MPa	1.40	1.46	1.56	1.23	1.12	0.96	0.83	0.25	20.5	
Profundidad de rodera	$RD_{(AIR)}$	mm	4.20	4.00	5.32	6.63	-	-	-	1.38	27.4	
Porcentaje de la profundidad media de la rodera	$PRD_{(AIR)}$	%	8.39	8.01	10.64	13.3	-	-	-	2.77	0.27	
Pendiente de deformación en pista	$WTS_{(AIR)}$	mm/1000 ciclos	0.24	0.25	0.45	0.60	-	-	-	0.21	53.2	
Módulo de rigidez	Sm	MPa	4751	4387	3973	3474	3089	-	-	676	17.2	

## 6.4 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 6.4.1 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS

#### 6.4.1.1 Densidades y contenidos de huecos

En la Fig. 6.4 se representa la relación entre la densidad máxima de las mezclas bituminosas y el contenido de PET incorporado. Se observa que **ambos tipos de mezclas con PET muestran densidades máximas casi idénticas** para cada contenido de plástico incorporado (diferencia entre mezclas  $\leq 1.1\%$ ). Este resultado era previsible puesto que la diferencia de densidad entre ambos ligantes es mínima (Tablas 6.2). Las densidades obtenidas presentan baja dispersión estadística (Cv: 1.9%, para la mezclas con betún 35/50; Cv: 1.8%, para las mezclas con betún 50/70 (Tablas 6.9 y 6.10)).

Conforme **se incrementa el contenido de PET, la densidad máxima disminuye** proporcionalmente (1.2-5.4%). Esta tendencia es lógica debido a que al remplazar parte del árido por partículas plásticas, la densidad del esqueleto mineral varía, volviéndose más ligero.

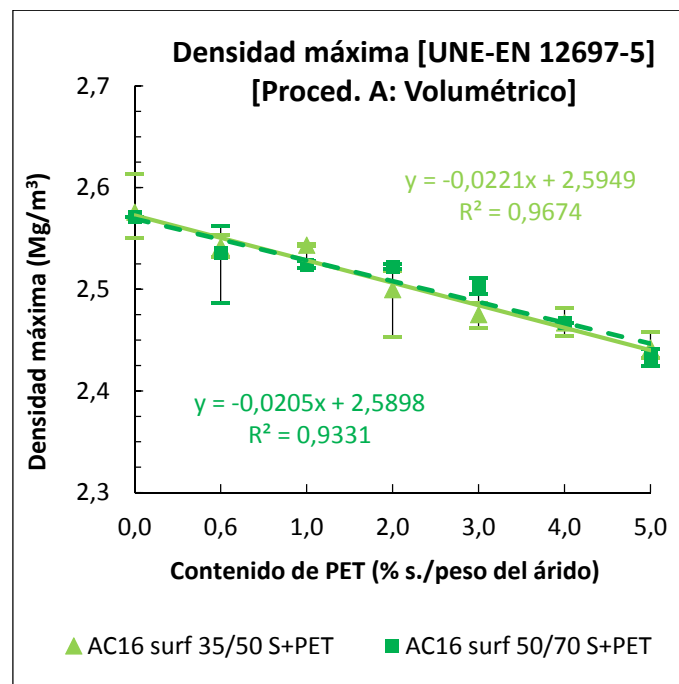


Figura 6.4 Densidad máxima de las muestras no compactadas según contenido de PET

Al analizar **las densidades aparentes** de las probetas cilíndricas (compactadas a 75 golpes por cara) se observa que **las MBC con betún 35/50 presentan densidades ligeramente superiores a las de las MBC con betún 50/70** con una diferencia  $\leq 4.0\%$  según el procedimiento geométrico y  $\leq 2.9\%$  según el procedimiento SSD (Figs. 6.5 y 6.6).

Al igual que la densidad máxima, conforme aumenta el contenido de PET la densidad aparente disminuye (1.0-13.9% según procedimiento geométrico y 0.7-11.4% según procedimiento SSD). La **máxima densidad aparente** se obtuvo en las mezclas sin PET o con un contenido del **0.6% de PET** (s/peso total del árido) para ambos tipos de mezclas. Esta reducción de la densidad



aparente con el contenido de PET es similar con ambos tipos de ligante (las rectas de regresión son aproximadamente paralelas).

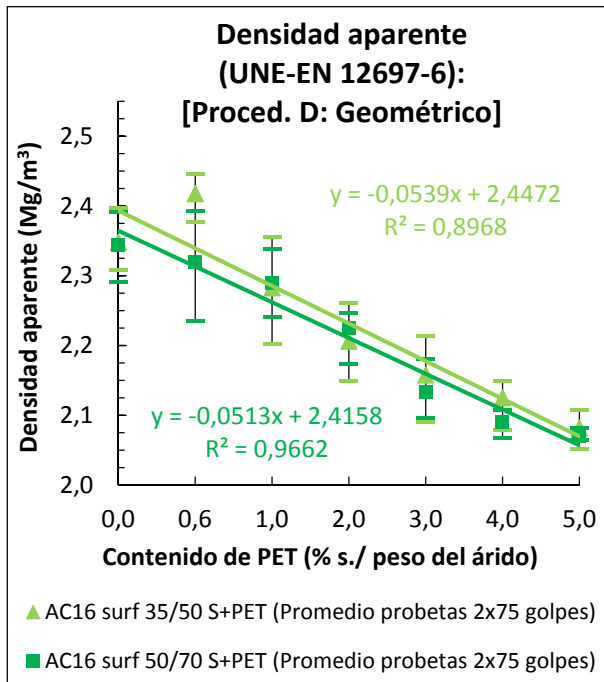


Figura 6.5 Densidad aparente geométrica de las probetas compactadas a 75 golpes por cara.

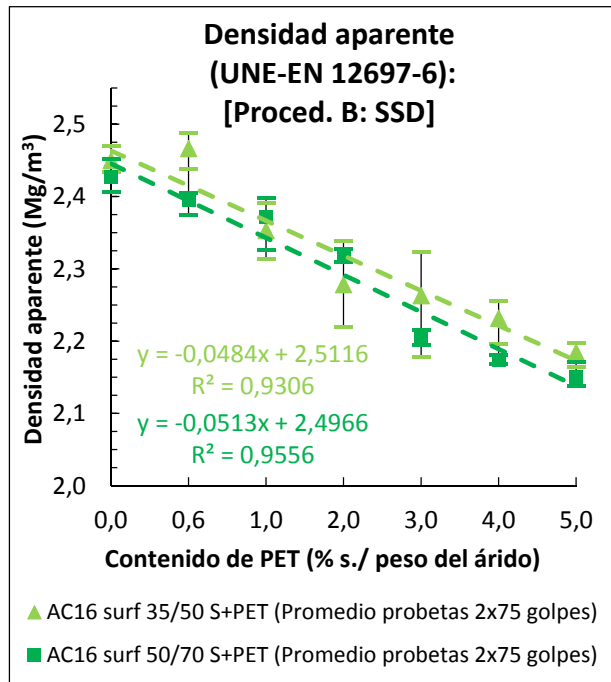


Figura 6.6 Densidad aparente SSD de las probetas compactadas a 75 golpes por cara.

Los contenidos de huecos de las mezclas se representan en las Figs. 6.7 y 6.8. **El contenido de huecos de la mezcla ( $V_m$ ) y el contenido de huecos del árido mineral (VMA) de las mezclas con betún 50/70 son superiores a los contenidos de huecos de las mezclas con betún 35/50** para la misma energía de compactación (75 golpes por cara). En consecuencia, el contenido de huecos rellenos con ligante (VFB) es ligeramente inferior en las mezclas con betún 50/70. Las diferencias entre estos tipos de mezclas en cuanto al contenido de huecos  $V_m$  varía entre el 0.2-73.5% por el procedimiento geométrico (Fig. 6.7a) y entre el 8.4-87.3% por el procedimiento SSD (Fig. 6.8a). Los valores extremos obtenidos están relacionados con el comportamiento anómalo de la mezcla AC16 surf 35/50 S + 0.6% PET.

Respecto al contenido de huecos en el árido mineral VMA (Figs. 6.7b y 6.8b), la diferencia varía entre el 0.2-16.2% por el procedimiento geométrico y entre el 2.3-13.8% por el procedimiento SSD, siendo las rectas de regresión prácticamente paralelas. La superioridad en huecos de las mezclas con un betún 50/70 podría relacionarse con las condiciones de compactación y mezclado del ligante ante la presencia del plástico. En el caso del ligante 50/70 la temperatura de compactación y mezclado debe ser 150 °C y 160 °C respectivamente, mientras que en con el betún 35/50 la temperatura de referencia es 15 °C superior (UNE-EN 12697-35). Por tanto, se deduce que, al incorporar el plástico en la mezcla, **la viscosidad del conjunto se verá afectada de diferente manera** en función de la temperatura empleada.

Las características referentes al contenido de huecos **cumplen con las especificaciones** ( $4 \leq V_m \leq 6\%$  y  $VMA \geq 15\%$ , para capas superficiales con mezclas tipo AC) del art.542 del PG-3, **para un contenido de PET  $\leq 0.6\%$**  para cualquiera de los ligantes empleados (contenido de huecos  $V_m$  calculado por el procedimiento B:SSD).



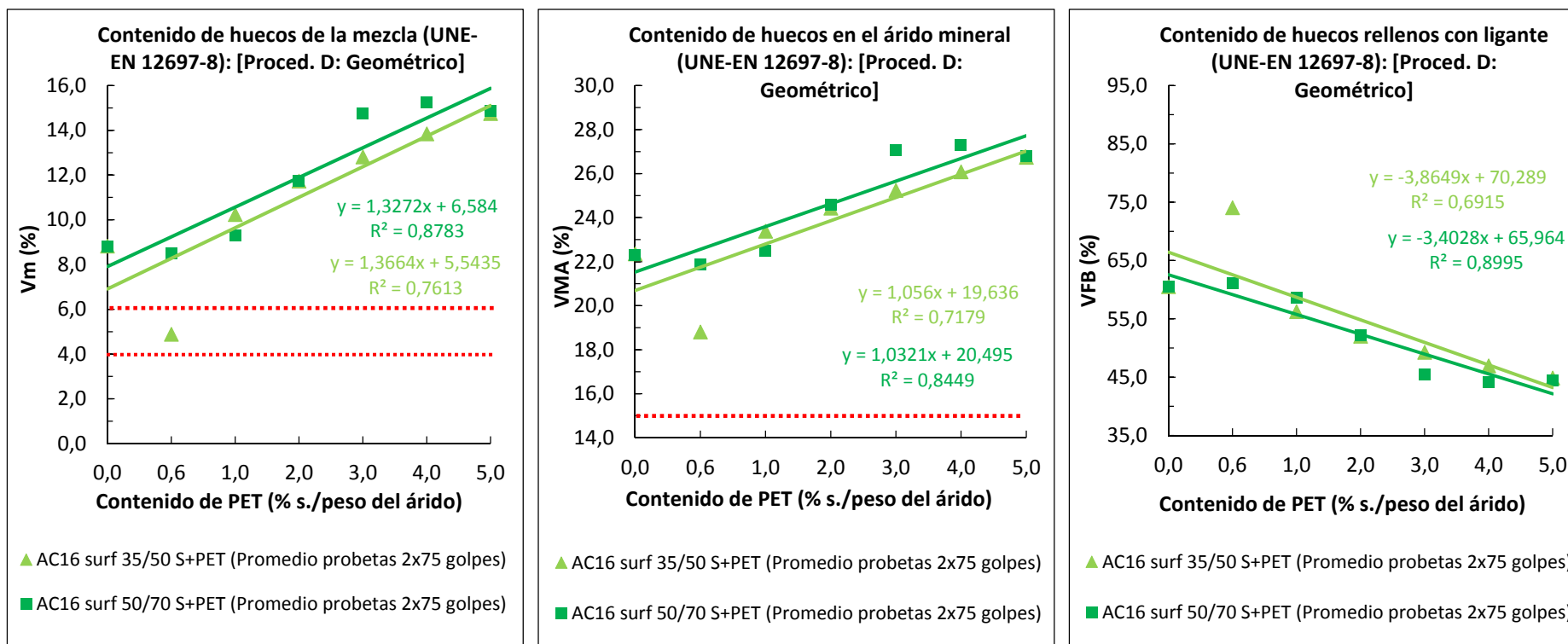


Figura 6.7 Contenido de huecos por el procedimiento geométrico según contenido de PET y tipo de mezcla: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante

\*Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $4\% \leq V_m \leq 6\%$  y  $VMA \geq 15\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

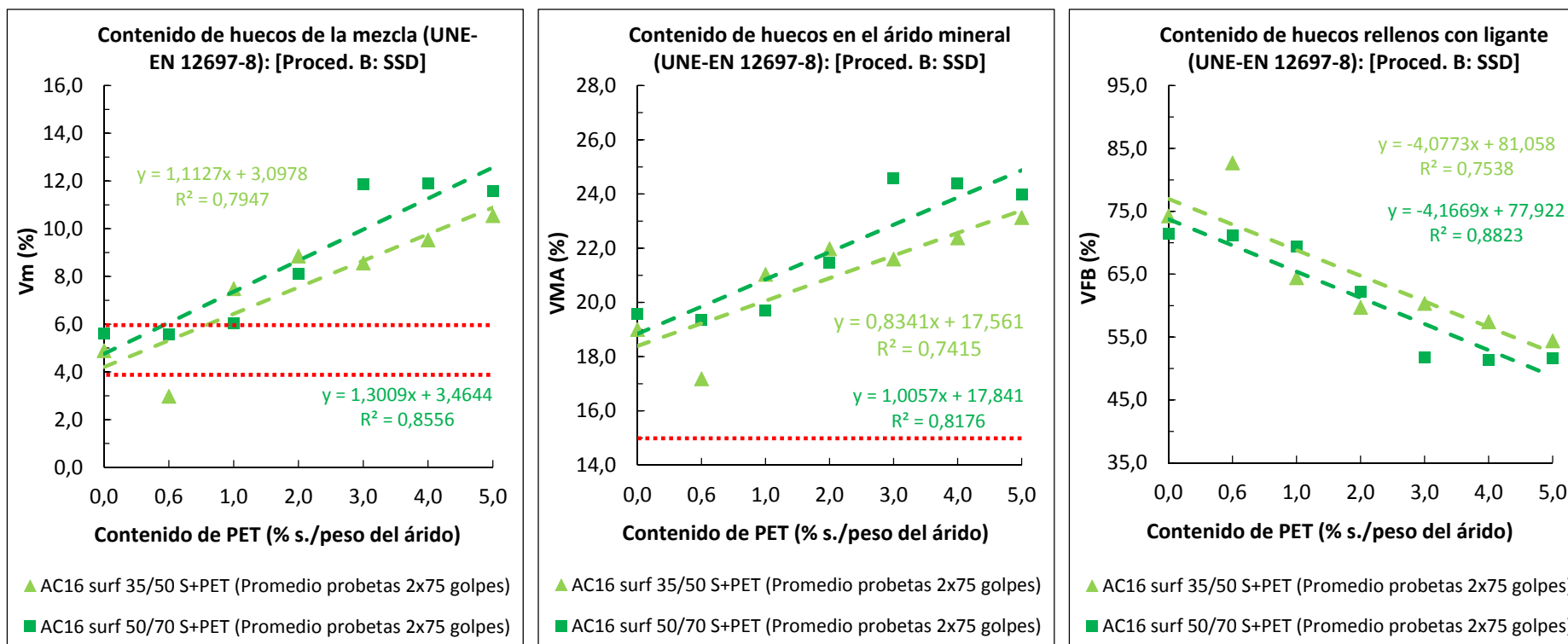


Figura 6.8 Contenido de huecos por el procedimiento SSD según contenido de PET y tipo de mezcla: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante.

\*Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $4\% \leq V_m \leq 6\%$  y  $VMA \geq 15\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

### 6.4.1.2 Compactibilidad

En las Figs. 6.9 y 6.10 se analiza el comportamiento de las mezclas durante el proceso de compactación de las probetas cilíndricas sometidas a 75 golpes por cada cara. En la Fig. 6.9 se muestra la variación de la densidad aparente geométrica de las probetas conforme se aplica la energía de compactación (nº de golpes). En esta gráfica puede observarse que conforme se incorpora mayor proporción de PET, la densidad aparente disminuye. Esta diferencia es más significativa cuando los contenidos de PET son  $\leq 3\%$ . Por encima de este porcentaje, los comportamientos de las mezclas en cuanto a su compactación y las densidades alcanzadas son similares, independientemente del ligante empleado.

En la Fig.6.10 se analiza la relación entre la resistencia a la compactación (T) y el contenido de PET incorporado a las diferentes mezclas. En este caso, pese a que los resultados obtenidos para este parámetro muestran valores similares entre sí (30-40 x 21Nm/golpe), se aprecia una ligera tendencia ascendente que indicaría que **a mayor contenido de PET, mayor dificultad de compactación**. En cuanto al comportamiento de un ligante frente a otro, se observa que el betún 50/70, como cabría esperarse, ofrece mayor resistencia de compactación en cualquiera de las mezclas analizadas. Esto concuerda con el mayor Vm y menor densidad aparente de este tipo de mezclas observados en la figuras anteriores (Fig. 6.5 a Fig. 6.8).

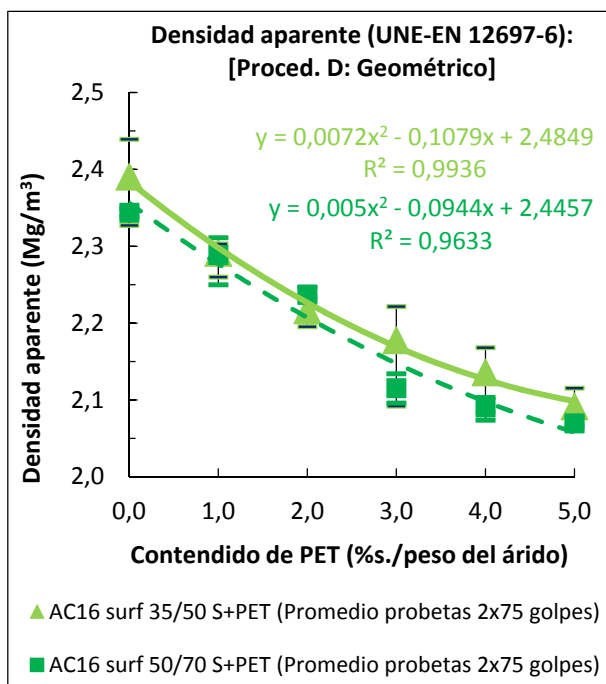


Figura 6.9 Densidad aparente según procedimiento geométrico de probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara

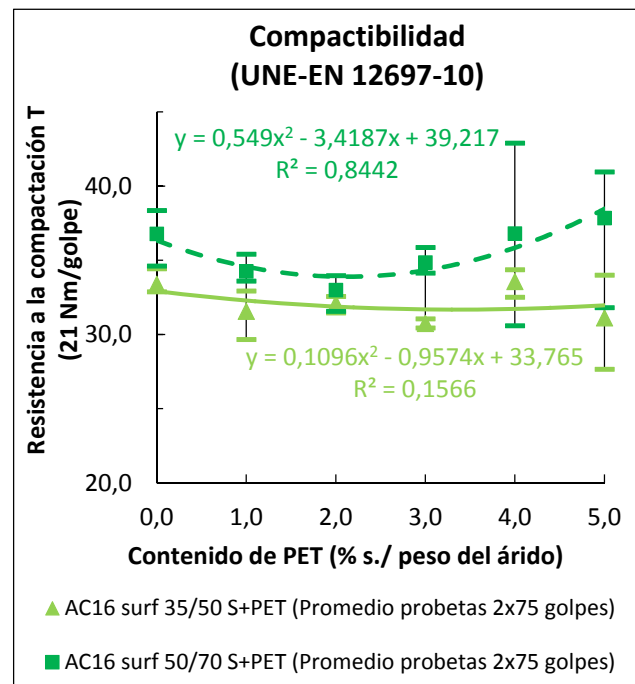


Figura 6.10 Resistencia a la compactación T (21 Nm/golpe) de probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara

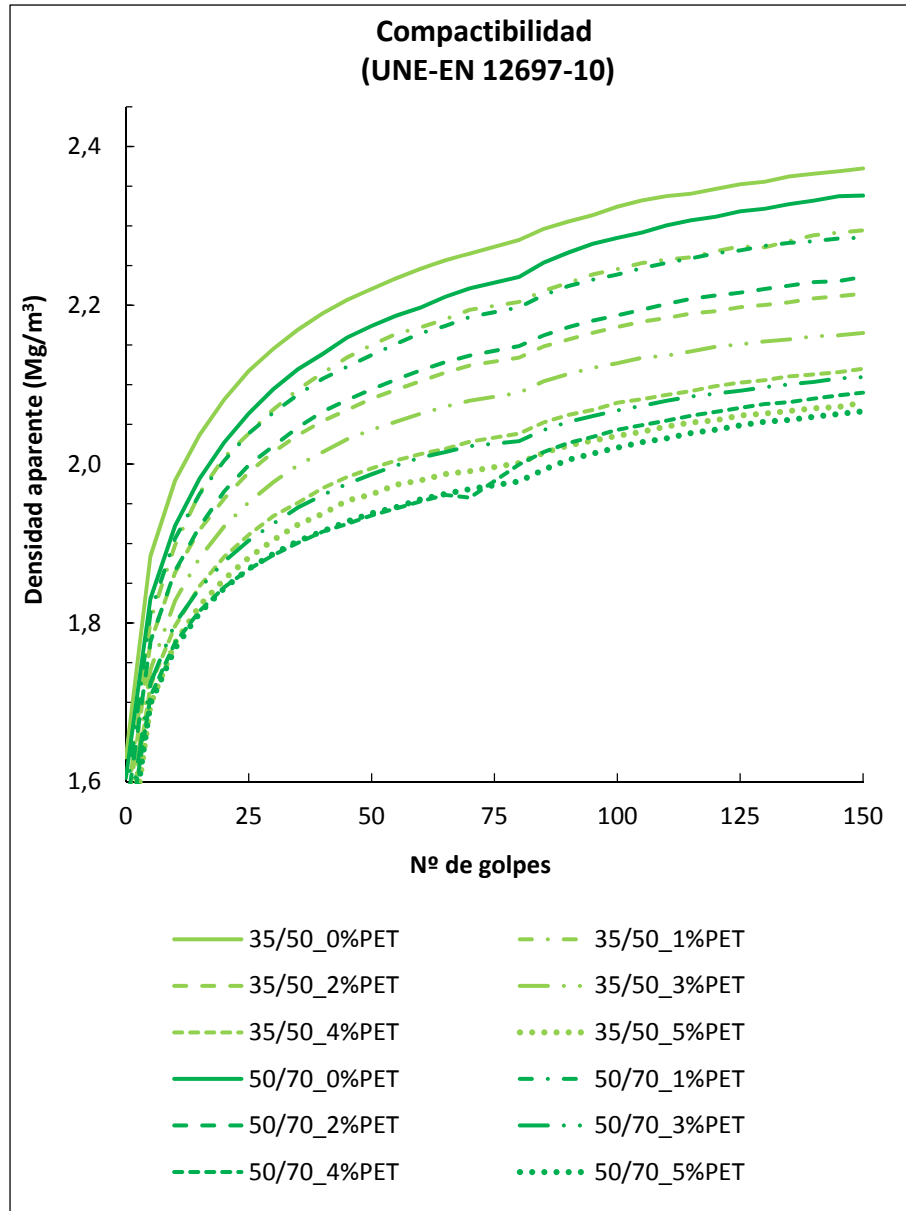
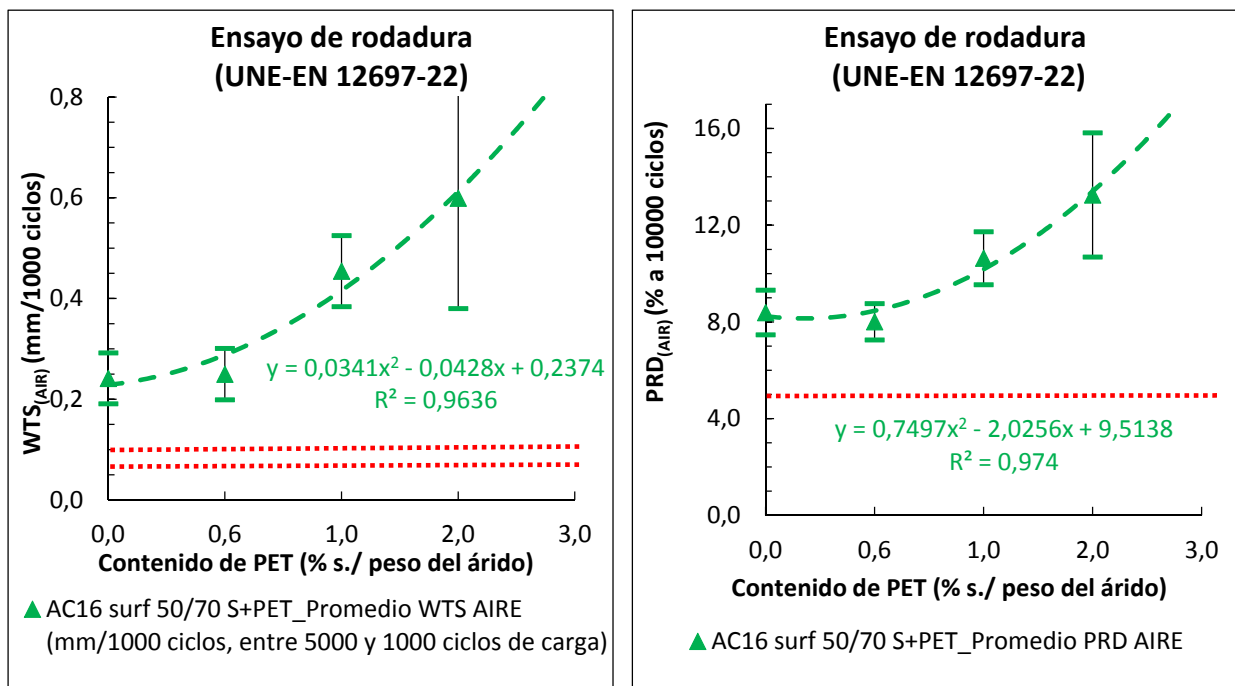


Figura 6.11 Evolución de la densidad aparente de las mezclas conforme al número de golpes aplicados (según tipo de ligante y contenido de PET en mezcla).

## 6.4.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS

### 6.4.2.1 Resistencia a la deformación permanente

En las Figs. 6.12a y 6.12b se muestra la variación de la pendiente de la deformación ( $WTS_{(AIR)}$ ) y la variación del porcentaje de la profundidad media de la rodera ( $PRD_{(AIR)}$ ) de las probetas de placa (compactadas mediante rodillo) en función del contenido de PET, respectivamente. En estas gráficas es posible apreciar la pérdida de resistencia a la deformación plástica conforme aumenta en contenido de partículas de PET según el ensayo de rodadura en pista (proced. B: al aire, dispositivo pequeño, a 60 °C y  $10^4$  ciclos).



\* Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $WTS_{(AIR)} \leq 0.10$  mm/1000 ciclos;  $PRD_{(AIR)} \leq 5\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

Figura 6.12 Ensayo de rodadura en pista por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos para cada mezcla según contenido de PET: a)  $WTS_{(AIR)}$  (mm/1000ciclos); b) PRD%

En la gráfica de la Fig. 6.12a se observa que la pendiente de la profundidad de rodera ( $WTS_{(AIR)}$ ) aumenta  $\leq 148.2\%$  (mezclas del 2% PET con respecto a la mezcla sin PET), mientras que en la Fig. 6.12b la profundidad de rodera proporcional ( $PRD_{(AIR)}$ ) aumenta  $\leq 58.0\%$  (mezclas del 2% PET con respecto a la mezcla sin PET). No obstante, se aprecia que para un contenido bajo de PET (0.6% PET sobre el peso de la mezcla) la variación correspondiente es de +3.5% en el caso de la WTS y un -4.5% en el caso del PRD. Estos resultados indican que **el uso del PET como sustituto parcial del árido no mejora la deformación plástica de la MB**. Por el contrario, contribuye a aumentar notablemente las deformaciones permanentes, **salvo si se emplea en proporciones reducidas ( $\leq 0.6\%$  sobre peso del árido)**. Se recomienda la realización de un mayor número de ensayos que permitan confirmar esta hipótesis con ambos tipos de mezclas.



Figura 6.13 Probetas tipo placa de mezcla 50/70 con un 1% y un 2% de PET s/peso del árido compactadas mediante rodillo.

Los resultados obtenidos no cumplen en ningún caso las especificaciones de carreteras ( $WTS_{(AIR)} \leq 0.10$  mm/1000 ciclos;  $PRD_{(AIR)} \leq 5\%$ ), quedando estas mezclas fuera de los límites establecidos en la regulación española para cualquier contenido de PET analizado, incluso con 0% de PET, como ya se demostró en el Capítulo 4, debido al carácter marginal de los áridos porosos empleados (BOPV).

En la Fig. 6.14 se pueden apreciar resultados similares a los del ensayo de rodadura, obtenidos mediante el ensayo Marshall sobre probetas cilíndricas (compactadas a 75 golpes por cara). En la Fig. 6.14a se observa una reducción de la estabilidad Marshall de las mezclas conforme aumenta el contenido de PET sobre el peso del árido ( $\leq 34.9\%$  para mezclas con betún 35/50 y  $\leq 29.6\%$  para mezclas con betún 50/70, (diferencia máxima obtenida con respecto a las mezclas 0%PET)), mientras que en la Fig. 6.14b se observa un aumento del valor de deformación ( $\leq 161.7\%$  y  $\leq 90.9\%$ , respectivamente con respecto a las mezclas 0% PET); en consecuencia, se produce un descenso del coeficiente Marshall que varía por debajo del 75% para mezclas con betún 35/50 y del 66.9% para mezclas con betún 50/70 (Fig. 6.14c). En ambos casos, la mejor relación S/F (máxima estabilidad, menor deformación) se logra con las mezclas sin adición de PET.

De forma análoga al ensayo de rodadura, los resultados obtenidos para el contenido de PET más bajo (0.6% sobre el peso del árido) presentan una variación reducida en relación a las mezclas sin PET (-1.5% y -3.2% en la estabilidad Marshall, +57.2 y +23.1% en la deformación, para la mezcla con betún 35/50 y 50/70 respectivamente).

Tomando como referencia los valores de referencia de la versión anterior del Art. 542 del PG-3 (Orden FOM/891/2004) (estabilidad,  $S \geq 8$  kN y deformación,  $F \leq 3.5$  mm (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2004)) sólo serían válidas las mezclas con un contenido de PET  $\leq 0.6\%$ . Esto permite afirmar que, **con respecto a las deformaciones plásticas, es posible la introducción del PET como sustituto del árido en las mezclas bituminosas pero en proporciones reducidas ( $< 0.6\%$ ).**

En este ensayo, la dispersión estadística de los valores obtenidos fue superior en las mezclas con betún 35/50 que en las mezclas con betún 50/70 (Tablas 6.9 y 6.10).



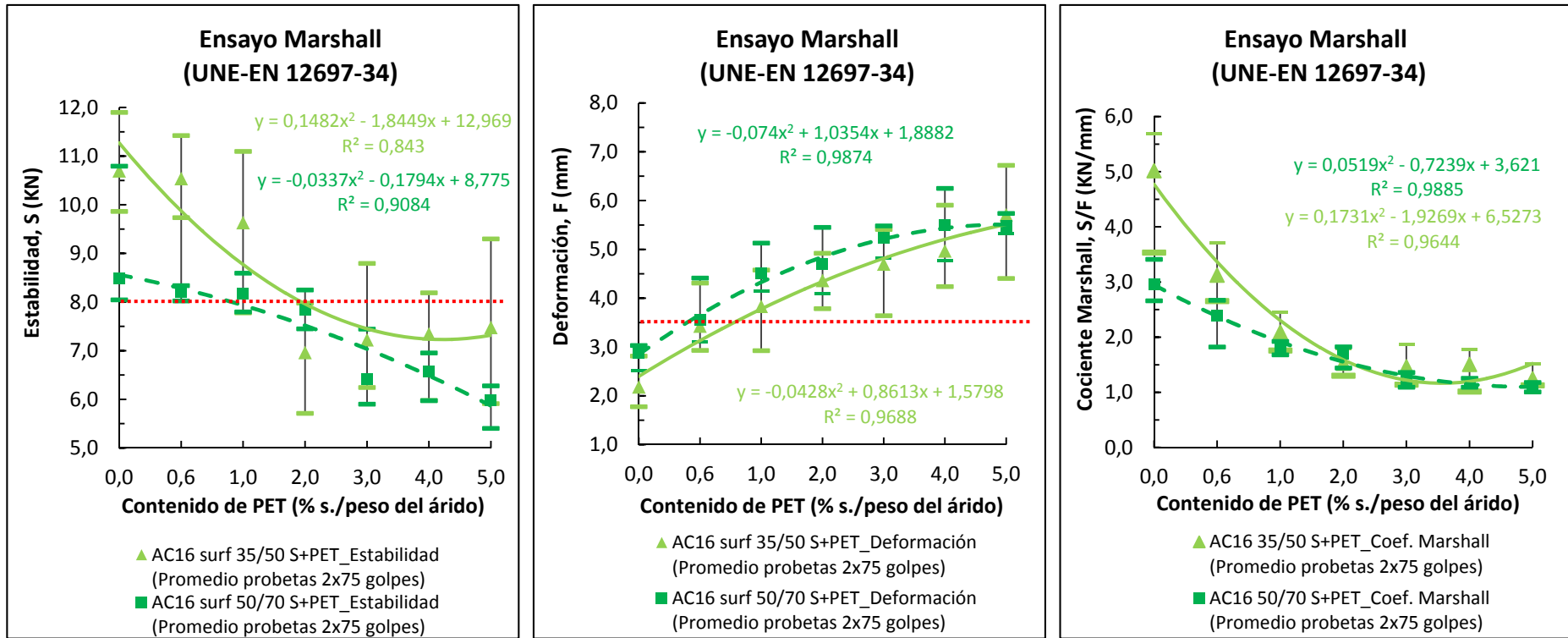


Figura 6.14 Resultados del ensayo Marshall según contenido de PET y tipo de mezcla: a) Estabilidad máxima; b) Deformación plástica; c) Cociente Marshall

\* Las líneas rojas discontinuas representan valores de referencia establecidos en el Art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2004).

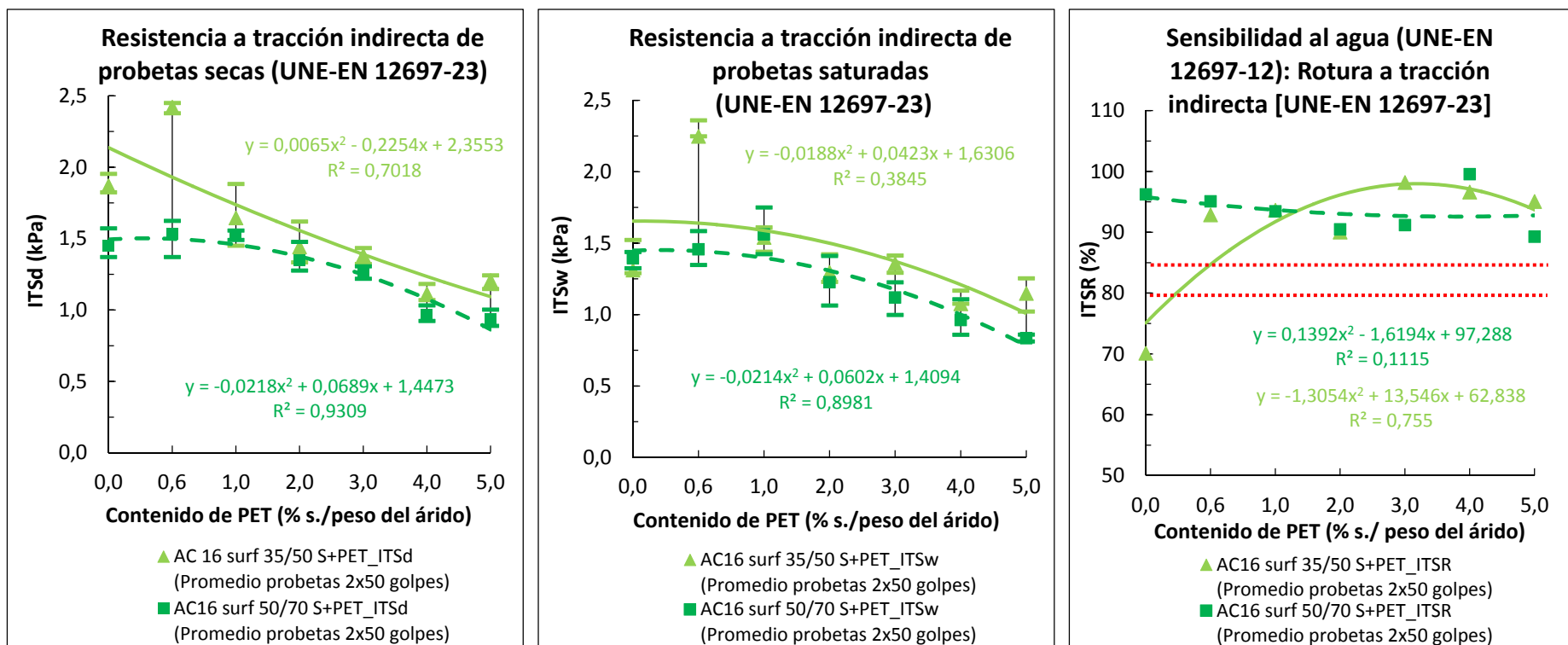


Figura 6.15 Resultados del ensayo de sensibilidad al agua según contenido de PET y tipo de mezcla: a)  $ITS_d$  en condiciones secas; b)  $ITS_w$  en condiciones de saturación; c)  $ITSR$

\*Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $80\% \leq ITSR \leq 85\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

#### 6.4.2.2 Sensibilidad al agua

A la hora de evaluar el efecto del agua sobre la resistencia de las mezclas, se comparó la resistencia a tracción indirecta a 15 °C de dos subconjuntos de probetas cilíndricas (compactadas a 50 golpes por cara) sometidas a distintas condiciones de saturación: secas ( $ITS_d$ ) y saturadas tras 72h sumergidas a 40 °C ( $ITS_w$ ).

En la Fig. 6.15a se observa que la resistencia a tracción indirecta en condiciones secas ( $ITS_d$ ) disminuye hasta un  $\leq 35.5\%$  con respecto a las mezclas sin plástico, en ambos tipos de mezclas a medida que aumenta el contenido de PET en las mismas. Si se centra el análisis en el inicio de las líneas de tendencia, entre el 0% y 1% de contenido de PET, se observa que la variación de la resistencia se mantiene relativamente estable ( $-12.1\%$  en las mezclas con betún 35/50 y  $+5.2\%$  en las mezclas con betún 50/70). Estas mismas circunstancias se aprecian en la Fig. 6.15b, donde la disminución de la resistencia a tracción indirecta en condiciones saturadas ( $ITS_w$ ) es hasta un  $\leq 40.2\%$  inferior conforme se incrementa el contenido de PET, pero en este caso se produce una ligera mejora entre el 0% y el 1% de PET ( $+17.4\%$  en las mezclas con betún 35/50 y  $+11.9\%$  en las mezclas con betún 50/70). En ambas figuras, las resistencias de las mezclas elaboradas con betún 35/50 se sitúan ligeramente por encima que las de las mezclas elaboradas con betún 50/70 ( $ITS_d \leq 22.6\%$  e  $ITS_w \leq 27.3\%$ ). Mención aparte merece, la mezcla *AC16 surf 35/50 S + 0.6% PET* que muestra un comportamiento anómalo con unas resistencias muy superiores al resto ( $ITS_d \geq 29.4\%$  e  $ITS_w \geq 71.4\%$ ).

En cuanto a la relación existente entre ambas resistencias a tracción indirecta ( $ITSR$ ), en la Fig. 6.15c se observa que **la incorporación del PET no afecta de forma claramente significativa a la resistencia conservada frente a la acción del agua**, situándose este coeficiente por encima del límite establecido ( $\geq 80\%$ ) en las especificaciones de carreteras (PG-3) a pesar del alto contenido de huecos de las mezclas (Figs. 6.6 y 6.7). Esto podría atribuirse a que, durante el proceso de mezclado, el PET se deforma cubriendo el árido como una película impermeabilizante, tal como sugiere Sojobi *et al.* (2016).

### 6.4.2.3 Contenido óptimo de PET

La Tabla 6.11 resume el grado de cumplimiento de las especificaciones de la normativa de carreteras española PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014) de las mezclas elaboradas con PET para cualquiera de las capas de pavimento (rodadura, intermedia o base). Conforme a los resultados obtenidos, se ha buscado determinar el contenido óptimo de PET en función de los límites establecidos en el PG-3 para una mezcla tipo AC. Como se puede observar al comparar las mezclas con PET con la mezcla de referencia, **el contenido óptimo de PET se sitúa < 0.6%**. No obstante, **es necesario un estudio más exhaustivo** del comportamiento de las mezclas con PET para poder determinar un contenido óptimo de PET más preciso en el que se considere las variables que intervienen en el proceso de mezclado (dosificación del árido natural y formas de incorporación del material), dado que el principal hándicap encontrado durante la investigación, ha sido poder garantizar la homogeneidad del material empleado a lo largo de las diferentes fases.

Tabla 6.11 Determinación del contenido óptimo de ligante en función del cumplimiento de las especificaciones para cada propiedad analizada.

Propiedades	Especificaciones para una mezcla AC	Contenido de PET% (sobre peso total de mezcla)						
		0.0	0.6	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Volumétricas	Máximo valor $\rho_{ssd}$	█						
	$4 \leq V_m \leq 6\%$	█						
	$4 \leq V_m \leq 7\%$	█		█				
	$4 \leq V_m \leq 8\%$	█		█	█			
	VMA $\geq 15\%$	█						
Sensibilidad al agua	VMA $\geq 14\%$	█						
	ITSR $\geq 85\%$	█						
	ITSR $\geq 80\%$	█						
Deformación permanente	$WTS_{AIR} \leq 0.07-0.10$	█						
	$WTS_{AIR} \leq 0.10-0.15$	█						
	$PRD_{AIR} \leq 5\%$	█						
	$S \geq 8kN^{**}$	█						
	$F \leq 3.5mm^{**}$	█						

\*En verde más claro se representan las mezclas que cumplen las especificaciones para capas de rodadura, en trama de líneas las mezclas que cumplen las especificaciones para capas intermedias y en verde oscuro, para capas de base.  
 \*\*Valores de referencia del Art.542 PG-3 (Orden FOM/891/2004) (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2004)

#### 6.4.2.4 Rigidez

Para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas analizadas, se determinó el módulo dinámico de rigidez mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara (IT-CY, factor de carga superficial  $k = 0.6$ , a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Las probetas elaboradas con PET **proporcionan una rigidez media de 3935 MPa, inferior a la recomendada** para el tipo de mezcla diseñada (AC Densa o Semidensa  $\geq 6000\text{ MPa}$ ) (Consejería de Obras Públicas y Transportes-Sevilla, 2007). Los resultados obtenidos para cada mezcla muestran una baja dispersión estadística ( $D_s \leq 494$  y  $C_v \leq 10.4\%$ ).

En la Fig. 6.16 se representa el valor del módulo de rigidez dinámico frente a los distintos contenidos de PET de las mezclas. En esta gráfica se observa que el módulo de rigidez disminuye al aumentar la proporción de PET ( $\leq 35.0\%$ ). La máxima rigidez de las mezclas se obtuvo en el caso de las mezclas sin PET (4751 MPa). Aunque si se centra el análisis en el porcentaje del 0.6% de PET (sobre el peso de la mezcla) la variación es tan sólo de un -7.68% con respecto al máximo obtenido. Por tanto, se puede afirmar que en el caso de **las mezclas con PET cuanto mayor es su contenido menor es su rigidez dinámica pero puede permanecer relativamente estable por debajo del 0.6% de PET**. La variación de la rigidez dinámica, al igual que sucede con la deformación plástica, se justifica por la pérdida de estructura mineral al ser reemplazada por partículas plásticas cuya densidad y módulo es significativamente menor.

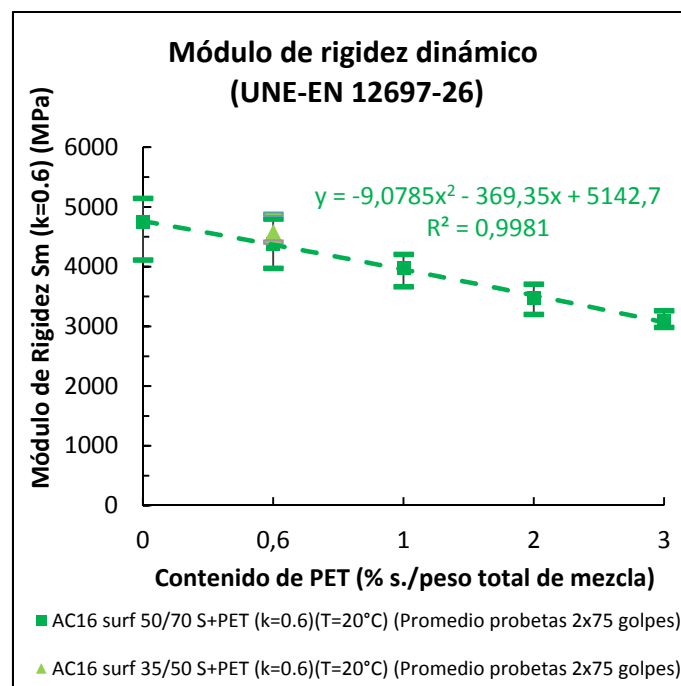


Figura 6.16 Valores del módulo de rigidez dinámico obtenido mediante ensayo de tracción indirecta en función del contenido de ligante y tipo de mezcla.

## 6.5 CONCLUSIONES

---

A partir del análisis de resultados realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- **Las densidades máximas y aparentes de las MB elaboradas con PET son similares**, independientemente del ligante empleado (35/50 o 50/70).
- Conforme **aumenta el contenido de PET en las MB, las densidades máximas y aparentes de las mezclas disminuyen y los contenidos de huecos aumentan**. Por tanto, las mayores densidades aparentes y menores contenidos de huecos se obtuvieron en las mezclas de referencia sin PET, pudiendo mantenerse con valores similares en las mezclas con un 0.6% de PET sobre el peso del árido.
- **Pese a ser un polímero termoplástico** con un punto de fusión alto ( $\geq 245$  °C) su temperatura de transición vítrea está por encima de los 60 °C, por lo que este polímero comienza a deformarse a las temperaturas de trabajo empleadas. Por consiguiente, su incorporación **dificulta el mezclado y compactación de las MB al interactuar sobre la viscosidad del ligante**.
- La incorporación del PET por vía seca a las mezclas bituminosas **dificulta el proceso de compactación** de las mismas, ofreciendo mayor resistencia cuanto mayor es la proporción de PET.
- La combinación del PET con el árido BOPV por vía seca **no contribuye a mejorar la resistencia frente a la deformación plástica** de las mezclas analizadas. Por el contrario, las deformaciones permanentes (tanto en términos de WTS como PRD) aumentan considerablemente al incrementarse el contenido de PET en las mezclas.
- Pese a que las mezclas analizadas no cumplen en ningún caso las especificaciones españolas para carreteras sobre deformaciones ( $WTS \leq 0.15$  mm y  $PRD \leq 5\%$ ), **la deformación plástica de las MB se mantiene estable cuando se emplean proporciones reducidas** de PET ( $< 0.6\%$  sobre peso del árido).
- Una de las ventajas que ofrece el uso del PET en las MB es que **favorece la impermeabilización** de las mezclas frente a la acción del agua, permitiendo conservar la resistencia de las mismas por encima de los límites establecidos por la normativa de carreteras ( $ITSR \geq 80\%$ ).
- **La incorporación del PET** como sustituto parcial del árido mineral **contribuye a una pérdida de rigidez de la mezcla conforme aumenta el contenido de PET** introducido en la mezcla. Estas mezclas tienen un módulo dinámico de rigidez inferior a los valores recomendables para el tipo de mezclas analizadas (AC Densa o Semidensa  $\geq 6000$  MPa).
- Ante la limitada bibliografía existente al respecto y que solo se ha podido añadir con éxito un contenido bajo de PET (0.6% sobre el peso del árido), se recomienda **profundizar en el estudio sobre el procedimiento de fabricación** de las mezclas con este polímero por vía seca en cuanto a establecer la proporción y tamaño más adecuados de las partículas, los posibles tratamientos previos del polímero, control de tiempos y temperaturas de mezclado y compactación, determinación de contenido óptimo de ligante, etc.

## 7 DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

---

### 7.1 INTRODUCCIÓN

---

En este último capítulo se recoge una discusión sobre los resultados obtenidos con los polímeros analizados, una valoración cualitativa del impacto ecológico y económico que supondría su aplicación en carreteras, las principales conclusiones obtenidas en este trabajo de tesis doctoral y una propuesta sobre líneas futuras de investigación.

En el apartado de discusión de resultados de este capítulo, se establecerá una comparativa de cada una de las propiedades analizadas a lo largo de la tesis doctoral entre las diferentes mezclas elaboradas con polímeros (caucho de NFU o PET) y a su vez, con respecto a las mezclas convencionales. En total se comparan 5 mezclas distintas: dos mezclas convencionales con distintos ligantes (35/50 o 50/70), dos mezclas con PET con distintos ligantes (35/50 o 50/70) y una mezcla con un betún mejorado con caucho (BC35/50). Para poder realizar este análisis comparativo se han empleado los datos obtenidos en las fases previas, con las siguientes particularidades:

- Se ha mantenido el mismo tipo de árido volcánico en todos los casos (BOPV), aunque con ligeras variaciones en la granulometría debido a la heterogeneidad del propio material y del proceso de obtención del mismo.
- Se ha establecido como contenido óptimo de ligante para todas las mezclas una proporción del 6% sobre el peso total de la mezcla.
- Se han utilizado tres tipos de ligantes con distinto grado de penetración: 35/50, 50/70 y BC35/50.
- Se ha utilizado la misma proporción de adiciones poliméricas con respecto al peso total del árido (0.6%).
- El proceso de fabricación de todas las mezclas se ha realizado bajo las mismas condiciones de mezclado y compactación, adecuando las temperaturas y tiempos de cada proceso al tipo de ligante empleado. Sin embargo, por las características de cada polímero se ha optado por emplear en el caso del polvo de neumático la vía húmeda y en el caso del PET, la vía seca.

De forma análoga a los capítulos previos, en esta discusión de resultados se analizará en primer lugar las propiedades volumétricas de las mezclas (densidades y contenidos de huecos), a continuación sus propiedades mecánicas (deformaciones y resistencias) y, finalmente, el comportamiento dinámico de las mismas (rigidez y fatiga).

En el apartado de impacto ambiental se hará una valoración aproximada de la eco-eficiencia del proceso de producción de estas mezclas teniendo en cuenta los materiales y técnicas empleados. Por último, se muestra un resumen de las principales conclusiones extraídas en esta investigación y plantear distintas alternativas que den continuidad al trabajo realizado.

## 7.2 COMPARATIVA DE MEZCLAS

### 7.2.1 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS

#### 7.2.1.1 Densidades máximas y aparentes

En las Figs. 7.1 y 7.2 se establece una comparación entre los valores promedios de densidad máxima (según procedimiento volumétrico) y densidad aparente (según procedimiento SSD) de cada una de las 5 mezclas analizadas, todas ellas con áridos basálticos vacuolares (BOPV).

En la Fig. 7.1 se aprecia que, con respecto a las mezclas sin polímeros las densidades obtenidas son menores, dado que las densidades de los polímeros empleados (caucho de NFU o PET) son inferiores que las del resto de componentes de la mezcla (betún y áridos). No obstante, se observa que, **independientemente del ligante o polímero empleado y del método de fabricación (vía seca o vía húmeda), la densidad máxima teórica permanece constante** (en torno a  $2.55 \text{ Mg/m}^3$ ) con baja desviación estadística ( $D_s=0.05$ ).

En la Fig. 7.2 se observa que la densidad aparente según el procedimiento SSD de las probetas cilíndricas (2x75 golpes) presenta una mayor dispersión en sus resultados que en la figura anterior. La máxima densidad aparente se logra con la mezcla *AC16 surf 35/50 S + 0.6% PET*, mientras que la mínima densidad aparente se obtiene con la mezcla *AC16 surf BC35/50 S*, siendo la diferencia entre ambos extremos de un 3.6%. La causa de esta diferencia puede deberse a las variaciones que ha sufrido la granulometría del árido a lo largo de todo el proceso de investigación, a la dificultad de garantizar una temperatura uniforme de compactación para todas las mezclas y al cambio de viscosidad de los ligantes al añadir los polímeros. A pesar de ello, **el valor promedio de la densidad aparente por el procedimiento SSD de todas las mezclas se sitúa alrededor de  $2.40 \text{ Mg/m}^3$  con baja desviación estadística ( $D_s=0.06$ ).**

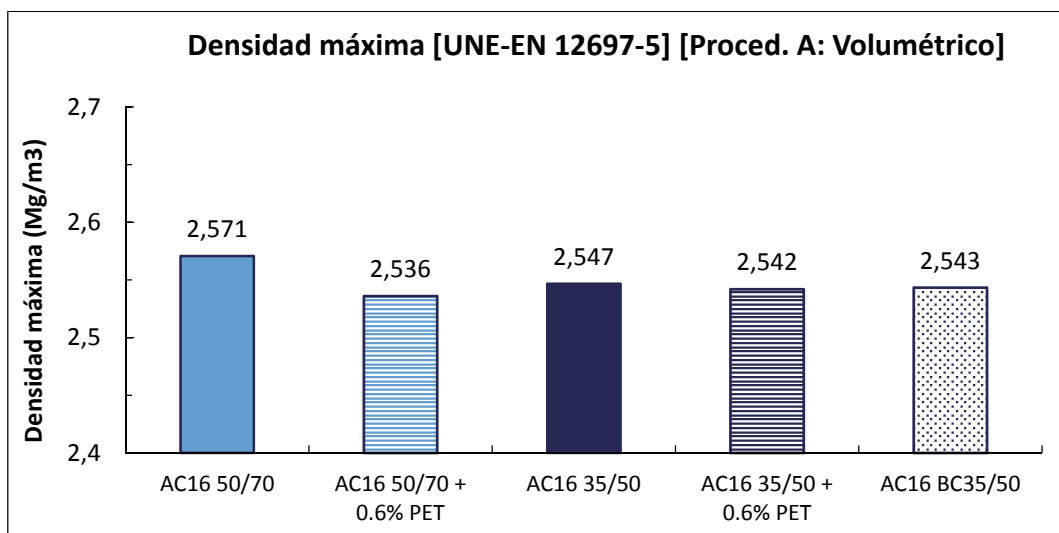


Figura 7.1 Densidad máxima según procedimiento A: Volumétrico ( $\text{Mg/m}^3$ ) [UNE-EN 12697-5] (muestras sin compactar).



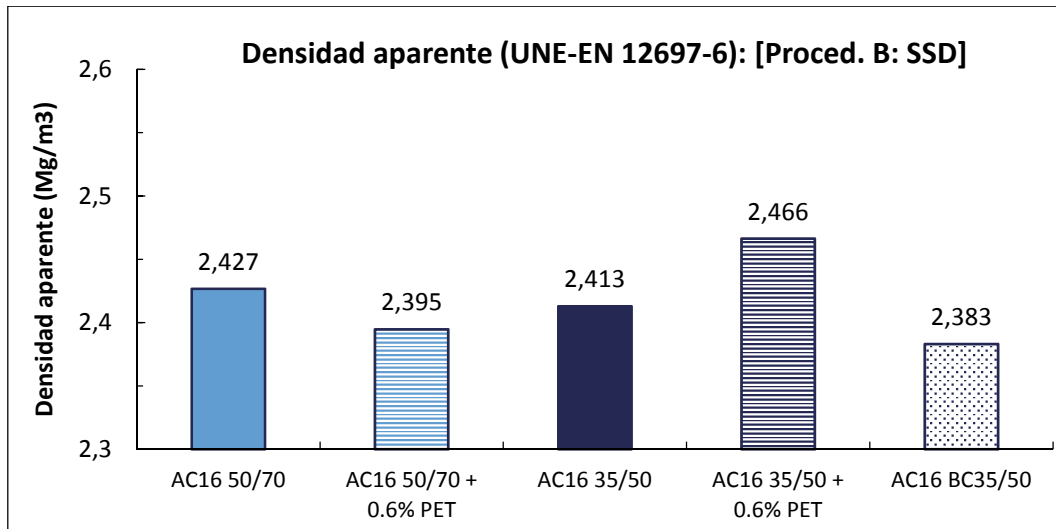


Figura 7.2 Densidad aparente según procedimiento B: SSD (Mg/m<sup>3</sup>) [UNE-EN 12697-6] (probetas compactadas 2x 75 golpes).

#### 7.2.1.1 Contenidos de huecos

En las Figs. 7.3, 7.4 y 7.5 se analiza la relación de contenidos de huecos de las diferentes mezclas calculados en función de la densidad máxima y la densidad aparente según el procedimiento SSD.

Con respecto al volumen de huecos ( $V_m$ ) presente en la diferentes mezclas analizadas (Fig. 7.3) se aprecia que, exceptuando la mezcla *AC16 surf 35/50 S + 0.6% PET*, el resto de mezclas **cumplen o se aproximan a los límites establecidos en la regulación española de carreteras para capas superficiales de pavimento ( $4% < V_m < 6%$ )**. El valor promedio del contenido de huecos obtenido es  $V_m = 5.7\%$  y su desviación estándar  $D_s = 0.4$  (excluyendo el valor de las mezclas *AC16 surf 35/50 S + 0.6% PET*). Por lo que estos resultados, **confirman la validez del empleo del árido vacuolar con independencia del polímero incluido en la mezcla.**

Por su parte, **el volumen de huecos en el árido mineral (VMA) (Fig. 7.4) se sitúa en todos los casos por encima del límite establecido ( $VMA > 15\%$ ) cumpliendo la regulación española.** El valor promedio obtenido para todas las mezclas es  $VMA = 19.1\%$  y su desviación estándar  $D_s = 1.10$ . De nuevo, se observa que el contenido de huecos del árido de la mezcla *AC16 surf 35/50 S + 0.6% PET* es inferior (10.3-14.2%) al del resto de mezclas como consecuencia de tener la máxima densidad aparente.

Finalmente, el volumen de huecos rellenos de ligante (VFB) tiene un valor promedio de  $VFB = 73.3\%$  y una desviación estándar  $D_s = 1.7$ . El valor mínimo obtenido es el de la mezcla *AC16 surf BC35/50 S* siendo entre un 3.8-17.1% inferior al del resto de mezclas. Esto significa que **la viscosidad del ligante mejorado con caucho dificulta la capacidad de penetrar con mayor dificultad en los huecos de la mezcla y en los propios poros del árido.**

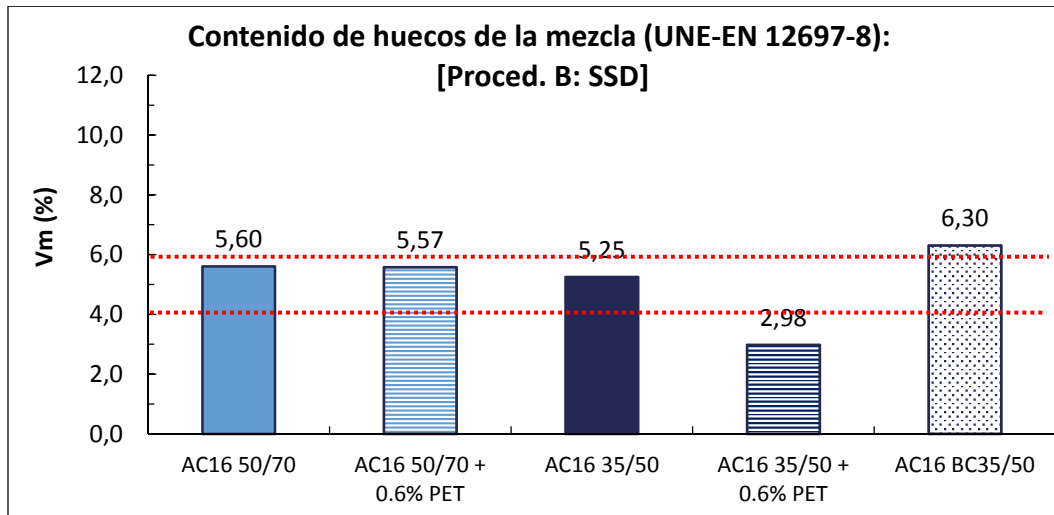


Figura 7.3 Contenido de huecos de la mezcla, Vm (%) [UNE-EN 12697-8] (probetas compactadas 2x75 golpes).

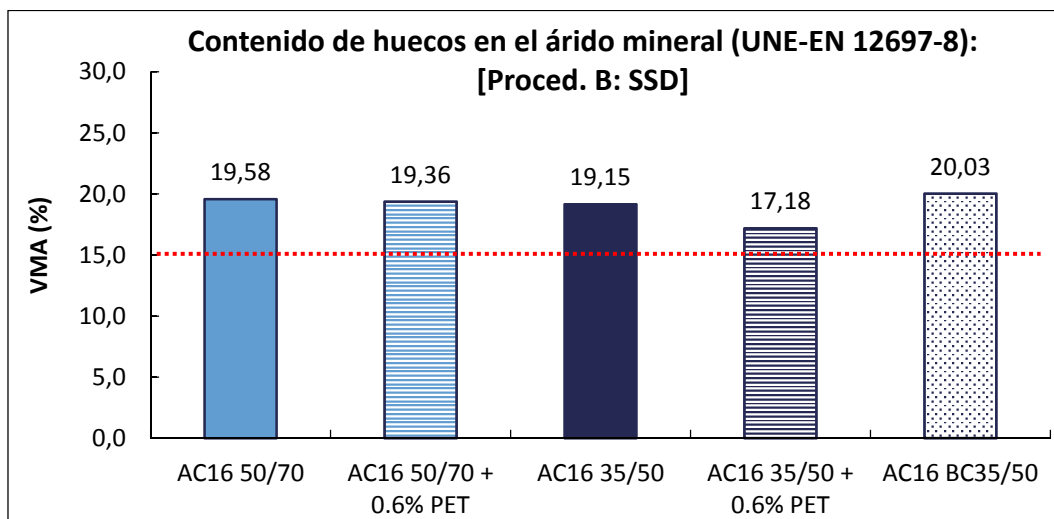


Figura 7.4 Contenido de huecos en el árido mineral, VMA (%) [UNE-EN 12697-8] (probetas compactadas 2x75 golpes).

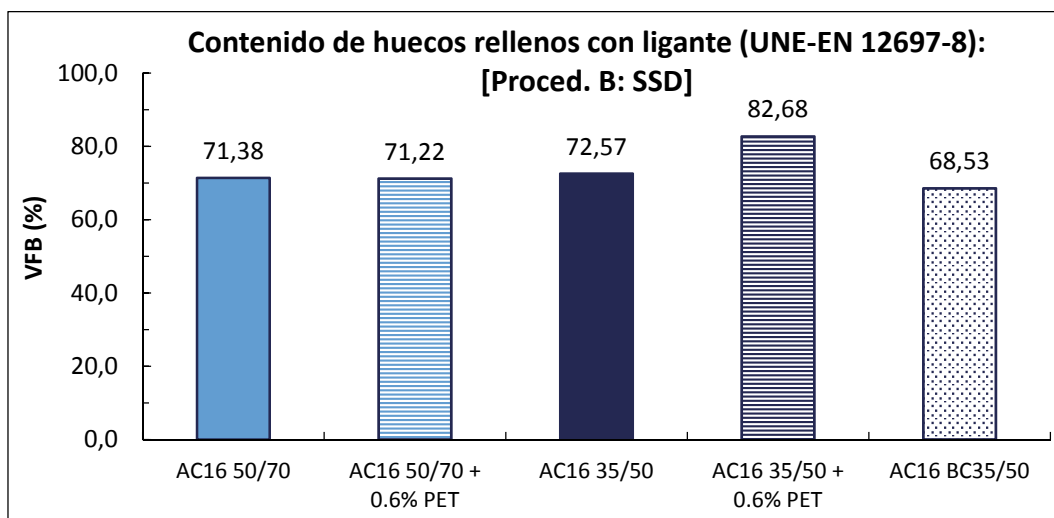


Figura 7.5 Contenido de huecos rellenos con ligante, VFB (%) [UNE-EN 12697-8] (probetas compactadas 2x 75 golpes).

## 7.2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS

### 7.2.2.1 Resistencia a la deformación permanente

En cuanto a la deformación plástica de las mezclas se analizará, por un lado los resultados del ensayo Marshall para mezclas compactadas a 75 golpes por cara (Figs. 7.6, 7.7 y 7.8) y, por otro lado, los resultados del ensayo de rodadura en pista para mezclas compactadas mediante rodillo (Figs. 7.9 y 7.10).

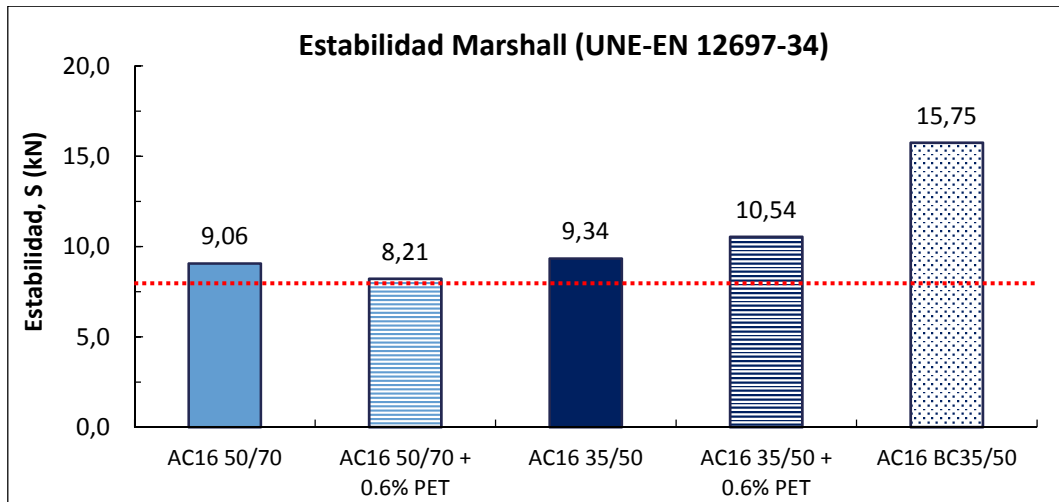
En la Fig. 7.6 se analiza la carga de estabilidad resistida por las mezclas antes de la rotura en kN. El valor promedio de la estabilidad Marshall se sitúa en torno a 10.4 kN con una desviación estándar  $D_s = 2.8$ . Se observa que **la estabilidad de la mezcla con BC35/50 es notablemente superior al del resto de mezclas** (variación entre 49.4%-91.7%). Por su parte, las mezclas con PET presentan comportamientos dispares, siendo **la mezcla AC16 surf 50/70 S + 0.6% PET la que presenta la mínima estabilidad Marshall** de todas las mezclas analizadas. Por el contrario, la mezcla AC16 surf 35/50 S + 0.6% PET presenta cierta mejoría con respecto a la mezcla de referencia AC16 surf 35/50 S (+12.8%).

La deformación plástica según el ensayo Marshall de cada una de las mezclas se compara en la Fig. 7.7. La deformación plástica media se sitúa en torno a 2.9 mm con una desviación estándar de  $D_s = 0.7$ . En esta gráfica se aprecia claramente la diferencia entre **las mezclas con PET** y el resto, siendo éstas las que **ofrecen los valores máximos de deformación permanente** (+27.2% y +26.0% con respecto a las mezclas de referencia). La causa de esta diferencia es principalmente la pérdida parcial de estructura mineral por la sustitución del árido con plástico, disminuyendo la rigidez de la mezcla. La mezcla con BC35/50 se sitúa en una posición intermedia entre las mezclas con PET y las mezclas sin polímeros.

Con respecto al coeficiente Marshall (Fig. 7.8), calculado como la relación entre la estabilidad y la deformación permanente, se obtiene un valor promedio igual a 3.8 y una desviación estándar  $D_s = 1.6$ . Destaca el comportamiento de **la mezcla AC16 surf BC35/50 S, al ofrecer la mejor relación estabilidad-deformación**, seguido de las mezclas de referencia y en último lugar las mezclas con PET.

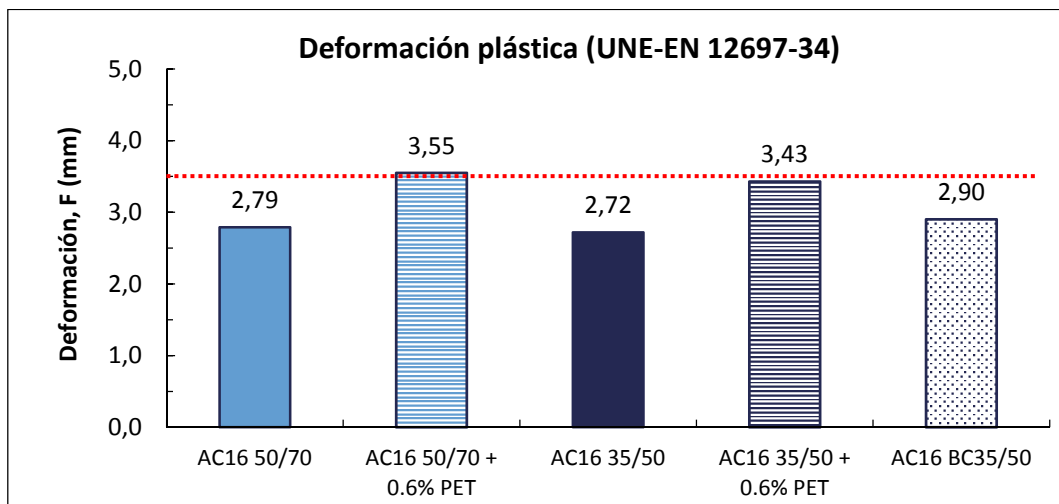
En las Figs. 7.9 y 7.10 se analizan los resultados del ensayo de rodadura en pista (proced. B: al aire, dispositivo pequeño, a 60 °C y  $10^4$  ciclos): la pendiente de la deformación en pista  $WTS_{(AIR)}$  y la profundidad proporcional de la rodera  $PRD_{(AIR)}$ , respectivamente. Como se observa, solo las mezclas que contienen caucho cumplen las especificaciones normativas ( $WTS_{(AIR)} \leq 0.10$  mm/1000 ciclos;  $PRD_{(AIR)} \leq 5\%$ ), quedando el resto de mezclas muy por encima de estos límites. **La introducción del caucho supone una reducción del  $WTS_{(AIR)}$  de -91.6% y del PRD de -87.2% con respecto a la mezcla de referencia AC16 surf 35/50 S.**

Por su parte, **la introducción de PET** en la mezcla (0.6% s/peso del árido) **no modifica apenas el comportamiento** de la mezcla de referencia AC16 surf 50/70 S ( $WTS_{(AIR)}$ : +3.5% y  $PRD_{(AIR)}$ : -2.8%). En cualquier caso, se requiere de un mayor número de muestras que permitan confirmar estas afirmaciones.



\* La línea roja discontinua representa un valor mínimo de referencia del Art. 542 PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2004).

Figura 7.6 Estabilidad Marshall, S (kN) [UNE-EN 12697-34] (probetas compactadas 2x 75 golpes).



\* La línea roja discontinua representa un valor de referencia máximo del Art. 542 PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2004)

Figura 7.7 Deformación plástica, F [UNE-EN 12697-34] (probetas compactadas 2x 75 golpes).

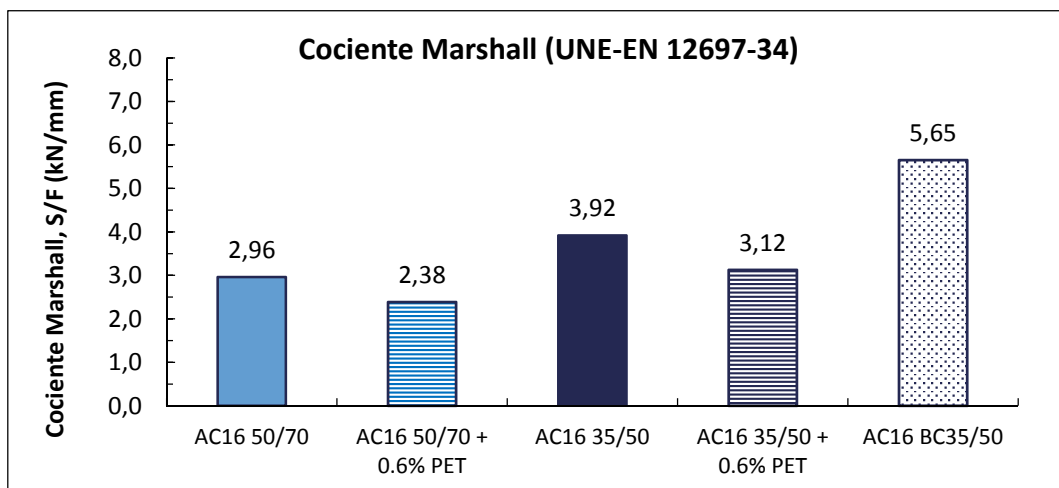
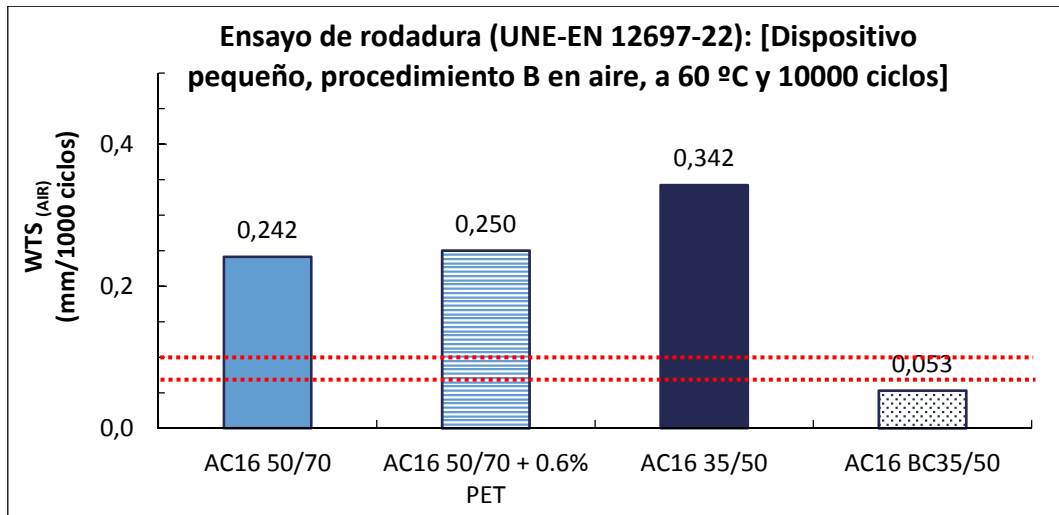
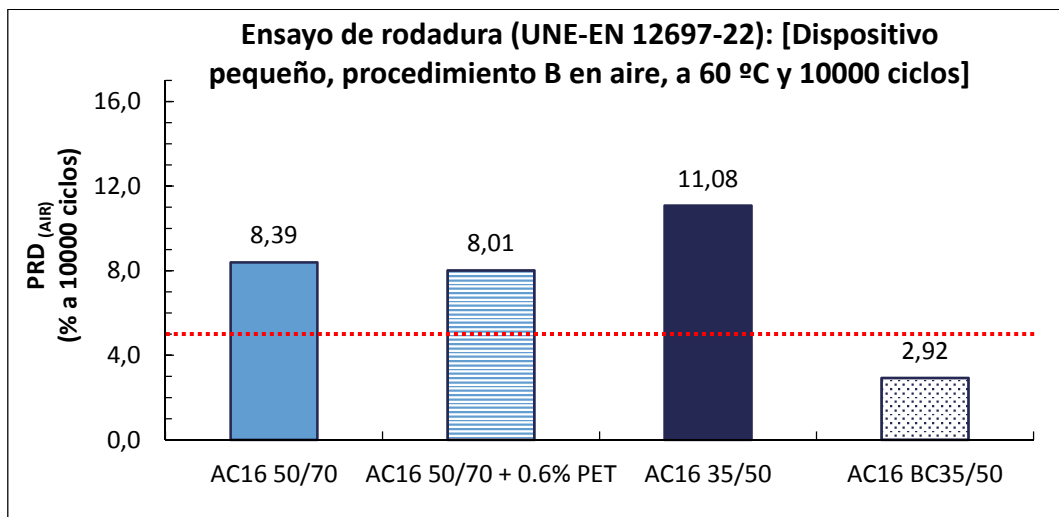


Figura 7.8 Cociente Marshall S/F [UNE-EN 12697-34] (probetas compactadas 2x 75 golpes).



\* Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $WTS_{(AIR)} \leq 0.10$  mm/1000 ciclos) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

Figura 7.9 WTS por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos [UNE-EN 12697-22] (probetas compactadas mediante rodillo).



\* La línea roja discontinua representa el límite establecido ( $PRD_{(AIR)} \leq 5\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

Figura 7.10 PRD por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos [UNE-EN 12697-22] (probetas compactadas mediante rodillo).

### 7.2.2.2 Sensibilidad al agua

En las siguientes figuras (Figs. 7.11, 7.12 y 7.13) se analiza el comportamiento de las mezclas ante la presencia de agua mediante el ensayo de tracción indirecta a 15 °C en probetas cilíndricas compactadas a 50 golpes por cara.

En la Fig. 7.11 se compara la resistencia a tracción indirecta de las probetas cilíndricas en condiciones secas ( $ITS_d$ ) y en la Fig. 7.12, la resistencia de las probetas sometidas a condiciones de saturación ( $ITS_w$ ) (72h sumergidas a 40 °C). En ambas figuras destaca el comportamiento de la mezcla *AC16 surf 35/50 S + 0.6% PET* sobre el resto de mezclas, siendo su valor promedio 2.42 MPa y 2.25 MPa, respectivamente, mientras que el valor promedio de las resistencias del conjunto de mezclas es  $ITS_d$ : 1.6 MPa y  $ITS_w$ : 1.4 MPa ( $D_s = 0.4$  en ambos casos).

En este ensayo, la presencia del caucho no mejora la resistencia a tracción de las mezclas, siendo la mezcla *AC16 surf BC35/50 S* la que ofrece los valores más bajos. Por el contrario, las mezclas con PET muestran una ligera mejora de las resistencias con respecto a las mezclas de referencia (+5.7% y +4,41% para las mezclas con betún 50/70; +48.7% y +64,0% para las mezclas con betún 35/50).

**Todas las mezclas cumplen o se aproximan a los límites establecidos** en la normativa española de carreteras para capas de rodadura ( $ITSR \geq 85\%$ ) en cuanto a la sensibilidad al agua (Fig. 7.13). **Para otras capas** donde el grado de exigencia es menor ( $ITSR \geq 80\%$ ), **todas las mezclas cumplirían las especificaciones exigibles.**

### 7.2.2.3 Rigidez

Con respecto al análisis del módulo de rigidez dinámico evaluado según ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara (IT-CY, factor de carga superficial  $k = 0.6$ , a 20 °C) se aprecia un comportamiento diferenciado en las mezclas con betún 35/50 con respecto a las mezclas con betún 50/70 (Fig. 7.14). Las primeras cumplen los valores habitualmente recomendados para mezclas de tipo hormigón asfáltico de tipo denso o semidenso ( $S_m \geq 6000$  MPa) mientras que las segundas quedan por debajo de este límite.

Por otro lado, se observa que la mezcla de referencia *AC16 surf 35/50 S* alcanza el valor máximo del conjunto de mezclas mientras que la mezcla *AC16 surf 50/70 S + 0.6% PET* obtiene el valor mínimo, siendo la variación entre ambas mezclas -35.8%. El valor promedio para estas mezclas es de 5257 MPa con una amplia dispersión en los resultados ( $D_s = 1023$ ).

La incorporación del polvo de caucho supone una reducción del módulo de rigidez de -11.5% y la incorporación del PET una reducción de -7.7% con respecto a las mezclas de referencia sin polímeros. A raíz de este dato, es posible afirmar que **la incorporación de cualquiera de estos polímeros reduce la rigidez de las mezclas con este tipo de áridos vacuolares (BOPV).**

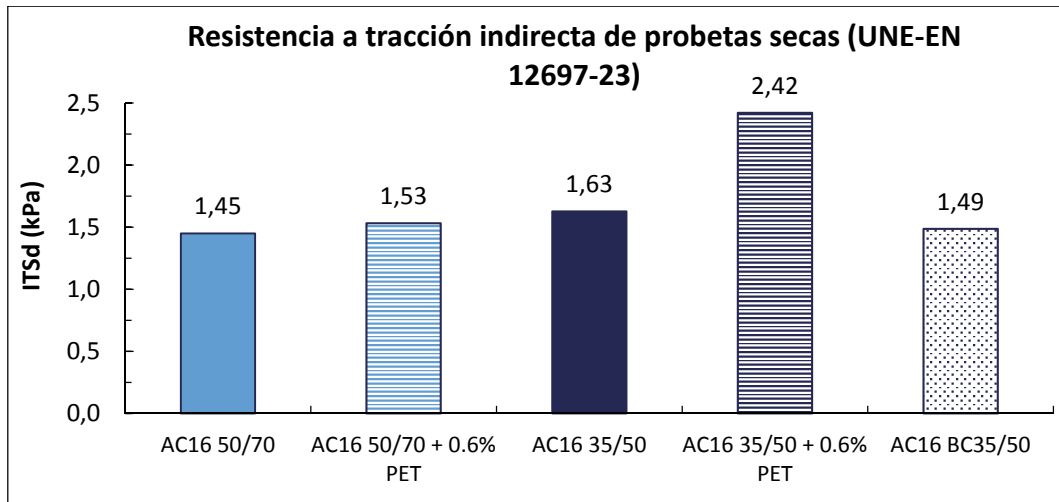


Figura 7.11 Resistencia a tracción indirecta del subconjunto de probetas secas, ITS<sub>d</sub> [UNE-EN 12697-23] (probetas compactadas 2x50 golpes).

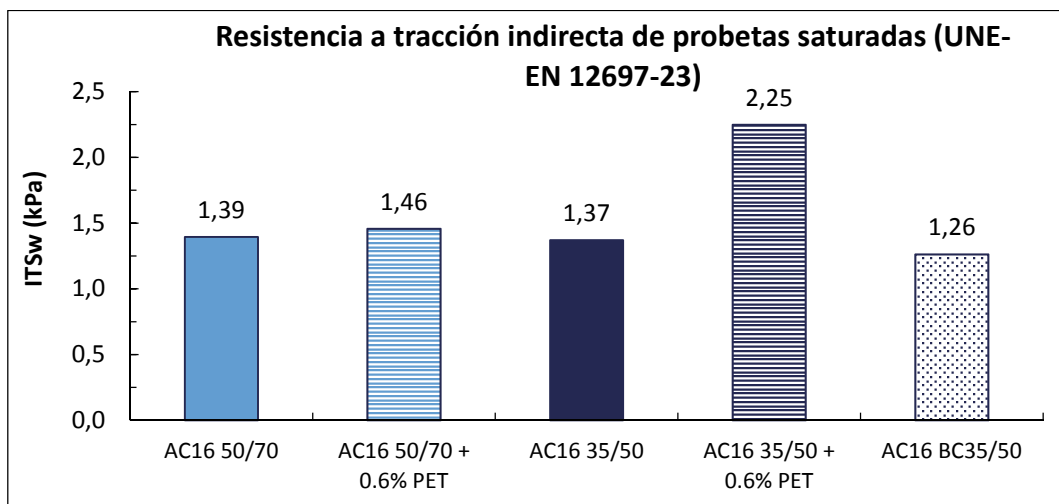
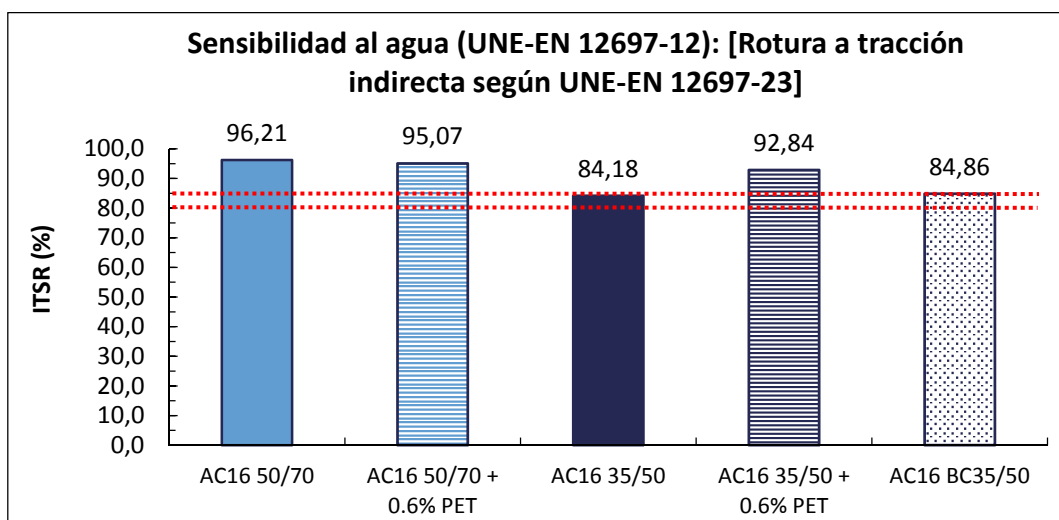
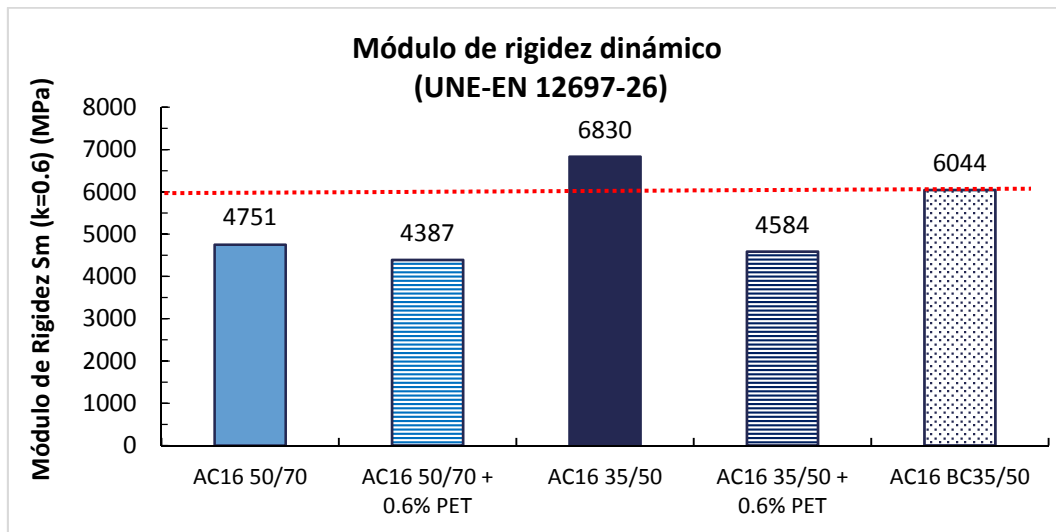


Figura 7.12 Resistencia a tracción indirecta del subconjunto de probetas saturadas, ITS<sub>w</sub> [UNE-EN 12697-23] (probetas compactadas 2x50 golpes).



\*Las líneas rojas discontinuas representan los límites establecidos ( $80\% \leq \text{ITSR} \leq 85\%$ ) para capas superficiales con mezclas tipo AC del art. 542 del PG-3 (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014).

Figura 7.13 Sensibilidad al agua, ITSR (%) [UNE-EN 12697-23] (probetas compactadas 2x50 golpes).



\*Las líneas rojas discontinuas representan valores de referencia para mezclas AC Densas o Semidensas  $\geq 6000$  MPa (Consejería de Obras Públicas y Transportes-Sevilla, 2007)

Figura 7.14 Módulo de rigidez dinámico,  $S_m$  (MPa) obtenido mediante tracción indirecta (IT-CY, factor de carga superficial  $k = 0.6$ , a  $20^\circ\text{C}$  [UNE-EN 12697-23] (probetas compactadas 2x75 golpes).

### 7.3 IMPACTO AMBIENTAL

En la actualidad existen dos modelos de indicadores que permiten evaluar el deterioro o mejora ambiental que producen las empresas, los procesos o los productos de forma cuantitativa: el análisis del ciclo de vida del producto (*Life Cycle Analysis, LCA*) y el análisis de la eco-eficiencia. La principal diferencia entre ambos modelos es que el análisis de eco-eficiencia se centra en un aspecto específico del proceso o del producto y no en su ciclo de vida completo (Rincón y Wellens, 2011).

Generalmente, cuando se habla del ciclo de vida de un pavimento de carretera nos referimos a un ciclo dividido en 5 fases: la producción de sus componentes, su fabricación, su puesta en servicio, su conservación y su retirada (Santero et al, 2011). A su vez, cada una de estas fases tiene asociada una serie de procesos que generan cierta cantidad de consumos y emisiones a la atmósfera ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y COV (compuestos orgánicos volátiles)) que dificultan la cuantificación del efecto de emplear un determinado tipo de mezcla o técnica con respecto a otro.

A continuación, se nombran los procesos asociados a cada fase del ciclo de vida de un pavimento asfáltico que se deben considerar a la hora de evaluar su eco-eficiencia:

1. Producción de materiales: obtención, tratamiento y transporte de materias primas (Wang et al., 2012).
2. Construcción: producción de la mezcla, transporte, extendido y compactación (Huang et al., 2009).
3. Puesta en servicio.
4. Conservación: mantenimiento ordinario, rehabilitación o reconstrucción.



## 5. Retirada: demolición y reciclaje.

De todas estas fases del ciclo de vida de un pavimento asfáltico, nos centraremos únicamente en el proceso de producción de las mezclas por ser las que mayor gasto energético y emisiones de gases genera (Wang *et al.*, 2018) y dado que ha sido el principal objeto de esta tesis doctoral. Dentro de este proceso, se tendrá en cuenta la preparación del árido, la preparación del ligante, el mezclado y la compactación de la MB. Por el contrario, no se contemplará la obtención del árido, del ligante o el tratamiento previo de los polímeros.

### 7.3.1 CONCEPTO DE ECOEFICIENCIA

Según el *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* “la Eco-eficiencia se obtiene por medio del suministro de bienes y servicios a precios competitivos, que satisfagan las necesidades humanas y proporcionen calidad de vida, mientras progresivamente reducen los impactos ecológicos y el consumo de recursos a lo largo de su ciclo de vida, por lo menos hasta un nivel acorde con la capacidad de carga estimada de la Tierra” (Lehni, 2000).

$$\text{Ecoeficiencia} = \frac{\text{Valor del producto}}{\text{Influencia ambiental}} \quad (\text{Sturm y Müller, 2001}) \quad 7.1$$

“Un indicador es una medida específica de cierto elemento para demostrar su rendimiento a través del reconocimiento y valoración de información relevante” (Rincón y Wellens, 2011).

Algunos indicadores habituales de la eco-eficiencia de un producto suelen ser el consumo de agua o energía, las toneladas de NO<sub>x</sub> emitidas a la atmósfera o los kg de residuos sólidos generados por unidad fabricada. Como puede verse, la eco-eficiencia pueden calcularse en función de tantas variables como se desee (Nakaniwa, 2004). Es por ello, que en este apartado se dará una aproximación de la eco-eficiencia del proceso de fabricación de las MB basada en el método propuesto por la *United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD)* que propone estos 5 indicadores (Sturm *et al.*, 2004):

1. Consumo de agua
2. Requerimientos energéticos
3. Contribución al calentamiento global
4. Dependencia de sustancias que deterioran la capa de ozono
5. Residuos sólidos generados

De los indicadores propuestos por la *UNCTAD* los que tienen mayor relevancia y se estudian habitualmente dentro de la producción de MB son: los requerimientos energéticos (2), las emisiones a la atmósfera (3) y la generación de residuos (5). Por tanto, serán estos indicadores los que se evaluarán en mayor detalle. Para esta labor, se compararán las ventajas e inconvenientes de las 6 mezclas que se describen a continuación:

Tabla 7.1 Mezclas desarrolladas en laboratorio para análisis de eco-eficiencia

Tipo de mezcla	Ligante	Polímero	% Polímero	Aditivo	% Aditivo	Temperatura mezclado
MBC AC16 surf 35/50 S	35/50	-	-	-	-	175
MBC AC16 surf 50/70 S	50/70	-	-	-	-	160
MBC AC16 surf BC35/50 S	BC35/50	Caucho	10% (s/betún)	-	-	180
MBSC AC16 surf BC35/50 S	BC35/50	Caucho	10% (s/betún)	Cecabase RT	0.5% (s/betún)	160
MBC AC16 surf 35/50 S +PET	35/50	PET	0.6% (s/árido)	-	-	175
MBC AC16 surf 50/70 S +PET	50/70	PET	0.6% (s/árido)	-	-	160

A la hora de valorar el impacto que tienen las diferentes mezclas desarrolladas, solo se tendrá en cuenta el proceso de fabricación de las mismas, considerando los siguientes aspectos: 1) calentamiento de los áridos, incluido el polvo mineral; 2) calentamiento del ligante, 3) tiempo y temperatura de mezclado y 4) temperatura de compactación de las mezclas.

Al no ser un objetivo explícito de la tesis la cuantificación de la eco-eficiencia, se procederá a dar una estimación cualitativa basada en la bibliografía disponible al respecto y en las observaciones hechas en la fase experimental. Para hacer una valoración más rigurosa de la eco-eficiencia de estas mezclas se requeriría realizar un control más exhaustivo en una planta piloto que permitiera medir y cuantificar el efecto de los métodos y técnicas descritos.

### 7.3.2 ESTIMACIÓN DE LOS INDICADORES

#### 7.3.2.1 Consumo energético

Para medir la eco-eficiencia de este indicador, se tomará como referencia las temperaturas de trabajo empleadas para la fabricación de las mezclas en laboratorio. Si bien la temperatura de los áridos empleados es igual en todos los casos, el empleo de áridos vacuolares ofrece menor rendimiento eco-eficiente que un árido masivo. Esto se debe a que los áridos porosos, al tener un mayor porcentaje de absorción de agua, requieren mayor tiempo de secado para eliminar completamente la humedad antes de proceder a su mezclado. El contenido de humedad del árido tiene un impacto directo en el consumo energético, traduciéndose en 0.7 L de fuel por cada incremento del 1.0% en la humedad del árido Gillespie (2012). Sin embargo, también debe considerarse que las mezclas donde se reemplaza parcialmente este tipo de árido (mezclas con PET) son más eco-eficientes, puesto que al emplear menor cantidad de árido los tiempos de consumo son menores.

Así pues, desde un punto de vista cualitativo, las mezclas MBC AC16 surf 50/70 S + PET serían las que menor consumo energético requerirían, seguidas de las mezclas MBC AC16 surf 50/70 S, la MBC AC16 surf 35/50 S + PET, la MBC AC16 surf 35/50 S y en último lugar, las mezclas MBC AC16 surf BC35/50 S. Estas últimas mezclas son las que ofrecen peor rendimiento puesto que

requieren la mayor temperatura de calentamiento del ligante para lograr una viscosidad adecuada y por consiguiente, un correcto mezclado y compactación.

A modo de referencia, en la [Tablas 7.2 y 7.3](#) se muestra el consumo energético aproximado de cada material y proceso que interviene en la fabricación de mezclas elaboradas con polímeros según diferentes autores. En la [Tabla 7.2](#) se hace referencia al consumo de mezclas convencionales y las mejoradas con caucho, mientras que en la [Tabla 7.3](#) se muestran los datos de una mezcla elaborada con una proporción de un 20% (s/betún) de polipropileno (PP) y caucho, que sin ser exactamente el mismo polímero que el PET, nos ofrece una idea del consumo energético de su empleo en las MB.

*Tabla 7.2 Consumo energético inicial de cada material y proceso (MJ/t)*

Material	Athena Institute, 2006	Stripple, 2001
Árido natural	57.6	78.6
Árido triturado	36	7.67
Materias primas del ligante	40200	40200
Producción de ligante	5320	2890
Mezclado en planta de MBC	531	551
Mezclado en planta de MBC-BC	375	404

*Tabla 7.3 Consumos de la producción de una mezcla con plástico y caucho (Yu et al.,2014)*

Material	Energía (MJ/t)
Betún	104.2
Árido	82.9
Caucho	29.8
Polipropileno (PP)	6.2
Mezclado	401.0
Triturado del PP	0.4
Manufacturación del polvo de caucho	7.2
Transporte	47.1
<b>TOTAL</b>	<b>678.8</b>

Mención aparte merecen las mezclas MBSC AC16 surf 35/50 S, que son, sin lugar a dudas, las que ofrecen un mejor rendimiento eco-eficiente del consumo energético dado que mediante la adición del aditivo se logra reducir hasta unos 20 °C la temperatura de mezclado y compactación dependiendo de la capa de pavimento a la que se vaya a destinar la mezcla.

A modo orientativo, si se lograra reducir la temperatura de mezclado unos 30 °C el ahorro en el consumo de fuel está en un 20-25% (Xiao *et al.*, 2009). Como la relación del consumo de fuel y la temperatura en las mezclas MBC y MBSC es lineal (Fig. 5.1), podría deducirse que el ahorro de fuel /t se situaría entre un 10-15%.

### 7.3.2.2 Contribución al calentamiento global

De la misma forma que el consumo energético, las emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero están relacionadas con las temperaturas de trabajo de fabricación de las mezclas.

*“A temperaturas inferiores a los 80°C, virtualmente no existen emisiones; incluso alrededor de los 150°C, las emisiones son solo de alrededor de 1mg/h. Sin embargo, a 180°C, las emisiones sí resultaron ser bastante importantes.”*(GAPA, 2009)

Una mezcla convencional ronda los 29.0 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de mezcla producida (Poulikakos *et al.*, 2017; Gillespie, 2012). Sin embargo, las mezclas con caucho, al requerir temperaturas cercanas a los 180 °C, emiten una alta cantidad de gases y humos tóxicos a la atmósfera, especialmente peligrosos durante la pavimentación de túneles. Es por ello que la reducción de las temperaturas de mezclado y compactación mediante la técnica MBSC empleada en este trabajo adquiere cierta importancia al permitir fabricar las mezclas con caucho de NFU entre 10-15 °C por debajo de las temperaturas de referencia sin perjudicar sus propiedades mecánicas.

A partir de los datos del estudio realizado por Peilong y Zhan (2011), en el que se ofrecen valores de referencia de la tasa de reducción de emisiones entre dos mezclas (MBC y MBSC) en una planta de asfaltos donde la variación de temperatura fue de entre 30-40 °C, se estiman, mediante proporcionalidad directa para una disminución media de 15 °C, los siguientes valores:

Tabla 7.4 Estimación de las emisiones de una mezcla MBSC AC16 surf BC35/50 S

	Uds.	MBC	MBSC	Reducción %	MBSC BC35/50	Reducción %
CO <sub>2</sub>	%	2.6	1	61.5	1.9	26.4
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	151	40	73.5	103	31.5
CO	mg/m <sup>3</sup>	104	91.3	12.2	98.6	5.2
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	13	3.3	74.6	8.8	32.0
Humo y polvo	mg/m <sup>3</sup>	5.6	2.59	53.8	4.3	23.1

### 7.3.2.3 Residuos sólidos generados

Uno de los objetivos fundamentales a lo largo del trabajo ha sido la reutilización de materiales residuales como materias primas para su incorporación en las MB. Por lo tanto, la eco-eficiencia sobre los residuos sólidos generados se enfocará desde la perspectiva del aprovechamiento de residuos de otros procesos para que el volumen final de residuos generados sea mínimo. Por esta razón hablaremos del impacto que genera el empleo de áridos marginales, el caucho y, en último lugar, el PET.

Según el último informe de la ANEFA (2018) (Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos) tan solo en las Islas Canarias en 2017 se produjo un consumo de 3.0 Mt de áridos para

usos constructivos, de los cuales cerca del 27% se empleó en la construcción y mantenimiento de carreteras, es decir, 0.81 Mt de áridos. En una región como las islas, dónde existen limitaciones territoriales y paisajísticas y dónde la industria extractiva está cada vez más restringida, supone un grave problema de abastecimiento.

A corto plazo, el tener que disponer de tales cantidades de áridos podría obligar a la importación de materias primas desde la Península Ibérica o el Norte de África, asumiendo sobrecostos y demoras en los proyectos de carreteras, limitando el desarrollo de las Islas Canarias y además, generando un mayor impacto ecológico asociado a las emisiones relacionadas con el transporte. Es por esta razón que el aprovechamiento de los áridos marginales vacuolares, bien como árido principal o en combinación con los áridos masivos en las MB, contribuiría a reducir el impacto de la industria de la construcción al darle salida a un material local abundante que hasta ahora sólo estaba siendo empleado para la construcción de rellenos.

Por su parte, el empleo del caucho en las mezclas bituminosas no solo consigue mejorar las cualidades de las mezclas, sino que además logra reutilizar una proporción de un 0.6% s/peso total del árido de este residuo. Aunque esta proporción pueda parecer mínima, lo cierto es que por cada km de capa de rodadura que se construya o renueve en carreteras (6m de ancho, 5 cm de espesor y una densidad media de 2.55 Mg/m<sup>3</sup>) permitiría recuperar 38.25 t de polvo de neumático que desaparecerían de los vertederos.

De la misma forma, la utilización del PET en las MB (en la misma proporción que el caucho) ayudaría a reducir el problema de acumulación de estos residuos en vertederos y en el paisaje, reduciría las emisiones derivadas de su combustión y permitiría mejorar la economía de las empresas dedicadas a la gestión de este residuo. Además, al emplearse como parte de la estructura mineral de la MB permitiría abaratar el coste de fabricación de las mezclas y reduciría el volumen de áridos extraídos.

## 7.4 CONCLUSIONES FINALES

---

En base a los resultados obtenidos, las principales conclusiones que pueden extraerse de este trabajo se resumen a continuación:

- En las regiones volcánicas, como las Islas Canarias, es posible encontrar **áridos naturales de tres diferentes naturalezas y comportamientos: los masivos, los vacuolares y los piroclásticos**. Sin embargo, estos materiales presentan una gran variabilidad espacial y de propiedades condicionada por los ciclos de actividad vulcanológica y el grado de alteración al que han estado expuestos.
- **La resistencia de los áridos volcánicos** está fuertemente relacionada con su **estructura, composición y alteración**, siendo los áridos masivos los que mejores cualidades presentan para usos constructivos y por ende, son los que se utilizan y comercializan habitualmente.
- No obstante, en estas regiones con un alto grado de protección ambiental y donde resulta prácticamente imposible la apertura de nuevas canteras de explotación de áridos o en países donde los recursos técnicos y económicos son limitados, **el empleo de áridos locales marginales se convierte en una alternativa viable** desde el punto de

vista económico, logístico y medioambiental, **para determinados usos constructivos y ciertos tipos de capas asfálticas del firme. Es posible producir mezclas bituminosas con áridos volcánicos marginales de tipo vacuolar o escoriáceo** si se introducen mejoras en el proceso de fabricación de las mezclas asfálticas, como la incorporación de polímeros. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la aleatoriedad y heterogeneidad que presenta este tipo de áridos a la hora de ajustar la dosificación de las mezclas.

Los resultados obtenidos con estos áridos volcánicos vacuolares pueden ser extrapolados a otras regiones volcánicas con áridos de similar naturaleza y que suelen ser fáciles de extraer en abundancia.

- **El uso de un betún mejorado con polvo de caucho** procedente del triturado de NFU en **combinación con áridos vacuolares** ha demostrado ser un método eficiente para mejorar el comportamiento mecánico de estos materiales en las MB, **permitiendo cumplir las especificaciones de la normativa española de carreteras.**
- **La presencia de un elastómero** en las MB con áridos basálticos vacuolares mejora el comportamiento mecánico de estas mezclas con respecto a las mezclas sin caucho: **reduce las deformaciones plásticas** (el  $WTS_{(AIR)}$  disminuye más de un 76%, el  $PRD_{(AIR)}$  más de un 67% y la deformación Marshall hasta un 20%), **aporta rigidez** (entre un 15-34% adicional), **aumenta la resistencia frente a la acción del agua por su efecto impermeabilizante** (entre un 10-24%) **y alarga la vida en servicio ante esfuerzos de fatiga.**
- A pesar de emplearse una reducida cantidad de caucho (10% sobre el peso del betún) los resultados obtenidos son satisfactorios, **permitiendo compensar parcialmente con ese porcentaje el alto contenido de betún requerido en la mezcla (6-6.5% de betún s/peso total de mezcla) por la presencia de un árido de elevada porosidad.**
- No obstante, **la viscosidad del BC35/50 dificulta las condiciones de trabajo** de las mezclas (temperaturas de mezclado más altas y peor compactibilidad), dando lugar a **MB con un mayor contenido de huecos** (el  $V_m$  hasta un 25% superior y el  $VMA$  hasta un 11% más) **que las mezclas convencionales.**
- **El empleo de un aditivo químico surfactante en las mezclas elaboradas con BC35/50 y árido volcánico marginal (basalto vacuolar) permite utilizar MB compactadas a temperaturas comprendidas entre 160-165 °C (mezclado a 170-175 °C) que cumplen las especificaciones para capas superficiales de pavimentos de carretera.** Esto se traduce en **una reducción de 5-10 °C en las temperaturas de fabricación con respecto a la mezcla estándar** con caucho procedente de NFU, compensando los altos consumos energéticos y el volumen de emisiones emitidas por este tipo de mezclas con caucho. **Para capas inferiores de pavimento, donde las limitaciones en cuanto a deformaciones plásticas son menores, se logra reducir la temperatura de compactación de la mezclas hasta los 150-155 °C (15-20 °C por debajo de la temperatura de referencia).** La reducción de temperaturas implica mejores condiciones de trabajo para los operarios de la construcción, mayores distancias de transporte y menor influencia de las condiciones climáticas durante la pavimentación.

- **Las mezclas con polvo de caucho** además proporcionan un **comportamiento especialmente adecuado ante la presencia de agua**, incluso a temperaturas de compactación de 140-145 °C, significando una reducción en las temperaturas de producción de 25-30 °C.
- **Cualquiera de las mezclas semicalientes MBSC** con BC35/50 elaboradas presenta **mejores propiedades mecánicas** (resistencia a la deformación permanente, estabilidad y sensibilidad al agua) **que las mezclas de referencia** sin caucho, pero en general su comportamiento es **inferior al de las mezclas en caliente MBC BC35/50** (mezcladas a 180 °C). Presentan un mayor contenido de huecos (el Vm se incrementa por encima de un 16% y el VMA por encima de un 4.5%), una mayor deformación en pista (el  $WTS_{(AIR)}$  aumenta más del 196% y el  $PRD_{(AIR)}$  más del 57%) y una mayor rigidez (aumenta más de un 16%) que la mezcla de referencia MBC BC35/50.
- **La inclusión de partículas de PET** en las MB por vía seca altera las propiedades volumétricas de las mezclas, haciendo que **disminuyan sus densidades** (la densidad máxima se reduce hasta un 5.5% y la densidad aparente hasta un 11.5%) **y aumenten los contenidos de huecos** (el Vm se incrementa hasta un 87%, y el VMA hasta un 14%).
- **Pese a ser un polímero termoplástico** con un punto de fusión alto ( $\geq 245$  °C) su temperatura de transición vítrea está por encima de los 60 °C, por lo que a las temperaturas de trabajo empleadas este polímero comienza a deformarse. Por consiguiente, su incorporación **dificulta el mezclado y compactación de las MB al interactuar sobre la viscosidad del ligante**.
- La combinación del **PET con el árido basáltico vacuolar reduce la resistencia a la deformación permanente** (aumentan los valores del  $WTS_{(AIR)}$  hasta un 148% y del  $PRD_{(AIR)}$  hasta un 58%) **y disminuye la rigidez** (el Sm se reduce hasta un 35%) de las MB. Por el contrario, **ejerce un efecto impermeabilizante** frente a la acción del agua que se refleja en los ensayos a tracción indirecta.
- **La incorporación del PET** en las MB estaría limitada a **proporciones inferiores al 0.6%** (s/peso del árido) siempre que se emplee en las condiciones descritas en este trabajo. Se requiere **profundizar en el estudio** del desarrollo de estas MB mediante tramos de ensayo bajo tráfico en servicio para determinar la validez del uso de este polímero.
- Al validar **la utilización de los distintos polímeros en combinación con los áridos vacuolares**, tanto en mezclas MBC como MBSC, se **mejora la sostenibilidad** en la producción de las MB **al reducir el volumen total de residuos sólidos generados, así como los consumos energéticos y emisiones** asociados al proceso de fabricación de las mezclas.

## 7.5 FUTUROS TRABAJOS

---

A lo largo de todo el trabajo experimental han ido surgiendo diferentes incógnitas con respecto al proceso de fabricación de las mezclas con polímeros reciclados que, por quedan abiertas a futuras líneas de estudio. Se considera interesante seguir profundizando en el uso de polímeros reciclados, sobre todo en lo referente al uso de micro-plásticos, debiéndose abordar los siguientes aspectos:

- **Desarrollo de mezclas bituminosas con áridos volcánicos reciclados (RAP).** De la misma forma que el uso de áridos marginales permite aprovechar un residuo que se origina en las canteras de áridos, debe analizarse la posibilidad de reutilizar los áridos volcánicos ya empleados en las carreteras del archipiélago canario para reducir el impacto medioambiental que genera la industria extractiva.
- **Análisis de la eficiencia de las mezclas MBC-BC y MBSC BC con aditivos químicos obtenidas, tras varios ciclos de reciclado,** a través del estudio del envejecimiento del ligante y de las características de las mezclas elaboradas con ellos después de someterse a varios ciclos de calentamiento y enfriado.
- **Implementación de las mezclas MBC-BC y MBSC BC** obtenidas en laboratorio en tramos de prueba para el análisis de su evolución en condiciones reales de tráfico y climáticas a lo largo del tiempo.
- **Estudio comparativo de las mezclas MBC-BC y mezclas elaboradas con polvo de caucho (NFU) fabricadas por vía seca,** ambas con áridos volcánicos marginales. Complementariamente al estudio de las mezclas elaboradas por vía húmeda, debería realizarse una comparativa con la misma proporción de polvo de caucho (0.6% s/peso de la mezcla) incluyéndolo por vía seca para determinar sus ventajas e inconvenientes y a su vez serviría para compararlo con la incorporación del PET.
- Evaluación de **mezclas elaboradas con PET con áridos volcánicos convencionales.** Uno de los inconvenientes detectados durante la investigación ha sido el uso de un árido no comercial con una granulometría y características no homogéneas a lo largo del proceso de estudio. Es por ello que los resultados de las MB muestran cierta dispersión y, por tanto, invalida el uso del PET en las MB en mayores proporciones (> 1% s/peso del árido).
- **Optimización del proceso de fabricación de las mezclas bituminosas con PET:** tamaño de partícula, dosificación, contenido óptimo de ligante y proceso de incorporación. La bibliografía existente confirma la viabilidad de usar este polímero en las MB. Sin embargo, no hay consenso en cuanto a la forma óptima de empleo. En consecuencia, se debería seguir trabajando en el desarrollo de este tipo de MB con áridos volcánicos.
- **Valorización energética de los procesos de fabricación de las mezclas analizadas** en comparación con la fabricación de mezclas convencionales. En este trabajo se ha dado una idea general de los principales beneficios e inconvenientes de las técnicas empleadas. No obstante, se requiere hacer una cuantificación de esos efectos mediante los indicadores habituales de eco-eficiencia.



### 8.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdelrahman, M.A., y Carpenter, S.H. (1999). Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier. *Transportation Research Record*, 1661 (1), 106–113. <https://doi.org/10.3141/1661-15>
2. Abo-Qudais, S., y Al-Shweily, H. (2007). Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behaviour. *Construction and Building Materials*, 21 (9), 1886-1898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.014>
3. Aghamelu, O.P., y Okogbue, C.O. (2015). Usability of pyroclastic rocks as construction materials; example from Nigeria. En: Lollino, G., Manconi A., Guzzetti F., Culshaw M., Bobrowsky P., Luino F. (eds), *Engineering Geology for Society and Territory*, 5 (pp.1259-1262) Suiza: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1\\_240](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_240)
4. Ahmad, A.F., Razali, A.R., Razelan, I.S.M., Jalil, S.S.A., Noh, M.S.M., e Idris, A.A. (2017). Utilization of polyethylene terephthalate (PET) in bituminous mixture for improved performance of roads. En: *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 203, 01200510. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/203/1/012005>
5. Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., y Ahmadinia, E. (2012). Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 984-989. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015>
6. Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Shafiq, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. *Materials & Design* 32 (10), 4844-4849. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.016>
7. Akbulut, H., Gürer, C., Çetin, S. (2011). *Use of volcanic aggregates in asphalt pavement mixes*. En: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, 164 (2), 111-123. <https://doi.org/10.1680/tran.2011.164.2.111>
8. Akisetty, C. (2008). *Evaluation of Warm Asphalt Additives on Performance Properties of CRM Binders and Mixtures* (Tesis doctoral). Civil Engineering. Clemson University, Clemson, USA. [https://tigerprints.clemson.edu/all\\_dissertations/270](https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations/270)
9. Al Qadi, A.N.S., Alhasanat, M.B.A., y Haddad, M. (2016). Effect of crumb rubber as coarse and fine aggregates on the properties of asphalt concrete. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9 (3), 558-564. <http://dx.doi.org/10.3844/ajeassp.2016.558.564>
10. Al-Fraihat, A.S., y Abu-Mahfouz, S. (2017). Effect of using polvo mineral particles rubber modified on pavement resistance. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8 (10), 369-379. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=8&IType=10>

11. Al-Hadidy, A.I., y Yi-qiu, T. (2009). Effect of polyethylene on life of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 23 (3), 1456–1464.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.004>
12. Al-Khateeb, G.G., Khedaywi, T.S., Obaidat, T.I.A., Najib, A.M. (2013). Laboratory Study for Comparing Rutting Performance of Limestone and Basalt Superpave Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (1), 21-9.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000519](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000519)
13. Alonso Blanco, J.J. (1989). *Estudio volcanoestratigráfico y volcanológico de los piroclastos sálicos del Sur de Tenerife* (Tesis Doctoral). Universidad de La Laguna, Tenerife, España.
14. Alonso, E., Martínez, L., Martínez, W., y Villaseñor, L. (2002). Mechanical properties of concrete elaborated with igneous aggregates. *Cement and Concrete Research*, 32 (2), 317-321. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00655-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00655-X).
15. Aparicio, A., Hernán, F., Cubas, C.R., y Araña, V. (2003). Fuentes mantélicas y evolución del volcanismo canario. *Estudios Geológicos*, 59 (1-4), 5-14.
16. Apuani, T., Corazzato, C., Cancelli, A., y Tibaldi, A. (2005). Physical and mechanical properties of rock masses at Stromboli, a dataset for volcano instability evaluation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64, 419-431.  
<https://doi.org/10.1007/s10064-005-0007-0>
17. Asi, I., Shalabi, F., y Naji, J. (2009). Use of basalt in asphalt concrete mixes. *Construction and Building Materials*, 23 (1), 498-506.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.026>
18. Athena Institute (2006). *A Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy and Global Warming Potential*. Cement Association of Ottawa: Ottawa, ON, Canada.  
[http://s3.amazonaws.com/zanran\\_storage/www.athenasmi.ca/ContentPages/859479425.pdf](http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.athenasmi.ca/ContentPages/859479425.pdf)
19. Awwad, M.T., y Shbeeb, L. (2007). The use of polyethylene in hot asphalt mixtures. *American Journal of Applied Sciences*, 4 (6), 390–396.  
<https://doi.org/10.3844/ajassp.2007.390.396>
20. Behiry, A. (2016). Optimisation of hot mix asphalt performance based on aggregate selection. *International Journal of Pavement Engineering*, 17 (10), 924-940.  
<https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1043634>
21. Behroozikhah, A., Morafa, S.H., y Aflaki, S. (2017). Investigation of fatigue cracks on RAP mixtures containing Sasobit and crumb rubber based on fracture energy. *Construction and Building Materials*, 141, 526-532.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.011>
22. Becker, Y., Méndez, P.M., y Rodríguez, Y. (2001). Polymer modified asphalt. *Visión Tecnológica*, 9 (1) ,39–48.

23. Bogas, J.A., y Gomes, T. (2015). Mechanical and durability behaviour of structural lightweight concrete produced with volcanic scoria. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40 (3), 705-717. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1550-4>
24. Bonaquist, R. (2011). Mix design practices for Warm-mix asphalt. *National Cooperative Highway Research Program - NCHRP Report 691*, Washington DC, USA: Transportation Research Board. <http://dx.doi.org/10.17226/14488>
25. Brown, E. T., e International Society for Rock Mechanics. (1981). *Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods*. Oxford: publicado para la Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics , Pergamon Press.
26. Brown, D.R., Jared, D., Jones, C., y Watson, D. (1997). Georgia's experience with crumb rubber in hot-mix asphalt. *Transportation Research Record*, 1583 (1), 45–51. <https://doi.org/10.3141/1583-06>
27. Bryan, S.E., Marti, J., y Cas, R.A.F. (1998). Stratigraphy of the Bandas del Sur Formation: an extracaldera record of Quaternary phonolitic explosive eruptions from the Las Cañadas edifice, Tenerife (Canary Islands). *Geological Magazine*, 135 (5), 605-636. <https://doi.org/10.1017/S0016756897001258>
28. Bueche, N. (2009). Warm Asphalt Bituminous Mixtures with regards to energy, emissions and performance. En: *Road Transport Conference*, Session 8. Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Francia.
29. Bustillo, M., Calvo, J.P., y Fueyo, L. (2001). *Rocas industriales. Tipología, aplicaciones en la construcción y empresas del sector*. Editorial Rocas y Minerales, Madrid, España.
30. Cai, G., Noguchi, T., Degee, H., Zhao, J., y Kitagaki, R. (2016). Volcano-related materials in concretes: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (8), 7220-7243. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6161-z>
31. Cao, W., y Liu, S. (2013). Performance evaluation of asphalt-rubber stone matrix asphalt mixtures with warm mix asphalt additives. *Journal of Testing and Evaluation*, 41 (1), 141-147. <http://dx.doi.org/10.1520/JTE20120014>
32. Cao, W., Liu, S., y Feng, Z. (2013). Comparison of performance of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates. *Construction and Building Materials*, 41, 474-479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.021>
33. Carrasco Flores, D.O. (2004). *Estudio comparativo entre mezclas asfálticas en caliente y mezclas asfálticas con emulsiones tibias* (Tesis doctoral). Universidad de Piura, Perú.
34. Casey, D., McNally, C., Gibney, A., y Gilchrist, M.D. (2008). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (10), 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.002>
35. Celauro, C., Celauro, B., y Boscaino, G. (2010). Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (6), 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.009>
36. Charania, E., Cano, J.O., y Schnormeier, R.H. (1991). Twenty year study of asphalt rubber pavement in Phoenix, Arizona. *Transportation Research Record*, 1307, 29–38.

37. Chavez, F., Marcobal, J. y Gallego, J. (2019). Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process. *Construction and Building Materials*, 205, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.159>
38. Cheng-Hsiao, L., Jia-Chong, D., y Der-Hsien, S. (2012). Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 28 (1), 66-71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.025>
39. Chowdhury, A., y Button, J.W. (2008). *A review of warm mix asphalt*. Technical Report, Texas A&M University System College Station. Texas, USA: Texas Transportation Institute.
40. Cox, K.G., Bell, J.D., y Pankhurst, R.J. (1979). *The interpretation of Igneous Rocks*. Dordrecht, Netherlands: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1>
41. D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., y Yeaton, B. (2007). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. En: European Tour FHWA-PL-08-007. American Trade Initiatives. <https://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf>
42. Davies, N., y Chaplow, R. (1998). *Geotechnical characteristics of the Borrowdale Volcanic Group*. En: Proceedings of the Yorkshire Geological Society, 52 (2), 189–197. <https://doi.org/10.1144/pygs.52.2.189>
43. Delmelle, P., Villiéras, F., y Pelletier, M. (2005). Surface area, porosity and water adsorption properties of fine volcanic ash particles. *Bulletin of Volcanology*, 67(2), 160–169. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0370-x>
44. Del Val Melús, M.A. (2010). *Las necesidades de conservación de los firmes de las carreteras españolas*. Monografía, 12. Asefma, Madrid, España. [http://oa.upm.es/4520/2/VAL\\_MELUS\\_MONO\\_2010\\_01.pdf](http://oa.upm.es/4520/2/VAL_MELUS_MONO_2010_01.pdf)
45. Demirdag, S., Ugur, I., y Saraç, S. (2008). The effects of cement/fly ash ratios on the volcanic slag aggregate lightweight concrete masonry units. *Construction and Building Materials*, 22 (8), 1730–1735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.05.011>
46. Dong, Z., Xiaoming, H., y Yongli, Z. (2012). Investigation of the shape, size, angularity and surface texture properties of coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 34, 330-336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.096>
47. Edwards, Y., y Redelius, P. (2003). Rheological effects of waxes in bitumen. *Energy Fuel*, 17 (3), 511–520. <http://dx.doi.org/10.1021/ef020202b>
48. Epps, A., Arambula, E., Estakhri, C., Epps, J., Park, E.S., Yin, F., Walubita, L.F., y Lytton, R.L. (2011). Performance of WMA technologies: Stage I – Moisture susceptibility, (NCHRP Project 09-49). En: (NCHRP) Report 763: *Evaluation of the Moisture Susceptibility of WMA Technologies* (pp. 96). Washington DC, USA: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22429>.
49. Faustino, R.P., O'Connell, M.J., Valencia, N.R., y Ford, W. (2005). *Making effective use of volcanic ash in road-building in the Philippines*. En: Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 5, 868-876.

50. Feng, D., Yi, J., y Wang, D. (2013). Performance and thermal evaluation of incorporating waste ceramic aggregates in wearing layer of asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000788](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000788)
51. Franesqui, M.A., Castelo Branco, F., Azevedo, M.C., y Moita, P. (2010). *Construction experiences with volcanic unbound aggregates in road pavements*. En: International Workshop on Rock Mechanics and Geo-Engineering in Volcanic Environments; MAY 31-JUN 03, 2010; Puerto de la Cruz, Tenerife, España.
52. Franesqui, M.A., Yepes, J., García-González, C., y Gallego, J. (2019). Sustainable low-temperature asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates and crumb rubber modified bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 207, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.219>
53. Gallego, J. (1999). *Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos. Estudio de la influencia de las características del caucho y de las condiciones de fabricación y puesta en obra.*(Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.
54. Geyer, R., Jambeck, J.R., y Lavender Law, K. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3 (7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
55. Gibreil, H.A.A., y Feng, C.P. (2017). Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 142, 101-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.062>
56. Gillespie, I. (2012). *Quantifying the Energy Used in an Asphalt Coating Plant*. (Tesis doctoral). University of Strathclyde, United Kingdom: Department of Mechanical and Aerospace Engineering. [http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc\\_2012/Gillespie.pdf](http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2012/Gillespie.pdf)
57. González, O., Muñoz, M.E., y Santamaría, A. (2006). Bitumen/polyethylene blends: using m-LLDPE to improve stability and viscoelastic properties. *Rheologica Acta*, 45 (5), 603–610. <https://doi.org/10.1007/s00397-005-0009-7>
58. Guigou, C. (1990). *Influencia de las características petrográficas de los áridos canarios en las propiedades de los hormigones* (Tesis doctoral). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Gran Canaria, España.
59. Guru, M., Jursat Cubuk, M., Arslan, D., Ali Farzanian, S., y Bilici, I. (2014). An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 302-310. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.018>
60. Hamad, G.S., Jaya, R.P., Hassan, N.A., Aziz, M.M.A., y Mohd Yusak, M.I. (2014). Influences of crumb rubber sizes on hot mix asphalt mixture. *Jurnal Teknologi*, 71 (3), 63-68. <https://doi.org/10.11113/jt.v71.3760>
61. Hanson, D.I., Foo, K.Y., Brown, E.R., y Denson, R. (1994). Evaluation and characterization of a rubber-modified hot mix asphalt pavement. *Transportation Research Record*, 1436, 98–107.

62. Harvey, J., Weissman, S., Long, F., y Monismith, C. (2001). Tests to evaluate the stiffness and permanent deformation characteristics of asphalt/binder-aggregate mixes, and their use in mix design and analysis. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist (AAPT)*, 70, 572–604.
63. Hassani, A., Ganjidoust, H., y Maghanaki, A.A. (2005). Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management & Research*, 23, 322-710. <https://doi.org/10.1177/0734242X05056739>
64. Hernández-Gutiérrez, L.E., Rodríguez-Losada, J.A., y Hernández-Fernández, S. (2008). Resistance to fragmentation of volcanic rocks as aggregates in concrete and asphalt. *Geo-Temas*, 10, 1567-1572.
65. Hınıslıglu, S., y Agar, E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials Letters*, 58 (3-4), 267–271. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00458-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00458-0)
66. Huang, Y., Bird, R., y Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources Conservation and Recycling*, 5, 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>
67. Huang, Y., Bird, R., y Heidrich, O. (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 17 (2), 283-296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.005>
68. Irvine, T.N., y Baragar, W.R.A. (1971). A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 (5), 523-548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
69. Iskender, E. (2013). Rutting evaluation of stone mastic asphalt for basalt and basalt-limestone aggregate combinations. *Composites Part B: Engineering*, 54, 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.019>
70. Jones, D., Tsai, B.W., y Signore, J. (2010). *Warm-mix asphalt study: laboratory test results for Akzonobel Rediset WMX*. California, USA: University of California Pavement Research Center (UCPRC).
71. Kahraman, S., Delibalta, M.S., Comakli, R., y Grafov, B.M. (2013). Noise level measurement test to predict the abrasion resistance of rock aggregates. *Fluctuation and Noise Letters*, 12 (4), art. 1350021. <https://doi.org/10.1142/S0219477513500211>
72. Kahraman, S., y Fener, M. (2008). Electrical resistivity measurements to predict abrasion resistance of rock aggregates. *Bulletin of Materials Science*, 31 (2), 179-184. <https://doi.org/10.1007/s12034-008-0031-3>
73. Kahraman, S., y Gunaydin, O. (2007). Empirical methods to predict the abrasion resistance of rock aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66 (4), 449-455. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0093-2>
74. Kakar, M.R., Hamzah, M.O., y Valentin, J. (2015). A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations. *Journal of Cleaner Production*, 99, 39-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.028>

75. Kalantar, Z.N., Karim, M.R., y Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*, 33, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>
76. Kamani, M., y Ajalloeian, R. (2020). The effect of rock crusher and rock type on the aggregate shape. *Construction and Building Materials*, 230: 117016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117016>
77. Khaleghi, M., Kamani, M., y Ajalloeian, R. (2019). An investigation of the general relationships between abrasion resistance of aggregates and rock aggregate properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78: 3959-3968. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1366-7>
78. Krüger, G., y Solas, H. (2008). Aufhellungsmaterial für Asphaltdeckschichten: Einsatz von Sanitärkeramikrezyklat . *Baustoff Recycling und Deponietechnik BR*, 24 (2), 30-38.
79. Krutilová, K., y Příklad, R. (2017). Relationship between polished stone value (PSV) and Nordic abrasion value (A (N)) of volcanic rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76 (1), 85-99. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0814-x>
80. Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M.A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., e Indacochea-Vega, I. (2016). Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. *Construction and Building Materials*, 112, 1133-1140. <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.156>.
81. Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M.A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., e Indacochea-Vega, I. (2017). Porous asphalt mixture with alternative aggregates and crumb-rubber modified binder at reduced temperature. *Construction and Building Materials*, 150, 260-267. <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.008>
82. Le Maitre, R.W. (Ed.). (1989). *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks* (pp. 193). Oxford, England: Blackwell Scientific Publications.
83. Lehni, M. World Business Council for Sustainable Development. (2000). *Eco-efficiency: Creating more value with less impact* (pp.32). Conches-Geneva, Suiza: WBCSD
84. Liu, S., Cao, W., Fang, J., y Shang, S. (2009). Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt. *Construction and Building Materials*, 23 (7), 2701-2708. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.009>
85. Lo Presti, D. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863-881. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>
86. Lomoschitz, A., Jiménez, J.R., Yepes, J., Pérez-Luzardo, J.M., Macías-Machín, A., Socorro, M., Hernández, I.E., Rodríguez, J.A., y Olalla, C. (2006). Basaltic lapilli used for construction purposes in the Canary Islands, Spain. *Environmental & Engineering Geoscience*, 12 (4), 327-336. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.12.4.327>
87. López Jimeno, C. (1994). *Áridos: manual de prospección, explotación y aplicaciones*. Madrid, España: Entorno gráfico S.L.

88. López Jimeno, C., Pernia Llera, J.M., Pla Ortiz de Urbina, F., y López Jimeno, E. (2004). *Manual de perforación y voladura de rocas. Serie: Tecnología y Seguridad Minera*. Madrid, España: Instituto Tecnológico Geo-Minero de España.
89. Ma, T., Wang, H., Zhao, Y., Huang, X., y Wang, S. (2017). Laboratory Investigation of Crumb Rubber Modified Asphalt Binder and Mixtures with Warm-Mix Additives. *International Journal of Civil Engineering*, 15 (2), 185-194. <http://dx.doi.org/10.1007/s40999-016-0040-3>
90. Ma, T., Zhang, D., Yan, J., y Ye, Q. (2016). Influences by air voids on fatigue life of asphalt mixture based on discrete element method. *Construction and Building Materials*, 126, 785-799. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.045>
91. Mahrez, A. (1999). *Properties of rubberised bitumen binder and its effect on the bituminous mix* (Tesis de Master). Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia.
92. Manal, A., y Mohamed, I. (2013). Impact of aggregate gradation and type on hot mix asphalt rutting in Egypt. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3 (4), 2249– 2258.
93. Maupin Jr., G.W. (1996). Hot mix asphalt rubber applications in Virginia. *Transportation Research Record*, 1530 (1), 18–24. <https://doi.org/10.1177/0361198196153000103>
94. Mills-Beale, J., y You, Z. (2010). The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 24 (3), 340-345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.046>
95. Modarres, A., y Hamed, H. (2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials & Design*, 61, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.046>
96. Moghaddam, T.B., Karim, M.R., y Soltani, M. (2013). Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. *Journal of Engineering Science and Technology*, 8 (3), 264-71.
97. Moghaddam, T.B., Soltani, M., y Karim, M.R. (2014). Experimental characterization of rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads. *Construction and Building Materials*, 65: 487-94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.006>
98. Moghaddam, T.B., Soltani, M., Karim, M.R., y Baaj, H. (2015). Optimization of asphalt and modifier contents for polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology. *Measurement*, 74, 159-69. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.012>
99. Moghaddam, T.B., Karim, M.R., y Syammaun, T. (2012). Dynamic properties of stonemastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles. *Construction and Building Materials*, 34, 236–242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054>
100. Moon, V., Bradshaw, J., Smith, R., y de Lange, W. (2005). *Geotechnical characterisation of stratocone crater wall sequences, White Island Volcano, New Zealand*. *Engineering Geology*, 81 (2), 146–178. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.07.014>



101. Moreno, F., Sol, M., Martín, J., Pérez, M., y Rubio, M.C. (2013). The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation. *Materials & Design*, 47, 274-280. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.022>
102. Mull, M.A., Stuart, K., Yehia, A., 2002. Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement. *Journal of Materials Science*, 37 (3), 557-566. <https://doi.org/10.1023/A:1013721708572>.
103. Naji, J.A., y Asi, I.M. (2008). Performance evaluation of asphalt concrete mixes containing granular volcanic ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20 (12), 754-761. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:12\(754\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:12(754))
104. Nakaniwa, C. (2004). *Ecoefficiency Indicator Handbook for Products* (pp. 25). Tokyo, Japan: Japan Environmental Management Association for Industry (JEMAI).
105. Okogbue, C.O., y Aghamelu, O.P. (2013). Performance of pyroclastic rocks from Abakaliki Metropolis (southeastern Nigeria) in road construction project. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72 (3-4), 433-446. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0489-0>
106. Ouni, A.E., Dony, A., y Colin, J. (2014). Probabilistic parametric approach for rutting evaluation: application to hot and warm asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (1), 58-65. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2012.725473>
107. Paranavithana, S., y Mohajerani, A. (2006). Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 48 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.12.009>
108. Pasandín, A.R., y Pérez, I. (2013). Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 43, 497-505. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.052>
109. Pasandín AR, Pérez I (2014). Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion. *Construction and Building Materials*, 55: 350-358. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.053>
110. Pasandín, A.R., y Pérez, I. (2017). Fatigue performance of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates and waste tire rubber. *Construction and Building Materials*, 157, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.090>
111. Peide, C., Yue, X., Boxiang, Y., Mingliang, L., y Shaopeng, W. (2018). Morphological characteristics of aggregates and their influence on the performance of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 186, 303-312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.124>.
112. Peilong, L., y Zhan, D. (2011). Analysis of Environmental and Ecological Effects on new techniques for asphalt pavement materials. En: *International Symposium on Water Resource and Environmental Protection*. Xian, China: 3090-3092. <https://doi.org/10.1109/ISWREP.2011.5893532>
113. Peña Ruiz, J.L. y Almazán Cruzado, D. (2007). Reciclado "in situ" en frío con emulsión. Panorámica de la técnica. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la*

- Carretera*, 155, 154-164.  
<http://www.institutoivia.com/revista%20carreteras/REVISTA%20155%20AEC.pdf>
114. Pereira, P.A.A., Oliveira, J.R.M., y Picado-Santos, L.G. (2004). Mechanical Characterisation of Hot Mix Recycled Materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 5 (4), 211-220. <https://doi.org/10.1080/10298430412331333668>
115. Pérez, I., y Pasandín, A.R. (2017). Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 165, 405-414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.140>
116. Pérez, I., Pasandín, A.R., y Medina, L. (2012). Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates. *Materials and Design*, 36, 840-846.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.058>
117. Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F.J., Gallegos, C., González, O., Muñoz, M.E., Santamaría, A. (2003). Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen. *Fuel*, 82 (11), 1339–1348.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00065-6)
118. Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J., y Zanzotto, L. (2005). Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal*, 41(12), 2831–44. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.05.034>
119. Poulidakos, L.D., Papadaskalopoulou, C., Hofko, B., Gschösser, F., Cannone, A., *et al.* (2017). Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 32-44.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>
120. Rahman, M.N., Ahmeduzzaman, M., Sobhan, M.A., y Ahmed, T.U. (2013). Performance evaluation of waste polyethylene and PVC on hot asphalt mixtures. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1 (5), 97-102.  
<https://doi.org/10.12691/ajcea-1-5-2>
121. Rincón, E., y Wellens, A. (2011). Cálculo de indicadores de ecoeficiencias para dos empresas ladrilleras mexicanas. *Revista Internacional Contaminación ambiental*, 27 (4), 333-345.
122. Rodríguez-Alloza, A.M., y Gallego, J. (2017). Volumetric characteristics and compactability of asphalt rubber mixtures with organic warm mix asphalt additives. *Materiales de Construcción*, 67 (327). <https://doi.org/10.3989/mc.2017.03616>
123. Rodríguez-Alloza, A.M., Malik AM, Lenzen M, Gallego J (2015). Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 90, 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.035>
124. Rodríguez-Losada, J.A., Hernández-Gutiérrez, L.E., y Mora-Figueroa, A.L. (2007a). Geotechnical features of the welded ignimbrites of the Canary Islands. En: *Proceedings of the International Workshop on Volcanic Rocks, Workshop W2 - 11th Congress ISRM*.  
<https://doi.org/10.1201/NOE0415451406.ch4>
125. Rodríguez-Losada, J.A., Hernández-Gutiérrez, L.E., Olalla, C., Perucho, A., Serrano, A., y Del Potro, R. (2007b). The volcanic rocks of the Canary Islands. Geotechnical properties.

- En: *Proceedings of the International Workshop on Volcanic Rocks, Workshop W2 - 11th Congress ISRM* (53-57). <https://doi.org/10.13140/2.1.2770.9444>
126. Rodríguez-Peces, M., Yepes, J., y Martín-Nicolau, E. (2013). Geotechnical features of the volcanic rocks related to the Arteara rock avalanche in Gran Canaria (Canary Islands, Spain). En: Margottini, C., Canuti, P., y Sassa, K. (Eds.), *Progress in Landslide Science, Volume 3: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 111-117). Berlin, Heidelberg, Germany: Springer. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31310-3\\_16](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31310-3_16)
127. Rondón-Quintana, H.A., Hernández-Noguera, J.A., y Reyes-Lizcano, F.A. (2015). A review of warm mix asphalt technology: Technical, Economical and environmental aspects. *Ingeniería e Investigación*, 35, 5-18. <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v35n3.50463>
128. Rondón-Quintana, H.A., Ocampo-Terreros, M.S., Vacca-Gómez, H.A., Reyes-Lizcano, F.A., Nieto-Mora, J.P., y Beltrán-Cruz, D.P. (2017). The mechanical behaviour of two warm-mix asphalts. *CT y F - Ciencia, Tecnología y Futuro* 7, 32-44. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v36n3.54861>
129. Rubio, B., Jiménez, R., Pérez, F.E., y Martínez, A. (2008). *El ensayo europeo de sensibilidad al agua y su relación con los ensayos normalizados en España*. CEDEX: Ingeniería Civil 151.
130. Saberi, F.K., Fakhri, M., y Azami, A. (2017). Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1125-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.079>
131. Samsuri, A.B. (1997). Properties of rubberised bitumen from reclaimed rubber. En: *Proceedings of the Conference on the Use of Rubberised Bitumen in the Road Construction* (pp.15-23), Selangor, Malaysia.
132. Sánchez de Juan, M., y Alaejos Gutiérrez, P. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23, 872 - 877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>
133. Sánchez, E., Vega, A., Castro, D., y Del Rio, M. (2011). Evaluation of compactibility and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives. *Construction and Building Materials*, 25 (5), 2304-2311. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.024>
134. Santana, M., Estaire, J., y Yepes, J. (2014). Geotechnical characterization of rocky materials from Arteara rock avalanche (Gran Canaria). En: Alejano, R., Perucho, A., Olalla, C., y Jiménez, R. (Eds.), *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses* (pp. 479–484). London, England: CRC Press, Taylor and Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b16955>
135. Santero, N.J., Masanet, E., y Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (9), 801-809. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>
136. Selim, A.A., Muniandy, R., y Abdelrahman, M. (2005). Potential use of ground tyre rubber in stone matrix asphalt (SMA)—a laboratory evaluation. En: *Proceedings of the 2005 International Symposium on Pavement Recycling*, Sao Paulo, Brazil.

137. Setyawan, A., Febrianto, N., y Sarwono, D. (2017). Design and Properties of Thin Surfacing Hot Mix Asphalt Containing Crumb Rubber as Partial Aggregate Replacement. En: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 75, 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/75/1/012016>
138. Shen, J., Amirkhanian, S., Xiao, F., y Tang, B. (2009). Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders. *Construction and Building Materials*, 23 (1), 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.005>
139. Shin, T., Tia, M., y Ruth, B.E. (1996). Evaluation of the effect of crumb rubber and SBR on rutting resistance of asphalt concrete. *American Chemical Society Division Fuel Chemistry*, 41 (4), 1227–1231.
140. Shu, X., y Huang, B.S. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and Portland cement concrete: an overview. *Construction and Building Materials*, 67 (B), 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>
141. Silvestre Martínez, R., Medel Colmenar, E., García García, A., y Navas, J. (2013). Utilizing recycled ceramic aggregates obtained from tile industry in the design of open graded wearing course on both laboratory and in situ basis. *Materials and Design*, 50, 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.041>
142. Sojobi, A.O., Nwobodo, S.E., y Aladegboye, O.J. (2016). Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete. *Cogent Engineering*, 3 (1), 1133480. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1133480>
143. Sterling, V. (2012). Special mixture design considerations and methods for warm mix asphalt: a supplement to NCHRP Report 673: a manual for design of hot mix asphalt with commentary. *National Cooperative Highway Research Program - NCHRP Report 714*. Washington DC, USA: Transportation Research Board.
144. Stripple, H. (2001). *Life Cycle Assessment of Road, a Pilot Study for Inventory Analysis* (pp. 182). Gothenburg, Sweden: IVL Swedish Environmental Research Institute.
145. Sturm, A., y Müller, K. (2001). *Standardized Eco-Efficiency Indicators* (pp.72). Basilea, Suiza: Ellipson Consultants.
146. Sturm, A., Müller, K. y Upasena, S. (2004). *A manual for the Preparers and Users of Ecoefficiency Indicators* (pp.114). Nueva York y Ginebra: United Nations Conference on Trade and Development UNCTAD/ITE/IPC/2003/7
147. Suárez, L., y Regueiro, M. (1994). *Áridos: áridos naturales y de machaqueo para la construcción*. Madrid, España: Colegio Oficial de Geólogos de España (435 p). (Traducido de Smith, M.R. & Collis, L. 1993. *Aggregates: sand, gravel and crushed rocks for construction purposes*. London, England: The Geological Society.
148. Syed, I., Hasan, M.A., y Tarefder, R.A. (2018). Investigation of rutting performance of different warm mix asphalt (WMA) Mixtures. *International Journal of GEOMATE*, 14 (45), 116-23. <https://dx.doi.org/10.21660/2018.45.7328>

149. Szilagyi, H., Baera, C., Corbu, O., y Puskas, A. (2016). Research and Valorization of Volcanic Tuff Aggregates in Lightweight Concrete. En: *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016*, Albena, Bulgaria.
150. Tchamdjou, W., Cherradi, T., Abidi, M., y Pereira de Oliveira, L. (2016). Characterisation of natural pozzolan of "Djoungo" (Cameroon) as lightweight aggregate for lightweight concrete. *International Journal of GEOMATE*, 11 (27), 2782-2789. <https://doi.org/10.21660/2016.27.1310>
151. Tchamdjou, W., Cherradi, T., Abidi, M., y Pereira de Oliveira, L. (2018). Mechanical Properties Of Lightweight Aggregates Concrete Made With Cameroonian Volcanic Scoria: Destructive and Non-Destructive Characterization. *Journal of Building Engineering*, 16, 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.01.003>
152. Topal, A., Oner, J., Sengoz, B., Dokandari, P.A., y Kaya, D. (2017). Evaluation of Rutting Performance of Warm Mix Asphalt. *International Journal of Civil Engineering*, 15 (4), 705-714. <http://dx.doi.org/10.1007/s40999-017-0188-5>
153. Török, Á. (2015). Los Angeles and Micro-Deval values of volcanic rocks and their use as aggregates, examples from Hungary. En: Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., y Luino, F. (eds), *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5* (115-118). Cham, Alemania: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_23)
154. Ugur, I., Demirdag, S., y Yavuz, H. (2010). Effect of rock properties on the Los Angeles abrasion and impact test characteristics of the aggregates. *Materials characterization*, 61 (1), 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.10.014>
155. Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., Miró, R., Martínez, A., y Botella, R. (2011). Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, 25 (3), 1289-1297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016>
156. Van de Ven, M.F.C., Molenaar, A.A.A., y Poot, M.R. (2011). Asphalt mixtures with waste materials: possibilities and constraints. En: *Proceedings of the 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*. KwaZulu-Natal, South Africa.
157. Varveri, A., Avgerinopoulos, S., Kasbergen, C., Scarpas, A., y Collop, A. (2014). Influence of air void content on moisture damage susceptibility of asphalt mixtures: computational study. *Transportation Research Record*, 2446 (1), 8-16. <http://dx.doi.org/10.3141/2446-02>
158. Vasudevan, R., Ramalinga Chandra Sekar, A., Sundarakannan, B., y Velkennedy, R. (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 28 (1), 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031>
159. Vergniolle, S., y Mangan, M. (2000). *Hawaiian and strombolian eruptions*. En: *Encyclopedia of Volcanoes* (eds. Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., y Stix, J.) Academic Press, 447-461.

160. Wang, S., Cheng, D., y Xiao, F. (2017). Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt. *Construction and Building Materials*, 131, 101-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.077>
161. Wang, T., Feipeng, X., Xingyi, Z., Baoshan, H., Jingang, W., y Serji, A. (2018). Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 180, 139-158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.086>
162. Wang, T., Lee, I.S., Kendall, A., Harvey, J., Lee, E.B., y Kim, C. (2012). Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. *Journal of Cleaner Production*, 33, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.001>
163. White, G., y Reid, G. (2018). Recycled waste plastic for extending and modifying asphalt binders. En: *8th Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF 2018)*. Brisbane, Queensland, Australia.
164. Widyatmoko, I. (2008). Mechanistic-empirical mixture design for hot mix asphalt pavement recycling. *Construction and Building Materials*, 22 (2), 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.041>
165. Wulandari, P.S., y Tjandra, D. (2017). Use of Crumb Rubber as an Additive in Asphalt Concrete Mixture. *Procedia Engineering*, 171, 1384-1389. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.451>
166. Xiao, F., Amirkhani, S.N., y Shen, J. (2009). Effects of various long-term aging procedures on the rheological properties of laboratory prepared rubberized asphalt binders. *Journal of Testing and Evaluation*, 37 (4), 329-336. <https://doi.org/10.1520/JTE101706>
167. Xiao, F., Punith, V.S., y Amirkhani, S.N. (2012). Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures. *Fuel*, 94, 144-155. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.017>
168. Yang, X., You, Z., Hasan, M.R.M., Diab, A., Shao, H., Chen, S., y Ge, D. (2017). Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm. *Journal of Cleaner Production*, 159, 346-358. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.168>
169. Yu, B., Jiao, L., Ni, F., y Yang, J. (2014). Evaluation of plastic-rubber asphalt: Engineering property and environmental concern. *Construction and Building Materials*, 71, 416-424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.0755>
170. Zaumanis, M., y Haritonovs, V. (2010). Research on properties of warm mix asphalt. *Scientific Journal of Riga Technical University: Construction Science*, 11 (1), 77-84.
171. Ziari, H., Kaliji, A.G., y Babagoli, R. (2016). Laboratory evaluation of the effect of waste plastic bottle (PET) on rutting performance of hot mix asphalt mixtures. *Petrol Science and Technology*, 34 (9), 819-823. <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1169290>
172. Zoorob, S.E., y Suparma, L.B. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). *Cement and Concrete Composites*, 22 (4), 233-42. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00026-3)

## 8.2 NORMATIVA

---

1. AENOR. UNE 146130. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas. Diciembre 2000.
2. AENOR. UNE 83-115-89. Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas. Abril 1989
3. AENOR. UNE-EN 932-1. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo. Febrero 1997.
4. AENOR. UNE-EN 932-2. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio. Noviembre 1999.
5. AENOR. UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. Julio 2012
6. AENOR. UNE-EN 933-2. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas. Mayo 1996.
7. AENOR. UNE-EN 933-3. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas. Marzo 2012.
8. AENOR. UNE-EN 933-5. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso. Febrero 1999.
9. AENOR. UNE-EN 933-8. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena. Julio 2012.
10. AENOR. UNE-EN 1097-1. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval). Mayo 2011.
11. AENOR. UNE-EN 1097-2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. Septiembre 2010.
12. AENOR. UNE-EN 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Mayo 2014.
13. AENOR. UNE-EN 1426. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la penetración con aguja. Junio 2016.
14. AENOR. UNE-EN 1427. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de reblandecimiento. Método del anillo y bola. Diciembre 2015.
15. AENOR. UNE-EN 1926. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial. Marzo 2007.

16. AENOR. UNE-EN 1936. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total. Marzo 2007
17. AENOR. UNE-EN 12593. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de fragilidad Fraass. Diciembre 2015.
18. AENOR. UNE-EN 12697-5. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima. Abril 2010.
19. AENOR. UNE-EN 12697-6. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas. Septiembre 2012.
20. AENOR. UNE-EN 12697-8. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas. Noviembre 2003.
21. AENOR. UNE-EN 12697-10. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 10: Compactibilidad. Enero 2003.
22. AENOR. UNE-EN 12697-12. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa. Junio 2009.
23. AENOR. UNE-EN 12697-22. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura. Marzo 2008.
24. AENOR. UNE-EN 12697-23. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas. Enero 2004.
25. AENOR. UNE-EN 12697-24. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga. Diciembre 2006.
26. AENOR. UNE-EN 12697-26. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez. Diciembre 2006.
27. AENOR. UNE-EN 12697-30. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de probetas mediante compactador de impactos. Marzo 2013.
28. AENOR. UNE-EN 12697-33. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa. Diciembre 2007.
29. AENOR. UNE-EN 12697-34. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 34: Ensayo Marshall. Diciembre 2006.
30. AENOR. UNE-EN 12697-35 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio. Julio 2017.
31. AENOR. UNE-EN 12697-39. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 39: Contenido en ligante por ignición. Marzo 2013.
32. AENOR. UNE-EN 15326. Betunes y ligantes bituminosos. Medida de la densidad y del peso específico. Método del picnómetro de tapón capilar. Noviembre 2018.



33. AENOR. UNE-ISO 690. Información y documentación. Directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información. Mayo 2013.
34. Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX (2007). *Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas*. Recuperado de: [http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/27EDCC96-7C3A-42B5-96B7-F6B87D0BD3DF/116371/Manual\\_NFU.pdf](http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/27EDCC96-7C3A-42B5-96B7-F6B87D0BD3DF/116371/Manual_NFU.pdf)
35. Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX (2013a). *Acción 2.1: Utilización de materiales marginales en terraplenes en el Sur de España y Norte de Marruecos, y metodologías para su aplicación*. Informe Actividad 2: Transferencia Tecnológica relativa a materiales de construcción, incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables. Recuperado de: [http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/8DFD5BC1-5377-42BA-A98462837E45379E/124758/Acci%C3%B3n21TTIGEM\\_P.pdf](http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/8DFD5BC1-5377-42BA-A98462837E45379E/124758/Acci%C3%B3n21TTIGEM_P.pdf)
36. Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX (2013b). *Residuos plásticos*. Catálogo de residuos utilizables en construcción. Recuperado de: [http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es\\_RESIDUOSPLASTICOSDIC2013.pdf](http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_RESIDUOSPLASTICOSDIC2013.pdf)
37. Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX (2014). *Residuos de construcción y demolición*. Catálogo de residuos utilizables en construcción. Recuperado de: [http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es\\_RESIDUOSDECONSTRUCCIONYDEMOLICIONNOV2014.pdf](http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_RESIDUOSDECONSTRUCCIONYDEMOLICIONNOV2014.pdf)
38. Colegio oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Santa Cruz de Tenerife, COAAT (2003): *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)* (pp. 551). Madrid, España: Estudio IDC.
39. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Sevilla: Consejería de Obras Públicas y Transportes (2007). *Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía*, (pp. 158 p). Recuperado de: <https://ws147.juntadeandalucia.es/obraspublicasyvivienda/publicaciones/02%20CARRTERAS/icafir/icafir.pdf>
40. Gobierno de Canarias (2011). *Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias (GETCAN-011)*, (pp.114). <https://web.ua.es/es/ginter/documentos/guia-geotecnica-canarias.pdf>
41. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. (2014). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*. Art. 330- Terraplenes. Art. 510- Zahorras. Art 542- Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso. Art. 543- Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. Orden FOM/2523/2014.
42. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2004). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*. Art. 542- Mezclas bituminosas en caliente. Orden FOM/891/2004.
43. Ministerio de Fomento (1998). *Instrucción de hormigón estructural (EHE-98)*. Real Decreto 2661/1998 de 11 de diciembre.

44. Ministerio de Fomento (2008). *Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*. Real Decreto 1247/2008 de 18 de julio. Recuperado de: [https://www.fomento.gob.es/recursos\\_mfom/1820100.pdf](https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/1820100.pdf)

### 8.3 WEBGRAFÍA

---

1. Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos, ANEFA (2018). Informe de situación económica sectorial, 2018 [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: <http://www.aridos.org/wp-content/uploads/2018/10/Informe-sectorial-Asamblea-General-ANEFA-2018.pdf>
2. Bisso Fernández, R. (06/2010). *Llantas Usadas en Pavimentos* (Mensaje del blog: Pavimentos Sustentables: Caminando hacia ellos!) [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>
3. Cicloplast (2011). *Informe anual, 2011* [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: [www.cicloplast.com/descargas/memoria\\_2011.pdf](http://www.cicloplast.com/descargas/memoria_2011.pdf)
4. Ecoembes (2016). *Informe Anual Integrado* [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: [https://www.ecoembes.com/sites/default/files/archivos\\_publicaciones\\_ecoembes/informe\\_anual-2016.pdf](https://www.ecoembes.com/sites/default/files/archivos_publicaciones_ecoembes/informe_anual-2016.pdf)
5. Ecoembes (2018). *Barómetro de reciclado de envases* [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: <https://www.ecoembes.com/es/ciudadanos/envases-y-proceso-reciclaje/reciclaje-en-datos/barometro>
6. German Asphalt Paving Association, GAPA. (2009). *Warm Mix Asphalts* (pp.52). Bonn, Germany: Deutscher Asphaltverband e.V. [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: [https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/warm\\_mix\\_asphalt\\_2009.pdf](https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/warm_mix_asphalt_2009.pdf)
7. Guía Española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). Proyecto GEAR (2008-2011). Asociación Española de Empresas de Reciclaje de RCD (GERD) [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: <http://www.caminospaisvasco.com/Profesion/documentostecnicos/guia>
8. Gobierno de Canarias, Consejería de Educación y Universidades. (13/10/2015). *Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos* [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: [https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Red\\_Canaria\\_de\\_Espacios\\_Naturales\\_Protegidos](https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Red_Canaria_de_Espacios_Naturales_Protegidos)
9. Cartográfica de Canarias, GRAFCAN. *IDE Canarias visor 4.5. Mapa Geotécnico* [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: <https://visor.grafcan.es/visorweb/>
10. Ministerio de Ciencia e Innovación (2011). *Investigación de Nuevas Mezclas de Baja Energía para la Rehabilitación Superficial (INMBERS)*. Laboratorio Ingeniería de la

- Construcción, Universidad de Granada. Serviá Cantó [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: [https://www.ugr.es/~labic/docs/actividad\\_1\\_1.pdf](https://www.ugr.es/~labic/docs/actividad_1_1.pdf)
11. Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX. (12/2013). *Residuos plásticos urbanos* [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: [http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es\\_RESIDUOSPLASTICOSDIC2013.pdf](http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_RESIDUOSPLASTICOSDIC2013.pdf)
  12. European Asphalt Pavement Association, EAPA (2014). *The use of Warm Mix Asphalt* (pp.23). Brussels, Belgium: EAPA position paper [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: <https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/EAPA-Position-Paper-WMA-version-October-2014.pdf>
  13. *Packaging waste statistics*. (14/03/2019). Eurostat: Statistic Explained [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging\\_waste\\_statistics\\_14/03/2019](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging_waste_statistics_14/03/2019)
  14. *Red Canaria de Espacios protegidos* (30/10/2017) [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Red\\_Canaria\\_de\\_Espacios\\_Naturales\\_Protegidos](https://es.wikipedia.org/wiki/Red_Canaria_de_Espacios_Naturales_Protegidos)
  15. Pavement Interactive (s.f.). *Coarse Aggregate Specific Gravity* [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/aggregate-tests/coarse-aggregate-specific-gravity/>
  16. SIGNUS Ecovalor, Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso (2017). *Memoria Anual* [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: [https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/06/signus\\_memoria\\_2017.pdf](https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/06/signus_memoria_2017.pdf)
  17. *Transiciones térmicas de los Polímeros*.(26/04/2014) Textos científicos [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/transiciones-termicas-polimeros>
  18. Trowsdale, A., Housden, T. y Meier, B. (2017). *Seven charts that explain the plastic pollution problem*. BBC,UK [fecha de consulta 23/07/2019]. Recuperado de: <https://www.bbc.com/news/science-environment-42264788>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de la metodología seguida en la investigación .....	10
Figura 2.1 Ejemplo de adición de un residuo polimérico a las mezclas bituminosas por la vía seca y por la vía húmeda. (Bisso, 2010) .....	17
Figura 2.2 Consumo de polímeros plásticos en España por tipo. (CEDEX, 2013b) .....	24
Figura 2.3 Principales aplicaciones de las materias plásticas recicladas en España (Cicloplast, 2011) .....	24
Figura 2.4 Destino del granulado de caucho (NFU). (SIGNUS, 2017) .....	32
Figura 3.1 Ejemplo de mapa litológico de las Islas Canarias (Gran Canaria). (IDE Canarias visor 4.5) .....	44
Figura 3.2 Tipos de manifestaciones lávicas: a) lavas cordadas, b) malpaís, c) colada en bloques .....	44
Figura 3.3 Diagrama del plan de ensayos seguido para la caracterización de áridos y rocas.....	51
Figura 3.4 Cantera de Fronpeca (Valverde, El Hierro). Antigua explotación de árido basáltico vacuolar (BOPV) procedente de coladas basálticas, basaníticas y foidíticas (actualmente inactiva).....	52
Figura 3.5 Cantera de La Cisnera (Tenáridos, S.L., Grupo SATOCÁN, Arico, Tenerife). Explotación del litotipo basalto masivo (BAFM).....	52
Figura 3.6 Cantera de la Esfinge y Roque Ceniciento (Autoridad Portuaria de Las Palmas, La Isleta, Las Palmas de Gran Canaria). Explotación de litotipos basálticos BOPV/BAFV, BOPM/BAFM, BES y LPS. ....	52
Figura 3.7 Basalto olivínico-piroxénico vacuolar de color gris/rojizo. ....	55
Figura 3.8 Basalto escoriáceo de color rojizo/marrón. ....	55
Figura 3.9 Basalto olivínico-piroxénico vacuolar de color gris. ....	55
Figura 3.10 Basalto olivínico-piroxénico masivo de color negro.....	55
Figura 3.11 Basalto masivo de color gris.....	55
Figura 3.12 Fonolita de color gris/verdoso. ....	55
Figura 3.13 Lapilli suelto de color rojizo.....	56
Figura 3.14 Lapilli suelto de color negro. ....	56
Figura 3.15 Ignimbrita no soldada de color amarillo. ....	56
Figura 3.16 Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ) y densidad aparente del árido ( $\rho_a$ ) de cada litotipo analizado .....	75
Figura 3.17 Absorción de agua ( $WA_{24}$ ) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ) .....	75
Figura 3.18 Índice de lajas (FI) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ).....	77
Figura 3.19 Porcentaje de partículas trituradas (Cc) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ) .....	77

Figura 3.20 Equivalente de arena (SE (10)) vs. Densidad aparente del árido ( $\rho_a$ ).....	78
Figura 3.21 Coeficiente de desgaste de Los Ángeles (LA) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ) .....	80
Figura 3.22 Coef. de abrasión por Micro-Deval ( $M_{DE}$ ) vs. Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ) .....	80
Figura 3.23 Coef. de friabilidad de las arenas ( $F_A$ ) vs. Densidad aparente del árido ( $\rho_a$ ) .....	80
Figura 3.24 Resistencia a la compresión simple (UCS) vs. Densidad aparente de la roca ( $\rho_a$ )....	81
Figura 3.25 Densidad de partículas secadas en estufa ( $\rho_{rd}$ ) vs. Densidad aparente de la roca matriz ( $\rho_a$ ).....	82
Figura 3.26 Coef. de desgaste de Los Ángeles del árido (LA) vs. Resistencia a compresión uniaxial de la roca (UCS) .....	83
Figura 4.1 Árido BOPV procedente de la cantera de La Esfinge (Autoridad Portuaria de Las Palmas, GC): a) fracción 10/20 mm, b) fracción 4/10 mm y c)fracción 0/4 mm.....	88
Figura 4.2 Muestra de una probeta cilíndrica fabricada con un 6.0% de BC35/50 .....	92
Figura 4.3 Densidad máxima de las muestras no compactadas según contenido de ligante... 100	
Figura 4.4 Densidad aparente geométrica de las probetas compactadas a 75 golpes por cara. ....	101
Figura 4.5 Densidad aparente SSD de las probetas compactadas a 75 golpes por cara.....	101
Figura 4.6 Contenido de huecos por el procedimiento Geométrico según contenido de ligante y tipo de mezcla: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante.....	103
Figura 4.7 Contenido de huecos por el procedimiento SSD según contenido de ligante y tipo de mezcla: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante. ....	104
Figura 4.8 Densidad aparente según procedimiento geométrico de probetas compactadas a 100 golpes por cara ( $Mg/m^3$ ). ....	105
Figura 4.9 Resistencia a la compactación de probetas compactada a 100 golpes por cara (21 Nm/golpe). ....	105
Figura 4.10 Evolución de la densidad aparente geométrica de las mezclas conforme al número de golpes aplicados (según contenido de ligante). ....	106
Figura 4.11 Variación del contenido de áridos de las probetas cilíndricas tras ser compactadas a 100 golpes por cara para cada fracción granulométrica.....	107
Figura 4.12 Ensayo de rodadura en pista por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos para cada mezcla según contenido de ligante y tipo de mezcla: a) $WTS_{(AIR)}$ (mm/1000ciclos); b) $PRD_{(AIR)}\%$ .....	108
Figura 4.13 Resultados del ensayo Marshall según contenido de ligante y tipo de mezcla: a) Estabilidad máxima; b) Deformación plástica; c) Cociente Marshall.....	109

Figura 4.14 Resultados del ensayo de sensibilidad al agua según contenido de ligante y tipo de mezcla: a) ITSd en condiciones secas; b) ITSw en condiciones de saturación; c) ITSR .....	110
Figura 4.15 Imágenes SEM de la superficie de rotura de 2 probetas de MBC tras el ensayo de tracción indirecta: una con betún convencional (imágenes a y b) y otra con betún-caucho (imágenes c y d) .....	112
Figura 4.16 Valores del módulo de rigidez dinámico obtenido mediante ensayo de tracción indirecta en función del contenido de ligante y tipo de mezcla. ....	114
Figura 4.17 Valores obtenidos durante el ensayo de fatiga mediante flexión en 4 puntos para un contenido de ligante del 6% (s/peso total de la mezcla). ....	115
Figura 5.1 Clasificación de las mezclas bituminosas en función de su temperatura de trabajo con su gasto de combustible (aproximado) por tonelada de producción (D'Angelo et al., 2007)..	117
Figura 5.2 Unidad mezcladora para preparar el betún mejorado con caucho y el aditivo de las mezclas semicalientes. En el lateral del equipo, el aditivo químico empleado. ....	120
Figura 5.3 a) Secciones de las probetas cilíndricas: izqda.: MBC 35/50; centro: MBC BC35/50; drcha.: MBSC BC35/50 compactada a 140 °C. b) Sección probeta prismática de una probeta MBSC BC35/50 compactada a 140 °C. ....	121
Figura 5.4 Imágenes infrarrojas de la fabricación de las probetas cilíndricas de las mezclas MBSC BC35/50: a) Temperatura de mezclado: 140 °C; b) Temperatura de compactado: 130 °C. ....	122
Figura 5.5 Densidad máxima de las muestras no compactadas según temperatura de mezclado .....	126
Figura 5.6 Densidad aparente geométrica de las probetas compactadas con 75 golpes por cara. ....	127
Figura 5.7 Densidad aparente SSD de las probetas compactadas con 75 golpes por cara.....	127
Figura 5.8 Contenido de huecos por el procedimiento Geométrico según temperatura de compactación: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla (Vm); b) Contenido de huecos en el árido mineral (VMA); c) Contenido de huecos rellenos con ligante (VFB).....	129
Figura 5.9 Contenido de huecos por el procedimiento SSD según temperatura de compactación: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante. ....	130
Figura 5.10 Densidad aparente según procedimiento geométrico de probetas compactadas a 100 golpes por cara .....	131
Figura 5.11 Resistencia a la compactación T (21 Nm/golpe) .....	131
Figura 5.12 Evolución de la densidad aparente de las mezclas conforme al número de golpes aplicados (según la temperatura de compactación).....	132
Figura 5.13 Ensayo de rodadura en pista por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos para cada mezcla según temperatura de compactación: a) WTS <sub>(AIR)</sub> (mm/1000ciclos); b) PRD%.....	133
Figura 5.14 Resultados del ensayo Marshall según temperatura de compactación de la mezcla: a) Estabilidad máxima; b) Deformación plástica; c) Cociente Marshall .....	135

Figura 5.15 Resultados del ensayo de sensibilidad al agua según temperatura de compactación de la mezcla: a) $ITS_d$ en condiciones secas; b) $ITS_w$ en condiciones de saturación; c) $ITSR$ . ....	136
Figura 5.16 Valores del módulo de rigidez dinámico obtenido mediante ensayo de tracción indirecta en función de la temperatura de compactación de la mezcla.....	138
Figura 5.17 Valores obtenidos durante el ensayo de fatiga mediante flexión en 4 puntos para un contenido de ligante del 6% (s/peso total de la mezcla) para mezclas elaboradas a distinta temperatura de compactación.....	139
Figura 6.1 Partículas de PET # $\leq$ 4 mm empleadas para la fabricación de las MBC. ....	146
Figura 6.2 Mezclado del árido cubierto con ligante y las partículas de PET .....	148
Figura 6.3 Muestra de una probeta cilíndrica fabricada con betún 35/50 +2% de PET (75 golpes por cara). ....	149
Figura 6.4 Densidad máxima de las muestras no compactadas según contenido de PET.....	152
Figura 6.5 Densidad aparente geométrica de las probetas compactadas a 75 golpes por cara. ....	153
Figura 6.6 Densidad aparente SSD de las probetas compactadas a 75 golpes por cara.....	153
Figura 6.7 Contenido de huecos por el procedimiento geométrico según contenido de PET y tipo de mezcla: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante.....	155
Figura 6.8 Contenido de huecos por el procedimiento SSD según contenido de PET y tipo de mezcla: a) Contenido de huecos de aire en la mezcla; b) Contenido de huecos en el árido mineral; c) Contenido de huecos rellenos con ligante. ....	156
Figura 6.9 Densidad aparente según procedimiento geométrico de probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara.....	157
Figura 6.10 Resistencia a la compactación T (21 Nm/golpe) de probetas cilíndricas compactadas a 75 golpes por cara .....	157
Figura 6.11 Evolución de la densidad aparente de las mezclas conforme al número de golpes aplicados (según tipo de ligante y contenido de PET en mezcla). ....	158
Figura 6.12 Ensayo de rodadura en pista por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos para cada mezcla según contenido de PET: a) $WTS_{(AIR)}$ (mm/1000ciclos); b) PRD% .....	159
Figura 6.13 Probetas tipo placa de mezcla 50/70 con un 1% y un 2% de PET s/peso del árido compactadas mediante rodillo.....	160
Figura 6.14 Resultados del ensayo Marshall según contenido de PET y tipo de mezcla: a) Estabilidad máxima; b) Deformación plástica; c) Cociente Marshall.....	161
Figura 6.15 Resultados del ensayo de sensibilidad al agua según contenido de PET y tipo de mezcla: a) $ITS_d$ en condiciones secas; b) $ITS_w$ en condiciones de saturación; c) $ITSR$ .....	162
Figura 6.16 Valores del módulo de rigidez dinámico obtenido mediante ensayo de tracción indirecta en función del contenido de ligante y tipo de mezcla. ....	165



Figura 7.1 Densidad máxima según procedimiento A: Volumétrico ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ) [UNE-EN 12697-5] (muestras sin compactar).....	168
Figura 7.2 Densidad aparente según procedimiento B: SSD ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ) [UNE-EN 12697-6] (probetas compactadas 2x 75 golpes). .....	169
Figura 7.3 Contenido de huecos de la mezcla, $V_m$ (%) [UNE-EN 12697-8] (probetas compactadas 2x75 golpes). .....	170
Figura 7.4 Contenido de huecos en el árido mineral, VMA (%) [UNE-EN 12697-8] (probetas compactadas 2x75 golpes). .....	170
Figura 7.5 Contenido de huecos rellenos con ligante, VFB (%) [UNE-EN 12697-8] (probetas compactadas 2x 75 golpes). .....	170
Figura 7.6 Estabilidad Marshall, S (kN) [UNE-EN 12697-34] (probetas compactadas 2x 75 golpes). .....	172
Figura 7.7 Deformación plástica, F [UNE-EN 12697-34] (probetas compactadas 2x 75 golpes). .....	172
Figura 7.8 Cociente Marshall S/F [UNE-EN 12697-34] (probetas compactadas 2x 75 golpes). .....	172
Figura 7.9 WTS por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos [UNE-EN 12697-22] (probetas compactadas mediante rodillo). .....	173
Figura 7.10 PRD por el procedimiento B (al aire) en dispositivo pequeño a 60 °C y 10000 ciclos [UNE-EN 12697-22] (probetas compactadas mediante rodillo). .....	173
Figura 7.11 Resistencia a tracción indirecta del subconjunto de probetas secas, $\text{ITS}_d$ [UNE-EN 12697-23] (probetas compactadas 2x50 golpes). .....	175
Figura 7.12 Resistencia a tracción indirecta del subconjunto de probetas saturadas, $\text{ITS}_w$ [UNE-EN 12697-23] (probetas compactadas 2x50 golpes). .....	175
Figura 7.13 Sensibilidad al agua, $\text{ITSR}$ (%) [UNE-EN 12697-23] (probetas compactadas 2x50 golpes). .....	175
Figura 7.14 Módulo de rigidez dinámico, $S_m$ (MPa) obtenido mediante tracción indirecta (IT-CY, factor de carga superficial $k = 0.6$ , a 20 °C [UNE-EN 12697-23] (probetas compactadas 2x75 golpes). .....	176



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Relación de ensayos de caracterización de los materiales componentes de las mezclas bituminosas .....	12
Tabla 1.2 Proceso de fabricación y análisis de las mezclas asfálticas de referencia .....	13
Tabla 2.1 Clasificación de los polímeros empleados como modificadores del betún (Becker et al., 2001).....	29
Tabla 2.2 Características de los polímeros más usados para modificar los betunes (Becker et al., 2001) .....	30
Tabla 2.3 Características del uso del caucho para modificar los betunes (Becker et al., 2001) .	33
Tabla 2.4 Emisiones de gases contaminantes según medio de transporte (Peilong y Zhan, 2011). .....	37
Tabla 2.5 Residuos generados y aplicación en pavimentos asfálticos en Reino Unido (Huang et al., 2007).....	38
Tabla 2.6 Emisiones de gases tóxicos durante la fabricación en planta de las mezclas MBC y MBSC (Peilong y Zhan, 2011).....	38
Tabla 3.1 Litotipos de las Islas Canarias (Fuente: GETCAN-011 [Gobierno de Canarias, 2011]).	45
Tabla 3.2 Propiedades geomecánicas de las rocas de Canarias (Fuente: elaboración propia a partir de datos de GETCAN-011 [Gobierno de Canarias, 2011]).....	46
Tabla 3.3 Propiedades geomecánicas de los materiales piroclásticos de Canarias (Fuente: elaboración propia a partir de datos de GETCAN-011 [Gobierno de Canarias, 2011]).....	46
Tabla 3.4 Principales canteras en explotación actual o en el pasado en todas las islas del archipiélago canario, clasificadas por litotipos .....	50
Tabla 3.5 Ensayos de laboratorio realizados sobre áridos .....	53
Tabla 3.6 Ensayos de laboratorio realizados sobre roca .....	53
Tabla 3.7 Muestras acopiadas para los ensayos de laboratorio. ....	54
Tabla 3.8 Relación de instrumental empleado en cada ensayo de áridos.....	56
Tabla 3.9 Relación de instrumental empleado en cada ensayo de rocas .....	57
Tabla 3.10 Previsión de masa bruta necesaria para la realización de ensayos para cada litotipo .....	59
Tabla 3.11 Numero de ensayos, valor promedio y desviación estándar de las propiedades estudiadas sobre áridos (Fracción 0/4 mm).....	65
Tabla 3.12 Numero de ensayos, valor promedio y desviación estándar de las propiedades estudiadas sobre áridos (Fracción 4/10 mm).....	67
Tabla 3.13 Numero de ensayos, valor promedio y desviación estándar de las propiedades estudiadas sobre áridos (Fracción 10/20 mm).....	68
Tabla 3.14 Clasificación de la meteorización según el ISRM (Brown e ISRM, 1981).....	69

Tabla 3.15 Numero de ensayos, valor promedio y desviación estándar de las propiedades estudiadas sobre roca. ....	70
Tabla 3.16 Resumen de características de los áridos volcánicos analizados según litotipo y estado de alteración. ....	72
Tabla 3.17 Referencias bibliográficas de las propiedades de rocas volcánicas .....	73
Tabla 3.18 Comparativa de los valores del BOPV analizado con respecto a otros áridos comerciales y a los valores de referencia de las especificaciones españolas de la construcción. ....	74
Tabla 3.19 Valores promedio del BOPV de la cantera de la Isleta con respecto a las prescripciones de la normativa de carreteras española PG-3.....	84
Tabla 4.1 Principales características de las fracciones de árido empleado .....	88
Tabla 4.2 Distribución granulométrica del polvo de caucho tras trituración .....	89
Tabla 4.3 Principales características de los ligantes empleados.....	89
Tabla 4.4 Distribución granulométrica del árido empleado conforme al huso granulométrico de una mezcla semidensa AC16 S (PG-3) .....	91
Tabla 4.5 Relación de ensayos realizados con las MB.....	92
Tabla 4.6 Número de muestras y ensayos realizados para la caracterización de las MB .....	93
Tabla 4.7 Parámetros estadísticos de cada propiedad analizada para las mezclas de referencia .....	98
Tabla 4.8 Parámetros estadísticos de cada propiedad analizada para las mezclas con BC35/50 .....	99
Tabla 4.9 Determinación del contenido óptimo de ligante en función del cumplimiento de las especificaciones para cada propiedad analizada. ....	113
Tabla 5.1 Muestras y probetas realizadas según temperatura de mezclado .....	123
Tabla 5.2 Número de ensayos realizados para la caracterización de las MB.....	123
Tabla 5.3 Parámetros estadísticos de las propiedades analizadas para las mezclas calientes (MBC) de referencia .....	124
Tabla 5.4 Parámetros estadísticos de las propiedades analizadas para las mezclas semicalientes (MBSC).....	125
Tabla 5.5 Grado de cumplimiento de las especificaciones de carreteras para capas de rodadura de las mezclas MBSC BC35/50. ....	140
Tabla 6.1 Distribución granulométrica del árido basáltico vacuolar según fracción de acopio	145
Tabla 6.2 Principales características de los ligantes empleados.....	145
Tabla 6.3 Principales características de las partículas de PET de la planta de PLASCAN .....	146
Tabla 6.4 Distribución granulométrica del polvo de PET tras trituración en planta de reciclado .....	146
Tabla 6.5 Dosificación en frío de las distintas fracciones de áridos. ....	147

Tabla 6.6 Distribución granulométrica del árido empleado conforme al huso granulométrico de una mezcla semidensa AC16 S (Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 2014) .....	147
Tabla 6.7 Relación de ensayos realizados con las MB.....	148
Tabla 6.8 Número de muestras y probetas realizadas para la caracterización de las MB con PET según contenido de plástico (s./peso del árido) .....	149
Tabla 6.9 Resultados y parámetros estadísticos de las propiedades de las mezclas con betún 35/50. ....	150
Tabla 6.10 Resultados y parámetros estadísticos de las propiedades de las mezclas con betún 50/70. ....	151
Tabla 6.11 Determinación del contenido óptimo de ligante en función del cumplimiento de las especificaciones para cada propiedad analizada. ....	164
Tabla 7.1 Mezclas desarrolladas en laboratorio para análisis de eco-eficiencia .....	178
Tabla 7.2 Consumo energético inicial de cada material y proceso (MJ/t) .....	179
Tabla 7.3 Consumos de la producción de una mezcla con plástico y caucho (Yu et al.,2014)..	179
Tabla 7.4 Estimación de las emisiones de una mezcla MBSC AC16 surf BC35/50 S .....	180





Reutilización de residuos poliméricos para la  
fabricación de mezclas asfálticas sostenibles con  
áridos volcánicos marginales de Canarias

ANEXO I

Las Palmas de Gran Canaria, 2020





## INDICE

<b>1. DATOS DE ÁRIDOS Y ROCAS VOLCÁNICOS</b> .....	<b>3</b>
1.1 Datos recopilados en informes técnicos sobre áridos y rocas volcánicos .....	5
1.2 Datos recopilados en laboratorio de ensayos con áridos volcánicos .....	13
1.3 Datos recopilados en laboratorio de ensayos con rocas volcánicas .....	21
<b>2. DOSIFICACIONES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS</b> .....	<b>43</b>
2.1 Granulometría adoptada MBC AC 16 surf 35/50 S .....	45
2.2 Granulometría adoptada MBC y MBSC AC 16 surf BC35/50 S .....	46
2.3 Granulometrías adoptadas MBC AC 16 surf 35/50 S +PET.....	47
<b>3. MEZCLAS EN CALIENTE CON BETÚN CAUCHO Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS</b> .....	<b>49</b>
3.1 Densidad máxima de mezclas bituminosas [UNE-EN 12697-5] .....	51
3.2 Densidad aparente de mezclas bituminosas [UNE-EN 12697-6] .....	52
3.3 Contenido de huecos en las probetas bituminosas [UNE-EN 12697-8] .....	53
3.4 Ensayo Marshall [UNE-EN 12697-34] .....	54
3.5 Ensayo de rodadura [UNE-EN 12697-22] .....	55
3.6 Compactibilidad [UNE-EN 12697-10] .....	56
3.7 Sensibilidad al agua [UNE-EN 12697-26].....	57
3.8 Módulo de rigidez dinámico [UNE-EN 12697-8] .....	58
3.9 Resistencia a la fatiga [UNE-EN 12697-24].....	59
3.10 Degradación granulométrica tras el proceso de compactación .....	60
<b>4. MEZCLAS SEMICALIENTES CON BETÚN CAUCHO Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS</b> .....	<b>61</b>
4.1 Densidad máxima de mezclas bituminosas [UNE-EN 12697-5] .....	63
4.2 Densidad aparente de mezclas bituminosas [UNE-EN 12697-6] .....	63
4.3 Contenido de huecos en las probetas bituminosas [UNE-EN 12697-8] .....	64
4.4 Ensayo Marshall [UNE-EN 12697-34] .....	65
4.5 Ensayo de rodadura [UNE-EN 12697-22] .....	66
4.6 Compactibilidad [UNE-EN 12697-10] .....	67
4.7 Sensibilidad al agua [UNE-EN 12697-26].....	68
4.8 Módulo de rigidez dinámico [UNE-EN 12697-8] .....	69
4.9 Resistencia a la fatiga [UNE-EN 12697-24].....	70
<b>5. MEZCLAS EN CALIENTE CON PET Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS</b> .....	<b>71</b>
5.1 Densidad máxima de mezclas bituminosas [UNE-EN 12697-5] .....	73

5.2 Densidad aparente de mezclas bituminosas [UNE-EN 12697-6] .....	74
5.3 Contenido de huecos en las probetas bituminosas [UNE-EN 12697-8] .....	75
5.4 Ensayo Marshall [UNE-EN 12697-34] .....	76
5.5 Ensayo de rodadura [UNE-EN 12697-22] .....	77
5.6 Compactibilidad [UNE-EN 12697-10] .....	78
5.7 Sensibilidad al agua [UNE-EN 12697-26] .....	79
5.8 Módulo de rigidez dinámico [UNE-EN 12697-8] .....	80

# 1 DATOS DE ÁRIDOS Y ROCAS VOLCÁNICOS

---



MUESTRA	FON_R_GC_001	FON_R_GC_002	FON_R_GC_003	FON_R_GC_004	FON_G_GC_003	FON_G_GC_004	FON_G_GC_007	FON_G_GC_008	FON_G_GC_010	FON_G_GC_015	FON_G_GC_016	FON_G_GC_018	FON_G_C_019	FON_G_C_020	
<b>Referencia externa</b>	Grafcan:EGC-014	Gob Can TF: 0119/12	Grafcan:EGC-028	Grafcan:EGC-095	Lopesan:S14-766	Lopesan:S14-751	Lopesan:S14-741	Gob Can: 56/179	Gob Can: 56/505	UTE Sener+La Roche:TGC-SRTC-AN-003	Gob Can: 02/04/1980	UTE Sener+La Roche:TGC-SRTC-AN-003	FSM: DQ.86	FSM: DQ.87	
<b>Datos de cantera origen</b>															
<b>Nombre cantera</b>	Áridos Canarias SL (LOPESÁN)	Áridos Canarias SL (LOPESÁN)	Triasca	Santana Cazorla	Áridos Canarias SL (LOPESÁN)	Áridos Canarias SL (LOPESÁN)	Áridos Canarias SL (LOPESÁN)	Áridos Canarias SL (LOPESÁN)	Áridos Canarias SL (LOPESÁN)	Áridos Canarias SL (LOPESÁN)	Santana Cazorla	Santana Cazorla	Félix Stgo. Melián	Félix Stgo. Melián	
<b>Isla</b>	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	
<b>Litotipo (código GETCAN-011)</b>	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	
<b>Propiedades Roca Matriz (R)</b>															
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uds.</b>													
UNE 103.300/UNE 103.301_Humedad natural. Método de la balanza hidrostática	Peso específico aparente	Mg/m3	2,59												
UNE 103.302_Densidad relativa de las partículas de un suelo	Densidad de partículas	Mg/m3													
UNE-EN 1097-3_Porosidad	Porosidad	%	0,77												
UNE-EN 1925_Coef. Absorción por capilaridad	Absorción por capilaridad	%	0,087												
UNE 22-950-90: 1 Y 3_Ensayo de compresión simple	RCS	MPa	146,16	155,99	137,44	283,1									
UNE 22-950-90:5_Ensayo de carga puntual	Índice de carga puntual	MPa	8,49	7,11	5,15	6,54									
UNE 22-950-90:2_Ensayo Brasileño (Tracción indirecta)	Tracción indirecta	MPa		62,73											
<b>Propiedades áridos</b>															
<b>Fracción del árido</b>					(12/20)	(12/20)	(4/12)	15/25	(12/20)	(6/12)	(5/10)	(10/20)		(4/10)	(0/40)
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uds.</b>													
UNE 146130 (Anexo C)_Determinación de la Limpieza superficial del árido grueso	Coef. limpieza	%													
UNE-EN 1097-6_Determinación de la Densidad de partículas y la absorción de agua	Densidad aparente	Mg/m3						2,56	2,58	2,5	2,57	2,57	2,552	2,59	2,57
	Densidad real	Mg/m3						2,68	2,72	2,69	2,68	2,68		2,66	2,64
	Densidad de partículas s.s.s.	Mg/m3						2,61	2,63	2,57	2,61	2,61		2,62	2,6
	Absorción de agua	%						1,7	1,9	2,8	1,7	1,6	0,14	0,96	1,17
	Índice de lajas	IL											18	1,89	1,21
UNE-EN 933-3_Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas	Índice de lajas	IL							16		15				
UNE-EN 933-5_Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	Partículas trituradas (Cc)	%													
	Partículas redondeadas (Cr)	%													
UNE-EN 1097-2_Determinación de la resistencia a la fragmentación	Los Ángeles	%								6			17,25		
UNE EN 1097-1_Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)	Coefficiente micro-deval	%											8,9		
UNE EN 1097-8_Determinación del coeficiente de pulimento acelerado	PSV														42,6
UNE 7238_Determinación del coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones	Índice de forma												0,4		
UNE-EN 933-8_Ensayo del Equivalente de Arena	Equivalente de arena	EA													1,1
UNE-EN 1097-2_Medida del coef. de friabilidad	Coef. friabilidad														

MUESTRA	FON_G_G C 021	FON_G_G C 022	FON_G_G GC 023	FON_G_G GC 024	FON_G_GC_025	FON_G_GC_026	FON_G_GC_027	FON_G_GC_028	FON_G_GC_029	FON_G_GC_030	FON_G_GC_031	FON_G_GC_032	FON_G_GC_033	FON_S_GC_002	FON_S_GC_003	FON_S_GC_004	FON_S_GC_005	FON_S_GC_006	FON_S_GC_007	FON_S_GC_008					
<b>Referencia externa</b>	FSM: DQ.88	FSM: DQ.89	Gob Can: 56/2727 AB	Gob Can: 56/2721 B	Gob Can: 56/2690	Gob Can: 56/2689	UTE La Roche: Agaete- La Aldea (pag 148)	UTE Sener+La Roche:TGC- SRTC-AN- 003	UTE Sener+La Roche:TGC- SRTC-AN- 003	Gob Can: 24/04/1975	UTE Sener+La Roche:TGC- SRTC-AN- 003	UTE Sener+La Roche:TGC- SRTC-AN- 003	UTE Sener+La Roche:TGC- SRTC-AN- 003	Lopesan:S 14-714	Lopesan:S 14-716	Lopesan:S 14-740	Gob Can: 56/179	Gob Can: 56/4436	Gob Can: 56/506	Gob Can: 56/505					
<b>Datos de cantera origen</b>																									
<b>Nombre cantera</b>	Félix Stgo. Melían	Félix Stgo. Melían	Félix Stgo. Melían	Félix Stgo. Melían	Félix Stgo. Melían	Félix Stgo. Melían	Félix Stgo. Melían	Félix Stgo. Melían	Conasfal	Triasca	Triasca	Martina Cabello Díaz	Cabo Verde	Áridos Canarios SL (LOPESÁN)	Áridos Canarios SL (LOPESÁN)	Áridos Canarios SL (LOPESÁN)	Áridos Canarios SL (LOPESÁN)	Áridos Canarios SL (LOPESÁN)	Áridos Canarios SL (LOPESÁN)	Áridos Canarios SL (LOPESÁN)					
<b>Isla</b>	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC					
<b>Litotipo (código GETCAN-011)</b>	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON	FON					
<b>Propiedades Roca Matriz (R)</b>																									
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>																			<b>Uds.</b>					
UNE 103.300/UNE 103.301_Humedad natural. Método de la balanza hidrostática	Peso específico aparente																			Mg/m3					
UNE 103.302_Densidad relativa de las partículas de un suelo	Densidad de partículas																			Mg/m3					
UNE-EN 1097-3_Porosidad	Porosidad																			%					
UNE-EN 1925_Coef. Absorción por capilaridad	Absorción por capilaridad																			%					
UNE 22-950-90: 1 Y 3_Ensayo de compresión simple	RCS																			MPa					
UNE 22-950-90:5_Ensayo de carga puntual	Índice de carga puntual																			MPa					
UNE 22-950-90:2_Ensayo Brasileño (Tracción indirecta)	Tracción indirecta																			MPa					
<b>Propiedades áridos</b>																									
<b>Fracción del árido</b>	(10/20)	(20/40)	(10/20)	(10/20)	(5/10)	(10/20)	(20/40)	(10/20)	(5/10)	(10/20)			(5/10)	(10/20)	(20/40)			(10/20)	(0/4)	(0/4)	(0/4)	(0/6)	(0/6)	(0/5)	(0/5)
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>																			<b>Uds.</b>					
UNE 146130 (Anexo C)_Determinación de la Limpieza superficial del árido grueso	Coef. limpieza																			%					
UNE-EN 1097-6_Determinación de la Densidad de partículas y la absorción de agua	Densidad aparente																			Mg/m3					
	Densidad real																			Mg/m3					
	Densidad de partículas s.s.s.																			Mg/m3					
	Absorción de agua																			%					
UNE-EN 933-3_Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas	Índice de lajas																			IL					
UNE-EN 933-5_Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	Partículas trituradas (Cc)																			%					
	Partículas redondeadas (Cr)																			%					
UNE-EN 1097-2_Determinación de la resistencia a la fragmentación	Los Ángeles																			%					
UNE EN 1097-1_Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)	Coeficiente micro-deval																			%					
UNE EN 1097-8_Determinación del coeficiente de pulimento acelerado	PSV																								
UNE 7238_Determinación del coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones	Índice de forma																								
UNE-EN 933-8_Ensayo del Equivalente de Arena	Equivalente de arena																			EA					
UNE-EN 1097-2_Medida del coef. de friabilidad	Coef. friabilidad																								



1.1 DATOS RECOPIADOS EN INFORMES TÉCNICOS SOBRE ÁRIDOS Y ROCAS VOLCÁNICOS

MUESTRA	BOPM_R_LP_00 2	BOPM_R_LZ_00 1	BOPM_G_GC_003	BOPM_G_GC_004	BOPM_G_GC_005	BOPM_G_GC_006	BOPM_G_LP_001	BOPM_G_LP_002	BOPM_G_LZ_001	BOPM_G_LZ_006	BOPM_S_LZ_001	BOPM_S_LZ_002	BOPM_F_LZ_001	BOPM_F_LZ_002	BOPM_F_LZ_003	BOPM_G_FV_001	BOPM_G_FV/LZ_001			
<b>Referencia externa</b>	Gob Can_TF: 0078/12	Grafcan: Ficha muestreo ELZ- 14	Puerto:03/15- 5846-111	Gob Can: 03/05/1974	Gob Can: 27/04/1974	UTE Sener+La Roche:TGC- SRTC-AN-003	Gob Can TF: 0038/12	Gob Can_TF: 0077/12	Gob Can: 05/12/1989	Gob Can: 18/01/1990	Gob Can: 03/11/1989	Gob Can: 56/8488	Gob Can: 05/12/1989	Gob Can: 56/8488	Gob Can: 18/01/1990	Gob Can: 56/4622 A/B	Peñate Caballero, R (2007)_Planta 1			
<b>Datos de cantera origen</b>																				
<b>Nombre cantera</b>	Los Pasitos- Llano del Moro	Lanzagrava	Autoridad Portuaria de LP	Roque Ceniciento_La Isleta (Zona Militar)	La Degollada	Roque Ceniciento	Áridos El Riachuelo	Los Pasitos- Llano del Moro	Lanzagrava	HRDROS. Juan Acuña	Lanzagrava	Lanzagrava	Lanzagrava	Lanzagrava	HRDROS. Juan Acuña	Cororasa				
<b>Isla</b>	LP	LZ	GC	GC	GC	GC	LP	LP	LZ	LZ	LZ	LZ	LZ	LZ	LZ	FV	FV/LZ			
<b>Litotipo (código GETCAN-011)</b>	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM			
<b>Propiedades Roca Matriz (R)</b>																				
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>		<b>Uds.</b>																	
UNE 103.300/UNE 103.301_Humedad natural. Método de la balanza hidrostática	Peso específico aparente		Mg/m3		2,88															
UNE 103.302_Densidad relativa de las partículas de un suelo	Densidad de partículas		Mg/m3			2,82														
UNE-EN 1097-3_Porosidad	Porosidad		%		2,93	0,58														
UNE-EN 1925_Coef. Absorción por capilaridad	Absorción por capilaridad		%		0,26															
UNE 22-950-90: 1 Y 3_Ensayo de compresión simple	RCS		MPa		156,5	160,9	81,8													
UNE 22-950-90:5_Ensayo de carga puntual	Índice de carga puntual		MPa		9,824	8,14														
UNE 22-950-90:2_Ensayo Brasileño (Tracción indirecta)	Tracción indirecta		MPa																	
<b>Propiedades áridos</b>																				
<b>Fracción del árido</b>																				
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>		<b>Uds.</b>		<b>Escollera</b>	(20/40)	(5/20)	(40/80)	(20/40)	(4/12)	(10/40)	(2/10)	(3/7)	(0/6)	(3/6)	(0/2)	(0/3)	(0/3)	7/14	(4/10)
UNE 146130 (Anexo C)_Determinación de la Limpieza superficial del árido grueso	Coef. limpieza		%							0,53	0,08									
UNE-EN 1097-6_Determinación de la Densidad de partículas y la absorción de agua	Densidad aparente		Mg/m3			3,16	3,07		2,91	3,41	2,95								2,83	
	Densidad real		Mg/m3			3,18	3,13			2,46	2,66								3,15	2,75
	Densidad de partículas s.s.s.		Mg/m3			3,23	3,27			2,74	2,76								2,91	
	Absorción de agua		%		0,43	0,7	2,1		0,13	11,15	3,64								3,2	2,84
UNE-EN 933-3_Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas	Índice de lajas		IL								8,9									13,8
UNE-EN 933-5_Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	Partículas trituradas (Cc)		%								66,8									82
	Partículas redondeadas (Cr)		%								33,2									
UNE-EN 1097-2_Determinación de la resistencia a la fragmentación	Los Ángeles		%		8	9	13	14,5	14	17,25	35,7									20,7
UNE EN 1097-1_Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)	Coeficiente micro-deval		%																	
UNE EN 1097-8_Determinación del coeficiente de pulimento acelerado	PSV																			0,56
UNE 7238_Determinación del coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones	Índice de forma										18									
UNE-EN 933-8_Ensayo del Equivalente de Arena	Equivalente de arena		EA								80	91	70	68	33	89	56			
UNE-EN 1097-2_Medida del coef. de friabilidad	Coef. friabilidad																			



MUESTRA	BOPM_G_FV/L Z 002	BOPM_G_FV/ LZ 003	BOPM_G_FV/ LZ 004	BOPM_G_FV/ LZ 005	BOPM_G_FV/ LZ 006	BOPM_G_FV/ LZ 007	BOPM_S_FV_00 1	BOPM_S_FV/L Z 001	BOPM_S_FV/L Z 002	BOPM_S_FV/L Z 003	BOPM_S_FV/L Z 004	BOPM_G_LP_00 1	BOPM_G_LP_00 2	BOPM_G_LP_0 05	BOPM_G_LP_0 06	BOPM_G_LP_0 07	BOPM_G_LP_0 08	BOPM_G_LP_0 09	BOPM_G_LP_0 10			
<b>Referencia externa</b>	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 1	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 2	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 3	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 3	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 4	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 4	Gob Can: 56/4523 A/B	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 1	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 2	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 3	Peñate Caballero, R (2007)_Plant a 4	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)			
<b>Datos de cantera origen</b>																						
<b>Nombre cantera</b>	Cororasa																					
<b>Isla</b>	FV/LZ BOPM	FV/LZ BOPM	FV/LZ BOPM	FV/LZ BOPM	FV/LZ BOPM	FV/LZ BOPM	FV BOPM	FV/LZ BOPM	FV/LZ BOPM	FV/LZ BOPM	FV/LZ BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM			
<b>Litotipo (código GETCAN-011)</b>																						
<b>Propiedades Roca Matriz (R)</b>																						
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uds.</b>																				
UNE 103.300/UNE 103.301_Humedad natural. Método de la balanza hidrostática	Peso específico aparente	Mg/m3																				
UNE 103.302_Densidad relativa de las partículas de un suelo	Densidad de partículas	Mg/m3																				
UNE-EN 1097-3_Porosidad	Porosidad	%																				
UNE-EN 1925_Coef. Absorción por capilaridad	Absorción por capilaridad	%																				
UNE 22-950-90: 1 Y 3_Ensayo de compresión simple	RCS	MPa																				
UNE 22-950-90:5_Ensayo de carga puntual	Índice de carga puntual	MPa																				
UNE 22-950-90:2_Ensayo Brasileño (Tracción indirecta)	Tracción indirecta	MPa																				
<b>Propiedades áridos</b>																						
<b>Fracción del árido</b>																						
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uds.</b>	(10/20)	(5/10)	(6/10)	(10/20)	(6/10)	(10/20)	(0/3)	(0/4)	(0/5)	(0/4)	(0/5)				(10/20)	(10/20)	(10/20)	(10/20)		
UNE 146130 (Anexo C)_Determinación de la Limpieza superficial del árido grueso	Coef. limpieza	%																				
UNE-EN 1097-6_Determinación de la Densidad de partículas y la absorción de agua	Densidad aparente	Mg/m3																				
	Densidad real	Mg/m3	2,72	2,79	2,69	2,73	2,74	2,79		2,47	2,54	2,51	2,61	2,85	2,63	2,73	2,65	2,67	2,67	2,69		
	Densidad de partículas s.s.s.	Mg/m3																				
	Absorción de agua	%	2,85	2,73	2,79	2,61	3,48	2,25		5,49	4,98	5,12	4,87	2,54	2,62	2,69	3,3	1,99	1,58	1,38		
UNE-EN 933-3_Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas	Índice de lajas	IL	7	17	29,1	23	15,37	25,59						7	12	10	14					
UNE-EN 933-5_Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	Partículas trituradas (Cc)	%	92	91		96	89	87														
	Partículas redondeadas (Cr)	%																				
UNE-EN 1097-2_Determinación de la resistencia a la fragmentación	Los Ángeles	%	21	19	21	16	17	18						8	11	16	11					
UNE EN 1097-1_Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)	Coefficiente micro-deval	%																				
UNE EN 1097-8_Determinación del coeficiente de pulimento acelerado	PSV		0,57		0,51		0,57															
UNE 7238_Determinación del coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones	Índice de forma																					
UNE-EN 933-8_Ensayo del Equivalente de Arena	Equivalente de arena	EA																				
UNE-EN 1097-2_Medida del coef. de friabilidad	Coef. friabilidad																					
									55	98	98	86	46,86	31,3								

MUESTRA	BOPM_G_LP_0 11	BOPM_G_LP_0 12	BOPM_G_LP_0 13	BOPM_G_LP_0 14	BOPM_G_LP_0 15	BOPM_G_LP_0 16	S_LP_001	S_LP_002	S_LP_003	S_LP_004	S_LP_005	BOPV_R_EH_0 01	BOPV_G_LP_0 01	BOPV_G_LP_0 02	BOPV_G_LP_0 03	BAFM_G_TF_003	BAFM_S_TF_0 02	TRQ_R						
<b>Referencia externa</b>	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	Gob Can TF:0050/12	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	González Vilanova(2007)	Resumen actas Tenaridos	Resumen actas Tenaridos	Gob Ca 0072/1:						
<b>Datos de cantera origen</b>																								
<b>Nombre cantera</b>													Fronpeca	Tenaridos SL (SATOCÁN)			Tenaridos SL (SATOCÁN)	Recicl. Nort Teneri						
<b>Isla</b>	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	LP BOPM	TF BAFM	TF BAFM	T TF						
<b>Litotipo (código GETCAN-011)</b>																								
<b>Propiedades Roca Matriz (R)</b>																								
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uds.</b>																						
UNE 103.300/UNE 103.301_Humedad natural. Método de la balanza hidrostática	Peso específico aparente	Mg/m3																2,97					2,57	
UNE 103.302_Densidad relativa de las partículas de un suelo	Densidad de partículas	Mg/m3																						
UNE-EN 1097-3_Porosidad	Porosidad	%																5,11					3,76	
UNE-EN 1925_Coef. Absorción por capilaridad	Absorción por capilaridad	%																1,05					0,645	
UNE 22-950-90: 1 Y 3_Ensayo de compresión simple	RCS	MPa																181					222,2	
UNE 22-950-90:5_Ensayo de carga puntual	Índice de carga puntual	MPa																8,77					12,88	
UNE 22-950-90:2_Ensayo Brasileño (Tracción indirecta)	Tracción indirecta	MPa																35,66					59,05	
<b>Propiedades áridos</b>																								
<b>Fracción del árido</b>			(10/20)	(5/10)	(5/10)	(5/10)	(5/10)	(5/10)	(0/5)	(0/5)	(0/5)	(0/5)	(0/5)		(10/20)	(10/20)	(10/20)	(10/20)	(4/12)	(0/6)				
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uds.</b>																						
UNE 146130 (Anexo C)_Determinación de la Limpieza superficial del árido grueso	Coef. limpieza	%																						
UNE-EN 1097-6_Determinación de la Densidad de partículas y la absorción de agua	Densidad aparente	Mg/m3	2,68	2,56	2,54	2,54	2,56	2,55	2,97	2,96	2,92	2,93	2,9		2,53	2,54	2,58	2,61	2,71	2,44				
	Densidad real	Mg/m3	2,73	2,64	2,62	2,61	2,63	2,62	2,82	2,8	2,76	2,78	2,75											
	Absorción de agua	%	1,79	3,05	3,01	2,79	2,78	3	2,9	3,11	3,14	2,99	2,99		4,44	3,98	2,34	3,18	3,99	11,6				
UNE-EN 933-3_Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas	Índice de lajas	IL																17	12	13	6,73	7,93		
UNE-EN 933-5_Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	Partículas trituradas (Cc)	%																			90,11	96,79		
	Partículas redondeadas (Cr)	%																			0,04	0		
UNE-EN 1097-2_Determinación de la resistencia a la fragmentación	Los Ángeles	%																22	17	15	16,13	16,08		
UNE EN 1097-1_Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)	Coefficiente micro-deval	%																						
UNE EN 1097-8_Determinación del coeficiente de pulimento acelerado	PSV																				16,11	0,52		
UNE 7238_Determinación del coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones	Índice de forma																							
UNE-EN 933-8_Ensayo del Equivalente de Arena	Equivalente de arena	EA																					77	
UNE-EN 1097-2_Medida del coef. de friabilidad	Coef. friabilidad																							

MUESTRA	TF_001	TRQ_G_TF_001	TRQB_R_LP_00	TRQB_R_TF_00	TRQB_R_TF_00	TRQB_G_TF_001	BES_S_GC_001	BES_G_GC_001	LP_G_GC_001	LP_G_GC_002	LP_G_GC_003	DB_G_GC_001	DB_G_GC_002	DB_G_GC_003
Referencia externa	h TF: 2	Gob Can TF: 0072/12	Gob Can TF: 0038/12	Gob Can TF: 0206/12	Gob Can TF: 0206/12	Gob Can TF: 0206/12	F. Martin Vega: GC2014/801	F. Martin Vega: GC2014/801	Lomoschitz, A et al. (2004) Tabla1	Lomoschitz, A et al. (2004) Tabla1	Lomoschitz, A et al. (2004) Tabla1	Ramos Gil: 004-AGC-01012014	Ramos Gil: 003-AGC-01012014	Ramos Gil: 002-AGC-01012014
<b>Datos de cantera origen</b>														
Nombre cantera	je del e de fe S.L.	Reciclaje del Norte de Tenerife S.L.	Áridos el Riachuelo	TEN-BEL	TEN-BEL	TEN-BEL	F. Martin Vega	F. Martin Vega				Ramos Gil	Ramos Gil	Ramos Gil
Isla	F	TF	LP	TF	TF	TF	GC	GC	GC	IC	IC	GC	GC	GC
Litotipo (código GETCAN-011)	Q	TRQ	TRQB	TRQB	TRQB	TRQB	BES	BES	LPS negro	LPS negro	LPS negro	DB	DB	DB
<b>Propiedades Roca Matriz (R)</b>														
Ensayo	Propiedad		Uds.											
UNE 103.300/UNE 103.301_Humedad natural. Método de la balanza hidrostática	Peso específico aparente	Mg/m3	2,68											
UNE 103.302_Densidad relativa de las partículas de un suelo	Densidad de partículas	Mg/m3												
UNE-EN 1097-3_Porosidad	Porosidad	%												
UNE-EN 1925_Coef. Absorción por capilaridad	Absorción por capilaridad	%												
UNE 22-950-90: 1 Y 3_Ensayo de compresión simple	RCS	MPa												
UNE 22-950-90:5_Ensayo de carga puntual	Índice de carga puntual	MPa												
UNE 22-950-90:2_Ensayo Brasileño (Tracción indirecta)	Tracción indirecta	MPa												
<b>Propiedades áridos</b>														
<b>Fracción del árido</b>														
Ensayo	Propiedad		Uds.											
UNE 146130 (Anexo C)_Determinación de la Limpieza superficial del árido grueso	Coef. limpieza	%												
UNE-EN 1097-6_Determinación de la Densidad de partículas y la absorción de agua	Densidad aparente	Mg/m3												
	Densidad real	Mg/m3												
	Densidad de partículas s.s.s.	Mg/m3												
	Absorción de agua	%												
UNE-EN 933-3_Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas	Índice de lajas	IL												
UNE-EN 933-5_Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	Partículas trituradas (Cc)	%												
	Partículas redondeadas (Cr)	%												
UNE-EN 1097-2_Determinación de la resistencia a la fragmentación	Los Ángeles	%												
UNE EN 1097-1_Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)	Coefficiente micro-deval	%												
UNE EN 1097-8_Determinación del coeficiente de pulimento acelerado	PSV													
UNE 7238_Determinación del coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones	Índice de forma													
UNE-EN 933-8_Ensayo del Equivalente de Arena	Equivalente de arena	EA												
UNE-EN 1097-2_Medida del coef. de friabilidad	Coef. friabilidad													

1.1 DATOS RECOPIADOS EN INFORMES TÉCNICOS SOBRE ÁRIDOS Y ROCAS VOLCÁNICOS

MUESTRA	DB_S_GC_001	DB_S_GC_002	DB_S_GC_003	DB_S_GC_004	DB_F_GC_005		
<b>Referencia externa</b>	Ramos Gil: 001- AGC-01012014	Ramos Gil: 005 AGC-01012014	Ramos Gil: 001- AGC-01012015	Ramos Gil: 005 AGC-01012015	Gob Can: 56/1729		
<b>Datos de cantera origen</b>							
<b>Nombre cantera</b>	Ramos Gil	Ramos Gil	Ramos Gil	Ramos Gil	Ramos Gil		
<b>Isla</b>	GC	GC	GC	GC	GC		
<b>Litotipo (código GETCAN-011)</b>	DB	DB	DB	DB	DB		
<b>Propiedades Roca Matriz (R)</b>							
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uds.</b>					
UNE 103.300/UNE 103.301_Humedad natural. Método de la balanza hidrostática	Peso específico aparente	Mg/m3					
UNE 103.302_Densidad relativa de las partículas de un suelo	Densidad de partículas	Mg/m3					
UNE-EN 1097-3_Porosidad	Porosidad	%					
UNE-EN 1925_Coef. Absorción por capilaridad	Absorción por capilaridad	%					
UNE 22-950-90: 1 Y 3_Ensayo de compresión simple	RCS	MPa					
UNE 22-950-90:5_Ensayo de carga puntual	Índice de carga puntual	MPa					
UNE 22-950-90:2_Ensayo Brasileño (Tracción indirecta)	Tracción indirecta	MPa					
<b>Propiedades áridos</b>							
<b>Fracción del árido</b>		(0/6)	(0/2)	(0/2)	(0/6)	(0/2)	(0/5)
<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uds.</b>					
UNE 146130 (Anexo C)_Determinación de la Limpieza superficial del árido grueso	Coef. limpieza	%					
UNE-EN 1097-6_Determinación de la Densidad de partículas y la absorción de agua	Densidad aparente	Mg/m3					
	Densidad real	Mg/m3					
	Densidad de partículas s.s.s.	Mg/m3	2,6	2,6	2,6	2,5	
	Absorción de agua	%	5	3,3	2,3	3,3	
UNE-EN 933-3_Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas	Índice de lajas	IL					
UNE-EN 933-5_Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso	Partículas trituradas (Cc)	%					
	Partículas redondeadas (Cr)	%					
UNE-EN 1097-2_Determinación de la resistencia a la fragmentación	Los Ángeles	%					
UNE EN 1097-1_Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)	Coefficiente micro-deval	%					
UNE EN 1097-8_Determinación del coeficiente de pulimento acelerado	PSV						
UNE 7238_Determinación del coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones	Índice de forma						
UNE-EN 933-8_Ensayo del Equivalente de Arena	Equivalente de arena	EA	70	70	70	70	75
UNE-EN 1097-2_Medida del coef. de friabilidad	Coef. friabilidad						89

FRACCIÓN 10/20 mm																												
Litotipo	FON FON																											
Cantera	Piedra Grande	Piedra Grande	F.S.M. Gob	Santana Cazorla	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande							
Ref.	Can_GC:04/15	Can_GC:04/15	Can_TF:069/2/15	Can_TF:080/9/15	Can_TF:081/1/15	ON	ON	N 16/20-1	N 16/20-2	N 16/20-3	N 16/20-4	N 10/20-3	N 10/20-4	N 10/20-5														
LIMPIEZA	Indice de limpieza	%L	0,40																		0,73	0,39	0,62	0,03				
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*																			2,74	2,73	2,59	2,56	2,61	2,56		
	dens.aparente	pa	2,66	2,65	2,72	2,69	2,59	2,74	2,73	2,63	2,61	2,62	2,60															
	dens.real	pr	2,61	2,61	2,49	2,57	2,52	2,48	2,43	2,51	2,54	2,56	2,54															
	densidad sss	pssd	2,63	2,63	2,57	2,62	2,55	2,57	2,54	2,55	2,57	2,58	2,56															
	%absorción H2O	%W	0,66	0,60	3,43	1,77	1,18	3,86	4,61	1,86	1,01	0,84	0,77															
Lajas	Indice de lasjas	IL	11,25	14,40	18,02	10,42	17,17	15,53	11,71	10,63	10,57	13,37	14,63	12,46														
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc	99,99	37,8	61,1	61,0	88,69	86,43	78,93	79,72	85,76	69,18																
	Part.redondeadas	Cr	0,11	62,2	38,9	39,0	11,31	13,47	20,97	20,27	14,23	30,80																
Coef. De forma	Coef. Forma	SI																			18,04	23,12						
Micro-Deval	Indice MicroDeval	MDE																			4,4	5	6,6	6	5,4	6	7,8	7,1
Los Angeles	Indice Los Angeles	LA	10,88	24,2	14,1	12,2	11,14	8,72								11,88	12,46	11,83										

FRACCIÓN 4/10 mm																																
Litotipo	FON FON																															
Cantera	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	F.S.M. Gob	Santana Cazorla	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande											
Ref.	Can_GC:05/15	Can_GC:05/16	Can_GC:R5/0-A	Can_GC:R5/0-A	Can_TF:069/2/15	Can_TF:0	Can_TF:0	Can_TF:0	N 4/10-1	N 4/10-1	N 4/10-2	N 4/10-2	N 4/10-3	N 4/10-3	N 4/10-4	N 4/10-4	N 6,3/10-1a	N 6,3/10-1b	N 6,3/10-2a	N 6,3/10-2b	N 4/10-5											
LIMPIEZA	Indice de limpieza	%L	0,24	0,59																			0,70	0,38					0,46	0,41		
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*																			2,57	2,71	2,71	2,57	2,75	2,84	2,63	2,62	2,59	2,66	2,60	2,66
	dens.aparente	pa	2,65	2,64	2,67	2,67	2,65	2,71	2,69	2,61	2,74	2,76	2,62	2,61	2,68	2,64	2,63	2,66	2,73	2,65	2,77											
	dens.real	pr	2,58	2,58	2,56	2,56	2,48	2,52	2,50	2,32	2,47	2,32	2,04																			
	densidad sss	pssd	2,61	2,60	2,60	2,60	2,54	2,59	2,57	2,43	2,57	2,48	2,26	2,49	2,46	2,53	2,61	2,52	2,65	2,69												
	%absorción H2O	%W	0,96	0,98	1,62	1,58	2,55	2,67	2,91	4,91	3,97	6,85	10,82	3,79	4,50	1,88	1,67	1,97	1,67													
Lajas	Indice de lasjas	IL	18	21	14	25	19	22					22	21	25																	
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc	100,0	99,1				65,4	80,7	46,0																						
	Part.redondeadas	Cr	0,10				34,6	19,3	54,0																							
Micro-Deval	Indice MicroDeval	MDE																			10,2	10,14	10,56	9,18	10,16	8,64	10,48	9				
Los Angeles	Indice Los Angeles	LA																			15,94	13,5	15,32	17,49								
Pulimento acelerado	Coef. Pulimento Acelerado	PSV																			48,4	45,1	39,6									

FRACCIÓN 0/4 mm																														
Litotipo	FON FON																													
Cantera	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	F.S.M. Gob	Santana Cazorla	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande	Piedra Grande									
Ref.	Can_GC:05/15	Can_GC:05/1/15	Can_GC:05/1/16	Can_GC:R5/1-A	Can_GC:R5/1-A	Can_TF:0	Can_TF:0	Can_TF:08/11/15	N 0/4-1	N 0/4-1	N 0/4-2	N 0/4-2	N 0/4-3	N 0/4-3	N 0/4-4	N 0/4-4	N 0/4-5	N 0/4-5	N 0/4-5											
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*																			2,59	2,64	2,59	2,59	2,57	2,58	2,68	2,59	2,58	2,68
	dens.aparente	pa	2,64				2,64	2,51	2,61	2,67	2,67	2,82	3,11	2,84	2,77	2,76	2,86	2,94	2,85	2,82	2,98									
	dens.real	pr	2,58				2,11	2,44	2,5	2,5	2,58	2,67	2,92	2,70	2,65	2,63	2,70	2,72	2,57	2,66	2,73									
	densidad sss	pssd	2,61				2,31	2,47	2,54	2,57	2,62	2,72	2,98	2,75	2,69	2,68	2,75	2,79	2,67	2,72	2,82									
	%absorción H2O	%W	0,82				9,47	1,26	1,68	2,49	1,29	2,10	2,12	1,89	1,66	1,82	2,06	2,79	3,80	2,16	3,08									
Friabilidad	Id. Friabilidad	Fr																			23,2	22,8	25	25,2	21,76	22,42	23,28	24,38		
Eq. de arena	Eq. Arena	EA	75,4	77,5	77,1	77,6	74,2	80,0	77,0	83,0	73,2	73,9	61,9	70,2	70,2	82,6	75,4	73,9	78,1	80,0										

FRACCIÓN 10/20 mm																									
Litotipo			IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP			
Cantera	Arguinegú n		Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge			
Muestra	UPLPGC:IG	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO			
	NS 10/20-1	GNS 10/20-1	GNS 10/20-2	GNS 10/20-3	GNS 10/20-4	GNS 10/20-5	GNS 10/20-6	GNS 10/20-7				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
LIMPIEZA	Índice de limpieza	%L										0,79	0,92	0,63	0,67	0,57									
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,03	2,07								2,85	2,93	2,84	2,92	2,81	2,88	2,89	2,89	2,82	2,95	2,95	2,96	2,95	2,92
	dens.aparente	pa	2,16	2,05								2,87	2,95	2,82	2,93	2,84	2,90	2,93	2,97	2,83	2,94	2,96	2,98	2,97	2,94
	dens.real	pr	1,24	1,44								2,39	2,47	2,53	2,45	2,43	2,70	2,77	2,76	2,61	2,74	2,59	2,59	2,59	2,56
	densidad sss	pssd	1,67	1,74								2,56	2,63	2,63	2,61	2,57	2,76	2,83	2,83	2,69	2,81	2,72	2,72	2,72	2,69
	%absorción H2O	%W	34,41	20,80								6,91	6,46	4,10	6,72	5,87	2,57	1,95	2,54	2,99	2,55	4,74	5,14	4,90	5,11
Lajas	Índice de lajas	IL	4,334498								4,12	4,37	2,19	4,96	2,71										
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc									34,42	33,01	27,81	62,71	63,55										
	Part.redondeadas	Cr									65,56	66,98	72,19	37,31	36,35										
Coef. De forma	Coef. Forma	SI									17,32	11,38													
Micro-Deval	Índice MicroDeval	MDE	75,5	71,82	76,24	70,68	74,6	74,4	74,2	74,8	12,6	16,6	16,2	12,8	12,2	16,8	18,2	17							
Los Angeles	Índice Los Angeles	LA	35,54	35,5	34,26	33,68					34,96	36,18	29,42	29,02	26,88										

FRACCIÓN 4/10 mm																								
Litotipo			IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP		
Cantera	Arguinegú n		Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge			
Ref.	UPLPGC:IG	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO			
	NS 4/10-1	GNS 4/10-2	GNS 4/10-3	GNS 4/10-4	GNS 4/10-5	GNS 4/10-6			P 4/10-1	P 4/10-2	P 4/10-3	P 4/10-4	P 4/10-5	P 4/10-6	P 4/10-7	P 4/10-8	P 4/10-9	P 4/10-10						
LIMPIEZA	Índice de limpieza	%L							1,23	1,15	0,94	1,29	1,10											
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,32	2,31	2,26				2,99	2,97	2,89	2,84	2,91	2,99	2,90	2,83	3,00	3,05						
	dens.aparente	pa	2,39	2,39	2,40				3,00	3,00	2,91	2,89	2,95	3,04	2,98	2,92	3,01	3,08						
	dens.real	pr	1,38	1,40	1,36				2,39	2,52	2,19	2,25	2,41	2,84	2,72	2,70	2,78	2,86						
	densidad sss	pssd	1,80	1,81	1,80				2,59	2,68	2,43	2,47	2,59	2,91	2,80	2,78	2,86	2,93						
	%absorción H2O	%W	30,64	29,56	31,66				8,45	6,43	11,37	9,97	7,66	2,36	3,20	2,80	2,71	2,56						
Lajas	Índice de lajas	IL							3,36	3,31	2,79	2,88	3,55											
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc							60,22	73,21	67,36	64,10	48,05											
	Part.redondeadas	Cr							39,14	25,95	32,43	35,68	51,85											
Micro-Deval	Índice MicroDeval	MDE	75,94	78,22	79,52	79,12	78,4	77,2	37,2	36,8	37	36,6	26,1	25,66	25,98	26,26								
Los Angeles	Índice Los Angeles	LA	35,54	35,5	34,26	33,68			34,52															
Pulimento acelerado	Coef. Pulimento Acelerado	PSV																						

FRACCIÓN 0/4-5 mm																									
Litotipo			IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	IGNS	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP	BOP			
Cantera	Arguinegú n		Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	Arguinegú uín	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge			
Ref.	UPLPGC:IG	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:I	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO	UPLPGC:BO				
	NS 0/4-1	GNS 0/4-2	GNS 0/4-3	GNS 0/4-4	GNS 0/4-5	GNS 0/4-6			BO P 0/4-1	BO P 0/4-2	BO P 0/4-3	BO P 0/4-4	BO P 0/4-5	BO P 0/4-6	BO P 0/4-7	BO P 0/4-8	BO P 0/4-9	BO P 0/4-10	BO P 0/4-11	BO P 0/4-12	BO P 0/4-13	BO P 0/4-14a	BO P 0/4-14b	BO P 0/4-15a	BO P 0/4-15b
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,22	2,22					2,62	2,56	2,52	2,51	2,50	2,87	2,90	2,99	3,00	2,87	2,90	2,86	2,88	2,97	3,07	3,10	2,94
	dens.aparente	pa	2,35	2,58					4,28	3,33	3,61	3,95	4,64	66,60	18,96	3,54	3,76	3,90	3,80	3,75	4,20	3,18	3,37	3,27	3,17
	dens.real	pr	1,56	1,53					1,78	1,89	2,20	2,33	2,47	2,75	2,75	3,32	3,55	3,64	3,53	3,81	3,11	3,06	3,26	3,08	2,93
	densidad sss	pssd	1,89	1,94					2,37	2,33	2,59	2,74	2,94	3,71	3,60	3,38	3,61	3,71	3,60	3,06	3,37	3,10	3,29	3,14	3,01
	%absorción H2O	%W	21,62	26,44					32,80	22,81	17,68	17,52	18,95	34,83	31,12	1,93	1,54	1,81	2,02	8,97	8,37	1,19	1,09	1,84	2,53
Friabilidad	Id. Friabilidad	Fr	59,92	52,82	59,00	59,40	54,20	45,40	25,4	25,12	25,38	26,64	25,8	25,48	24,84	26,14	24,82	32,4							
Eq. de arena	Eq. Arena	EA							69,6	70,1	69,2	67,4	64,4	64,8	60,0	63,0	60,5	59,0							

FRACCIÓN 10/20 mm																								
Litotipo			BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	
Cantera			La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	Fronpeca	Fronpeca	Fronpeca	Fronpeca	Morro	Morro	Morro	Morro	Morro	Morro	Morro	
Muestra			U LPGC: BOPV 10/20-1	U LPGC: BOPV 10/20-2	U LPGC: BOPV 10/20-3	U LPGC: BOPV 10/20-4	U LPGC: BOPV 10/20-5	U LPGC: BOPV 10/20-6	U LPGC: BOPV 10/20-7	U LPGC: BOPV 10/20-8	U LPGC: BOPV 10/20-8	U LPGC: BOPV EH 10/20-1	U LPGC: BOPV EH 10/20-1	U LPGC: BOPV EH 10/20-2	U LPGC: BOPV EH 10/20-2	U LPGC: Morro FTV 10/20-1	U LPGC: Morro FTV 10/20-2	U LPGC: Morro FTV 10/20-3	U LPGC: Morro FTV 10/20-4	U LPGC: Morro FTV 10/20-5	U LPGC: Morro FTV 10/20-6	U LPGC: Morro FTV 10/20-7	U LPGC: Morro FTV 10/20-8	
LIMPIEZA	Índice de limpieza	%L	1,89	1,18		1,23	1,03	0,90				0,51		0,00		0,46		0,26						
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,81	2,90	2,91	2,95	2,85	2,79				2,95	2,94	3,02	2,87	2,72	2,80	2,73	2,81					
	dens.aparente	pa	2,88	2,93	2,91	3,11	3,13	2,87				2,97	2,95	2,78	2,89	2,72	2,82	2,73	2,84					
	dens.real	pr	2,39	2,57	2,60	2,69	2,44	2,45				2,39	2,45	2,24	2,48	2,13	2,23	2,21	2,28					
	densidad sss	pssd	2,56	2,69	2,70	2,83	2,66	2,60				2,59	2,62	2,44	2,63	2,35	2,44	2,40	2,48					
	%absorción H2O	%W	7,04	4,82	4,15	5,05	9,02	5,94				8,11	6,89	8,66	5,73	10,19	9,45	8,59	8,58					
Lajas	Índice de lasjas	IL	7,90	2,67		3,48	2,48	3,82				5,71		7,88		2,34		2,61						
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc	38,32	61,04		43,71	61,33	61,76				80,80		54,77		62,32		62,37						
	Part.redondeadas	Cr	61,55	38,52		56,17	38,54	38,07				19,18		45,03		37,76		37,61						
Coef. De forma	Coef. Forma	SI														40,83		16,40						
Micro-Deval	Índice MicroDeval	MDE	10,2	10,6	12,2	14,2	12	14,2	12	8					12,74	13,52	13,8	14,84	14,6	12,76	13,28	13,34		
Los Angeles	Índice Los Angeles	LA	38,28	31,68		30,8	31,76	27,58				20,58		21,06		19,17						20,23	19,89	19,80

FRACCIÓN 4/10 mm																							
Litotipo			BOPV	BOPV								BOPV	BOPV	BOPV									
Cantera												Fronpeca	Fronpeca			Morro	Morro	Morro					
Ref.											U LPGC:B OPV EH 4/10-1	U LPGC:B OPV EH 4/10-2			U LPGC:B OPV FTV 4/10-1	U LPGC:B OPV FTV 4/10-2	U LPGC:BO PV FTV 4/10-3						
LIMPIEZA	Índice de limpieza	%L									1,55	1,89			0,28	0,18	0,14						
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*									2,71	2,96			2,89	2,85	2,88						
	dens.aparente	pa									2,73	3,02			2,90	2,86	2,89						
	dens.real	pr									2,06	2,30			2,29	2,32	2,24						
	densidad sss	pssd									2,30	2,54			2,50	2,51	2,47						
	%absorción H2O	%W									11,99	10,27			9,29	8,18	10,02						
Lajas	Índice de lasjas	IL									27,69	7,58			7,14	8,73	7,23						
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc									38,5	27,5			60,0	57,3	83,7						
	Part.redondeadas	Cr									62,1	72,4			40,0	42,7	16,2						
Micro-Deval	Índice MicroDeval	MDE													14,26	17,84	14,94						
Los Angeles	Índice Los Angeles	LA													20,92								
Pulimento acelerado	Coef. Pulimento Acelerado	PSV																					

FRACCIÓN 0/4 mm																								
Litotipo			BOPV	BOPV								BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	
Cantera												Fronpeca	Fronpeca			Morro	Morro	Morro	Morro	Morro	Morro	Morro	Morro	
Ref.											U LPGC:B OPV EH 0/4-1	U LPGC:B OPV EH 0/4-1			U LPGC:B OPV FTV 0/4-1	U LPGC:B OPV FTV 0/4-2	U LPGC:BO PV FTV 0/4-3							
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*									3,06				2,09	2,06	2,09	2,06	2,07					
	dens.aparente	pa									5,86				2,91	3,01	3,01	3,41	3,04					
	dens.real	pr									2,98				1,28	1,31	1,36	1,32	1,33					
	densidad sss	pssd									3,47				1,84	1,88	1,91	1,93	1,89					
	%absorción H2O	%W									16,46				44,08	43,01	40,45	46,38	42,49					
Friabilidad	Id. Friabilidad	Fr													36	15	19	21	21	41	21	31		
Eq. de arena	Eq. Arena	EA									72,41	62,89			96,4	92,2	82,8	90,8	83,2	78,8	84,5	88,1	92,9	88,3

FRACCIÓN 10/20 mm																						
Litotipo			BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES
Cantera			La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge
Muestra			ULPGC: BOPM 10/20-1	ULPGC: BOPM 10/20-2	ULPGC: BOPM 10/20-3	ULPGC: BOPM 10/20-4	ULPGC: BOPM 10/20-5	ULPGC: BOPM 10/20-6	ULPGC: BOPM 10/20-7	ULPGC: BOPM 10/20-8	ULPGC: BOPM MEH 10/20-1	ULPGC: BES 10/20-1	ULPGC: BES 10/20-1	ULPGC: BES 10/20-2	ULPGC: BES 10/20-2	ULPGC: BES 10/20-3	ULPGC: BES 10/20-3	ULPGC: BES 10/20-4	ULPGC: BES 10/20-4	ULPGC: BES 10/20-5	ULPGC: BES 10/20-5	
LIMPIEZA	Indice de limpieza	%L	0,61	0,78	0,65	0,38	0,50				0,31	1,32		3,19		1,20		0,95		2,78		
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,98	2,95	2,95	2,98	2,97				3,00	2,67	2,53	2,66	2,69	2,63	2,61	2,77	2,56	2,92	2,84	
	dens.aparente	pa	3,04	3,00	2,97	3,02	2,98				3,01	2,68	2,55	2,67	2,73	2,66	2,63	2,80	2,59	2,96	2,86	
	dens.real	pr	2,67	2,61	2,61	2,63	2,53				2,79	2,04	2,00	1,88	1,90	2,08	1,98	2,09	1,96	2,12	2,01	
	densidad sss	pssd	2,79	2,74	2,73	2,76	2,68				2,86	2,28	2,22	2,18	2,21	2,30	2,23	2,34	2,21	2,40	2,31	
	%absorción H2O	%W	4,57	5,05	4,66	4,95	5,96				2,57	11,75	10,72	15,69	15,94	10,52	12,43	12,23	12,38	13,50	14,74	
Lajas	Indice de lajas	IL	6,37	6,72	12,11	13,11	4,70				1,72	2,02		4,50		3,09		3,41		2,09		
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc	68,93	61,20	72,75	81,07	57,36				54,33	19,88		69,80		73,15		45,25		49,78		
	Part.redondeadas	Cr	30,96	38,77	27,24	18,93	42,59				45,65	79,59		29,94		26,84		54,65		49,93		
Coef. De forma	Coef. Forma	SI										15,67		20,35								
Micro-Deval	Indice MicroDeval	MDE	24,4	28,8	31	29	26	25,2	30,4	26,2		31,6	28,4	28,6	34,4	38,4	41,6	32,6	36,4			
Los Angeles	Indice Los Angeles	LA	36,26	35,48	38,02	35,62	37,24				19,68	40,56		42,02		43,52		45		44,16		

FRACCIÓN 4/10 mm																							
Litotipo			BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES		
Cantera			La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge		
Ref.			ULPGC: BES 4/10-1	ULPGC: BES 4/10-2	ULPGC: BES 4/10-3	ULPGC: BES 4/10-4	ULPGC: BES 4/10-5	ULPGC: BES 4/10-6	ULPGC: BES 4/10-7	ULPGC: BES 4/10-8	ULPGC: BES 4/10-9	ULPGC: BES 4/6,3-3a	ULPGC: BES 4/6,3-3b	ULPGC: BES 4/6,3-4a	ULPGC: BES 4/6,3-4b	ULPGC: BES 4/6,3-5a	ULPGC: BES 4/6,3-5b						
LIMPIEZA	Indice de limpieza	%L		1,70	2,25	2,4	0,3	1,1302617															
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*		3,20	2,98	2,96	2,96	2,73						2,89		3,76	2,97	2,84	3,01	3,02	2,87	3,04	2,86
	dens.aparente	pa		2,98	3,01	3,04	3,01	2,77						2,91	2,99	2,99	2,97	2,95	3,06	3,10	2,87	3,07	3,12
	dens.real	pr			1,41	2,10	2,12	2,00										2,44	2,50	2,62	2,42	2,52	2,60
	densidad sss	pssd			1,95	2,41	2,42	2,28										2,61	2,69	2,77	2,58	2,70	2,76
	%absorción H2O	%W			37,49	14,67	13,84	13,78										7,10	7,28	5,89	6,46	7,12	6,42
Lajas	Indice de lajas	IL		2,07	4,00	1,52	1,32	1,14															
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc																					
	Part.redondeadas	Cr																					
Micro-Deval	Indice MicroDeval	MDE		55	52,4	52,4	57	59,2	57	61	60,8												
Los Angeles	Indice Los Angeles	LA		55,56	51,82	55,62	55,64																
Pulimento acelerado	Coef. Pulimento Acelerado	PSV																					

FRACCIÓN 0/4 mm																						
Litotipo			BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	
Cantera			La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	La Esfinge	
Ref.			ULPGC: BES 0/4-1	ULPGC: BES 0/4-1	ULPGC: BES 0/4-2	ULPGC: BES 0/4-2	ULPGC: BES 0/4-3	ULPGC: BES 0/4-3	ULPGC: BES 0/4-4	ULPGC: BES 0/4-4	ULPGC: BES 0/4-5	ULPGC: BES 0/4-5	ULPGC: BES 0/4-5	ULPGC: BES 0/4-5	ULPGC: BES 0/4-6							
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*		1,89	1,93	3,09	3,04	2,99	3,00	2,93	3,03	2,98	2,94	3,08	3,00							
	dens.aparente	pa		2,87	2,70	3,22	3,18	3,08	2,98	3,06	3,22	3,21	3,08	3,23	3,12							
	dens.real	pr		1,94	1,81	2,78	2,72	1,84	2,01	2,98	3,08	2,93	2,72	3,01	2,98							
	densidad sss	pssd		2,26	2,14	2,92	2,86	2,24	2,33	3,01	3,12	3,02	2,83	3,08	3,02							
	%absorción H2O	%W		16,72	18,10	4,91	5,29	21,98	16,27	0,92	1,38	2,92	4,33	2,20	1,52							
Friabilidad	Id. Friabilidad	Fr		12,02	17,2	18,94	16,7	23,34	14,16	17,84	17,3											
Eq. de arena	Eq. Arena	EA		96,7	96,9	95,7	96,2	98,4	97,6	99,5	95,6	97,5	94,8									



FRACCIÓN 10/20 mm			
Litotipo			LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO)
Cantera			La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge
Muestra			ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ROJO ROJO ROJO ROJO ROJO ROJO ROJO ROJO ROJO 10/20-1 10/20-2 10/20-3 10/20-3 10/20-4 10/20-4 10/20-5 10/20-5
LIMPIEZA	Indice de limpieza	%L	0,91 1,03 0,41 0,49
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,09 1,90 2,27 2,17 2,18 2,20
	dens.aparente	pa	2,12 1,91 2,28 2,12 2,18 2,21
	dens.real	pr	1,45 1,39 1,38 1,46 1,40 1,40
	densidad sss	pssd	1,77 1,66 1,78 1,77 1,76 1,77
	%absorción H2O	%W	21,55 19,95 28,54 21,39 25,74 26,08
Lajas	Indice de lajas	IL	5,95 5,00 2,18 2,09
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc	67,92 83,19 60,02 74,90
	Part. redondeadas	Cr	31,97 16,77 39,92 25,03
Coef. De forma	Coef. Forma	SI	23,31 22,50
Micro-Deval	Indice MicroDeval	MDE	25,2 27,8 25,6 25,8 26 25,8 25,4 25
Los Angeles	Indice Los Angeles	LA	35,06 34,56 38,16 37,96 38,32

FRACCIÓN 4/10 mm			
Litotipo			LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO)
Cantera			La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge
Ref.			ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- ROJO 4/10- 1 1 2 2 3 3 4 4 5 5 6 7
LIMPIEZA	Indice de limpieza	%L	0,68 0,39 0,72 1,39 1,42
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,45 2,40 2,43 2,34 2,43 2,33 2,50 2,49 2,55 2,48 2,87
	dens.aparente	pa	2,46 2,41 2,44 2,36 2,44 2,33 2,49 2,51 2,59 2,50 2,87
	dens.real	pr	1,41 1,38 1,42 1,32 1,44 1,37 1,48 1,48 1,47 1,56 1,61
	densidad sss	pssd	1,84 1,81 1,84 1,76 1,85 1,78 1,88 1,89 1,90 1,93 2,05
	%absorción H2O	%W	30,02 30,90 29,65 33,29 28,28 30,24 27,49 27,61 29,38 24,30 27,41
Lajas	Indice de lajas	IL	1,82 1,97 1,76 2,00 2,37
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc	
	Part. redondeadas	Cr	
Micro-Deval	Indice MicroDeval	MDE	57,8 57 58,8 57,8 45,6 46,2 45,4 45,4 56,8 63,1 52,2 55,1
Los Angeles	Indice Los Angeles	LA	31,74 31,8
Pulimento acelerado	Coef. Pulimento Acelerado	PSV	

Litotipo	BES* BES* BES* BES* BES*		LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO) LPS (ROJO)
Cantera	Segovia IES Haria Vecindario Vecindario B San José		La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge La Esfinge
Ref.	ULPGC:BE ULPGC:B ULPGC:B ULPGC:BES ULPGC:BE S* 0/4-A ES* 0/4- ES* 0/4- * 0/4-D S* 0/4-E B C		ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ULPGC: LPS ROJO 0/4-1 ROJO 0/4-1 ROJO 0/4-2 ROJO 0/4-2 ROJO 0/4-3 ROJO 0/4-3 ROJO 0/4-4 ROJO 0/4-4 ROJO 0/4-5 ROJO 0/4-5
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,83 2,67 2,68 2,69 2,71 2,60 2,77 2,58 2,73 2,65
	dens.aparente	pa	3,24 2,79 2,95 3,23 2,91 2,71 3,02 2,70 2,95 2,84
	dens.real	pr	2,03 1,91 2,04 2,24 2,66 2,52 2,88 2,25 2,77 2,64
	densidad sss	pssd	2,40 2,22 2,35 2,55 2,75 2,59 2,92 2,42 2,83 2,71
	%absorción H2O	%W	18,51 16,56 15,24 13,71 3,27 2,71 1,67 7,44 2,13 2,65
Friabilidad	Id. Friabilidad	Fr	63,2 99,33 89,4 53,33 99,73 14,4 14,6 15,8 14,8 15,76 14,94 14,64 15,78
Eq. de arena	Eq. Arena	EA	94,6 93,5 92,2 87,6 89,7 99,2 91,5 96,2 90,2 97,8

FRACCIÓN 10/20 mm																																
Litotipo	LPS (NEGRO)																BOPM															
Cantera	La Esfinge																Roque Centiento															
Muestra	ULPGC: LPS																ULPGC: BOPM															
	NEGRO																Militar															
LIMPIEZA	Indice de limpieza	%L																														
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	1,87	2,15	1,96	1,92	1,94	1,86	1,96	1,88	2,22	2,11	2,03	1,95	2,06	2,07	1,94	3,06	3,03	3,09	3,07	3,09	3,13	3,11	3,13	3,06	3,16					
	dens.aparente	pa	1,86	2,17	1,95	1,92	1,94	1,87	1,97	1,89	2,22	2,12	2,05	1,97	2,07	2,09	1,95	3,17	3,11	3,15	3,15	3,10	3,20	3,15	3,25	3,14	3,20					
	dens.real	pr	1,43	1,60	1,45	1,39	1,31	1,25	1,30	1,30	1,60	1,49	1,48	1,43	1,54	1,47	1,37	2,84	2,81	2,91	2,93	2,89	3,08	2,78	3,14	3,04	3,08					
	densidad sss	pssd	1,66	1,86	1,70	1,67	1,64	1,58	1,64	1,61	1,88	1,79	1,76	1,70	1,80	1,77	1,67	2,94	2,91	2,99	3,00	2,96	3,12	2,90	3,17	3,07	3,12					
	%absorción H2O	%W	16,10	16,52	17,81	19,67	24,58	26,20	26,05	23,98	17,52	19,86	18,87	19,10	16,40	20,00	21,67	3,66	3,36	2,61	2,42	2,30	1,20	4,29	1,08	1,06	1,27					
Lajas	Indice de lajas	IL	2,63	3,63		3,16		3,34		4,59							10,16		8,04		11,09		12,60		11,62							
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc	73,73		53,73		32,81		78,46		84,83							86,98		90,50		89,06		91,96		92,83						
	Part.redondeadas	Cr	26,20		46,26		66,72		21,61		15,13							12,89		9,52		10,95		8,04		7,16						
Coef. De forma	Coef. Forma	SI	15,51		15,50																											
Micro-Deval	Indice MicroDeval	MDE	29	29,6	28,8	29,4	30	26,6	29,8	30,8											20,6	19,6	22,8	21	21,4	20,5	19,7	18,4				
Los Angeles	Indice Los Angeles	LA	45,88	36,32		46,64		49,02		46,1												14,66	13,58	12,64	15,6	16,46	11,96	13,46	16,48	14,48		

FRACCIÓN 4/10 mm																														
Litotipo	LPS (NEGRO)													BOPM																
Cantera	La Esfinge													Roque Centiento																
Ref.	ULPGC: LPS													ULPGC: BOPM																
	NEGRO													Militar																
LIMPIEZA	Indice de limpieza	%L																												
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	1,96	1,86	2,01	1,93	1,94	1,93	2,13	1,94	2,03	1,94	2,01	1,85	3,09	3,10	3,03	3,24	3,04	3,09	3,02	2,93	3,05	2,95						
	dens.aparente	pa	1,98	1,87	2,03	1,95	1,98	1,98	1,99	2,00	2,04	1,99	2,13	1,88	3,16	3,11	3,08	3,03	3,06	3,19	3,13	3,06	3,18	3,07						
	dens.real	pr	1,23	1,06	1,33	1,15	1,21	1,34	1,31	1,31	1,22	1,23	1,34	1,25	2,84	2,83	2,67	2,77	2,80	2,97	2,92	2,87	2,98	2,88						
	densidad sss	pssd	1,61	1,49	1,67	1,56	1,60	1,66	1,65	1,65	1,62	1,61	1,71	1,59	2,94	2,92	2,80	2,86	2,89	3,04	2,99	2,93	3,05	2,94						
	%absorción H2O	%W	30,89	41,26	25,81	35,40	31,79	23,87	25,89	26,38	32,96	30,82	27,67	26,87	3,60	3,17	5,04	3,13	3,04	2,33	2,27	2,16	2,09	2,12						
Lajas	Indice de lajas	IL	1,61	2,36	2,14	1,91	1,08														22,28	23,96	18,30	22,71	19,50					
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc														94,84	82,78	72,13	84,91											
	Part.redondeadas	Cr														5,52	17,22	27,87	14,95											
Micro-Deval	Indice MicroDeval	MDE	60,8	64,6	62,4	61,6	64	62	64,6	61,2											23,96	23,6	26,66	21,86	21,28	23,22	21,76	22,26		
Los Angeles	Indice Los Angeles	LA	31,98	33,58	27,04	29,96	26,88											19,82	16,56	19	16,56	22,46								
Pulimento acelerado	Coef. Pulimento Acelerado	PSV																												

FRACCIÓN 0/4-6 mm																															
Litotipo	LPS (NEGRO)													BOPM																	
Cantera	La Esfinge													Roque Centiento																	
Ref.	ULPGC: LPS													ULPGC: BOPM																	
	NEGRO													Militar																	
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,42	2,41	2,46	2,44	2,42	2,48	2,41	2,39	2,46	2,40	2,35	2,29	2,89	2,88	2,87	2,90	2,88	2,78	2,92	2,94	2,81	2,86	2,83						
	dens.aparente	pa	2,48	2,37	2,54	2,50	2,47	2,53	2,32	2,40	2,51	2,47	2,40	2,36	4,02	3,94	3,24	3,39	3,66	3,70	3,64	3,75	3,35	3,33	2,97						
	dens.real	pr	1,84	1,98	2,16	2,08	2,03	2,09	2,21	2,14	2,08	1,99	1,90	1,78	2,58	2,66	2,68	2,80	3,48	3,40	3,43	3,55	3,22	3,11	1,70						
	densidad sss	pssd	2,10	2,15	2,31	2,25	2,21	2,27	2,26	2,24	2,25	2,18	2,11	2,03	2,94	2,98	2,86	2,97	3,53	3,48	3,49	3,60	3,26	3,18	2,13						
	%absorción H2O	%W	13,97	8,27	6,98	8,02	8,87	8,26	2,02	5,09	8,40	9,72	11,04	13,66	13,93	12,30	6,41	6,19	1,39	2,39	1,66	1,49	1,19	2,07	25,29						
Friabilidad	Id. Friabilidad	Fr	14,28	12,88	10,24	12,82	11,42	13,62	10,46	11,36											35,6	30,58	33,86	18,04	20,84	20,66	21,98	29,8	29,32	31,88	29,96
Eq. de arena	Eq. Arena	EA	100	100	99,3	93,7	98,4	100,0	97,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	63,5	68,4	70,6	66,4	71,0	75,0	79,0	77,0	81,0	69,7							

<b>FRACCIÓN 10/20 mm</b>																	
Litotipo		BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	
Cantera		Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	
Ref.		ULPGC:BOP	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	
Muestra		M La Aldea 10/20-1	PM La Aldea 10/20-2	PM La Aldea 10/20-3	M La Aldea 10/20-4	M La Aldea 10/20-5	BOPM La 10/20-6	BOPM La 10/12,5-16:1	La Aldea 8- 10/12,5-16:2	La Aldea 8- 10/12,5-16:3	BOPM La >16:1	BOPM La >16:2	BOPM La >16:3	BOPM La >16:4	BOPM La >16:5	BOPM La >16:6	BOPM La >16:7
LIMPIEZA	Índice de limpieza	%L															
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,77	2,77	2,79	2,78	2,74	2,77									
	dens.aparente	pa	2,96	2,92	2,99	2,92	2,87	2,95									
	dens.real	pr	2,56	2,58	2,58	2,60	2,62	2,53									
	densidad sss	pssd	2,69	2,69	2,72	2,71	2,70	2,67									
	%absorción H2O	%W	5,30	4,52	5,29	4,26	3,32	5,69									
Lajas	Índice de lajas	IL															
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc															
	Part.redondeadas	Cr															
Coef. De forma	Coef. Forma	SI															
Micro-Deval	Índice MicroDeval	MDE	55,2	61	59,2	57,6	56,4				49,0	50,8	55,6	49,2	49,8	47,3	56,1
Los Angeles	Índice Los Angeles	LA	35,98	33,94	33,24	35,34	35,36	35,52	29,56	33,94	23,52	26,21	27,58				

<b>FRACCIÓN 4/10 mm</b>																		
Litotipo		BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*		
Cantera		Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea		
Ref.		ULPGC:BOP	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO		
Muestra		M La Aldea 4/10-1	PM La Aldea 4/10-2	PM La Aldea 4/10-3	M La Aldea 4/10-4	M La Aldea 4/10-5	M La Aldea 4/10-6	M La Aldea 4/10-7	La Aldea 8	La Aldea 4/10-9	M La Aldea 4/10-10	M La Aldea 4/10-11	M La Aldea 4/10-12	M La Aldea 4/10-13	M La Aldea 4/10-14	M La Aldea 4/10-15	M La Aldea 4/10-16	
LIMPIEZA	Índice de limpieza	%L																
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,73	2,77	2,68	2,81	2,77	2,84	2,72	2,72	2,74	2,76						
	dens.aparente	pa	2,92	2,98	2,94	3,03	2,98	3,05	2,96	2,96	2,98	3,01						
	dens.real	pr	2,47	2,51	2,50	2,43	2,45	2,42	2,42	2,38	2,35	2,41						
	densidad sss	pssd	2,62	2,67	2,65	2,63	2,63	2,62	2,60	2,57	2,56	2,61						
	%absorción H2O	%W	6,33	6,38	6,00	8,13	7,18	8,62	7,50	8,27	9,06	8,30						
Lajas	Índice de lajas	IL	6,06	6,87	7,06													
Caras de fractura	Part. Trituradas	Cc																
	Part.redondeadas	Cr																
Micro-Deval	Índice MicroDeval	MDE	67,36	67,32	68,42	67,56	63,4	65,4	64,8	64,2	68,2	66	65,6	62,82	63,4	62,2	64,8	64,6
Los Angeles	Índice Los Angeles	LA																
Pulimento acelerado	Coef. Pulimento Acelerado	PSV																

<b>FRACCIÓN 0/4 mm</b>																
Litotipo		BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*	BOPM*
Cantera		Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea	Túnel de La Aldea
Ref.		ULPGC:BOP	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO	ULPGC:BO
Muestra		M La Aldea 0/4-1	PM La Aldea 0/4-2	PM La Aldea 0/4-3	M La Aldea 0/4-4	M La Aldea 0/4-5	M La Aldea 0/4-6	La Aldea 7	La Aldea 8	La Aldea 0/4-8						
Densidad	dens.part. Presecadas	pa*	2,70	2,58	2,73	2,68	2,66	2,78	2,71	2,74						
	dens.aparente	pa	2,99	2,83	2,99	2,96	2,87	3,00	2,98	2,98						
	dens.real	pr	2,35	2,38	2,57	2,48	2,51	2,65	2,47	2,59						
	densidad sss	pssd	2,56	2,54	2,71	2,64	2,64	2,77	2,64	2,72						
	%absorción H2O	%W	9,10	6,62	5,53	6,55	5,08	4,30	7,02	5,02						
Friabilidad	Id. Friabilidad	Fr	24,94	26,28	28,12	25,48	27,54	25,82	26,62	27,74	32,25	29,6	27,2	25,8		
Eq. de arena	Eq. Arena	EA														





1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	33	34	35	36	37	38	39	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	
Cantera	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC	Roque centenito GC		
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																															
<b>A) Geología</b>																															
<b>1) Litología</b> (BOPM, IGNS; LPZ, etc.)	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM
<b>2) Grado de alteración</b> (I, II, III; IV, V, VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
<b>3) Número de diaclasas</b> (No; algunas; muchas)	No	Algunas	No	Algunas	No	No	Algunas	Algunas	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Algunas	No	No	No	No	No	No	No	No	
<b>4) Tipo de diaclasas</b> (Cerradas; abiertas; rellenas)	-	Cerradas	-	Cerradas	-	-	Cerradas	Cerradas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cerradas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>5) Porosidad</b> (Si; No)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	
<b>6) Tamaño de poros (diam.)</b> (<2mm; 2-6mm; >6mm)	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm		
<b>7) Fábrica</b> (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo		
<b>8) Ángulo fábrica-base probeta</b> (0º; 45º; 90º)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
<b>9) Ángulo fuerza-fábrica</b> (0º; 90º)	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	
<b>2) DENSIDAD:</b>																															
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																															
<b>1) M1 (g)</b>	302,4	231,3	187,9	148,9	172,4	170,1	171,6	217,0	234,5	174,1	178,1	171,5	126,0	130,8	144,5	153,3	140,7	126,1	160,2	252,5	242,2	214,6	211,6	237,0	182,0	175,8	172,4	174,2	168,6	175,5	
<b>2) M2 - M3 (g)</b>	207,4	159,6	128,9	103,0	120,8	117,0	121,5	152,2	163,4	119,2	125,3	118,8	85,4	89,1	100,1	103,4	98,4	85,9	109,5	174,0	167,3	145,5	144,1	164,8	125,2	121,9	120,5	118,4	117,2	119,2	
<b>3) M4 (g)</b>	300,8	229,9	187,2	148,3	171,0	168,9	170,4	215,4	233,2	172,1	177,3	170,0	125,5	129,9	143,9	152,5	140,0	125,5	159,5	251,4	241,1	213,7	210,6	236,1	181,2	174,9	171,2	173,3	167,9	174,8	
<b>4) RW (g/cm3)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
<b>5) F<sub>a</sub> (g/cm3)</b>	<b>3,22</b>	<b>3,27</b>	<b>3,21</b>	<b>3,27</b>	<b>3,41</b>	<b>3,25</b>	<b>3,48</b>	<b>3,41</b>	<b>3,34</b>	<b>3,25</b>	<b>3,41</b>	<b>3,32</b>	<b>3,13</b>	<b>3,18</b>	<b>3,29</b>	<b>3,11</b>	<b>3,37</b>	<b>3,17</b>	<b>3,19</b>	<b>3,25</b>	<b>3,27</b>	<b>3,13</b>	<b>3,17</b>	<b>3,31</b>	<b>3,24</b>	<b>3,30</b>	<b>3,38</b>	<b>3,16</b>	<b>3,31</b>	<b>3,14</b>	
<b>6) F<sub>a4</sub> (g/cm3)</b>	3,17	3,21	3,17	3,23	3,31	3,18	3,40	3,32	3,28	3,13	3,36	3,23	3,09	3,12	3,24	3,06	3,31	3,12	3,15	3,20	3,22	3,09	3,12	3,27	3,19	3,24	3,30	3,11	3,27	3,10	
<b>7) F<sub>a48</sub> (g/cm3)</b>	3,18	3,23	3,18	3,24	3,34	3,20	3,43	3,35	3,30	3,17	3,37	3,25	3,10	3,14	3,25	3,07	3,33	3,14	3,16	3,22	3,23	3,11	3,13	3,28	3,20	3,26	3,32	3,12	3,28	3,12	
<b>8) WA<sub>24</sub> (%)</b>	0,5	0,6	0,4	0,4	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	1,2	0,5	0,9	0,4	0,7	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,7	0,5	0,4	0,4	
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																															
<b>A) Datos del ensayo:</b>																															
<b>1) Fuerza (kN)</b>																															
<b>2) Sección probeta (mm<sup>2</sup>)</b>																															
<b>3) Compresión (Mpa=N/mm<sup>2</sup>)</b>																															
<b>4) Recorrido (mm)</b>																															
<b>5) Ángulo fuerza-plano rotura</b> (0º; 30º; 45º)																															
<b>6) Validez del ensayo</b> (Si; No)																															
<b>7) Fábrica</b> (Anisótropo; Isótropo)																															
<b>8) Ángulo F-fábrica</b> (0º; 30º; 45º; 90º)																															

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	64	65	66	67	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	113	114	115	28	29	30	31	32						
Cantera	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	Roque	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea						
Ísla	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC						
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																																					
<b>1) Geología</b>																																					
1) Usos (BOPM, IGNS, LPZ, etc.)	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM			
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	III	III	III	III	III	III				
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)	No	No	No	No	No	No	Si, una	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si, una	No	No	No	No	No	Si	Si	No	Si	Si	Si				
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenadas)	-	-	-	-	-	-	Cerrada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cerrada	-	-	-	-	-	Abiertas	Cerradas	-	Cerradas	Rellenas						
5) Porosidad (Si; No)	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No					
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm						
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo						
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0º; 45º; 90º)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No					
9) Ángulo fuerza-fábrica (0º; 90º)	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º					
<b>2) DENSIDAD:</b>																																					
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																																					
1) M1 (g)	167,1	168,5	168,8	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	169,4	231,00	238,80	215,20	190,80	182,10
2) M2 - M3 (g)	113,7	118,7	117,0	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3	115,3
3) M4 (g)	166,4	167,9	167,7	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8	168,8
4) FW (g/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5) F1 (g/cm3)	3,16	3,41	3,31	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16		
6) F2 (g/cm3)	3,12	3,37	3,24	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12	3,12		
7) F3 (g/cm3)	3,13	3,38	3,26	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13		
8) WA 24 (%)	0,4	0,4	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4		
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																																					
<b>A) Datos del ensayo:</b>																																					
1) Fuerza (kN)																																					
2) Sección probeta (mm2)																																					
3) Compresión (MpaN/mm2)																																					
4) Recorrido (mm)																																					
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)																																					
6) Validez del ensayo (Si; No)																																					
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																																					
8) Ángulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)																																					





1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	211	276	277	277	278	279	279	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	380	388	389	390	391	392		
Cantera	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC		
Isla	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC		
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																															
<b>1.1) Geología</b>																															
1) Litología (BOPM; IGNS; LPZ, etc.)	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPM	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV
2) Grado de alteración (I; II; III; IV; V; VI)	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)	Si, muchas	Si, muchas	Si, muchas	Si, muchas	Si, muchas	Si, muchas	Si, muchas	Algunas	No	Algunas	No	Algunas	No	No	Algunas	Algunas	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
4) Tipo de diaclasas (Cerradas; abiertas; rellenas)	Rellenas (Carbonato)	Rellenas (Carbonato)	Rellenas (Carbonato)	Rellenas (Carbonato)	Rellenas (Carbonato)	Rellenas (Carbonato)	Rellenas (Carbonato)	Cerradas	-	Cerradas	-	Abiertas	-	-	Abiertas	Abiertas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5) Porosidad	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-5mm; >5mm)	< 2 mm	< 2 mm	< 2 mm	< 2 mm	< 2 mm	< 2 mm	< 2 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	<2 mm	<2 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0°; 45°; 90°)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
9) Ángulo fuerza-fábrica (0°; 90°)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
<b>2) DENSIDAD:</b>																															
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																															
1) M1 (g)	217,63	332,50	151,70	119,50	182,70	265,80	253,60	802,7	788,8	829,7	821,3	805,0	801,1	812,4	814,8	850,4	804,6	812,8	807,3	822,6	785,0	765,9	799,5	329,6	248,1	432,6	260,6	378,0	149,6		
2) M2 - M3 (g)	141,08	214,60	100,20	76,50	119,00	171,50	164,70	501,8	489,4	518,0	509,6	497,6	497,1	507,3	500,6	525,5	498,4	510,5	502,7	514,0	485,8	476,1	497,3	204,4	154,2	269,0	161,7	233,7	93,5		
3) M4 (g)	216,07	330,10	150,40	117,80	181,70	264,60	251,80	763,5	751,3	788,9	783,2	765,0	760,5	770,0	775,4	809,2	764,3	773,8	767,0	780,1	744,9	728,6	757,9	312,8	236,8	410,5	246,7	359,8	142,3		
4) $\rho_w$ (g/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5) $F_c$ (g/cm3)	2,88	2,86	3,00	2,85	2,90	2,84	2,89	2,92	2,87	2,91	2,86	2,86	2,89	2,93	2,82	2,85	2,87	2,94	2,90	2,93	2,87	2,89	2,89	2,91	2,89	2,87	2,90	2,90	2,85	2,92	
6) $F_{rel}$ (g/cm3)	2,82	2,80	2,92	2,74	2,85	2,81	2,83	2,54	2,51	2,53	2,51	2,49	2,50	2,52	2,47	2,49	2,50	2,56	2,52	2,53	2,49	2,51	2,51	2,50	2,52	2,51	2,49	2,49	2,49	2,54	
7) $F_{rel}$ (g/cm3)	2,84	2,82	2,95	2,78	2,87	2,82	2,85	2,67	2,63	2,66	2,63	2,62	2,64	2,66	2,59	2,62	2,63	2,69	2,65	2,67	2,62	2,64	2,65	2,63	2,64	2,64	2,63	2,62	2,62	2,67	
8) $WA_{34}$ (%)	0,73	0,73	0,86	1,44	0,55	0,45	0,71	5,1	5,0	5,2	4,9	5,2	5,3	5,5	5,1	5,1	5,3	5,0	5,3	5,4	5,4	5,1	5,5	5,4	4,8	5,4	5,6	5,1	5,1	5,1	
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																															
<b>A) Datos del ensayo:</b>																															
1) Fuerza (kN)	82,6							34,40	26,34	42,75	33,16	69,41	56,78	64,97	29,52	34,19	40,52	50,13	50,72	61,17	69,41	39,91	71,63								
2) Sección probeta (mm2)	2290,22	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	15,02	11,50	18,66	14,48	30,31	24,79	28,37	12,89	14,93	17,69	21,89	22,15	26,71	30,31	17,43	31,28								
4) Recorrido (mm)	-							2,07	1,62	2,15	2,30	2,24	1,86	1,86	1,50	1,90	2,10	1,93	2,26	2,04	2,24	1,92	2,02								
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0°; 30°; 45°)	-							0-30°	0-30°	30°	0-30°	30°	0-30°	0-30°	0-30°	45°	?	30°	0-30°	30°	0-30°	0°	0°								
6) Validez del ensayo (S; No)	No							Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si								
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo							Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo								
8) Ángulo F-fábrica (0°; 30°; 45°; 90°)	-							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	502	503	504	505	560	
Cantera	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	GC	GC	GC	GC	GC	
1) DESCRIPCIÓN																														
a) Geología																														
1) <b>Usos</b> (BDPM, IGNS, LPZ, etc.)	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV
2) <b>Grado de alteración</b> (I, II, III, IV, V, VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
3) <b>Número de diaclasas</b> (No, algunas, muchas)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
4) <b>Tipo de diaclasas</b> (cerradas; abiertas; rellenadas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5) <b>Porosidad</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
6) <b>Tamaño de poros (diam.)</b> (<2mm ; 2-6mm; >6mm)	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	
7) <b>Fábrica</b> (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	
8) <b>Ángulo fábrica-base probeta</b> (No; 0°; 45°; 90°)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
9) <b>Ángulo fuerza-fábrica</b> (0°; 90°)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	
2) DENSIDAD:																														
a) de las partículas y abs. H2O																														
1) <b>M1 (g)</b>	245,7	178,9	283,3	191,5	199,4	139,2	191,3	273,4	180,3	105,6	198,5	99,7	187,2	137,5	149,4	81,2	148,0	141,3	209,2	124,2	229,6	295,8	95,8	137,9	650,4	661,6	702,3	351,2	853,3	
2) <b>M2 - M3 (g)</b>	152,9	110,6	176,1	119,5	122,9	86,4	118,7	169,5	111,5	64,9	122,8	61,5	115,5	84,6	92,9	50,2	92,0	88,2	129,4	77,5	142,4	184,5	59,3	85,2	398,9	397,1	429,9	210,5	553,8	
3) <b>M4 (g)</b>	233,2	169,9	269,0	183,3	188,4	132,8	181,3	260,0	170,6	100,0	187,5	95,1	177,1	131,1	141,6	77,1	140,5	134,4	197,8	118,6	217,4	281,3	91,1	130,7	643,8	652,6	694,1	348,5	841,2	
4) <b>FW (gr/cm3)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5) <b>Fa (gr/cm3)</b>	2,90	2,87	2,90	2,87	2,88	2,86	2,90	2,87	2,89	2,85	2,90	2,83	2,88	2,82	2,91	2,87	2,90	2,91	2,89	2,89	2,90	2,86	2,87	2,87	2,63	2,55	2,63	2,53	2,93	
6) <b>Fd (gr/cm3)</b>	2,51	2,49	2,51	2,55	2,46	2,52	2,50	2,50	2,48	2,46	2,48	2,49	2,47	2,48	2,51	2,49	2,51	2,53	2,48	2,54	2,49	2,53	2,50	2,48	2,56	2,47	2,55	2,48	2,81	
7) <b>Fsd (gr/cm3)</b>	2,65	2,62	2,64	2,66	2,61	2,64	2,63	2,62	2,59	2,62	2,61	2,61	2,60	2,64	2,62	2,64	2,66	2,66	2,62	2,66	2,63	2,66	2,62	2,62	2,59	2,50	2,58	2,50	2,85	
8) <b>WA 24 (%)</b>	5,4	5,3	5,3	4,5	5,8	4,8	5,5	5,2	5,7	5,6	5,9	4,8	5,7	4,9	5,5	5,3	5,3	5,1	5,8	4,7	5,6	5,2	5,2	5,5	1,03	1,38	1,18	0,77	1,44	
3) ERCS (compresión simple):																														
a) Datos del ensayo:																														
1) <b>Fuerza (kN)</b>																										132,3	197,8			
2) <b>Sección probeta (mm2)</b>																										2290,22	2290,22			
3) <b>Compresión (MpaN/mm2)</b>																										57,77	86,37			
4) <b>Recorrido (mm)</b>																														
5) <b>Ángulo fuerza-plano rotura</b> (0°; 30°; 45°)																										0° a 30°	0°			
6) <b>Validez del ensayo</b> (Sí; No)																										Sí	Sí			
7) <b>Fábrica</b> (Anisótropo; Isótropo)																										ANISÓTROPA	ANISÓTROPA			
8) <b>Ángulo F-Fábrica</b> (0°; 30°; 45°; 90°)																										45°	45°			

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589
Cantera	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC
1) DESCRIPCIÓN																													
1) Geología																													
1) Usotipo	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV
2) Grado de alteración																													
3) Número de diaclasas																													
4) Tipo de diaclasas																													
5) Porosidad																													
6) Tamaño de poros (diam.)																													
7) Fábrica																													
8) Ángulo fábrica-base probeta																													
9) Ángulo fuerza-fábrica																													
2) DENSIDAD:																													
a) de las partículas y abs. H2O																													
1) M1 (g)	790,4	815,9	875,8	798,3	829,7	804,3	315,3	323,1	359,6	266,1	319	282	167,2	242,3	260,8	351	219,9	175	196,1	168,9	168,7	140,7	172,3	216,7	160,8	158	170,1	102,1	119
2) M2 - M3 (g)	496,4	510,5	564,3	495,1	525,6	494,4	198,9	204,4	225,8	165,9	193,3	177,8	105,9	145,7	157,8	200,2	136,6	113,8	116,1	99,5	97,1	82,3	99,7	129,4	104,2	93,3	108,4	58,6	71
3) M4 (g)	774,6	803,3	862,4	783,5	817	782,6	309,7	319	352,6	257,9	311,1	276,5	164,8	234,7	255,3	344,6	214,4	172,5	189,7	162,3	164,5	136,2	165,5	210,4	158,6	153,3	167,5	96,5	116,6
a) fw (gr/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5) Fa (gr/cm3)	2,78	2,74	2,89	2,72	2,80	2,72	2,80	2,78	2,78	2,80	2,64	2,80	2,80	2,64	2,62	2,39	2,76	2,94	2,58	2,58	2,44	2,53	2,52	2,60	2,92	2,56	2,83	2,55	2,56
6) Fnd (gr/cm3)	2,63	2,63	2,77	2,58	2,69	2,53	2,66	2,69	2,64	2,57	2,47	2,65	2,69	2,43	2,48	2,29	2,57	2,82	2,37	2,34	2,30	2,33	2,28	2,41	2,80	2,37	2,71	2,22	2,43
7) Fnd (gr/cm3)	2,69	2,67	2,81	2,63	2,73	2,60	2,71	2,72	2,69	2,66	2,54	2,71	2,73	2,51	2,53	2,33	2,64	2,86	2,45	2,43	2,36	2,41	2,37	2,48	2,84	2,44	2,76	2,35	2,48
8) WA <sub>24</sub> (%)	2,04	1,57	1,55	1,89	1,55	2,77	1,81	1,29	1,99	3,18	2,54	1,99	1,46	3,24	2,15	1,86	2,57	1,45	3,37	4,07	2,55	3,30	4,11	2,99	1,39	3,07	1,55	5,80	2,06
3) ERCS (compresión simple):																													
a) Datos del ensayo:																													
1) Fuerza (kN)	99,3	147,7	67,79	95,98	158	138,5																							
2) Sección probeta (mm2)	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22																							
3) Compresión (MpaN/mm2)	43,36	64,49	29,60	41,91	68,99	60,47																							
4) Recorrido (mm)			1,58	2,58																									
5) Ángulo fuerza-plano rotura	0º a 30º	0º a 30º	30º	0º a 30º	0º a 30º	0º a 30º																							
6) Validez del ensayo	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ																							
7) Fábrica	ANISÓTropa	ANISÓTropa	ANISÓTropa	ANISÓTropa	ANISÓTropa	ANISÓTropa																							
8) Ángulo F-fábrica	45º	45º	45º	45º	45º	45º																							

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	590	591	1	2	3	4	5	6	21	22	23	24	25	26	567	563	565	582	11	12	13	14	15	16	17	379	381	382	383	384	385		
Cantera	GC	GC	Volcan Gairía FV	Volcan Gairía FV	Volcan Gairía FV	Volcan Gairía FV	Volcan Gairía FV	Volcan Gairía FV	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	Lomo Bayuyo FV	Lomo Bayuyo FV	Lomo Bayuyo FV	Lomo Bayuyo FV	Lomo Bayuyo FV	Lomo Bayuyo FV	Lomo Bayuyo FV	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC		
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																																	
<b>1) Geología</b>																																	
1) Usotipo (BDPM, IGNS, LPZ, etc.)	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)			I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	II	II	II	II	II	II	
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)																										No	No	No	No	No	No		
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)																										-	-	-	-	-	-		
5) Porosidad (Si; No)																										Si	Si	Si	Si	Si	Si		
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)																										2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm		
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																										Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo		
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0º; 45º; 90º)																										No	No	No	No	No	No		
9) Ángulo fuerza-fábrica (0º; 90º)																										0º	0º	0º	0º	0º	0º		
<b>2) DENSIDAD:</b>																																	
<b>a) de las partículas y abs. H2O</b>																																	
1) M1 (g)	88,6	82,5	257,8	281,4	114,7	248,6	67,1	115,4	83,60	100,60	76,70	56,90	52,60	47,90	95,90	98,50	69,60	78,60		337,4	378,5	324,8	146	107,2	162,2	525,4	189,7	224,4	113,2	171,6	166,7	208,1	
2) M2 - M3 (g)	56,6	49,6	165,9	186,4	76	162,9	44,6	74,8	53,00	65,30	49,10	36,50	34,60	31,20	61,80	63,80	44,80	50,00		218	243,2	209,1	94,5	69,9	105,3	334,1	117,7	139,3	70,4	106,3	103,5	129,4	
3) M4 (g)	87,3	80,5	250,6	279,5	114,1	245,1	66,8	113	82,40	99,30	75,50	55,80	52,00	47,30	94,20	97,30	69,00	76,90		329	368,1	317,4	141,6	104,9	159	509,9	180,2	212,5	107,6	163,0	158,3	197,8	
4) FW (g/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5) F1 (g/cm3)	2,84	2,61	2,96	3,00	2,99	2,98	3,01	2,96	2,80	2,92	2,86	2,89	2,99	2,94	2,91	2,90	2,85	2,86		2,96	2,95	2,93	3,01	3,00	2,96	2,90	2,88	2,90	2,89	2,87	2,89	2,89	
6) Fd (g/cm3)	2,73	2,45	2,73	2,94	2,95	2,86	2,97	2,78	2,69	2,81	2,74	2,74	2,89	2,83	2,76	2,80	2,78	2,69		2,76	2,72	2,74	2,75	2,81	2,79	2,67	2,50	2,50	2,51	2,50	2,50	2,51	
7) Fsd (g/cm3)	2,77	2,51	2,81	2,96	2,96	2,90	2,98	2,84	2,73	2,85	2,78	2,79	2,92	2,87	2,81	2,84	2,81	2,75		2,83	2,80	2,81	2,83	2,87	2,85	2,75	2,63	2,64	2,64	2,63	2,64	2,64	
8) WA 24 (%)	1,49	2,48	2,9	0,7	0,5	1,4	0,4	2,1	1,46	1,31	1,59	1,97	1,15	1,27	1,80	1,23	0,87	2,21		2,55	2,83	2,33	3,11	2,19	2,01	3,04	5,3	5,6	5,2	5,3	5,3	5,2	
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																																	
<b>a) Datos del ensayo:</b>																																	
1) Fuerza (kN)																																	
2) Sección probeta (mm2)																											2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	
3) Compresión (MpaN/mm2)																																	
4) Recorrido (mm)																																	
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)																																	
6) Validez del ensayo (Si; No)																																	
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																																	
8) Ángulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)																																	

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	386	387	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	559	226	227	228	229	230	231	232	
Cantera	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	Morro Frisco FV	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	
Isla																															
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																															
<b>1) Geología</b>																															
1) Litología (BOPM; IGNS; LPZ; etc.)	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV
2) Grado de alteración (I; II; III; IV; V; VI)	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)	No	No														No	No	No	No	No	No	No	No	Si, una	No	No	No	No	No	Si, una	No
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)	-	-														-	-	-	-	-	-	-	-	Abierta	-	-	-	-	-	Abierta	-
5) Porosidad	SI	SI														SI	SI						SI	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)	2-6 mm	2-6 mm														>6 mm	>6 mm						>6 mm	>6 mm	>6 mm	>6 mm	>6 mm	>6 mm	>6 mm	>6 mm	>6 mm
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Isótropo														Anisótropo	Anisótropo					Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0º; 45º; 90º)	No	No														0º	0º					0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º
9) Ángulo fuerza-fábrica (0º; 90º)	0º	0º														0º	0º					0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º
<b>2) DENSIDAD:</b>																															
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																															
1) M1 (g)	231,0	154,0	714,9	687,8	650	686,6	287,5	180	111,6	188	161,9	121,2	134,6	133,9	131,1	132,5	136,2	141,4	126,7	134	80,3	66,8	140,2	145,88	145,88	145,88	145,88	145,88	145,88	145,88	145,88
2) M2 - M3 (g)	142,9	95,5	407,3	385,3	359,2	391,1	159,5	102	61,3	108,2	88,2	68,2	73,4	77,1	71,6	74,6	75,3	76,8	69,2	72,7	44,5	39	84,5	88,27	88,27	88,27	88,27	88,27	88,27	88,27	88,27
3) M4 (g)	219,0	145,8	633,9	610,6	607	608,7	274,6	173	101,2	170	144,3	110,6	121,3	128,6	117,4	127	122,4	127,4	112,9	118,7	72,4	63,2	137,6	137,75	137,75	137,75	137,75	137,75	137,75	137,75	137,75
4) RW (gr/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5) F <sub>1</sub> (gr/cm3)	2,88	2,90	2,80	2,71	2,45	2,80	2,39	2,44	2,54	2,75	2,57	2,61	2,53	2,50	2,56	2,42	2,60	2,52	2,58	2,58	2,59	2,61	2,59	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78
6) F <sub>2</sub> (gr/cm3)	2,49	2,49	2,06	2,02	2,09	2,06	2,15	2,22	2,01	2,13	1,96	2,09	1,98	2,26	1,97	2,19	2,01	1,97	1,96	1,94	2,02	2,27	2,47	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	
7) F <sub>3</sub> (gr/cm3)	2,62	2,63	2,32	2,27	2,24	2,32	2,25	2,31	2,22	2,36	2,20	2,29	2,20	2,36	2,20	2,29	2,24	2,19	2,20	2,19	2,24	2,40	2,52	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	
8) WA <sub>24</sub> (%)	5,5	5,6	12,78	12,64	7,08	12,80	4,70	4,05	10,28	10,59	12,20	9,58	10,96	4,12	11,67	4,33	11,27	10,99	12,22	12,89	10,91	5,70	1,89	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90	
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																															
<b>A) Datos del ensayo:</b>																															
1) Fuerza (kN)			19,89	17,75	14,58	19,34																									
2) Sección probeta (mm <sup>2</sup> )	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22																									
3) Compresión (Mpa=N/mm <sup>2</sup> )			8,68	7,75	6,37	8,44																									
4) Recorrido (mm)			1,02	0,76	1,01	0,82																									
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)			30º	30º	45º	45º																									
6) Validez del ensayo (Si; No)			SI	SI	SI	SI																									
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)			ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA																									
8) Ángulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)			NO	NO	NO	NO																									

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	233	234	235	236	237	238	88	90	91	92	93	95	96	97	98	99	100	101	103	94	501	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Cantera	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea																La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea		
Isla	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC		
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																																	
<b>1) Descripción</b>																																	
1) litología	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BOPV	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BAFM	BPLM	BPLM	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	II	II	II	II	II	II	I	I	I	I	I	I	I	I	II	II	II	II	II	II	II	I	I	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Algunas	No	Algunas	No	No	No	Algunas	Algunas	Algunas	Algunas	Algunas	No	SI	Algunas	Algunas	SI	No	No	SI	SI	SI	No	
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenadas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Rellenas	-	Rellenas	-	-	-	Abiertas	Abiertas	Cerradas	Cerradas	-	Abiertas	Rellenas	Abiertas	Abiertas	-	-	Abiertas	Abiertas	Abiertas	-		
5) Porosidad (SI, No)	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI, Rellenos	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)	2 - 6 mm	2 - 6 mm	2 - 6 mm	2 - 6 mm	2 - 6 mm	2 - 6 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo		
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0º; 45º; 90º)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	90º	45º	90º	90º	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
9) Ángulo fuerza-fábrica (0º; 30º)	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	
<b>2) DENSIDAD:</b>																																	
<b>a) de las partículas y abs. H2O</b>																																	
1) M1 (g)	107,60	169,20	124,70	96,00	141,50	236,30	290,2	382,4	193,1	148,3	460,2	2089,3	3454,7	701,5	3528,8	521,8	2948,6	321,4	248,4	2091,6	314,3	802,80	744,40	793,40	725,30	730,50	712,80	218,90	212,20	216,20	215,40		
2) M2 - M3 (g)	67,00	102,80	74,90	59,80	85,10	140,00	194,5	255,9	129,7	99,5	308,9	1403,5	2242,8	453,8	2313,6	322,1	1813,5	196,1	155,5	1404,7	208,2	488,70	451,20	478,40	435,70	436,60	424,10	133,20	125,40	130,90	129,90		
3) M4 (g)	101,20	161,30	119,50	90,50	133,20	220,80	288,5	380,1	191,9	147,1	458,1	2079,0	3403,4	687,2	3488,0	482,3	2728,7	294,2	233,2	2079,8	310,0	765,60	709,70	755,80	686,90	692,80	672,30	209,60	198,50	205,90	204,20		
a) $\rho_w$ (g/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5) $\rho_a$ (g/cm3)	2,96	2,76	2,68	2,95	2,77	2,73	3,07	3,06	3,09	3,09	3,07	3,08	2,93	2,94	2,97	3,01	2,98	3,00	3,00	3,08	3,05	3,08	2,76	2,75	2,72	2,73	2,70	2,71	2,74	2,72	2,75	2,75	
6) $\rho_f$ (g/cm3)	2,49	2,43	2,40	2,50	2,36	2,29	3,01	3,00	3,03	3,01	3,03	3,03	2,81	2,77	2,87	2,42	2,40	2,35	2,51	3,03	2,92	2,44	2,42	2,40	2,37	2,36	2,33	2,45	2,29	2,41	2,39		
7) $\rho_{ad}$ (g/cm3)	2,65	2,55	2,50	2,65	2,51	2,45	3,03	3,02	3,05	3,04	3,04	3,05	2,85	2,83	2,90	2,61	2,60	2,57	2,67	3,04	2,96	2,56	2,54	2,52	2,50	2,49	2,47	2,55	2,44	2,53	2,52		
8) $W_A$ 24 (%)	6,32	4,90	4,35	6,08	6,23	7,02	0,6	0,6	0,6	0,8	0,5	0,5	1,5	2,1	1,2	8,2	8,1	9,2	6,5	0,6	1,4	4,86	4,89	4,97	5,59	5,44	6,02	4,44	6,90	5,00	5,48		
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																																	
<b>A) Datos del ensayo:</b>																																	
1) Fuerza (kN)												866,2	791,8		756,7		149,6			487,2			30,0	39,4	49,8	16,5	41,6	43,2					
2) Sección probeta (mm2)	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22						3970,35	5808,80		5808,80		5808,80			3970,35			2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	
3) Compresión (Mpa-N/mm2)												218,17	136,31		130,27		25,75			122,7			13,1	17,2	21,7	7,2	18,2	18,9					
4) Recorrido (mm)																																	
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)															0-30º	0-30º				0-30º	0º		30º	30º	0º	30º	0º	10º					
6) Validez del ensayo (SI, No)												SI	SI		SI					SI			SI	SI	SI	SI	SI	SI					
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)												Isótropo	Isótropo		Isótropo					Isótropo			Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo					
8) Ángulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)																																	

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	147	150	151	153	267	268	269	270	271	272	90	872	1153	1136	1145			
Cantera	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	La Aldea	GC1 Puerto Rico	GC1 Puerto Rico	GC1 Puerto Rico	GC1 Puerto Rico	GC1 Puerto Rico			
Isla	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC		
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																																			
<b>1) Geología</b>																																			
1) Litología	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	BES	
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)	Si	No	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	Si	No	No	No	Una	No	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)	Rellenas	-	-	Abiertas	Abiertas	-	-	-	-	-	-	-	-	Abiertas	-	-	-	Abierta	-	Abiertas	Rellenas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5) Porosidad (Si; No)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)	<2 mm	<2 mm	<2 mm	-	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<1 mm	<1 mm	<1 mm	<1 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm		
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo		
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0°; 45°; 90°)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
9) Ángulo fuerza-fábrica (0°; 90°)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°		
<b>2) DENSIDAD:</b>																																			
<b>a) de las partículas y abs. H2O</b>																																			
1) M1 (g)	213,70	209,10	196,50	213,00	184,90	204,50	149,00	155,10	153,30	154,20	148,40	159,90	144,10	154,60	150,00	113,20	145,90	311,35					362,30	128,40	203,20	199,50	234,80	739,90	753,1	1218,3	1878,4	1828	1819,2		
2) M2 - M3 (g)	129,80	124,10	118,10	128,60	111,80	122,70	87,80	93,40	91,20	90,70	86,60	94,90	85,10	91,10	88,40	68,10	88,10	189,75				218,10	79,60	128,20	120,10	142,10	450,40	449,1	737,6	1129,7	1092,2	1086,1			
3) M4 (g)	203,90	197,90	186,50	202,40	175,00	192,70	138,70	146,70	143,70	144,00	140,50	150,50	135,40	146,40	140,40	107,20	138,80	302,98				351,30	123,60	199,80	195,40	227,70	720,10	749,1	1206,6	1876,6	1810	1805			
4) Fw (g/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
5) Fa (g/cm3)	2,75	2,68	2,73	2,74	2,77	2,75	2,72	2,75	2,74	2,70	2,61	2,71	2,69	2,65	2,70	2,74	2,74	2,68				2,64	2,81	2,79	2,59	2,66	2,67	2,50	2,57	2,51	2,52	2,51	2,51		
6) Fd (g/cm3)	2,43	2,33	2,38	2,40	2,39	2,36	2,27	2,38	2,31	2,27	2,27	2,32	2,29	2,31	2,28	2,38	2,40	2,49				2,44	2,53	2,66	2,46	2,46	2,49	2,46	2,51	2,51	2,46	2,46	2,46		
7) Fsa (g/cm3)	2,55	2,46	2,51	2,52	2,53	2,50	2,43	2,51	2,47	2,43	2,40	2,46	2,44	2,43	2,44	2,51	2,52	2,56				2,51	2,63	2,71	2,51	2,53	2,56	2,48	2,53	2,51	2,48	2,48	2,48		
8) WA <sub>24</sub> (%)	4,81	5,66	5,36	5,24	5,66	6,12	7,43	5,73	6,68	7,08	5,62	6,25	6,43	5,60	6,84	5,60	5,12	2,76				3,13	3,88	1,70	2,10	3,12	2,75	0,5	1,0	0,1	1,0	0,8	0,8		
<b>3) ERCs (compresión simple):</b>																																			
<b>a) Datos del ensayo:</b>																																			
1) Fuerza (kN)																																			
2) Sección probeta (mm <sup>2</sup> )																																			
3) Compresión (MpaN/mm <sup>2</sup> )																																			
4) Recorrido (mm)																																			
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0°; 30°; 45°)																																			
6) Validez del ensayo (Si; No)																																			
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																																			
8) Ángulo F-Fábrica (0°; 30°; 45°; 90°)																																			

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	1151	1156	1158	1159	1160	1154	1155	1157	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	
Cantera	GCI Puerto Rico GC	GCI Puerto Rico GC	GCI Puerto Rico GC	GCI Puerto Rico GC	GCI Puerto Rico GC	GCI Puerto Rico GC	GCI Puerto Rico GC	GCI Puerto Rico GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	Bco. Fataga GC	
Isla																												
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																												
<b>1) Geología</b>																												
1) Usado	IGS VERDE	IGS VERDE	IGS VERDE	IGS VERDE	IGS VERDE	IGS BLANCA	IGS BLANCA	IGS BLANCA	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja	IGS roja
2) Grado de alteración (I; II; III; IV; V; VI)	II	II	II	II	II	II	II	II	No	No	No	No	No	No	No	Algunas	No	Algunas	No	No	No	Algunas	No	No	II	II	II	II
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)																Abiertas	-	Abiertas	-	-	-	Cerradas	-	-	-	-	-	-
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)																Abiertas	-	Abiertas	-	-	-	Cerradas	-	-	-	-	-	-
5) Porosidad (Si; No)									Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm ; 2-6mm; >6mm)									2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	<2 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	2-6 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	2-6 mm	Heterométrica
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)									Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0°; 45°; 90°)									No	No	90°	90°	No	0°	No	No	90°	90°	90°	No	No	No	No	0°	No	90°	90°	
9) Ángulo fuerza-fábrica (0°; 90°)									0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
<b>2) DENSIDAD:</b>																												
<b>a) de las partículas y abs. H2O</b>																												
1) M1 (g)	1927,4	1789,4	1800,3	1771,7	1862,6	1618,6	1667,2	1724,5	448,7	337,7	308,6	375,8	270,4	110,3	473,1	105,6	174,6	128,6	167,9	115,1	240,2	125,1	125,6	87,2	113,0	111,1	119,7	
2) M2 - M3 (g)	1181,8	1061	1071,2	1052,7	1132,8	894,6	940	991,8	241,2	182,2	164,7	201,8	147,4	59,7	251,2	53,7	90,6	68,7	91,4	60,5	127,7	59,6	67,0	46,7	60,9	60,2	65	
3) M4 (g)	1922,1	1773,5	1780,7	1756,8	1855,6	1497,5	1587	1693,9	404,6	303,2	277,0	339,2	244,1	97,9	425,0	87,0	153,0	114,5	151,8	102,8	213,3	98,1	111,3	77,3	100,0	99,5	107,3	
4) FW (gr/cm <sup>3</sup> )	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5) F <sub>a</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	2,60	2,49	2,51	2,50	2,57	2,48	2,45	2,41	2,48	2,51	2,47	2,47	2,52	2,56	2,45	2,61	2,45	2,50	2,51	2,43	2,49	2,55	2,51	2,53	2,56	2,53	2,54	
6) F <sub>rd</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	2,58	2,43	2,44	2,44	2,54	2,07	2,18	2,31	1,95	1,95	1,92	1,95	1,98	1,93	1,92	1,68	1,82	1,91	1,98	1,88	1,90	1,50	1,91	1,91	1,92	1,95	1,96	
7) F <sub>rsd</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	2,59	2,46	2,47	2,46	2,55	2,24	2,29	2,35	2,16	2,17	2,14	2,16	2,20	2,18	2,13	2,03	2,08	2,15	2,19	2,11	2,14	1,91	2,14	2,15	2,17	2,18	2,19	
8) WA <sub>24</sub> (%)	0,3	0,9	1,1	0,8	0,4	8,1	5,1	1,8	10,9	11,4	11,4	10,8	10,8	12,7	11,3	21,4	14,1	12,3	10,6	12,0	12,6	27,5	12,8	12,8	13,0	11,7	11,6	
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																												
<b>a) Datos del ensayo:</b>																												
1) Fuerza (kN)	392,3	155,8	141,7	200,2	211,8	50,9	80,8	102,4																				
2) Sección probeta (mm <sup>2</sup> )	4003,9	3970,4	3981,5	3981,5	3981,5	3970,4	3981,5																					
3) Compresión (MpaN/mm <sup>2</sup> )	98,0	38,9	35,7	50,3	53,2	12,8	20,4	25,7																				
4) Recorrido (mm)																												
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0°; 30°; 45°)	30	30	30	30	30	30	30	30																				
6) Validez del ensayo (Si; No)																												
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																												
8) Ángulo F-Fábrica (0°; 30°; 45°; 90°)																												



1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	102	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177
Cantera	Bco. Fataga	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas	Aruacas
Isla	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																														
<b>1) Geología</b>																														
<b>1.1) Usolito</b> (IDPM, IGS, LPZ, etc.)	IGS roja	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris
<b>2) Grado de alteración</b> (I, II, III, IV, V, VI)	II	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
<b>3) Número de diaclasas</b> (No, algunas, muchas)	Algunas	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
<b>4) Tipo de diaclasas</b> (cerradas; abiertas; rellenas)	Cerradas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>5) Porosidad</b> (Si; No)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
<b>6) Tamaño de poros (diam.)</b> (<2mm; 2-6mm; >6mm)	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	2-6 mm	<2 mm	2-6 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	2-6 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	2-6 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	2-6 mm
<b>7) Fábrica</b> (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo
<b>8) Ángulo fábrica-base probeta</b> (No; 0°; 45°; 90°)	No	No	0°	90°	90°	0°	0°	0°	0°	0°	90°	0°	No	0°	0°	No	No	0°	90°	0°	0°	0°	0°	0°	90°	90°	90°	90°	90°	0°
<b>9) Ángulo fuerza-fábrica</b> (0°; 90°)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
<b>2) DENSIDAD:</b>																														
<b>a) de las partículas y abs. H2O</b>																														
<b>1) M1 (g)</b>	455,2	748,5	751,0	820,1	827,5	749,4	772,0	767,4	762,1	756,5	819,1	753,9	759,8	761,6	739,8	313,8	305,9	198,9	309,1	211,9	313,5	122,9	318,0	140,3	171,3	143,5	161,8	177,5	143,3	221,6
<b>2) M2 - M3 (g)</b>	240,9	436,5	438,3	481,5	484,3	437,5	451,7	446,7	442,6	441,3	480,4	439,3	444,8	443,1	429,7	184,8	179,0	117,1	181,2	124,3	183,2	72,6	184,6	83,0	101,2	84,0	95,5	104,6	84,4	130,3
<b>3) M4 (g)</b>	403,2	730,1	731,6	801,8	811,6	728,4	751,7	746,7	743,2	738,2	803,4	736,8	742,7	741,1	721,5	307,3	299,7	192,7	302,6	205,5	307,1	120,0	310,4	135,9	167,3	139,3	156,9	173,1	138,7	216,7
<b>a) FW (gr/cm3)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>5) F<sub>a</sub> (gr/cm3)</b>	2,48	2,49	2,49	2,50	2,48	2,50	2,51	2,49	2,47	2,49	2,48	2,49	2,49	2,49	2,47	2,51	2,48	2,55	2,49	2,53	2,48	2,53	2,47	2,57	2,53	2,52	2,56	2,53	2,55	2,51
<b>6) F<sub>d</sub> (gr/cm3)</b>	1,88	2,34	2,34	2,37	2,36	2,34	2,35	2,33	2,33	2,34	2,37	2,34	2,36	2,33	2,33	2,38	2,36	2,36	2,37	2,35	2,36	2,39	2,33	2,37	2,39	2,34	2,37	2,37	2,35	2,37
<b>7) F<sub>sd</sub> (gr/cm3)</b>	2,12	2,40	2,40	2,42	2,41	2,40	2,41	2,39	2,39	2,40	2,42	2,40	2,41	2,39	2,39	2,43	2,41	2,43	2,42	2,42	2,41	2,44	2,38	2,45	2,44	2,41	2,44	2,43	2,43	2,43
<b>8) WA<sub>24</sub> (%)</b>	12,9	2,5	2,7	2,3	2,0	2,9	2,7	2,8	2,5	2,5	2,0	2,3	2,3	2,8	2,5	2,1	2,1	3,2	2,1	3,1	2,1	2,4	2,4	3,2	2,4	3,0	3,1	2,5	3,3	2,3
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																														
<b>a) Datos del ensayo:</b>																														
<b>1) Fuerza (kN)</b>	174,0	241,0	298,5	109,6	192,7	245,4	157,9	91,2	177,6	200,9	179,7	235,0	191,5	104,0																
<b>2) Sección probeta (mm2)</b>	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22																
<b>3) Compresión (MpaN/mm2)</b>	75,98	105,23	130,34	47,86	84,14	107,15	68,95	39,82	77,55	87,72	78,46	102,61	83,62	45,41																
<b>4) Recorrido (mm)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																
<b>5) Ángulo fuerza-plano rotura</b> (0°; 30°; 45°)	30°	45°	0°	0°	0°	45°	0°	0°	30°	30°	30°	0°	0°	0°																
<b>6) Validez del ensayo</b> (Si; No)	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si																
<b>7) Fábrica</b> (Anisótropo; Isótropo)	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo																
<b>8) Ángulo F-fábrica</b> (0°; 30°; 45°; 90°)	90°	90°	0°	0°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°																

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	498	499	500	104
Cartera	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas	Arucas
Isla	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC
1) DESCRIPCIÓN																														
1) Genética																														
1) Utilidad (IGPM, IGS, LPZ, etc.)	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris	IGS gris
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3) Número de diaclasas (No, algunas, muchas)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
4) Tipo de diaclasas (cerradas, abiertas, rellenas)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Cerradas	-	-	-
5) Porosidad (Si, No)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	2-6 mm	<2 mm	<2 mm	2-6 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm	2-6 mm	<2 mm	<2 mm	<2 mm
7) Fábrica (Anisótropo, Isótropo)	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo
8) Ángulo fábrica-base probeta (No, 0º; 45º; 90º)	0º	90º	90º	No	0º	90º	No	0º	No	90º	0º	90º	0º	90º	No	90º	90º	90º	90º	90º	90º	90º	0º	90º	45º	90º	45º	No	90º	0º
9) Ángulo fuerza-fábrica (0º; 90º)	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º
2) DENSIDAD:																														
A) de las partículas y abs. H2O																														
1) M1 (g)	199,4	169,3	127,0	166,2	172,5	146,9	132,2	154,2	152,8	153,5	175,5	226,8	198,0	163,3	245,2	182,3	168,1	178,7	161,5	167,0	180,5	131,5	329,4	140,4	309,5	132,3	301,1	165,7	170,7	658,1
2) M2 - M3 (g)	117,4	99,6	75,1	98,1	100,7	86,7	77,5	91,1	90,2	90,6	103,8	133,9	116,7	96,2	143,9	107,3	99,2	105,5	94,6	98,1	106,5	77,9	192,2	82,4	181,4	77,9	175,8	97,1	102,2	358,9
3) M4 (g)	194,9	164,4	123,6	162,6	166,7	142,4	128,6	149,6	149,3	150,0	171,2	222,1	193,9	158,8	239,9	178,2	164,3	174,5	157,4	162,8	175,9	128,6	320,9	135,8	301,2	128,2	289,9	155,1	164,1	609,5
a) $\rho_w$ (g/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5) $F_{10}$ (g/cm3)	2,51	2,54	2,55	2,52	2,53	2,56	2,52	2,56	2,53	2,53	2,54	2,52	2,51	2,54	2,50	2,51	2,52	2,53	2,51	2,52	2,53	2,54	2,49	2,54	2,51	2,55	2,54	2,67	2,65	2,43
6) $F_{10}$ (g/cm3)	2,38	2,36	2,38	2,39	2,32	2,37	2,35	2,37	2,38	2,38	2,39	2,39	2,38	2,37	2,37	2,38	2,38	2,38	2,38	2,35	2,36	2,38	2,40	2,34	2,34	2,35	2,36	2,31	2,26	2,40
7) $F_{10d}$ (g/cm3)	2,43	2,43	2,45	2,44	2,40	2,44	2,42	2,44	2,44	2,44	2,45	2,44	2,44	2,43	2,42	2,43	2,44	2,44	2,41	2,42	2,44	2,45	2,40	2,42	2,42	2,43	2,40	2,42	2,49	2,20
8) $W_{24}$ (%)	2,3	3,0	2,8	2,2	3,5	3,2	2,8	3,1	2,3	2,3	2,5	2,1	2,1	2,8	2,2	2,3	2,3	2,4	2,6	2,6	2,6	2,3	2,6	3,4	2,8	3,2	3,9	6,8	4,0	8,0
3) ERCS (compresión simple):																														
A) Datos del ensayo:																														
1) Fuerza (kN)																														
2) Sección probeta (mm2)																														
3) Compresión (Mpa=N/mm2)																														
4) Recorrido (mm)																														
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)																														
6) Validez del ensayo (Si, No)																														
7) Fábrica (Anisótropo, Isótropo)																														
8) Ángulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)																														

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	105	106	107	109	111	112	113	114	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
Cantera	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures
Isla	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																							
<b>1) Geología</b>																							
1) Litología (IOPM; IGNS; LPZ; etc.)	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja
2) Grado de alteración (I; II; III; IV; V; VI)	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)	Muchas	No	No	Algunas	No	No	Algunas	No	No	No	No	No	No	No	Algunas	No	No	No	No	No	Algunas	Algunas	No
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)	Abiertas	-	-	Abiertas	-	-	Abiertas	-	-	-	-	-	-	-	Abiertas	-	-	-	-	-	Abiertas	Abiertas	-
5) Porosidad	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-5mm; >5mm)	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0°; 45°; 90°)	45°	90°	90°	0°	45°	0°	45°	0°	0°	45°	45°	90°	0°	0°	90°	90°	90°	90°	0°	0°	0°	90°	90°
9) Ángulo fuerza-fábrica (0°; 90°)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
<b>2) DENSIDAD:</b>																							
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																							
1) M1 (g)	666,5	669,7	661,2	660,1	665,4	672,7	660,7	646,3	662,3	648,6	658,3	683,8	645,3	665,6	680,2	680,6	661,1	667,8	668,6	656,4	662,3	659,3	656,1
2) M2 - M3 (g)	359,5	357,9	357,5	358,8	361,7	364,2	360,5	347,5	356,6	349,9	348,1	371,5	349,1	364,5	370,0	371,3	359,4	361,4	361,7	358,9	363,3	359,7	358,3
3) M4 (g)	618,0	618,3	614,7	614,5	612,8	618,9	616,1	593,1	606,2	595,0	597,0	633,5	592,0	621,3	631,5	640	616,1	612,2	601,3	612,1	612,1	608,2	607,3
4) $\rho_w$ (gr/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5) $F_v$ (gr/cm3)	2,39	2,37	2,39	2,40	2,44	2,43	2,41	2,41	2,43	2,43	2,40	2,42	2,42	2,44	2,42	2,41	2,38	2,40	2,42	2,44	2,46	2,45	2,44
6) $F_{rel}$ (gr/cm3)	2,01	1,98	2,02	2,04	2,02	2,01	2,05	1,98	1,98	1,99	1,92	2,03	2,00	2,06	2,04	2,07	2,04	2,01	1,99	2,02	2,05	2,03	2,04
7) $F_{rel}$ (gr/cm3)	2,17	2,15	2,18	2,19	2,19	2,18	2,20	2,16	2,17	2,17	2,12	2,19	2,18	2,21	2,19	2,20	2,19	2,20	2,18	2,21	2,22	2,20	2,20
8) $WA_{34}$ (%)	7,8	8,3	7,6	7,4	8,6	8,7	7,2	9,0	9,3	9,0	10,3	7,9	9,0	7,1	7,7	6,3	7,3	8,4	9,2	9,2	8,2	8,4	8,0
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																							
<b>A) Datos del ensayo:</b>																							
1) Fuerza (kN)	54,05	39,81	67,28	65,94	34,28	35,80	38,72	32,47	34,32	42,40	25,79	44,67	37,90	34,40	50,11	55,12	63,76	-	28,52	36,46	46,98	31,76	52,48
2) Sección probeta (mm2)	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22
3) Compresión (Mpa=N/mm2)	23,60	17,38	29,38	28,79	14,97	15,63	16,91	14,18	14,98	18,51	11,26	19,50	16,55	15,02	21,88	24,07	27,84	-	12,45	15,92	20,51	13,87	22,91
4) Recorrido (mm)	1,58	1,78	2,06	2,07	1,61	3,32	1,61	1,76	1,35	1,81	1,94	2,36	2,37	1,62	1,63	3,01	3,50	-	1,85	1,73	1,90	2,37	1,68
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0°; 30°; 45°)	30°	30°	30°	30°	0°	30°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	30°	0°	0°	30°	0°	0°	0°	0°	30°	45°	30°
6) Validez del ensayo (Sí; No)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo
8) Ángulo F-Fábrica (0°; 30°; 45°; 90°)	90°	0°	0°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	0°	90°	90°	0°	0°	0°	0°	90°	90°	0°	0°	90°

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	423	424	425	426	427	428	
Cantera	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Ayagaures	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC
Isla	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																									
<b>1) Descripción</b>																									
1) IGPM; IGNS; LPZ; etc.)	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	IGNS naranja	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	I	I	I	I	I	I	I
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)	Algunas	Algunas	No	No	No	No	Muchas	Algunas	No	No	No	No	No	Algunas	Algunas	Algunas	No	No	No	Algunas	Algunas	No	No	No	No
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)	Abiertas	Abiertas	-	-	-	-	Abiertas	Abiertas	-	-	-	-	-	Abiertas	Abiertas	Abiertas	-	-	-	Abiertas	Abiertas	-	-	-	-
5) Porosidad (Si; No)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	2-6 mm	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0°; 45°; 90°)	90°	90°	90°	45°	0°	90°	0°	0°	45°	45°	0°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	45°	45°	No	45°	90°	No	No
9) Ángulo fuerza-fábrica (0°; 90°)	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
<b>2) DENSIDAD:</b>																									
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																									
1) M1 (g)	674,9	657,9	679,5	669,9	662,2	650,4	661,2	670,7	647,1	654,9	663,1	268,9	247,3	317,3	261,3	320,4	288,2	262,8	582,3	583,1	616,6	565,6	559,7	458,5	
2) M2 - M3 (g)	371,1	357,8	371,9	360,3	358,1	348,0	359,4	367,3	355,5	350,1	359,5	147,3	136,3	173,9	141,5	175,4	158,5	145,4	280,0	279,9	322,2	264,3	254,3	158,8	
3) M4 (g)	625,0	605,6	632,4	614,0	606,0	607,0	617,7	625,2	605,2	596,5	609,3	247,9	228,8	294,1	239,5	295,4	266,3	242,3	511,3	505,3	578,4	493,2	483,9	417,7	
4) FW (gr/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5) Fa (gr/cm3)	2,46	2,44	2,43	2,42	2,44	2,34	2,39	2,42	2,42	2,42	2,44	2,46	2,47	2,45	2,44	2,46	2,47	2,50	2,21	2,24	2,26	2,15	2,11	1,61	
6) Frel (gr/cm3)	2,06	2,02	2,06	1,98	1,99	2,01	2,05	2,06	2,08	1,96	2,01	2,04	2,06	2,05	2,00	2,04	2,05	2,06	1,69	1,67	1,96	1,64	1,58	1,39	
7) Frel (gr/cm3)	2,22	2,19	2,21	2,16	2,18	2,15	2,19	2,21	2,22	2,15	2,18	2,21	2,23	2,21	2,18	2,21	2,22	2,24	1,93	1,92	2,09	1,88	1,83	1,53	
8) WA 24 (%)	8,0	8,6	7,4	9,1	9,3	7,1	7,0	7,3	6,9	9,8	8,8	8,5	8,1	7,9	9,1	8,5	8,2	8,5	13,9	15,4	6,6	14,7	15,7	9,8	
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																									
<b>A) Datos del ensayo:</b>																									
1) Fuerza (kN)	66,28	51,71	66,64	34,85	32,64	53,65	48,74	73,63	86,67	28,45	25,46								60,32	55,98	38,82	70,60	49,28	57,68	
2) Sección probeta (mm2)	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22								2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	2290,22	
3) Compresión (Mpa=N/mm2)	28,94	22,58	29,10	15,22	14,25	23,43	21,28	32,15	37,84	12,42	11,12								26,34	24,44	16,95	30,83	21,52	25,19	
4) Recorrido (mm)	1,63	2,28	1,71	1,99	1,41	1,41	1,93	1,94	2,41	1,50	1,69								2,62	1,55	1,44	1,64	1,93	1,68	
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0°; 30°; 45°)	30°	30°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	30°	0°	30°								30°	0°	0°	0°	0°	0°	
6) Validez del ensayo (Si; No)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si								No	Si	Si	Si	Si	Si	
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo	Anisótropo								Anisótropo	?	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	
8) Ángulo F-Fábrica (0°; 30°; 45°; 90°)	0°	0°	0°	90°	90°	0°	90°	90°	90°	90°	90°								45°	?	45°	-	-	-	

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454		
Cantera	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC		
Isla	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC	GC		
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																												
<b>1) Geología</b>																												
1) Litología (IOPM; IGNS; LPZ; etc.)	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro
2) Grado de alteración (I; II; III; IV; V; VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)	No	No	No	No	No	No	Algunas	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Algunas	No	No	No	No	No	No	No	No	
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)	-	-	-	-	-	-	Abiertas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Abiertas	-	-	-	-	-	-	-	-	
5) Porosidad	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-5mm; >6mm)	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0º; 45º; 90º)	No	45º	No	90º	No	45º	45º	No	45º	No	No	45º	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	45º	No	45º	No	No	
9) Ángulo fuerza-fábrica (0º; 30º)	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	
<b>2) DENSIDAD:</b>																												
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																												
1) M1 (g)	198,5	280,4	213,0	288,4	180,0	262,2	242,5	175,4	305,4	228,9	259,7	287,2	245,5	206,2	209,3	250,0	194,4	219,6	198,4	206,1	258,4	212,2	285,1	202,6	210,1	104,0		
2) M2 - M3 (g)	89,9	149,7	85,6	158,6	83,6	131,2	113,0	75,1	162,0	109,7	133,4	150,1	114,7	76,4	89,8	113,0	77,5	95,9	90,9	85,5	103,1	94,0	155,2	82,3	104,1	45,2		
3) M4 (g)	168,9	256,1	177,4	267,0	144,8	233,1	207,8	132,8	281,1	199,0	234,2	263,2	211,1	171,1	160,9	203,3	146,2	173,0	179,7	163,6	211,0	179,8	268,9	155,7	182,3	84,6		
4) $\rho_w$ (gr/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5) $F_c$ (gr/cm3)	<b>2,14</b>	<b>2,41</b>	<b>1,93</b>	<b>2,46</b>	<b>2,37</b>	<b>2,29</b>	<b>2,19</b>	<b>2,30</b>	<b>2,36</b>	<b>2,23</b>	<b>2,32</b>	<b>2,33</b>	<b>2,19</b>	<b>1,81</b>	<b>2,26</b>	<b>2,25</b>	<b>2,13</b>	<b>2,24</b>	<b>2,02</b>	<b>2,09</b>	<b>1,96</b>	<b>2,10</b>	<b>2,36</b>	<b>2,12</b>	<b>2,33</b>	<b>2,15</b>		
6) $F_{rel}$ (gr/cm3)	1,56	1,96	1,39	2,06	1,50	1,78	1,60	1,32	1,96	1,67	1,85	1,92	1,61	1,32	1,35	1,48	1,25	1,40	1,67	1,36	1,36	1,52	2,07	1,29	1,72	1,44		
7) $F_{rel}$ (gr/cm3)	1,83	2,15	1,67	2,22	1,87	2,00	1,87	1,75	2,13	1,92	2,06	2,09	1,88	1,59	1,75	1,82	1,66	1,78	1,85	1,71	1,66	1,80	2,19	1,68	1,98	1,77		
8) $WA_{34}$ (%)	17,5	9,5	20,1	8,0	24,3	12,5	16,7	32,1	8,6	15,0	10,9	9,1	16,3	20,5	30,1	23,0	33,0	26,9	10,4	26,0	22,5	18,0	6,0	30,1	15,2	22,9		
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																												
<b>A) Datos del ensayo:</b>																												
1) Fuerza (kN)																												
2) Sección probeta (mm2)	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	
3) Compresión (Mpa=N/mm2)																												
4) Recorrido (mm)																												
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)																												
6) Validez del ensayo (Sí; No)																												
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																												
8) Ángulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)																												

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480		
Cantera	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC		
Isla																												
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																												
<b>1) Geología</b>																												
1) Litología (IOPM; IGNS; LPZ, etc.)	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)	No	Algunas	No	No	No	No	No	Algunas	No	No	Algunas	No	Algunas	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Algunas	Algunas	
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)	-	Abiertas	-	-	-	-	-	Abiertas	-	-	Abiertas	-	Abiertas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Abiertas	Abiertas	
5) Porosidad	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-5mm; >6mm)	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	Anisótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Anisótropo	Isótropo	Anisótropo	
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0º; 45º; 90º)	No	No	No	No	No	45º	45º	No	No	45º	No	0º	No	No	45º	No	No	45º	No	0º	45º	No	No	90º	No	45º		
9) Ángulo fuerza-fábrica (0º; 30º)	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	
<b>2) DENSIDAD:</b>																												
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																												
1) M1 (g)	165,2	164,9	127,0	149,3	136,0	143,2	117,1	198,7	104,7	189,6	193,8	178,6	133,7	152,9	262,0	167,9	149,5	182,6	118,0	158,0	127,5	163,1	168,4	123,8	198,9	131,8		
2) M2 - M3 (g)	86,1	80,6	62,9	63,8	52,9	58,6	48,1	109,5	46,3	104,0	99,2	83,7	78,1	66,0	145,9	89,3	66,9	107,8	60,0	65,5	55,2	74,8	74,0	76,5	91,6	72,3		
3) M4 (g)	143,0	144,4	111,8	122,1	121,6	130,4	95,8	185,3	81,7	175,1	179,2	155,1	123,3	117,4	240,3	153,8	125,2	176,2	103,1	121,8	100,0	138,0	139,7	112,1	118,6	115,9		
4) $\rho_w$ (gr/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5) $F_c$ (gr/cm3)	<b>2,51</b>	<b>2,26</b>	<b>2,29</b>	<b>2,09</b>	<b>1,77</b>	<b>1,82</b>	<b>2,01</b>	<b>2,44</b>	<b>2,31</b>	<b>2,46</b>	<b>2,24</b>	<b>2,17</b>	<b>2,73</b>	<b>2,28</b>	<b>2,55</b>	<b>2,38</b>	<b>2,15</b>	<b>2,58</b>	<b>2,39</b>	<b>2,16</b>	<b>2,23</b>	<b>2,18</b>	<b>2,13</b>	<b>3,15</b>	<b>4,39</b>	<b>2,66</b>		
6) $F_{rel}$ (gr/cm3)	1,81	1,71	1,74	1,43	1,46	1,54	1,39	2,08	1,40	2,05	1,89	1,63	2,22	1,35	2,07	1,96	1,52	2,36	1,78	1,32	1,38	1,56	1,48	2,37	1,11	1,95		
7) $F_{rel}$ (gr/cm3)	2,09	1,96	1,98	1,75	1,64	1,69	1,70	2,23	1,79	2,21	2,05	1,88	2,40	1,76	2,26	2,14	1,81	2,44	2,03	1,71	1,76	1,85	1,78	2,62	1,85	2,22		
8) $WA_{34}$ (%)	15,5	14,2	13,6	22,3	11,8	9,8	22,2	7,2	28,2	8,3	8,1	15,2	8,4	30,2	9,0	9,2	19,4	3,6	14,5	29,7	27,5	18,2	20,5	10,4	67,7	13,7		
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																												
<b>A) Datos del ensayo:</b>																												
1) Fuerza (kN)																												
2) Sección probeta (mm2)	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	
3) Compresión (Mpa=N/mm2)																												
4) Recorrido (mm)																												
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)																												
6) Validez del ensayo (Sí; No)																												
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																												
8) Ángulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)																												

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545			
Cantera	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC			
Isla																																	
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																																	
<b>1) Descripción</b>																																	
1) litología (IGPM, IGIS, LP2, etc.)	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
3) Número de diaclasas (No: algunas; muchas)	No	No	No	No	No	No	Algunas	No	Algunas	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	
4) Tipo de diaclasas (Cerradas; abiertas; rellenas)	-	-	-	-	-	-	Cerradas	-	Cerradas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
5) Porosidad (Si/No)	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si		
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica	Heterométrica		
7) Fábrica (Anisótropo; isótropo)	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo		
8) Angulo fábrica-base probeta (No, 0º; 45º; 90º)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No		
9) Angulo fuerza-fábrica (0º; 30º)	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º		
<b>2) DENSIDAD:</b>																																	
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																																	
1) M1 (g)	112,2	132,6	137,5	124,5	90,4	167,8	103,5	135,6	90,0	91,0	85,0	112,1	70,8	94,7	74,4	91,4	61,8		508,1	508,3	458,8	495,5	522,8	477,7	505,5	243,4	216,4	170,7	228	151,5			
2) M2 - M3 (g)	53,5	70,6	79,8	58,2	48,0	94,3	43,4	79,3	49,2	40,7	37,3	63,0	32,9	40,8	32,7	42,0	31,2		199,8	198,2	153,1	181,7	207,4	177	192,2	99,5	84,3	53,6	107,7	52,2			
3) M4 (g)	98,6	122,6	127,8	104,9	79,9	157,6	82,6	128,3	79,1	69,2	100,0	65,4	75,5	59,0	76,7	52,4			453,6	467,7	411,8	455,6	463,4	448,5	498,5	234,4	207,7	146,1	218	135			
4) FW (gr/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
5) F (gr/cm3)	2,19	2,36	2,66	2,25	2,50	2,49	2,11	2,62	2,65	2,43	2,34	2,70	2,01	2,18	2,24	2,21	2,47		1,79	1,74	1,59	1,66	1,81	1,65	1,63	1,74	1,68	1,58	1,98	1,63			
6) F <sub>rel</sub> (gr/cm3)	1,68	1,98	2,21	1,58	1,88	2,14	1,37	2,28	1,94	1,38	1,37	2,04	1,73	1,40	1,41	1,55	1,71		1,47	1,51	1,35	1,45	1,47	1,49	1,59	1,63	1,57	1,25	1,81	1,36			
7) F <sub>rel</sub> (gr/cm3)	1,91	2,14	2,38	1,88	2,13	2,28	1,72	2,41	2,21	1,81	1,78	2,28	1,87	1,76	1,78	1,85	2,02		1,65	1,64	1,50	1,58	1,66	1,59	1,61	1,69	1,64	1,46	1,90	1,53			
8) WA <sub>24</sub> (%)	13,8	8,2	7,6	18,7	13,1	6,5	25,3	5,7	13,8	31,5	30,4	12,1	8,3	25,4	26,1	19,2	17,9		12,01	8,68	11,41	8,76	12,82	6,51	1,40	3,84	4,19	16,84	4,59	12,22			
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																																	
<b>A) Datos del ensayo:</b>																																	
1) Fuerza (kN)																			56,99	39,75	23,52	16,64	42,39	58,44	29,06	66,08							
2) Sección probeta (mm2)	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2		2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2	2290,2		
3) Compresión (Mpa=N/mm2)																			24,88	17,36	10,27	7,27	18,51	25,52	12,69	28,85							
4) Recorrido (mm)																			1,34	1,81	2,85	4,08	1,43	1,37	0,94	2,21							
5) Angulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)																			0º	0º	45º	45º	30º	0º	0º	0º							
6) Validez del ensayo (Si/No)																			Si	Si	Si	Si	NO	Si	NO	Si							
7) Fábrica (Anisótropo; isótropo)																			ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA	ANISÓTROPA			
8) Angulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)																			45º	45º	90º	0º	0º	0º	0º	0º							

1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	673	674	233	264	265	266	267	268	269	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518				
Cantera	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	Autoridad Portuaria GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	La Aldea GC	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV				
Isla																																							
1) DESCRIPCIÓN																																							
1) Geología																																							
1) litología (IGPM, IGMS, LPZ, etc.)	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT negro	LPT rojo	LPT rojo	LPT rojo	LPT rojo	LPT rojo	LPT rojo	LPT rojo	LPT rojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo		
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	III	III	III	III	III	III	III	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I		
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)																Si, una	Si, una	No	Si, varias	Si, varias	Si, varias	Si, varias	Si, varias																
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)																Cerrada	Abierta	-	Abiertas	Abiertas	Abiertas	Abiertas																	
5) Porosidad (Si; No)																Si, Pocos	Si, Pocos	Si, Pocos	Si, Pocos	Si, Pocos	Si, Pocos	Si, Pocos	Si, Pocos																
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)																<1 mm	<1 mm	<1 mm	<1 mm	<1 mm	<1 mm	<1 mm																	
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo	Isótropo																	
8) Angulo fábrica-base probeta (No; 0º; 45º; 90º)																No	No	No	No	No	No	No																	
9) Angulo fuerza-fábrica (0º; 30º)																0º	0º	0º	0º	0º	0º	0º																	
2) DENSIDAD:																																							
a) De las partículas y abs. H2O																																							
1) M1 (g)	184,5	148,8	146,8	122,2	140,3	132,8	137,3	81,7	85,8	66,3	67,8	58,8	56,5	100,8	33,9	403,60	355,20	104,20	610,50	494,10	726,20	131,40	509,7	489,6	494,1	524,8	506,2	502,6	506	497,5	229,8	233,2	193,1	176,3	185,1				
2) M2 - M3 (g)	81,6	66,2	60,7	41,8	60,8	59,9	65,9	23,6	31,4	20	30,9	28	23,2	41,4	14,5	249,80	219,50	68,70	376,50	303,50	449,10	81,50	200,4	200,3	190,9	219,7	217,3	214	211	210,8	100,5	98,8	82,1	74	83,1				
3) M4 (g)	175,8	143,9	143,3	115,6	138,1	131,7	132,1	79	77,9	61	66,5	57,9	53,7	72,3	25,9	392,57	345,80	101,60	595,40	477,40	707,10	128,10	427,8	409,5	411,5	438,8	429	423,3	423,8	418,7	191,4	195,3	159,9	146,4	155,2				
4) FW (g/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
5) Fa (g/cm3)	1,87	1,85	1,73	1,57	1,79	1,83	2,00	1,43	1,68	1,49	1,87	1,94	1,76	2,34	2,27	2,75	2,74	3,09	2,72	2,75	2,74	2,75	1,88	1,96	1,87	2,00	2,03	2,02	1,99	2,01	2,11	2,02	2,06	2,02	2,15				
6) Frel (g/cm3)	1,71	1,74	1,66	1,44	1,74	1,81	1,85	1,36	1,43	1,32	1,80	1,88	1,61	1,22	1,34	2,55	2,55	2,86	2,54	2,50	2,55	2,57	1,38	1,42	1,36	1,44	1,48	1,47	1,44	1,46	1,48	1,45	1,44	1,43	1,52				
7) Frel (g/cm3)	1,79	1,80	1,70	1,52	1,76	1,82	1,92	1,41	1,58	1,43	1,84	1,91	1,70	1,70	1,75	2,62	2,62	2,94	2,61	2,59	2,62	2,63	1,65	1,69	1,63	1,72	1,75	1,74	1,72	1,74	1,78	1,74	1,74	1,72	1,81				
8) IWA 24 (N)	4,95	3,41	2,44	5,71	1,59	0,84	3,94	3,42	10,14	8,69	1,95	1,55	5,21	39,42	30,89	2,81	2,72	2,56	2,54	3,50	2,70	2,58	19,14	19,56	20,07	19,60	18,00	18,73	19,40	18,82	20,06	19,41	20,76	20,42	19,27				
3) ERCS (compresión simple):																																							
a) Datos del ensayo:																																							
1) Fuerza (kN)																							13	12,77	9,44	20,27	19,09	17,36	18,65	23,11									
2) Sección probeta (mm2)																							2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290		
3) Compresión (Mpa=N/mm2)																							5,68	5,58	4,12	8,85	8,34	7,58	8,14	10,09									
4) Recorrido (mm)																							0,67	0,92	1,62	1,06	0,98	0,91	1,16	1,06									
5) Angulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)																							30º	0º	45º	30º	30º	30º	0º	0º a 30º									
6) Validez del ensayo (Si; No)																							Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si									
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																							ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA									
8) Angulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)																							NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO									



1.3 DATOS RECOPIADOS EN ENSAYOS DE LABORATORIO CON ROCAS VOLCÁNICAS

Nº de Probeta	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634			
Cartera	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV			
Isla																																						
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																																						
<b>1) Geología</b>																																						
1) litología (IGPM, IGMS, LPZ, etc.)	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)																																						
4) Tipo de diaclasas (cerradas; abiertas; rellenas)																																						
5) Porosidad (S; No)																																						
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm ; 2-6mm; >6mm)																																						
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																																						
8) Ángulo fábrica-base probeta (No; 0º; 45º; 90º)																																						
9) Ángulo fuerza-fábrica (0º; 90º)																																						
<b>2) DENSIDAD:</b>																																						
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																																						
1) M1 (g)	135,2	117,2	120,7	127,5	117,6	102,6	105,2	92,9	102	87,3	91,8	53,7	49,9	545,8	543	507,3	526,8	515,5	524,7	550,1	550,4	534,5	226,6	195,1	232,8	115,3	146,3	93,2	164,6	113	138,6	114,7	232,3	172,5	150,2			
2) M2 - M3 (g)	57,3	45,8	52,7	54,3	50,1	42,4	43,7	32,8	43,3	34,7	39	21,4	19,6	236,4	234,3	215,1	230,2	215,8	219,1	240,9	240,1	229,4	95,7	86,9	104,1	53	61,4	41,1	73,2	49	52,6	51,1	98,5	82,2	71,6			
3) M4 (g)	113,2	96,3	100,3	106	98	85,5	88,2	74,7	85	72,9	75,9	45,2	41,2	445	448,9	412,8	430	419,5	425,6	447,7	457,1	445,6	185,3	158,6	191,2	90,5	121,5	77,3	136,1	91,3	116,9	93	192,6	135,1	119,7			
4) $\rho_w$ (g/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
5) $\rho_{1(g/cm3)}$	2,03	1,91	2,11	2,05	2,05	1,98	1,98	1,78	2,04	1,91	2,06	1,90	1,91	2,13	2,09	2,09	2,15	2,06	2,06	2,16	2,11	2,06	2,07	2,21	2,20	2,41	2,02	2,14	2,16	2,16	1,82	2,22	2,05	2,55	2,49			
6) $\rho_{2(g/cm3)}$	1,45	1,35	1,48	1,45	1,45	1,42	1,43	1,24	1,45	1,39	1,44	1,40	1,36	1,44	1,45	1,41	1,45	1,40	1,39	1,45	1,47	1,46	1,42	1,47	1,49	1,45	1,43	1,48	1,49	1,43	1,36	1,46	1,44	1,50	1,52			
7) $\rho_{3(g/cm3)}$	1,74	1,64	1,78	1,74	1,74	1,70	1,71	1,55	1,74	1,66	1,74	1,66	1,65	1,76	1,76	1,74	1,78	1,72	1,72	1,78	1,77	1,75	1,73	1,80	1,81	1,85	1,72	1,79	1,80	1,77	1,61	1,80	1,74	1,91	1,91			
8) $W_{24}$ (%)	19,43	21,70	20,34	20,28	20,00	20,00	19,27	24,36	20,00	19,75	20,95	18,81	21,12	22,65	20,96	22,89	22,51	22,88	23,28	22,87	20,41	19,95	22,29	23,01	21,76	27,40	20,41	20,57	20,94	23,77	18,56	23,33	20,61	27,68	25,48			
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																																						
<b>A) Datos del ensayo:</b>																																						
1) Fuerza (kN)														14,12	13,46	12,45	9,95	15,07	12,91			18,12	20,76															
2) Sección probeta (mm2)	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290		
3) Compresión (Mpa-N/mm2)														6,17	5,88	5,44	4,34	6,58	5,64			7,91	9,06															
4) Recorrido (mm)														0,91	0,88	0,73	1,22	0,74	1,03			1,27	0,93															
5) Ángulo fuerza-plano rotura (0º; 30º; 45º)														30º	45º	45º	45º	30º	0º		30º	45º																
6) Validez del ensayo (S; No)														Sí	Sí	Sí	NO	Sí	Sí	Sí																		
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)														ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA	ISOTROPA			
8) Ángulo F-Fábrica (0º; 30º; 45º; 90º)														NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	

Nº de Probeta	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	
Cantera	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	Montaña roja FV	
Isla																			
<b>1) DESCRIPCIÓN</b>																			
<b>A) Geología</b>																			
1) Litotipo (BOPM; IGNS; LP2; etc.)	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo	LPTrojo
2) Grado de alteración (I, II, III, IV, V, VI)	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3) Número de diaclasas (No; algunas; muchas)																			
4) Tipo de diaclasas (Cerradas; abiertas; rellenas)																			
5) Porosidad (Si; No)																			
6) Tamaño de poros (diam.) (<2mm; 2-6mm; >6mm)																			
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																			
8) Angulo fábrica-base probeta (No; 0°; 45°; 90°)																			
9) Angulo fuerza-fábrica (0°; 90°)																			
<b>2) DENSIDAD:</b>																			
<b>A) de las partículas y abs. H2O</b>																			
1) M1 (g)	198,4	230,9	136,3	61,6	88,5	158,8	107,7	66,5	99,4	86	94,8	69,9	88,7	62,5	80,2	58,9	75,8	32	
2) M2 - M3 (g)	85,8	100,3	59,3	28,9	38,9	69,7	47,7	30,3	44,2	37,3	41,8	32,1	38,9	28,5	36,9	27,8	34,1	15,5	
3) M4 (g)	161,9	188,1	112,1	48,5	71,9	130,3	88,8	51,5	81,4	70,5	77,1	57,8	67,3	52	62,8	45,9	61,8	25,8	
4) FW (g/cm3)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5) F <sub>a</sub> (g/cm3)	2,13	2,14	2,12	2,47	2,18	2,15	2,16	2,43	2,19	2,12	2,18	2,25	2,37	2,21	2,42	2,54	2,23	2,50	
6) F <sub>rel</sub> (g/cm3)	1,44	1,44	1,46	1,48	1,45	1,46	1,48	1,42	1,47	1,45	1,45	1,53	1,35	1,53	1,45	1,48	1,48	1,56	
7) F <sub>rel</sub> (g/cm3)	1,76	1,77	1,77	1,88	1,78	1,78	1,80	1,84	1,80	1,77	1,79	1,85	1,78	1,84	1,85	1,89	1,82	1,94	
8) WVA <sub>24</sub> (%)	22,54	22,75	21,59	27,01	23,09	21,87	21,28	29,13	22,11	21,99	22,96	20,93	31,80	20,19	27,71	28,32	22,65	24,03	
<b>3) ERCS (compresión simple):</b>																			
<b>A) Datos del ensayo:</b>																			
1) Fuerza (kN)	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290	2290
2) Sección probeta (mm2)																			
3) Compresión (Mpa=N/mm2)																			
4) Recorrido (mm)																			
5) Angulo fuerza-plano rotura (0°; 30°; 45°)																			
6) Validez del ensayo (Si; No)																			
7) Fábrica (Anisótropo; Isótropo)																			
8) Angulo F-Fábrica (0°; 30°; 45°; 90°)																			

## 2 DOSIFICACIONES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

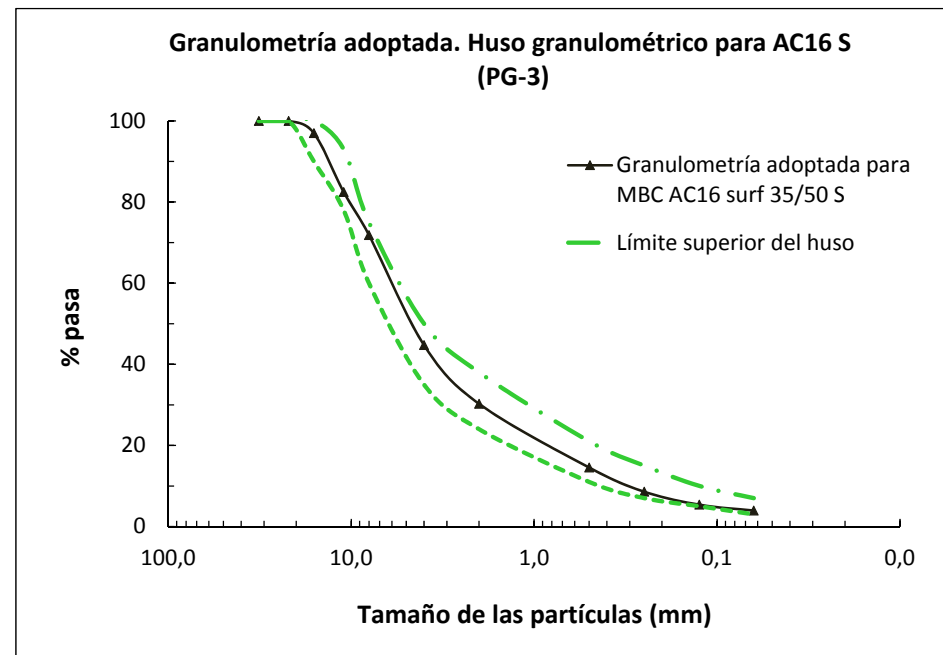
---



<b>Ensayos sobre Mezcla de referencia (o control): con áridos volcánicos y betún convencional</b>	Tipo de mezcla:	<b>MBC AC16 surf 35/50 S</b>				
	Betún:	Tipo y procedencia:	35/50, suministrado por DISA (Canarias)	Densidad (Mg/m <sup>3</sup> ): 1,0419		
	Áridos:	Árido grueso	Tipo y procedencia:	B-OP-V (Basalto vacuolar de color gris (10/20) y todouno (4/10 y 0/4) de la cantera de la Autoridad Portuaria de Las Palmas. Roque Ceniciento, La Isleta. Las Palmas de Gran Canaria)	Densidad aparente (Mg/m <sup>3</sup> ): 2,84	
		Árido fino:	Tipo y procedencia:		Densidad aparente (Mg/m <sup>3</sup> ): 2,72	
		Fracciones y dosificación teórica	10/20	20,93	% del árido	
			4/10	36,27	% del árido	
	0/4		38,88	% del árido		
Filler	3,92		% del árido	100% aportación, Cemento EN 197-1 CEM II/B-P 32,5 R		
Fabricación:	T mezclado (°C):	165-170	1 min. de envuelta + 2 min. amasado (T calentamiento betún = 170 °C; T calentamiento áridos = 170 °C)			
	T compactación (°C):	155-160				

## 2.1 Granulometría del esqueleto mineral [UNE-EN 933-1]

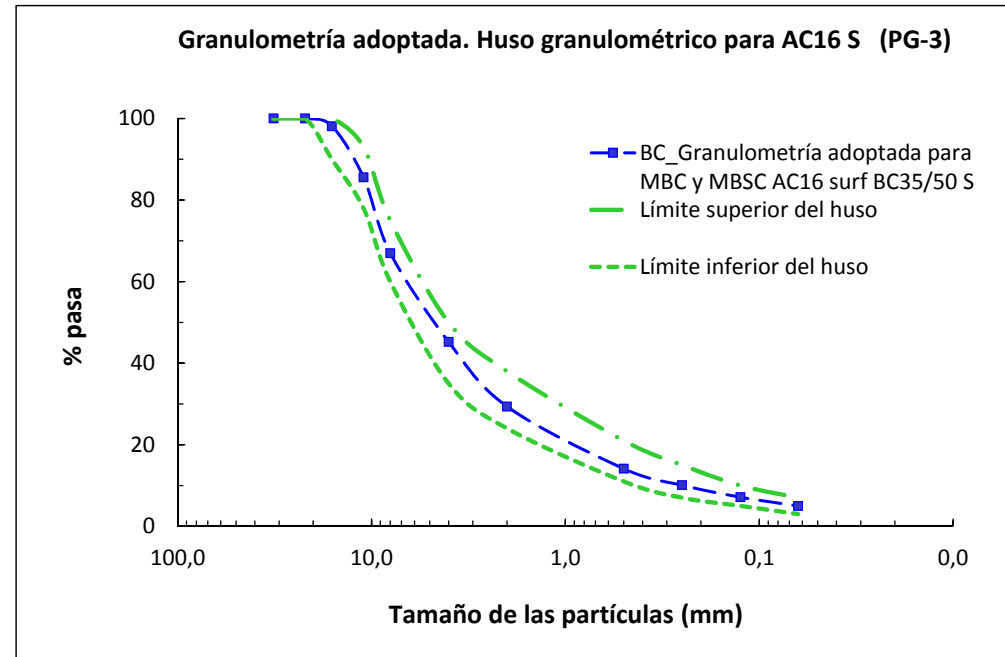
Tamaño de las partículas (mm)	Granulometría adoptada para MBC AC16	Límite superior del huso	Límite inferior del huso
32	100,00	100,00	100,00
22	100,00	100,00	100,00
16	96,98	100,00	90,00
11	82,46	93,00	78,00
8	71,85	75,00	60,00
4	44,71	50,00	35,00
2	30,24	38,00	24,00
0,500	14,53	21,00	11,00
0,250	8,57	15,00	7,00
0,125	5,37	10,00	5,00
0,063	3,92	7,00	3,00



<b>Ensayos sobre Mezcla calientes o semicalientes: con áridos volcánicos y betún-caucho.</b>	Tipo de mezcla:	<b>MBC AC16 surf BC35/50 S // MBSC AC16 surf BC35/50 S</b>				
	Betún:	Tipo y procedencia:	BC35/50, fabricado en laboratorio UPM a partir de 50/70	Densidad (Mg/m3): 1,0280		
	Áridos:	Árido grueso	Tipo y procedencia:	B-OP-V (Basalto vacuolar de color gris (10/20) y todouno (4/10 y 0/4) de la cantera de la Autoridad Portuaria de Las Palmas. Roque Ceniciento, La Isleta. Las Palmas de Gran Canaria)	Densidad aparente (Mg/m3): 2,84	
		Árido fino:	Tipo y procedencia:		Densidad aparente (Mg/m3): 2,72	
		Fracciones y dosificación teórica	10/20	20,93	% del árido	
			4/10	36,27	% del árido	
			0/4	38,88	% del árido	
	Filler		3,92	% del árido	100% aportación, Cemento EN 197-1 CEM II/B-P 32,5 R	
	Fabricación:	T mezclado (°C):	140-180	1 min. de vuelta + 3 min. amasado (T calentamiento betún = 175-180 °C; T calentamiento áridos = 175 °C)		
		T compactación (°C):	130-170			

## 2.2 Granulometría del esqueleto mineral [UNE-EN 933-1]

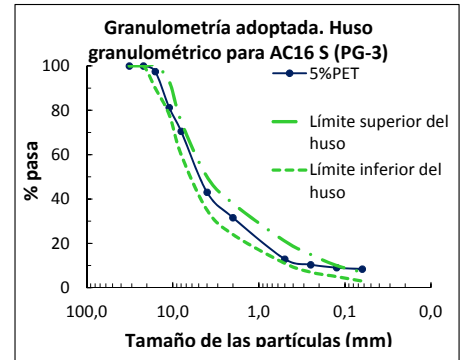
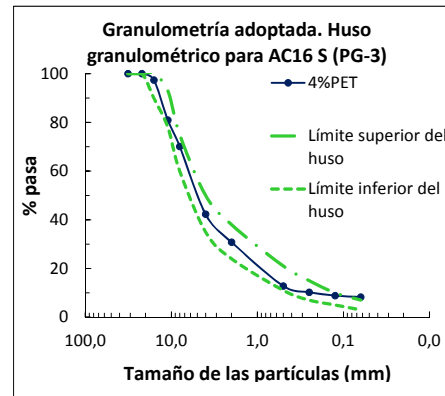
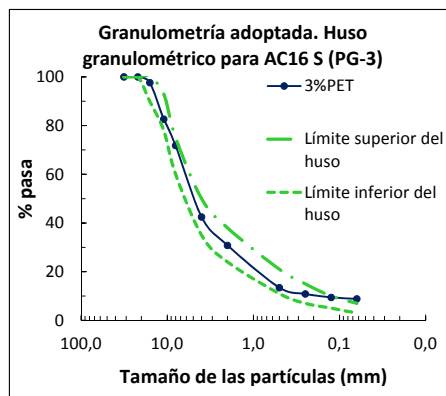
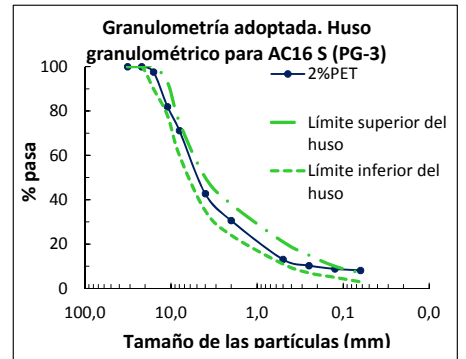
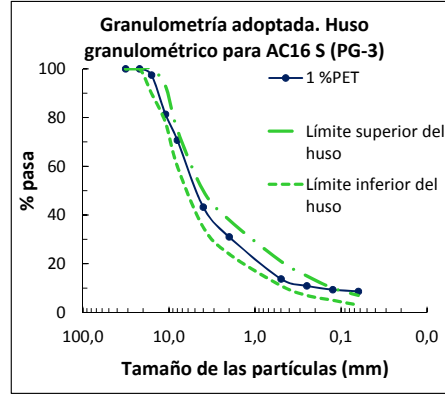
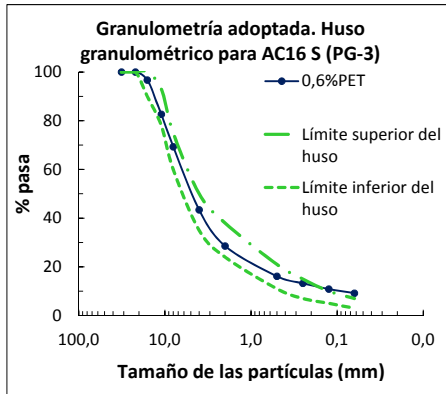
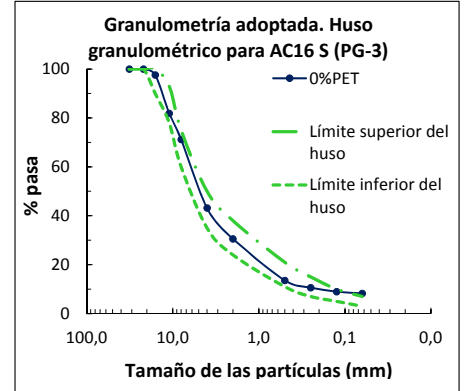
Tamaño de las partículas (mm)	BC_Granulometría adoptada	Límite superior del huso	Límite inferior del huso
32	100,00	100,00	100,00
22	100,00	100,00	100,00
16	98,11	100,00	90,00
11	85,58	93,00	78,00
8	66,98	75,00	60,00
4	45,21	50,00	35,00
2	29,37	38,00	24,00
0,500	14,13	21,00	11,00
0,250	10,06	15,00	7,00
0,125	7,13	10,00	5,00
0,063	4,99	7,00	3,00



<b>Ensayos sobre Mezclas calientes con: áridos volcánicos, betún convencional y PET</b>	<b>Tipo de mezcla:</b>	<b>MBC AC16 surf 35/50 S + PET</b>									
	<b>Betún:</b>	<b>Tipo y procedencia:</b>	35/50, suministrado por DISA (Canarias)						<b>Densidad (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	1,0419	
	<b>Áridos:</b>	<b>Árido grueso</b>	<b>Tipo y procedencia:</b>	B-OP-V (Basalto vacuolar de color gris (10/20) y todouno (4/10 y 0/4) de la cantera de la Autoridad Portuaria de Las Palmas. Roque Ceniciento, La Isleta. Las Palmas de Gran Canaria)						<b>Densidad aparente (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	2,84
		<b>Árido fino:</b>	<b>Tipo y procedencia:</b>							<b>Densidad aparente (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	2,72
		<b>Fraciones y dosificación teórica</b>	10/20	21,47	23,90	22,12	21,37	20,46	22,66	22,37	% del árido
			4/10	38,04	36,40	37,23	38,63	39,83	37,66	37,17	% del árido
	0/4		32,86	31,73	31,56	30,48	28,45	27,97	27,60	% del árido	
		Filler	7,63	7,44	8,04	7,53	8,27	7,68	7,85	% del árido	
		PET	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	% del árido	
										100% aportación.	
<b>Fabricación:</b>	<b>T mezclado (°C):</b>	Entre 160 y 170	1 min. de envuelta + 3 min. amasado (T calentamiento betún = [T mezclado]; T calentamiento áridos = [T mezclado])								
	<b>T compactación (°C):</b>	Entre 155 y 160									

### 2.3 Granulometría del esqueleto mineral [UNE-EN 933-1]

Tamaño de las partículas (mm)	Límite superior del huso	Límite inferior del huso	Granulometría adoptada para MBC AC16 surf 35/50 S+PET							
			0%PET	0,6%PET	1 %PET	2%PET	3%PET	4%PET	5%PET	
32	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
22	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	100,00	90,00	97,56	96,72	97,48	97,57	97,67	97,42	97,46	97,46
11	93,00	78,00	81,90	82,69	81,39	81,97	82,68	80,95	81,20	81,20
8	75,00	60,00	71,22	69,35	70,75	71,20	71,85	70,13	70,52	70,52
4	50,00	35,00	43,21	43,41	43,29	42,73	42,53	42,29	43,02	43,02
2	38,00	24,00	30,60	28,55	31,03	30,61	30,84	30,81	31,59	31,59
0,500	21,00	11,00	13,57	16,13	13,76	13,06	13,45	12,78	12,89	12,89
0,250	15,00	7,00	10,61	13,25	10,92	10,31	10,87	10,25	10,38	10,38
0,125	10,00	5,00	8,99	10,87	9,36	8,80	9,47	8,87	9,02	9,02
0,063	7,00	3,00	8,26	9,19	8,66	8,12	8,83	8,24	8,40	8,40







### 3 MEZCLAS EN CALIENTE CON BETÚN CAUCHO Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS

---



### 3.1 Densidad máxima de mezclas bituminosas [UNE-EN 12697-5]

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el fíller)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,394	2,478	2,366	2,432	2,353	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,446	2,459	2,392	2,422	2,380	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie III)	2,600	2,553	2,585	2,530	2,532	Mg/m3
Valor máximo	2,600	2,553	2,585	2,530	2,532	Mg/m3
Valor mínimo	2,446	2,459	2,392	2,422	2,380	Mg/m3
<b>AC 16 surf 35/50 S (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>2,523</b>	<b>2,506</b>	<b>2,489</b>	<b>2,476</b>	<b>2,456</b>	<b>Mg/m3</b>
Promedio	2,461					
Desv. Estánd.	0,08					
C.V.	3,30%					

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el fíller)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		2,588	2,550	2,551	2,505	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,571	2,537	2,483	2,461	Mg/m3
Valor máximo		2,588	2,550	2,551	2,505	Mg/m3
Valor mínimo		2,571	2,537	2,483	2,461	Mg/m3
<b>AC 16 surf BC35/50 S (Promedio muestras ensayadas)</b>		<b>2,579</b>	<b>2,543</b>	<b>2,517</b>	<b>2,483</b>	<b>Mg/m3</b>
Promedio	2,531					
Desv. Estánd.	0,04					
C.V.	1,73%					

**3.2 Densidad aparente de mezclas bituminosas (UNE-EN 12697-6)**

[Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x75 golpes]

**Proced. D: Geométrico**

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,113	2,183	2,203	2,194	2,183	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,139	2,123	2,058	2,157	2,135	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,128	2,167	2,088	2,221	2,250	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,142	2,182	2,186	2,296	2,218	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,102	2,168	2,225	2,298	2,244	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,088	2,140	2,261	2,240	2,212	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie III)		2,381	2,369	2,311	2,359	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie III)		2,350	2,340	2,330	2,333	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie III)		2,329	2,351	2,333	2,480	Mg/m3
Valor máximo (2x75 golpes)	2,142	2,381	2,369	2,333	2,480	Mg/m3
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,102	2,123	2,186	2,194	2,212	Mg/m3
<b>AC 16 surf 35/50 S (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>2,125</b>	<b>2,225</b>	<b>2,277</b>	<b>2,278</b>	<b>2,299</b>	<b>Mg/m3</b>
Promedio	2,229					
Desv. Estánd.	0,10					
C.V.	4,43%					

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		2,209	2,277	2,257	2,308	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		2,177	2,274	2,272	2,269	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		2,246	2,295	2,312	2,295	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,213	2,223	2,341	2,356	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,234	2,282	2,277	2,343	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,244	2,276	2,235	2,308	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie III)		2,226	2,351	2,193	2,334	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie III)		2,261	2,304	2,312	2,370	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie III)		2,270	2,344	2,296	2,385	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie IV)				2,302		Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie IV)				2,269		Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie IV)				2,254		Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie V)		2,202	2,260	2,260	2,240	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie V)		2,167	2,261	2,263	2,280	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie V)		2,173	2,250	2,265	2,258	Mg/m3
Valor máximo (2x75 golpes)		2,270	2,351	2,385	2,385	Mg/m3
Valor mínimo (2x75 golpes)		2,167	2,223	2,235	2,240	Mg/m3
<b>AC 16 surf BC35/50 S (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>2,218</b>	<b>2,284</b>	<b>2,280</b>	<b>2,312</b>	<b>Mg/m3</b>
Promedio	2,272					
Desv. Estánd.	0,05					
C.V.	2,19%					

**Proced. B: SSD**

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,007	2,283	2,320	2,286	2,304	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	1,893	2,271	2,188	2,290	2,221	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,276	2,274	2,263	2,302	2,304	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,221	2,264	2,324	2,364	2,340	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,239	2,311	2,288	2,370	2,313	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,270	2,287	2,374	2,317	2,297	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie III)		2,475	2,444	2,424	2,448	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie III)		2,454	2,441	2,421	2,443	Mg/m3
AC 16 surf 35/50 S (Serie III)		2,445	2,442	2,419	2,528	Mg/m3
Valor máximo (2x75 golpes)	2,276	2,454	2,444	2,424	2,448	Mg/m3
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,221	2,264	2,188	2,286	2,297	Mg/m3
<b>AC 16 surf 35/50 S (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>2,251</b>	<b>2,324</b>	<b>2,343</b>	<b>2,355</b>	<b>2,350</b>	<b>Mg/m3</b>
Promedio	2,320					
Desv. Estánd.	0,12					
C.V.	5,05%					

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		2,307	2,328	2,319	2,370	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		2,278	2,336	2,343	2,330	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		2,323	2,362	2,353	2,360	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,396	2,451	2,353	2,431	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,328	2,386	2,373	2,421	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,393	2,360	2,394	2,421	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie III)		2,397	2,426	2,432	2,345	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie III)		2,408	2,397	2,423	2,366	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie III)		2,361	2,369	2,431	2,365	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie IV)				2,341		Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie IV)				2,362		Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie IV)				2,349		Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie V)		2,310	2,369	2,404	2,358	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie V)		2,346	2,404	2,463	2,449	Mg/m3
AC 16 surf BC35/50 S (Serie V)		2,279	2,408	2,335	2,362	Mg/m3
Valor máximo (2x75 golpes)		2,408	2,451	2,432	2,431	Mg/m3
Valor mínimo (2x75 golpes)		2,278	2,328	2,319	2,330	Mg/m3
<b>AC 16 surf BC35/50 S (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>2,344</b>	<b>2,383</b>	<b>2,373</b>	<b>2,379</b>	<b>Mg/m3</b>
Promedio	2,372					
Desv. Estánd.	0,04					
C.V.	1,82%					

### 3.3 Contenido de huecos en las probetas bituminosas (UNE-EN 12697-8)

[Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x75 golpes]

#### Contenido de huecos de aire de la mezcla (Vm)

##### Proced. D: Geométrico

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
<b>AC 16 surf 35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>15,78</b>	<b>11,22</b>	<b>8,53</b>	<b>8,00</b>	<b>6,37</b>	%
<b>AC 16 surf BC35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>13,99</b>	<b>10,21</b>	<b>9,43</b>	<b>6,89</b>	%
<b>Promedio</b>	9,98	10,13				
<b>Desv. Estánd.</b>	3,68	2,94				
<b>C.V.</b>	36,89%	29,02%				

##### Proced. B: SSD

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
<b>AC 16 surf 35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>10,76</b>	<b>7,28</b>	<b>5,87</b>	<b>4,90</b>	<b>4,31</b>	%
<b>AC 16 surf BC35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>9,13</b>	<b>6,30</b>	<b>5,73</b>	<b>4,21</b>	%
<b>Promedio</b>	6,62	6,34				
<b>Desv. Estánd.</b>	2,57	2,05				
<b>C.V.</b>	38,81%	32,39%				

#### Contenido de huecos en el árido mineral (VMA)

##### Proced. D: Geométrico

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
<b>AC 16 surf 35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>25,97</b>	<b>22,96</b>	<b>21,64</b>	<b>22,21</b>	<b>21,82</b>	%
<b>AC 16 surf BC35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>25,86</b>	<b>23,54</b>	<b>23,84</b>	<b>22,63</b>	%
<b>Promedio</b>	22,92	23,97				
<b>Desv. Estánd.</b>	1,78	1,36				
<b>C.V.</b>	7,77%	5,69%				

##### Proced. B: SSD

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
<b>AC 16 surf 35/50 S (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>21,56</b>	<b>19,54</b>	<b>19,36</b>	<b>19,59</b>	<b>20,10</b>	%
<b>AC 16 surf BC35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>21,67</b>	<b>20,21</b>	<b>20,73</b>	<b>20,41</b>	%
<b>Promedio</b>	20,03	20,76				
<b>Desv. Estánd.</b>	0,90	0,64				
<b>C.V.</b>	4,49%	3,11%				

#### Contenido de huecos rellenos con ligante (VFB) existentes en el árido mineral

##### Proced. D: Geométrico

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
<b>AC 16 surf 35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>39,26</b>	<b>51,15</b>	<b>60,59</b>	<b>63,98</b>	<b>70,81</b>	%
<b>AC 16 surf BC35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>45,89</b>	<b>56,63</b>	<b>60,46</b>	<b>69,56</b>	%
<b>Promedio</b>	57,16	58,14				
<b>Desv. Estánd.</b>	12,26	9,80				
<b>C.V.</b>	21,45%	16,86%				

##### Proced. B: SSD

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
<b>AC 16 surf 35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>50,11</b>	<b>62,77</b>	<b>69,69</b>	<b>75,00</b>	<b>78,54</b>	%
<b>AC 16 surf BC35/50 S(Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>57,88</b>	<b>68,82</b>	<b>72,36</b>	<b>79,36</b>	%
<b>Promedio</b>	67,22	69,60				
<b>Desv. Estánd.</b>	11,26	8,96				
<b>C.V.</b>	16,76%	12,87%				

3.4 Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34)

[Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x75 golpes]

Estabilidad (kN)						
Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	5,10	5,97	6,38	5,96	6,48	kN
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	5,19	4,87	3,38			kN
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	5,39	4,93	4,64	7,14	7,46	kN
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	5,46	6,40	7,05	9,49	6,73	kN
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	4,93	6,57	7,82	9,21	6,76	kN
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	4,62	6,38	8,11	7,43	6,12	kN
Valor máximo	5,46	6,57	8,11	9,49	7,46	kN
Valor mínimo	4,62	4,87	4,64	7,14	6,12	kN
<b>AC 16 surf 35/50 S_Estabilidad (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>5,11</b>	<b>5,85</b>	<b>6,91</b>	<b>8,32</b>	<b>6,71</b>	<b>kN</b>
Promedio	6,28					
Desv. Estánd.	1,43					
C.V.	22,73%					

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		14,56			17,66	kN
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		15,18	17,97		22,27	kN
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		15,56	16,86	15,66	21,18	kN
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		11,97				kN
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		11,86		17,40		kN
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		9,82		21,06		kN
Valor máximo		15,56	17,97	21,06	22,27	kN
Valor mínimo		9,82	16,86	15,66	17,66	kN
<b>AC 16 surf BC35/50 S_Estabilidad (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>13,16</b>	<b>17,42</b>	<b>18,04</b>	<b>20,37</b>	<b>kN</b>
Promedio	16,36					
Desv. Estánd.	3,66					
C.V.	22,37%					

Deformación (mm)						
Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,56	2,12	6,38	2,44	2,98	mm
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,55	2,37	3,71			mm
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,61	2,39	2,63	3,41	3,35	mm
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,50	3,04	2,77	2,86	2,81	mm
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,56	2,96	3,28	3,14	2,89	mm
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,87	2,47	3,22	3,33	3,40	mm
Valor máximo	2,87	3,04	3,28	3,41	3,40	mm
Valor mínimo	2,50	2,37	2,63	2,44	2,81	mm
<b>AC 16 surf 35/50 S_Deformación plástica (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>2,61</b>	<b>2,65</b>	<b>2,97</b>	<b>3,03</b>	<b>3,08</b>	<b>mm</b>
Promedio	2,86					
Desv. Estánd.	0,40					
C.V.	13,83%					

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)			2,49		3,49	mm
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		2,59	2,51	2,28	3,00	mm
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		2,33	2,20	2,41	2,63	mm
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,21				mm
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,35		3,09		mm
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		2,33		2,19		mm
Valor máximo		2,59	2,51	3,09	3,49	mm
Valor mínimo		2,21	2,20	2,19	2,63	mm
<b>AC 16 surf BC35/50 S_Deformación plástica (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>2,36</b>	<b>2,40</b>	<b>2,49</b>	<b>3,04</b>	<b>mm</b>
Promedio	2,54					
Desv. Estánd.	0,38					
C.V.	14,85%					

Coef. Marshall						
Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	1,99	1,99		2,45	2,18	
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,04	2,04	0,91			
AC 16 surf 35/50 S (Serie I)	2,06	2,06	1,76	2,10	2,23	
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	2,18	2,10	2,55	3,32	2,39	
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	1,93	2,22	2,39	2,94	2,34	
AC 16 surf 35/50 S (Serie II)	1,61	2,58	2,52	2,23	1,80	
Valor máximo	2,18	2,58	2,55	3,32	2,39	
Valor mínimo	1,61	1,99	1,76	2,10	1,80	
<b>AC 16 surf 35/50 S_Cociente Marshall (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>1,97</b>	<b>2,17</b>	<b>2,30</b>	<b>2,61</b>	<b>2,19</b>	
Promedio	2,18					
Desv. Estánd.	0,44					
C.V.	19,98%					

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,26	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)					5,06	
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		5,85	7,17		7,42	
AC 16 surf BC35/50 S (Serie I)		6,66	7,65	6,50	8,05	
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		5,42				
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		5,05		5,63		
AC 16 surf BC35/50 S (Serie II)		4,21		9,64		
Valor máximo		6,66	7,65	9,64	8,05	
Valor mínimo		4,21	7,17	5,63	5,06	
<b>AC 16 surf BC35/50 S_Cociente Marshall (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>		<b>5,44</b>	<b>7,41</b>	<b>7,26</b>	<b>6,85</b>	
Promedio	6,49					
Desv. Estánd.	1,49					
C.V.	22,97%					

3.5 Ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22)

[Ensayos en pista de laboratorio con dispositivo pequeño, procedimiento B en aire, a 60 °C y 10000 ciclos]

Espesor promedio	Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
	Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
	T media de ensayo (°C)	60 ± 1	60 ± 1	60 ± 1	60 ± 1	°C
	Muestra 1 Lab.ULPGC	60,43	58,83		61,00	mm
	Muestra 2 Lab.ULPGC	60,43	58,83			mm
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	58,71	58,66	58,60	58,99	mm
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	57,44	57,13	57,34	56,93	mm
	Espesor medio máximo	60,43	58,83	58,60	61,00	mm
	Espesor medio mínimo	57,44	57,13	57,34	56,93	mm
	<b>Espesor promedio de las probetas (mm)</b>	<b>59,3</b>	<b>58,4</b>	<b>58,0</b>	<b>59,0</b>	<b>mm</b>
Densidad aparente	Muestra 1 Lab.ULPGC	2,340	2,388		2,433	Mg/m3
	Muestra 2 Lab.ULPGC	2,340	2,388			Mg/m3
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	2,302	2,467	2,338	2,469	Mg/m3
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	2,338	2,369	2,376	2,392	Mg/m3
	Densidad aparente máxima	2,340	2,467	2,376	2,469	Mg/m3
	Densidad aparente mínima	2,302	2,369	2,338	2,392	Mg/m3
	<b>Densidad aparente promedio de las probetas [Proced. D: Geométrico]</b>	<b>2,330</b>	<b>2,403</b>	<b>2,357</b>	<b>2,431</b>	<b>Mg/m3</b>
WTS (AIRE)	Muestra 1 Lab.ULPGC	0,228	0,262		0,328	mm/1000 ciclos
	Muestra 2 Lab.ULPGC	0,225	0,262			mm/1000 ciclos
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	0,201	0,275	0,293	0,229	mm/1000 ciclos
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	0,331	0,57	0,650	0,760	mm/1000 ciclos
	Valor máximo (WTS (AIRE))	0,331	0,571	0,650	0,760	mm/1000 ciclos
	Valor mínimo (WTS (AIRE))	0,201	0,262	0,293	0,229	mm/1000 ciclos
	<b>AC 16 surf 35/50 S_Promedio WTS AIRE (mm/1000 ciclos, entre 5000 y 10000 ciclos de carga)</b>	<b>0,246</b>	<b>0,342</b>	<b>0,472</b>	<b>0,439</b>	<b>mm/1000 ciclos</b>
	<b>Promedio</b>	<b>0,36</b>				
<b>Desv. Estánd.</b>	<b>0,18</b>					
<b>C.V.</b>	<b>51%</b>					

Espesor promedio	Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
	Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
	T media de ensayo (°C)	60 ± 1	60 ± 1	60 ± 1	60 ± 1	°C
	Muestra 1 Lab.ULPGC	53,50	51,50	52,25	51,50	mm
	Muestra 2 Lab.ULPGC	59,75	58,73	60,73	56,05	mm
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	58,93	59,08	58,68	58,90	mm
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	57,69	57,55	58,00	57,60	mm
	Espesor medio máximo	59,75	59,08	60,73	58,90	mm
	Espesor medio mínimo	53,50	51,50	52,25	51,50	mm
	<b>Espesor promedio de las probetas (mm)</b>	<b>57,5</b>	<b>56,7</b>	<b>57,4</b>	<b>56,0</b>	<b>mm</b>
Densidad aparente	Muestra 1 Lab.ULPGC	2,456	2,514	2,487	2,503	Mg/m3
	Muestra 2 Lab.ULPGC	2,219	2,203	2,126	2,304	Mg/m3
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	2,322	2,342	2,331	2,346	Mg/m3
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	2,364	2,391	2,369	2,385	Mg/m3
	Densidad aparente máxima	2,456	2,514	2,487	2,503	Mg/m3
	Densidad aparente mínima	2,219	2,203	2,126	2,304	Mg/m3
	<b>Densidad aparente promedio de las probetas [Proced. D: Geométrico]</b>	<b>2,340</b>	<b>2,363</b>	<b>2,328</b>	<b>2,385</b>	<b>Mg/m3</b>
WTS (AIRE)	Muestra 1 Lab.ULPGC	0,025	0,022	0,025	0,060	mm/1000 ciclos
	Muestra 2 Lab.ULPGC	0,049	0,034	0,236	0,040	mm/1000 ciclos
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	0,075	0,086	0,096	0,130	mm/1000 ciclos
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	0,084	0,070	0,079	0,120	mm/1000 ciclos
	Valor máximo (WTS (AIRE))	0,084	0,086	0,236	0,130	mm/1000 ciclos
	Valor mínimo (WTS (AIRE))	0,025	0,022	0,025	0,040	mm/1000 ciclos
	<b>AC 16 surf BC 35/50 S_Promedio WTS AIRE (mm/1000 ciclos, entre 5000 y 10000 ciclos de carga)</b>	<b>0,058</b>	<b>0,053</b>	<b>0,109</b>	<b>0,088</b>	<b>mm/1000 ciclos</b>
	<b>Promedio</b>	<b>0,08</b>				
<b>Desv. Estánd.</b>	<b>0,05</b>					
<b>C.V.</b>	<b>70%</b>					

RD (AIRE)	Muestra 1 Lab.ULPGC	5,648	6,200		6,994	mm
	Muestra 2 Lab.ULPGC	5,934	5,990			mm
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	3,435	4,827	4,698	5,088	mm
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	4,893	7,146	8,239	9,232	mm
	Valor máximo (RD (AIRE))	5,934	7,146	8,239	9,232	mm
	Valor mínimo (RD (AIRE))	3,435	4,827	4,698	5,088	mm
	<b>AC 16 surf 35/50 S_Promedio RD AIRE (mm a 10000 ciclos)</b>	<b>4,978</b>	<b>6,041</b>	<b>6,469</b>	<b>7,105</b>	<b>mm</b>
<b>Promedio</b>	<b>6,02</b>					
<b>Desv. Estánd.</b>	<b>1,57</b>					
<b>C.V.</b>	<b>26%</b>					

RD (AIRE)	Muestra 1 Lab.ULPGC	2,395	2,460	2,785	2,079	mm
	Muestra 2 Lab.ULPGC	1,300	0,767	2,412	1,193	mm
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	1,583	1,596	1,945	2,565	mm
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	1,41	1,54	1,479	2,092	mm
	Valor máximo (RD (AIRE))	2,395	2,460	2,785	2,565	mm
	Valor mínimo (RD (AIRE))	1,300	0,767	1,479	1,193	mm
	<b>AC 16 surf BC 35/50 S_Promedio RD AIRE (mm a 10000 ciclos)</b>	<b>1,672</b>	<b>1,591</b>	<b>2,155</b>	<b>1,982</b>	<b>mm</b>
<b>Promedio</b>	<b>1,85</b>					
<b>Desv. Estánd.</b>	<b>0,58</b>					
<b>C.V.</b>	<b>31%</b>					

PRD (AIRE)	Muestra 1 Lab.ULPGC	9,347	10,540		11,466	%
	Muestra 2 Lab.ULPGC	9,820	10,183			%
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	8,518	12,508	14,369	16,216	%
	Valor máximo (PRD (AIRE))	9,820	12,508	14,369	16,216	%
	Valor mínimo (PRD (AIRE))	8,518	10,183	14,369	11,466	%
	<b>AC 16 surf 35/50 S_Promedio PRD AIRE</b>	<b>9,23</b>	<b>11,08</b>	<b>14,37</b>	<b>13,84</b>	<b>%</b>
<b>Promedio</b>	<b>11,44</b>					
<b>Desv. Estánd.</b>	<b>2,51</b>					
<b>C.V.</b>	<b>22%</b>					

PRD (AIRE)	Muestra 1 Lab.ULPGC	4,477	4,777	5,330	4,037	%
	Muestra 2 Lab.ULPGC	2,176	1,306	3,972	2,128	%
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	2,444	2,679	2,958	4,184	%
	Valor máximo (PRD (AIRE))	4,477	4,777	5,330	4,184	%
	Valor mínimo (PRD (AIRE))	2,176	1,306	2,958	2,128	%
	<b>AC 16 surf BC 35/50 S_Promedio PRD AIRE</b>	<b>3,03</b>	<b>2,92</b>	<b>4,09</b>	<b>3,45</b>	<b>%</b>
<b>Promedio</b>	<b>3,37</b>					
<b>Desv. Estánd.</b>	<b>1,25</b>					
<b>C.V.</b>	<b>37%</b>					

### 3.6 Compactibilidad (UNE-EN 12697-10)

[Ensayos con misma muestra para todos los niveles de energía de compactación, anotando las disminuciones de espesor]

#### Densidades aparentes por el método geométrico (Mg/m<sup>3</sup>)

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
Serie I	2,394	2,410	2,340	2,442	Mg/m <sup>3</sup>
Serie I	2,388	2,374	2,368	2,370	Mg/m <sup>3</sup>
Serie I	2,380	2,439	2,324	2,409	Mg/m <sup>3</sup>
Valor máximo (2x100 golpes)	2,394	2,439	2,368	2,442	Mg/m <sup>3</sup>
Valor mínimo (2x100 golpes)	2,380	2,374	2,324	2,370	Mg/m <sup>3</sup>
<b>AC 16 surf 35/50 S (Promedio probetas 2x100 golpes)</b>	<b>2,387</b>	<b>2,408</b>	<b>2,344</b>	<b>2,407</b>	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>
Promedio	2,39				
Desv. Estánd.	0,04				
C.V.	2%				

Espesor Inicial calculado: t <sub>0</sub> (mm)	75,58	74,58	80,47	74,89	mm
Espesor mínimo calculado: t <sub>∞</sub> (mm)	62,44	61,79	63,97	59,71	mm

#### Resistencia a la compactación: T (21 Nm/golpes)

Serie I	29,99	27,56	17,23	13,32	21 Nm/golpes
Serie I	34,63	39,90	12,47	36,88	21 Nm/golpes
Serie I	12,69		40,93		21 Nm/golpes
Valor máximo (2x100 golpes)	34,63	39,90	40,93	36,88	21 Nm/golpes
Valor mínimo (2x100 golpes)	29,99	27,56	12,47	13,32	21 Nm/golpes
<b>AC 16 surf 35/50 S (Promedio probetas 2x100 golpes)</b>	<b>25,77</b>	<b>33,73</b>	<b>23,55</b>	<b>25,10</b>	<b>21 Nm/golpes</b>
Promedio	26,56				
Desv. Estánd.	11,65				
C.V.	44%				

#### Densidades aparentes por el método geométrico (Mg/m<sup>3</sup>)

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
Serie I	2,197	2,291	2,266	2,298	Mg/m <sup>3</sup>
Serie I	2,199	2,263	2,327	2,303	Mg/m <sup>3</sup>
Serie I	2,271	2,268	2,383	2,364	Mg/m <sup>3</sup>
Valor máximo (2x100 golpes)	2,271	2,291	2,383	2,364	Mg/m <sup>3</sup>
Valor mínimo (2x100 golpes)	2,197	2,263	2,266	2,298	Mg/m <sup>3</sup>
<b>AC 16 surf BC35/50 S (Promedio probetas 2x100golpes)</b>	<b>2,223</b>	<b>2,274</b>	<b>2,325</b>	<b>2,322</b>	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>
Promedio	2,29				
Desv. Estánd.	0,06				
C.V.	2%				

Espesor Inicial calculado: t <sub>0</sub> (mm)	83,46	81,73	79,87	80,70	mm
Espesor mínimo calculado: t <sub>∞</sub> (mm)	67,06	65,38	63,85	64,00	mm

#### Resistencia a la compactación: T (21 Nm/golpes)

Serie I	30,16	22,89	39,11	37,05	21 Nm/golpes
Serie I	39,16	37,99	39,70	37,50	21 Nm/golpes
Serie I	24,36	31,49	33,40		21 Nm/golpes
Valor máximo (2x100 golpes)	39,16	37,99	39,70	37,50	21 Nm/golpes
Valor mínimo (2x100 golpes)	24,36	22,89	33,40	37,05	21 Nm/golpes
<b>AC 16 surf BC35/50 S (Promedio probetas 2x100 golpes)</b>	<b>31,23</b>	<b>30,79</b>	<b>37,40</b>	<b>37,28</b>	<b>21 Nm/golpes</b>
Promedio	33,89				
Desv. Estánd.	6,00				
C.V.	18%				



3.7 Sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12)

[Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x50 golpes y rotas a tracción indirecta según UNE-EN 12697-23]

ITSd

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf 35/50 S ITSd (Serie I)	0,826	1,117	1,094		kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSd (Serie I)	0,750	1,130	1,034		kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSd (Serie I)	0,771	1,340	1,158		kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S ITSd (Promedio Serie I)</b>	<b>0,782</b>	<b>1,196</b>	<b>1,096</b>		<b>kPa</b>
AC 16 surf 35/50 S ITSd (Serie II)	1,782	2,195	1,895	2,074	kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSd (Serie II)	1,814		2,168	2,288	kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSd (Serie II)	1,786	1,953	2,279	2,101	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S ITSd (Promedio Serie II)</b>	<b>1,794</b>	<b>2,074</b>	<b>2,114</b>	<b>2,154</b>	<b>kPa</b>
AC 16 surf 35/50 S ITSd (Serie III)		1,835	1,737	1,662	kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSd (Serie III)		1,824	1,816	1,752	kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSd (Serie III)			2,072	1,573	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S ITSd (Promedio Serie III)</b>		<b>1,829</b>	<b>1,875</b>	<b>1,662</b>	<b>kPa</b>
Valor máximo (ITSd)	1,814	2,195	2,279	2,288	kPa
Valor mínimo (ITSd)	0,750	1,117	1,034	1,573	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S ITSd (Promedio todas las series)</b>	<b>1,288</b>	<b>1,700</b>	<b>1,695</b>	<b>1,908</b>	<b>kPa</b>
Promedio	1,64				
Desv. Estánd.	0,48				
C.V.	29,04%				

ITSw

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf 35/50 S ITSw (Serie I)	0,492	0,607	0,788		kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSw (Serie I)	0,501	0,644	0,723		kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSw (Serie I)	0,531	0,579	0,768		kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S ITSw (Promedio Serie I)</b>	<b>0,508</b>	<b>0,610</b>	<b>0,759</b>		<b>kPa</b>
AC 16 surf 35/50 S ITSw (Serie II)	1,307	1,295	1,420	2,064	kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSw (Serie II)	1,234		1,506	1,724	kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSw (Serie II)	1,173	1,622		2,045	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S ITSw (Promedio Serie II)</b>	<b>1,238</b>	<b>1,458</b>	<b>1,463</b>	<b>1,944</b>	<b>kPa</b>
AC 16 surf 35/50 S ITSw (Serie III)		1,123	1,081	1,325	kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSw (Serie III)		1,289	1,229	1,240	kPa
AC 16 surf 35/50 S ITSw (Serie III)		1,521	1,197	1,395	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S ITSw (Promedio Serie III)</b>		<b>1,311</b>	<b>1,169</b>	<b>1,320</b>	<b>kPa</b>
Valor máximo (ITSw)	1,307	1,622	1,506	2,064	kPa
Valor mínimo (ITSw)	0,492	0,579	0,723	1,240	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S ITSw (Promedio todas las series)</b>	<b>0,873</b>	<b>1,126</b>	<b>1,131</b>	<b>1,632</b>	<b>kPa</b>
Promedio	1,16				
Desv. Estánd.	0,44				
C.V.	38,21%				

ITSR

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf 35/50 S ITSR (Serie I)	64,94	51,00	69,31		%
AC 16 surf 35/50 S ITSR (Serie II)	69,01	70,31	69,23	90,24	%
AC 16 surf 35/50 S ITSR (Serie III)		71,69	62,34	79,41	%
Valor máximo (ITSR)	69,01	71,69	69,31	90,24	%
Valor mínimo (ITSR)	64,94	51,00	62,34	79,41	%
<b>AC 16 surf 35/50 S ITSR (Promedio todas las series)</b>	<b>66,98</b>	<b>64,33</b>	<b>66,96</b>	<b>84,83</b>	<b>%</b>
Promedio	69,75				
Desv. Estánd.	10,26				
C.V.	14,71%				

ITSd

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie I)		1,478	1,838	1,749	kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie I)	1,116	1,490	1,445	1,782	kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie I)	1,285	1,538	1,890	1,751	kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Promedio Serie I)</b>	<b>1,201</b>	<b>1,502</b>	<b>1,724</b>	<b>1,761</b>	<b>kPa</b>
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie II)		1,712	1,580	1,859	kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie II)					kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie II)					kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Promedio Serie II)</b>		<b>1,712</b>	<b>1,580</b>	<b>1,859</b>	<b>kPa</b>
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie III)	1,104		1,765		kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie III)	1,335		1,915		kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie III)			1,812		kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Promedio Serie III)</b>	<b>1,219</b>		<b>1,830</b>		<b>kPa</b>
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie IV)			1,430		kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie IV)			1,712		kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Serie IV)			1,575		kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Promedio Serie IV)</b>			<b>1,572</b>		<b>kPa</b>
Valor máximo (ITSd)	1,335	1,712	1,915	1,859	kPa
Valor mínimo (ITSd)	1,104	1,478	1,430	1,749	kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSd (Promedio todas las series)</b>	<b>1,210</b>	<b>1,607</b>	<b>1,677</b>	<b>1,810</b>	<b>kPa</b>
Promedio	1,60				
Desv. Estánd.	0,24				
C.V.	14,73%				

ITSw

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie I)		1,029	1,152	1,772	kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie I)	0,954	1,455	1,083	1,665	kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie I)	1,015	1,144	1,209	1,842	kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Promedio Serie I)</b>	<b>0,984</b>	<b>1,209</b>	<b>1,148</b>	<b>1,760</b>	<b>kPa</b>
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie II)	1,158	1,651	1,593	1,692	kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie II)	1,489		1,888	1,761	kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie II)					kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Promedio Serie II)</b>	<b>1,324</b>	<b>1,651</b>	<b>1,740</b>	<b>1,727</b>	<b>kPa</b>
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie III)			1,489		kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie III)	0,874		1,576		kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie III)	0,899				kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Promedio Serie III)</b>	<b>0,887</b>		<b>1,533</b>		<b>kPa</b>
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie IV)			1,597		kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie IV)			1,216		kPa
AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Serie IV)			1,399		kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Promedio Serie IV)</b>			<b>1,404</b>		<b>kPa</b>
Valor máximo (ITSw)	1,489	1,651	1,888	1,842	kPa
Valor mínimo (ITSw)	0,874	1,029	1,083	1,665	kPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S ITSw (Promedio todas las series)</b>	<b>1,065</b>	<b>1,430</b>	<b>1,456</b>	<b>1,743</b>	<b>kPa</b>
Promedio	1,38				
Desv. Estánd.	0,31				
C.V.	22,42%				

ITSR

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
AC 16 surf BC35/50 S ITSR (Serie I)	82,00	80,52	66,58	99,93	%
AC 16 surf BC35/50 S ITSR (Serie II)		96,39	110,17	92,89	%
AC 16 surf BC35/50 S ITSR (Serie III)	72,72		83,73		%
AC 16 surf BC35/50 S ITSR (Serie IV)			89,32		%
Valor máximo (ITSR)	82,00	96,39	110,17	99,93	%
Valor mínimo (ITSR)	72,72	80,52	66,58	92,89	%
<b>Mezclas con BC35/50 S ITSR (Promedio todas las series)</b>	<b>77,36</b>	<b>88,46</b>	<b>87,45</b>	<b>96,41</b>	<b>%</b>
Promedio	87,43				
Desv. Estánd.	13,03				
C.V.	14,91%				

### 3.8 Módulo de rigidez dinámico (UNE-EN 12697-26)

[Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY) compactadas por impacto según UNE-EN-12697-30 con 2x75 golpes]

#### Densidades aparentes por el método geométrico (probetas compactadas 2x75 golpes)

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
1	2,38	2,37	2,31	2,36	Mg/m <sup>3</sup>
2	2,35	2,34	2,33	2,33	Mg/m <sup>3</sup>
3	2,33	2,35	2,33	2,48	Mg/m <sup>3</sup>
<b>AC 16 surf 35/50 S_Promedio de las probetas</b>	<b>2,35</b>	<b>2,35</b>	<b>2,32</b>	<b>2,39</b>	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
1	2,21	2,22	2,34	2,36	Mg/m <sup>3</sup>
2	2,23	2,28	2,28	2,34	Mg/m <sup>3</sup>
3	2,24	2,28	2,24	2,31	Mg/m <sup>3</sup>
<b>AC 16 surf BC35/50 S_Promedio de las probetas</b>	<b>2,23</b>	<b>2,26</b>	<b>2,28</b>	<b>2,34</b>	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>

#### Módulo de rigidez (Probetas compactadas 2x75 golpes)

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
1	7285	6575	6358		MPa
2	7135	7038		5054	MPa
3	8029	7540	6294	4566	MPa
Valor máximo	8029	7540	6358	5054	MPa
Valor mínimo	7135	6575	6294	4566	MPa
<b>AC 16 surf 35/50 S_Sm [T=20 °C]</b>	<b>7483</b>	<b>7057</b>	<b>6326</b>	<b>4810</b>	<b>MPa</b>
1	7022	6365	6149		MPa
2	6870	6819		4911	MPa
3	7747	7295	6088	4441	MPa
Valor máximo	7747	7295	6149	4911	MPa
Valor mínimo	6870	6365	6088	4441	MPa
<b>AC 16 surf 35/50 S_Sm (k=0.6) [T=20 °C]</b>	<b>7213</b>	<b>6830</b>	<b>6119</b>	<b>4676</b>	<b>MPa</b>

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	5,5	6,0	6,5	7,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	5,82	6,38	6,95	7,53	%
1	7126	5888	7102	6059	MPa
2		6403	7394	6538	MPa
3	5344	6438		6881	MPa
Valor máximo	7126	6438	7394	6881	MPa
Valor mínimo	5344	5888	7102	6059	MPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S_Sm [T=20 °C]</b>	<b>6235</b>	<b>6243</b>	<b>7248</b>	<b>6493</b>	<b>MPa</b>
1	6881	5708	6894	5872	MPa
2		6195	7165	6328	MPa
3	5167	6228		6654	MPa
Valor máximo	6881	6228	7165	6654	MPa
Valor mínimo	5167	5708	6894	5872	MPa
<b>AC 16 surf BC35/50 S_Sm (k=0.6) [T=20 °C]</b>	<b>6024</b>	<b>6044</b>	<b>7029</b>	<b>6285</b>	<b>MPa</b>

### 3.9 Resistencia a la fatiga (UNE-EN 12697-24)

[Ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR) a partir de palcas compactadas con rodillo metálico según UNE-EN-12697-33 ]

#### MBC AC 16 surf 35/50 S (6% betún s./ peso total de mezcla)

Nº probeta	Peso (g)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Semiapertura (mm)	Sm (Mpa)	$\epsilon$ ( $\mu\text{m}$ )	Nº ciclos	Log10 (N)	Log10 ( $\epsilon$ )	Ln (N)	Ln ( $\epsilon$ )
11	2533	50,7	49,5	0,035	21387	93,7	10500	4,021	1,972	9,259	4,540
12	2600	51,7	49,9	0,05	20966	86,6	97500	4,989	1,938	11,488	4,461
13	2549	51,3	49,8	0,05	15471	90,9	96500	4,985	1,959	11,477	4,510
14	2599	51,6	49,8	0,04	15673	75	195500	5,291	1,875	12,183	4,317
21	2542	51,4	49,5	0,05	22880	81	60600	4,782	1,908	11,012	4,394
22	2583	51,9	46,7	0,03	23729						
23	Falló probeta										
24	2532	51,1	49,3	0,03	19287	41	653900	5,816	1,613	13,391	3,714
31	2525	51,3	49,7	0,04	16909	72,4	116200	5,065	1,860	11,663	4,282
32	2510	50,9	50	0,04	15779	57,8	323500	5,510	1,762	12,687	4,057
33	2553	51,8	50,2	0,03	17296	47,7	740400	5,869	1,679	13,515	3,865

#### MBC AC 16 surf BC 35/50 S (6% betún s./ peso total de mezcla)

Nº probeta	Peso (g)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Semiapertura (mm)	Sm (Mpa)	$\epsilon$ ( $\mu\text{m}$ )	Nº ciclos	Log10 (N)	Log10 ( $\epsilon$ )	Ln (N)	Ln ( $\epsilon$ )
11											
12	2581	53,5	51,6	0,04	19949	74,4	103200	5,014	1,872	11,544	4,309
13						58,1	536800	5,730	1,764	13,193	4,062
14	2610	52,6	52,5	0,05	15492	94,9	26500	4,423	1,977	10,185	4,553
21						66,8	289200	5,461	1,825	12,575	4,202
22						80,5	49200	4,692	1,906	10,804	4,388
31	2699	52,2	51,5	0,04	25278	84,1	61200	4,787	1,925	11,022	4,432
32	2710	52,8	51,9	0,03	12666	57,1	299400	5,476	1,757	12,610	4,045
33	2685	52,4	51,6	0,04	18792	62,5	104100	5,017	1,796	11,553	4,135

**3.10 Degradación granulométrica tras el proceso de compactación en probetas cilíndricas compactadas con 2x100 golpes**  
**Granulometría del esqueleto mineral [UNE-EN 933-1]**

<b>HMA AC16 surf 35/50 S</b>				<b>Granulometrías tras compactación de probetas cilíndricas con 2x100 golpes</b>				
Tamaño de las partículas (mm)	Límite superior del huso	Límite inferior del huso	B_Granulometría inicial para HMA AC16 35/50 S	35/50_5,5%	35/50_6%	35/50_6,5%	35/50_7%	
32	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	%
22	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	%
16	100,00	90,00	98,02	98,91	97,72	98,61	97,75	%
11	93,00	78,00	84,89	88,69	87,66	87,95	89,23	%
8	75,00	60,00	65,40	78,19	78,16	77,66	78,62	%
4	50,00	35,00	46,79	54,74	56,02	56,78	55,45	%
2	38,00	24,00	27,83	40,43	39,56	38,57	38,16	%
0,500	21,00	11,00	13,40	17,40	15,58	15,71	15,70	%
0,250	15,00	7,00	9,55	11,61	10,96	11,40	11,50	%
0,125	10,00	5,00	6,78	4,16	6,77	5,78	7,19	%
0,063	7,00	3,00	4,75	0,40	1,81	0,41	2,67	%

<b>HMA AC16 surf BC35/50 S</b>				<b>Granulometrías tras compactación de probetas cilíndricas con 2x100 golpes</b>				
Tamaño de las partículas (mm)	Límite superior del huso	Límite inferior del huso	BC_Granulometría inicial para HMA AC16 BC35/50 S	BC-35/50_5,5%	BC-35/50_6%	BC-35/50_6,5%	BC-35/50_7%	
32	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	%
22	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	%
16	100,00	90,00	98,02	98,16	97,63	99,18	98,12	%
11	93,00	78,00	84,89	87,88	88,49	88,74	87,90	%
8	75,00	60,00	65,40	75,97	75,85	73,63	74,86	%
4	50,00	35,00	46,79	53,01	55,56	54,46	55,45	%
2	38,00	24,00	27,83	34,67	38,53	37,55	36,63	%
0,500	21,00	11,00	13,40	13,15	15,40	15,87	15,60	%
0,250	15,00	7,00	9,55	9,76	11,16	11,08	11,80	%
0,125	10,00	5,00	6,78	6,47	6,54	8,34	7,06	%
0,063	7,00	3,00	4,75	0,96	1,92	1,92	2,60	%

## 4 MEZCLAS SEMICALIENTES CON BETÚN CAUCHO Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS

---



#### 4.1 Densidad máxima de mezclas bituminosas [UNE-EN 12697-5]

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
MBSC 6% BC35/50 (Proced. A)	2,572	2,552	2,534	2,552	
MBSC 6% BC35/50 (Proced. A)	2,548	2,554	2,526	2,583	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Proced. A)	2,560		2,556	2,559	Mg/m <sup>3</sup>
Valor máximo	2,572	2,554	2,556	2,583	Mg/m <sup>3</sup>
Valor mínimo	2,548	2,552	2,526	2,552	Mg/m <sup>3</sup>
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>2,56</b>	<b>2,55</b>	<b>2,54</b>	<b>2,56</b>	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>
Promedio	2,55				
Desv. Estánd.	0,02				
C.V.	0,62%				

#### 4.2 Densidad aparente de probetas bituminosas (UNE-EN 12697-6)

[Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x75 golpes]

##### Proced. D: Geométrico

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	2,194	2,359	2,300	2,270	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	2,176	2,292	2,285	2,299	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	2,199	2,274	2,263	2,273	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie II)	2,320	2,187	2,324	2,332	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie II)	2,284	2,266	2,321	2,341	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie II)	2,252		2,291	2,312	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie III)	2,290	2,319	2,344	2,321	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie III)	2,243	2,251	2,279	2,295	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie III)	2,221	2,212	2,244	2,340	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie IV)	2,281	2,335			Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie IV)	2,251	2,285			Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie IV)	2,252	2,329			Mg/m <sup>3</sup>
Valor máximo (2x75 golpes)	2,320	2,359	2,344	2,341	Mg/m <sup>3</sup>
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,176	2,187	2,244	2,270	Mg/m <sup>3</sup>
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>2,25</b>	<b>2,28</b>	<b>2,29</b>	<b>2,31</b>	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>
Promedio	2,28				
Desv. Estánd.	0,05				
C.V.	2,02%				

##### Proced. B: SSD

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	2,288	2,410	2,371	2,436	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	2,288	2,375	2,370	2,430	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	2,271	2,349	2,370	2,401	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie II)	2,401	2,305	2,387	2,403	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie II)	2,355	2,301	2,377	2,440	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie II)	2,310		2,357	2,382	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie III)	2,390	2,385	2,454	2,418	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie III)	2,332	2,382	2,376	2,421	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie III)	2,344	2,322	2,379	2,441	Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie IV)	2,395	2,393			Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie IV)	2,388	2,375			Mg/m <sup>3</sup>
MBSC 6% BC35/50 (Serie IV)	2,349	2,427			Mg/m <sup>3</sup>
Valor máximo (2x75 golpes)	2,401	2,410	2,454	2,441	Mg/m <sup>3</sup>
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,271	2,301	2,357	2,382	Mg/m <sup>3</sup>
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>2,34</b>	<b>2,37</b>	<b>2,38</b>	<b>2,42</b>	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>
Promedio	2,37				
Desv. Estánd.	0,05				
C.V.	1,90%				

#### 4.3 Contenido de huecos en las probetas bituminosas (UNE-EN 12697-8)

[Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x75 golpes]

##### Contenido de huecos de aire de la mezcla (Vm)

###### Proced. D: Geométrico

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>12,27</b>	<b>10,79</b>	<b>9,61</b>	<b>9,96</b>	<b>%</b>

Promedio	10,66
Desv. Estánd.	1,18
C.V.	11,08%

###### Proced. B: SSD

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>8,49</b>	<b>7,31</b>	<b>6,15</b>	<b>5,68</b>	<b>%</b>

Promedio	6,91
Desv. Estánd.	1,26
C.V.	18,22%

##### Contenido de huecos en el árido mineral (VMA)

###### Proced. D: Geométrico

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>25,38</b>	<b>24,12</b>	<b>23,00</b>	<b>23,44</b>	<b>%</b>

Promedio	23,99
Desv. Estánd.	1,04
C.V.	4,32%

###### Proced. B: SSD

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>22,16</b>	<b>21,12</b>	<b>20,06</b>	<b>19,80</b>	<b>%</b>

Promedio	20,78
Desv. Estánd.	1,08
C.V.	5,21%

##### Contenido de huecos rellenos con ligante (VFB) existentes en el árido mineral

###### Proced. D: Geométrico

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>51,67</b>	<b>55,24</b>	<b>58,22</b>	<b>57,50</b>	<b>%</b>

Promedio	55,66
Desv. Estánd.	2,94
C.V.	5,29%

###### Proced. B: SSD

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio muestras ensayadas)</b>	<b>61,70</b>	<b>65,39</b>	<b>69,33</b>	<b>71,33</b>	<b>%</b>

Promedio	66,93
Desv. Estánd.	4,28
C.V.	6,39%



#### 4.4 Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34)

[Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x75 golpes]

##### Estabilidad (kN)

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	/	11,09	14,38	/	kN
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	9,39	10,08	13,97	14,01	kN
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	10,29	/	12,96	14,16	kN
Valor máximo	10,29	11,09	14,38	14,16	kN
Valor mínimo	9,39	10,08	12,96	14,01	kN
<b>MBSC BC35/50 (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>9,84</b>	<b>10,58</b>	<b>13,77</b>	<b>14,08</b>	<b>kN</b>

<b>Promedio</b>	12,07
<b>Desv. Estánd.</b>	2,03
<b>C.V.</b>	16,79%

##### Deformación (mm)

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	/	4,58	2,96	/	mm
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	5,33	3,41	3,54	2,89	mm
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	5,73	/	3,55	2,62	mm
Valor máximo	5,73	4,58	3,55	2,89	mm
Valor mínimo	5,33	3,41	2,96	2,62	mm
<b>MBSC BC35/50 (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>5,53</b>	<b>4,00</b>	<b>3,35</b>	<b>2,75</b>	<b>mm</b>

<b>Promedio</b>	3,84
<b>Desv. Estánd.</b>	1,11
<b>C.V.</b>	28,89%

##### Coef. Marshall

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	/	2,42	4,87	/	
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	1,76	2,96	3,95	4,85	
MBSC 6% BC35/50 (Serie I)	1,80	/	3,65	5,41	
Valor máximo	1,80	2,96	4,87	5,41	
Valor mínimo	1,76	2,42	3,65	4,85	
<b>MBSC BC35/50 (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>1,78</b>	<b>2,69</b>	<b>4,16</b>	<b>5,13</b>	

<b>Promedio</b>	3,52
<b>Desv. Estánd.</b>	1,37
<b>C.V.</b>	38,85%

**4.5 Ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22)**

[Ensayos en pista de laboratorio con dispositivo pequeño, procedimiento B en aire, a 60 °C y 10000 ciclos]

Espesor promedio	T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
	T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
	T media de ensayo (°C)	60 ± 1	60 ± 1	60 ± 1	60 ± 1	°C
	Muestra 1 Lab.GOBCAN	58,13	57,75	57,68	57,56	mm
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	58,12	57,39	57,78	57,22	mm
	Muestra 1 Lab.GOBCAN (2)	56,95	57,96			mm
	Muestra 2 Lab.GOBCAN (2)	57,27	59,79			mm
	Valor máximo (Espesor medio)	58,13	59,79	57,78	57,56	mm
	Valor mínimo (Espesor medio)	56,95	57,39	57,68	57,22	mm
<b>MBSC 6% BC35/50_Espesor promedio de las probetas (mm)</b>		<b>57,6</b>	<b>58,2</b>	<b>57,7</b>	<b>57,4</b>	<b>mm</b>
Densidad aparente	Muestra 1 Lab.GOBCAN	2,342	2,356	2,36	2,365	Mg/m3
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	2,342	2,375	2,35	2,379	Mg/m3
	Muestra 1 Lab.GOBCAN (2)	2,390	2,348			Mg/m3
	Muestra 2 Lab.GOBCAN (2)	2,3770	2,292			Mg/m3
	Valor máximo (Densidad aparente)	2,390	2,375	2,356	2,379	Mg/m3
	Valor mínimo (Densidad aparente)	2,342	2,348	2,353	2,365	Mg/m3
	<b>MBSC 6% BC35/50_Densidad aparente promedio de las probetas [Proced. D: Geométrico]</b>		<b>2,363</b>	<b>2,360</b>	<b>2,355</b>	<b>2,372</b>
WTS <sub>[AIRE]</sub>	Muestra 1 Lab.GOBCAN	0,321	0,207	0,135	0,180	mm/1000 ciclos
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	0,302	0,253	0,231	0,134	mm/1000 ciclos
	Muestra 1 Lab.GOBCAN (2)	0,092	0,093			mm/1000 ciclos
	Muestra 2 Lab.GOBCAN (2)	0,074	0,138			mm/1000 ciclos
	Valor máximo (WTS <sub>[AIRE]</sub> )	0,321	0,253	0,231	0,180	mm/1000 ciclos
	Valor mínimo (WTS <sub>[AIRE]</sub> )	0,074	0,093	0,135	0,134	mm/1000 ciclos
	<b>MBSC 6% BC35/50_WTS <sub>[AIRE]</sub></b>		<b>0,197</b>	<b>0,173</b>	<b>0,183</b>	<b>0,157</b>

Promedio 0,18  
 Desv. Estándar 0,08  
 C.V 46,19%

RD <sub>[AIRE]</sub>	Muestra 1 Lab.GOBCAN	3,714	4,805	2,620	2,839	mm
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	3,480	4,176	3,261	2,427	mm
	Muestra 1 Lab.GOBCAN (2)	2,364	2,323			mm
	Muestra 2 Lab.GOBCAN (2)	3,230	2,856			mm
	Valor máximo (RD <sub>[AIRE]</sub> )	3,714	4,805	3,261	2,839	mm
	Valor mínimo (RD <sub>[AIRE]</sub> )	2,364	2,323	2,620	2,427	mm
	<b>MBSC 6% BC35/50_Promedio RD <sub>[AIRE]</sub> (mm a 10000 ciclos)</b>		<b>3,197</b>	<b>3,540</b>	<b>2,941</b>	<b>2,633</b>

Promedio 3,17  
 Desv. Estándar 0,77  
 C.V 24,25%

PRD <sub>[AIRE]</sub>	Muestra 1 Lab.GOBCAN	8,320	6,389	4,542	4,932	%
	Muestra 2 Lab.GOBCAN	7,277	5,988	5,644	4,242	%
	Muestra 1 Lab.GOBCAN (2)	4,008	4,151			%
	Muestra 2 Lab.GOBCAN (2)	4,777	5,640			%
	Valor máximo (PRD <sub>[AIRE]</sub> )	8,320	6,389	5,644	4,932	%
	Valor mínimo (PRD <sub>[AIRE]</sub> )	4,008	4,151	4,542	4,242	%
	<b>MBSC 6% BC35/50_PRD <sub>[AIRE]</sub> (%)</b>		<b>6,10</b>	<b>5,54</b>	<b>5,09</b>	<b>4,59</b>

Promedio 5,49  
 Desv. Estándar 1,33  
 C.V 24,28%

#### 4.6 Compactibilidad (UNE-EN 12697-10)

[Ensayos con misma muestra para todos los niveles de energía de compactación, anotando las disminuciones de espesor]

##### Densidades aparentes por el método geométrico

T mezclado	140	150	160	170	°C
T compactacion	130	140	150	160	°C
Serie I	2,311	2,357	2,317	2,379	Mg/m <sup>3</sup>
Serie I	2,149	2,355	2,338	2,318	Mg/m <sup>3</sup>
Serie I	2,321	2,339		2,330	Mg/m <sup>3</sup>
Valor máximo (2x100 golpes)	2,321	2,357	2,393	2,379	Mg/m <sup>3</sup>
Valor mínimo (2x100 golpes)	2,149	2,339	2,317	2,318	Mg/m <sup>3</sup>
<b>MBSC 6% BC35/50 (Promedio probetas 2x100 golpes)</b>	<b>2,260</b>	<b>2,350</b>	<b>2,328</b>	<b>2,342</b>	<b>Mg/m<sup>3</sup></b>
Promedio	2,32				
Desv. Estánd.	0,06				
C.V.	2,59%				

<b>Espesor Inicial calculado: t<sub>0</sub> (mm)</b>	<b>83,23</b>	<b>79,78</b>	<b>78,72</b>	<b>79,34</b>	<b>mm</b>
<b>Espesor mínimo calculado: t<sub>∞</sub> (mm)</b>	<b>66,39</b>	<b>63,36</b>	<b>63,33</b>	<b>63,51</b>	<b>mm</b>

##### Resistencia a la compactación: T (21 Nm/golpes)

Serie I	46,29	24,62	26,23	25,66	21 Nm/golpes
Serie I	55,85	30,80	33,35	36,27	21 Nm/golpes
Serie I	42,08	36,11	22,13	35,63	21 Nm/golpes
Valor máximo (2x100 golpes)	55,85	36,11	33,35	36,27	21 Nm/golpes
Valor mínimo (2x100 golpes)	42,08	24,62	22,13	25,66	21 Nm/golpes
<b>MBSC 6% BC35/50_T (Promedio probetas 2x100 golpes)</b>	<b>48,07</b>	<b>30,51</b>	<b>27,24</b>	<b>32,52</b>	<b>21 Nm/golpes</b>
Promedio	34,59				
Desv. Estánd.	9,87				
C.V.	28,54%				

#### 4.7 Sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12)

[Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x50 golpes y rotas a tracción indirecta según UNE-EN 12697-23]

##### ITSd

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactacion (°C)	130	140	150	160	°C
MBSC 6% BC35/50 ITSd (Serie I)	1,096	1,138	1,081	0,947	kPa
MBSC 6% BC35/50 ITSd (Serie I)	1,717	1,189	1,423		kPa
MBSC 6% BC35/50 ITSd (Serie I)	1,168	0,777	1,369	1,261	kPa
<b>MBSC 6% BC35/50 ITSd (Promedio Serie I)</b>	<b>1,327</b>	<b>1,035</b>	<b>1,291</b>	<b>1,104</b>	<b>kPa</b>
MBSC 6% BC35/50 ITSd (Serie II)				1,487	kPa
MBSC 6% BC35/50 ITSd (Serie II)				1,437	kPa
MBSC 6% BC35/50 ITSd (Serie II)				1,374	kPa
<b>MBSC 6% BC35/50 ITSd (Promedio Serie II)</b>				<b>1,432</b>	<b>kPa</b>
Valor máximo (ITSd)	1,717	1,189	1,423	1,487	kPa
Valor mínimo (ITSd)	1,096	0,777	1,081	0,947	kPa
<b>MBSC 6% BC35/50 ITSd (Promedio de todas las series)</b>	<b>1,327</b>	<b>1,035</b>	<b>1,291</b>	<b>1,268</b>	<b>kPa</b>
Promedio	1,25				
Desv. Estánd.	0,24				
C.V.	18,22%				

##### ITSR

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactacion (°C)	130	140	150	160	°C
MBSC BC-35/50 ITSR (Serie 1)	71,36	84,52	87,85	98,33	%
MBSC BC-35/50 ITSR (Serie 2)				90,76	%
Valor máximo (ITSR)	71,36	84,52	87,85	98,33	%
Valor mínimo (ITSR)	71,36	84,52	87,85	90,76	%
<b>MBSC 6% BC35/50 ITSR</b>	<b>71,36</b>	<b>84,52</b>	<b>87,85</b>	<b>94,54</b>	<b>%</b>
Promedio	86,57				
Desv. Estánd.	9,91				
C.V.	13,89%				

##### ITSw

T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
T compactacion (°C)	130	140	150	160	°C
MBSC 6% BC35/50 ITSw (Serie I)	0,856	0,782		1,025	kPa
MBSC 6% BC35/50 ITSw (Serie I)	1,012	0,908	1,252		kPa
MBSC 6% BC35/50 ITSw (Serie I)	0,972	0,933	1,051	1,146	kPa
<b>MBSC 6% BC35/50 ITSw (Promedio Serie I)</b>	<b>0,947</b>	<b>0,874</b>	<b>1,151</b>	<b>1,085</b>	<b>kPa</b>
MBSC 6% BC35/50 ITSw (Serie II)				1,234	kPa
MBSC 6% BC35/50 ITSw (Serie II)				1,337	kPa
MBSC 6% BC35/50 ITSw (Serie II)				1,329	kPa
<b>MBSC 6% BC35/50 ITSw (Promedio Serie II)</b>				<b>1,300</b>	<b>kPa</b>
Valor máximo (ITSw)	1,012	0,933	1,252	1,337	kPa
Valor mínimo (ITSw)	0,856	0,782	1,051	1,025	kPa
<b>MBSC 6% BC35/50 ITSw (Promedio de todas las series)</b>	<b>0,947</b>	<b>0,874</b>	<b>1,151</b>	<b>1,193</b>	<b>kPa</b>
Promedio	1,06				
Desv. Estánd.	0,18				
C.V.	19,11%				

#### 4.8 Módulo de rigidez dinámico (UNE-EN 12697-26)

[Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY) compactadas por impacto según UNE-EN-12697-30 con 2x75 golpes]

Densidades aparentes	T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
	T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
	Probeta 1	2,194	2,359	2,300	2,270	MPa
	Probeta 2	2,176	2,292	2,285	2,299	MPa
	Probeta 3	2,199	2,274	2,263	2,273	MPa
	Valor máximo	2,199	2,359	2,300	2,299	MPa
	Valor mínimo	2,176	2,274	2,263	2,270	MPa
	<b>MBSC 6% BC35/50_Densidad aparente (Proced. Geométrico)</b>	<b>2,190</b>	<b>2,308</b>	<b>2,283</b>	<b>2,281</b>	<b>MPa</b>
Promedio	2,265					
Desv. Estánd.	0,052					
C.V.	2,30%					

Coef. Poisson $\nu$	0,3
Temperatura (°C)	20
Amplitud de la carga (N)	3400
Frecuencia de carga (Hz)	2,2
Tiempo de relajación (ms)	2750

Sm [T=20 °C]	T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
	T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
	Probeta 1	7503	8609	9369	8403	MPa
	Probeta 2	7387	8195	10203	7415	MPa
	Probeta 3	6706	6887	8723	8038	MPa
	Valor máximo	7503	8609	10203	8403	MPa
	Valor mínimo	6706	6887	8723	7415	MPa
	<b>MBSC 6% BC35/50_Sm [T=20 °C]</b>	<b>7199</b>	<b>7897</b>	<b>9432</b>	<b>7952</b>	<b>MPa</b>
Promedio	8120					
Desv. Estánd.	1024					
C.V.	12,61%					

Sm (k=0.6) [T=20°C]	T mezclado (°C)	140	150	160	170	°C
	T compactación (°C)	130	140	150	160	°C
	Probeta 1	7308	8397	9116	8172	MPa
	Probeta 2	7171	7963	9932	7218	MPa
	Probeta 3	6543	6702	8501	7844	MPa
	Valor máximo	7308	8397	9932	8172	MPa
	Valor mínimo	6543	6702	8501	7218	MPa
	<b>MBSC 6% BC35/50_Sm (k=0.6) [T=20°C]</b>	<b>7007</b>	<b>7687</b>	<b>9183</b>	<b>7745</b>	<b>MPa</b>
Promedio	7906					
Desv. Estánd.	996					
C.V.	12,60%					

4.9 Resistencia a la fatiga (UNE-EN 12697-24)

[Ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas (4PB-PR) a partir de palcas compactadas con rodillo metálico según UNE-EN-12697-33 ]

	Nº probeta	Peso (g)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Amplitud (m)	Sm (Mpa)	$\epsilon$ ( $\mu\text{m}$ )	Nº ciclos	Log10 (N)	Log10 ( $\epsilon$ )	Ln (N)	Ln ( $\epsilon$ )	
MBSC 6% BC35/50 (T compactación=130 °C)	11	2630	52,8	50,6	0,04	14146	52,6	140500	5,148	1,721	11,853	3,963	
	12	2664	52,9	50,8	0,05	18637	72,2	37100	4,569	1,859	10,521	4,279	
	13	2661	52,2	51	0,04	16816	48	252600	5,402	1,681	12,440	3,871	
	14	2626	52,4	50,9	0,05	15557	68,4	53700	4,730	1,835	10,891	4,225	
	21	2570	52,1	50,7	0,04	18798	45,1	117500	5,070	1,654	11,674	3,809	
	23	2604	51,7	50,9	0,04	19507	62,5	46900	4,671	1,796	10,756	4,135	
	24	2614	51,1	51	0,05	19098	75,4	20400	4,310	1,877	9,923	4,323	
	31	2618	52,5	51,6	0,03	13331	53,5	77700	4,890	1,728	11,261	3,980	
MBSC 6% BC35/50 (T compactación=145 °C)	11	2615	52,3	51,3	0,03	14741	55	235200	5,371	1,740	12,368	4,007	
	12	2649	51,7	51,1	0,04	15572	73	29900	4,476	1,863	10,306	4,290	
	13	2661	52,6	50,5	0,04	19086	39,9	292800	5,467	1,601	12,587	3,686	
	14	2621	52	50,3	0,05	19423	78,6	7500	3,875	1,895	8,923	4,364	
	21	2536	52,3	50,9	0,04	13829	69,1	22500	4,352	1,839	10,021	4,236	
	22	2600	51,8	51,3	0,03	9970	56,2	29900	4,476	1,750	10,306	4,029	
	23	2626	51,6	51,5	0,03	19099	38,4	237800	5,376	1,584	12,379	3,648	
	24	2656	52,2	51,6	0,04	13830	72	34600	4,539	1,857	10,452	4,277	
	31	2594	51,9	51,7	0,05	15334	57,2	69000	4,839	1,757	11,142	4,047	
	34	Falló probeta											
MBSC 6% BC35/50 (T compactación=160 °C)	11	2540	50,9	50,4	0,05	22453	76,1	24500	4,389	1,881	10,106	4,332	
	12	2608	51,3	50,8	0,03	21049	37,2	954300	5,980	1,571	13,769	3,616	
	13	2559	50,5	50,9	0,04	16132	73,9	142400	5,154	1,869	11,866	4,303	
	14	2556	50,6	51,1	0,04	16245	74	163800	5,214	1,869	12,006	4,304	
	21	2609	51,7	51	0,03	24673	36,9	151500	5,180	1,567	11,928	3,608	
	22	2596	51,8	51,3	0,04	17141	73,5	102300	5,010	1,866	11,536	4,297	
	23	2579	51,4	51,1	0,05	15261	92,8	42000	4,623	1,968	10,645	4,530	
	24	2604	52	51,1	0,05	16973	92,7	16000	4,204	1,967	9,680	4,529	
	32	Falló probeta											
	33	Falló probeta											
	34	Falló probeta											

## 5 MEZCLAS EN CALIENTE CON PET Y ÁRIDOS VOLCÁNICOS





## 5.1 Densidad máxima de mezclas bituminosas [UNE-EN 12697-5]

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)	2,551	2,543	2,544	2,453	2,466	2,471	2,432	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)	2,563	2,553	2,543	2,511	2,486	2,454	2,434	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		2,541						Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		2,531						Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	2,576		2,543	2,518	2,487	2,482	2,445	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	2,613		2,544	2,516	2,462	2,461	2,458	Mg/m3
Valor máximo	2,613	2,553	2,544	2,518	2,487	2,482	2,458	Mg/m3
Valor mínimo	2,551	2,531	2,543	2,453	2,462	2,454	2,432	Mg/m3
<b>AC16 surf 35/50 S+PET</b>	<b>2,58</b>	<b>2,54</b>	<b>2,54</b>	<b>2,50</b>	<b>2,48</b>	<b>2,47</b>	<b>2,44</b>	<b>Mg/m3</b>
<b>Promedio</b>	2,51							
<b>Desv. Estánd.</b>	0,05							
<b>C.V.</b>	1,93%							

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,5706	2,549	2,521	2,520	2,511	2,467	2,441	Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,5709	2,487	2,527	2,524	2,496	2,467	2,424	Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)		2,562						Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)		2,546						Mg/m3
Valor máximo	2,571	2,562	2,527	2,524	2,511	2,467	2,441	Mg/m3
Valor mínimo	2,571	2,487	2,521	2,520	2,496	2,467	2,424	Mg/m3
<b>AC16 surf 50/70 S+PET</b>	<b>2,57</b>	<b>2,54</b>	<b>2,52</b>	<b>2,52</b>	<b>2,50</b>	<b>2,47</b>	<b>2,43</b>	<b>Mg/m3</b>
<b>Promedio</b>	2,51							
<b>Desv. Estánd.</b>	0,04							
<b>C.V.</b>	1,79%							

**5.2 Densidad aparente de probetas bituminosas (UNE-EN 12697-6) [Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x75 golpes]**

**Proced. D: Geométrico**

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET (% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)	2,369	2,428	2,305	2,204	2,116	2,133	2,105	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)	2,340	2,414	2,355	2,207	2,163	2,110	2,108	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)	2,351	2,387	2,238	2,261	2,169	2,150	2,051	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	2,325	2,440		2,150	2,171			Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	2,324							Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	2,309							Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	2,325	2,445	2,294	2,192	2,183	2,144	2,071	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	2,396	2,410	2,202	2,212	2,214	2,137	2,068	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	2,397	2,378	2,301	2,220	2,091	2,079	2,089	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)		2,441	2,286					Mg/m3
Valor máximo (2x75 golpes)	2,397	2,445	2,355	2,261	2,214	2,150	2,108	Mg/m3
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,309	2,378	2,202	2,150	2,091	2,079	2,051	Mg/m3
<b>AC16 surf 35/50 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>2,35</b>	<b>2,42</b>	<b>2,28</b>	<b>2,21</b>	<b>2,16</b>	<b>2,13</b>	<b>2,08</b>	<b>Mg/m3</b>

**Promedio** 2,25  
**Desv. Estánd.** 0,12  
**C.V.** 5,34%

AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,345	2,288	2,241	2,247	2,096	2,097	2,065	Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,338	2,350	2,306	2,221	2,138	2,067	2,081	Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,344	2,325	2,295	2,228	2,116	2,107	2,066	Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,391							Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie II)	2,367	2,235	2,270	2,174	2,132			Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie II)	2,375	2,393	2,262	2,230	2,112			Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie II)	2,291	2,283	2,339	2,245	2,181			Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie II)	2,305	2,367	2,309	2,236	2,122			Mg/m3
Valor máximo (2x75 golpes)	2,391	2,393	2,339	2,247	2,181	2,107	2,081	Mg/m3
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,291	2,235	2,241	2,174	2,096	2,067	2,065	Mg/m3
<b>AC16 surf 50/70 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>2,34</b>	<b>2,32</b>	<b>2,29</b>	<b>2,23</b>	<b>2,13</b>	<b>2,09</b>	<b>2,07</b>	<b>Mg/m3</b>

**Promedio** 2,24  
**Desv. Estánd.** 0,10  
**C.V.** 4,59

**Proced. B: SSD**

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET (% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)	2,444	2,488	2,335	2,220	2,178	2,216	2,165	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)	2,441	2,472	2,363	2,254	2,245	2,195	2,198	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)	2,442	2,438		2,260	2,257	2,243	2,170	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)		2,467		2,255	2,243			Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)								Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)								Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	2,433		2,359	2,339	2,323	2,248	2,187	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	2,469		2,313	2,295	2,318	2,255	2,190	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	2,469		2,390	2,326	2,278	2,234	2,197	Mg/m3
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)			2,357					Mg/m3
Valor máximo (2x75 golpes)	2,469	2,488	2,390	2,339	2,323	2,255	2,198	Mg/m3
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,433	2,438	2,313	2,220	2,178	2,195	2,165	Mg/m3
<b>AC16 surf 35/50 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>2,45</b>	<b>2,47</b>	<b>2,35</b>	<b>2,28</b>	<b>2,26</b>	<b>2,23</b>	<b>2,18</b>	<b>Mg/m3</b>

**Promedio** 2,31  
**Desv. Estánd.** 0,10  
**C.V.** 4,36%

AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,425	2,374	2,327	2,328	2,195	2,169	2,143	Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,425	2,405	2,398	2,310	2,216	2,171	2,138	Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,406	2,405	2,390	2,315	2,208	2,181	2,171	Mg/m3
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,451							Mg/m3
								Mg/m3
								Mg/m3
								Mg/m3
Valor máximo (2x75 golpes)	2,451	2,405	2,398	2,328	2,216	2,181	2,171	Mg/m3
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,406	2,374	2,327	2,310	2,195	2,169	2,138	Mg/m3
<b>AC16 surf 50/70 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>2,43</b>	<b>2,39</b>	<b>2,37</b>	<b>2,32</b>	<b>2,21</b>	<b>2,17</b>	<b>2,15</b>	<b>Mg/m3</b>

**Promedio** 2,30  
**Desv. Estánd.** 0,11  
**C.V.** 4,79%

### 5.3 Contenido de huecos en las probetas bituminosas (UNE-EN 12697-8) [Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x75 golpes]

#### Contenido de huecos de aire de la mezcla (Vm)

##### Proced. D: Geométrico

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
<b>AC16 surf 35/50 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>8,83</b>	<b>4,88</b>	<b>10,24</b>	<b>11,73</b>	<b>12,81</b>	<b>13,84</b>	<b>14,75</b>	%
<b>AC16 surf 50/70 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>8,80</b>	<b>8,50</b>	<b>9,31</b>	<b>11,75</b>	<b>14,77</b>	<b>15,25</b>	<b>14,87</b>	%
Promedio	11,01	11,89						
Desv. Estánd.	3,38	3,06						
C.V.	30,7	25,7						

##### Proced. B: SSD

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
<b>AC16 surf 35/50 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>4,89</b>	<b>2,98</b>	<b>7,48</b>	<b>8,85</b>	<b>8,56</b>	<b>9,53</b>	<b>10,55</b>	%
<b>AC16 surf 50/70 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>5,60</b>	<b>5,57</b>	<b>6,04</b>	<b>8,11</b>	<b>11,87</b>	<b>11,89</b>	<b>11,59</b>	%
Promedio	7,55	8,67						
Desv. Estánd.	2,70	3,04						
C.V.	35,7	35,1						

#### Contenido de huecos en el árido mineral (VMA)

##### Proced. D: Geométrico

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
<b>AC16 surf 35/50 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>22,35</b>	<b>18,80</b>	<b>23,38</b>	<b>24,43</b>	<b>25,23</b>	<b>26,08</b>	<b>26,74</b>	%
<b>AC16 surf 50/70 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>22,30</b>	<b>21,87</b>	<b>22,49</b>	<b>24,57</b>	<b>27,06</b>	<b>27,29</b>	<b>26,80</b>	%
Promedio	23,86	24,62						
Desv. Estánd.	2,69	2,43						
C.V.	11,3	9,9						

##### Proced. B: SSD

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
<b>AC16 surf 35/50 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>19,00</b>	<b>17,18</b>	<b>21,03</b>	<b>21,97</b>	<b>21,60</b>	<b>22,38</b>	<b>23,13</b>	%
<b>AC16 surf 50/70 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>19,6</b>	<b>19,4</b>	<b>19,7</b>	<b>21,5</b>	<b>24,6</b>	<b>24,4</b>	<b>24,0</b>	%
Promedio	20,90	21,86						
Desv. Estánd.	2,09	2,40						
C.V.	10,01	11,0						

#### Contenido de huecos rellenos con ligante (VFB) existentes en el árido mineral

##### Proced. D: Geométrico

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
<b>AC16 surf 35/50 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>60,51</b>	<b>74,05</b>	<b>56,23</b>	<b>52,01</b>	<b>49,25</b>	<b>46,93</b>	<b>44,84</b>	%
<b>AC16 surf 50/70 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>60,54</b>	<b>61,11</b>	<b>58,62</b>	<b>52,17</b>	<b>45,42</b>	<b>44,12</b>	<b>44,50</b>	%
Promedio	54,83	52,35						
Desv. Estánd.	10,04	7,75						
C.V.	18,3	14,8						

##### Proced. B: SSD

Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%
<b>AC16 surf 35/50 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>74,26</b>	<b>82,68</b>	<b>64,42</b>	<b>59,71</b>	<b>60,35</b>	<b>57,43</b>	<b>54,39</b>	%
<b>AC16 surf 50/70 S+PET (Promedio probetas 2x75 golpes)</b>	<b>71,4</b>	<b>71,2</b>	<b>69,4</b>	<b>62,2</b>	<b>51,7</b>	<b>51,3</b>	<b>51,7</b>	%
Promedio	64,75	61,25						
Desv. Estánd.	10,14	9,58						
C.V.	15,7	15,6						

**5.4 Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34) [Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x75 golpes]**

Estabilidad (KN)								Deformación (mm)								Coef. Marshall										
Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%	Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	mm	Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	mm
Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	%	Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	mm	Contenido de PET(% s./ áridos, incluido el filler)	0,00	0,60	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	mm
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		11,42	8,71	6,78	6,24	5,97	7,90	KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		4,31	3,94	3,92	5,41	5,90	5,99	mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		2,65	2,21	1,73	1,15	1,01	1,32	mm
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		9,73	9,85	7,77	8,38	7,31	9,29	KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		3,22	4,57	4,84	5,33	5,33	mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		3,03	2,15	1,61	1,14	1,37	1,15	mm	
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		10,86	/	7,96	6,26	8,14	7,58	KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		2,93	3,99	/	4,93	5,30	6,65	mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		3,71	1,76	1,30	1,27	1,54	1,14	mm
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		10,14	/	6,43	7,51			KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		3,26	/	4,92	4,94		mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie I)		3,11	/	1,31	1,52		mm		
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	9,92							KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	2,81						mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	3,53						mm		
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	10,69							KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	2,09						mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie II)	5,11						mm		
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	9,86		11,09	6,13	6,84	7,38	5,91	KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	1,77		2,92	4,28	4,59	4,23	4,79	mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	5,56	/	1,43	1,49	1,74	1,23	mm	
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	11,12	/	5,71	8,79	8,19	6,64		KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	2,14		3,78	4,69	4,61	4,40	mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	5,19		1,89	1,51	1,87	1,78	1,51	mm	
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	11,90		7,77	7,98	6,56	7,09	7,55	KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	2,09		3,20	4,44	3,64	4,44	6,72	mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)	5,68		1,80	1,80	1,60	1,12	mm	
AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)			10,74					KN	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)			4,38				mm	AC16 surf 35/50 S+PET (Serie III)			2,45				mm		
Valor máximo (2x75 golpes)	11,90	11,42	11,09	7,98	8,79	8,19	9,29	KN	Valor máximo (2x75 golpes)	2,81	4,31	4,57	4,92	5,41	5,90	6,72	mm	Valor máximo (2x75 golpes)	5,68	3,71	2,45	1,80	1,87	1,78	1,51	mm
Valor mínimo (2x75 golpes)	9,86	9,73	7,77	5,71	6,24	5,97	5,91	KN	Valor mínimo (2x75 golpes)	1,77	2,93	2,92	3,78	3,64	4,23	4,40	mm	Valor mínimo (2x75 golpes)	3,53	2,65	1,76	1,30	1,14	1,01	1,12	mm
<b>AC16 surf 35/50 S+PET_Estabilidad (Promedio)</b>	<b>10,70</b>	<b>10,54</b>	<b>9,63</b>	<b>6,96</b>	<b>7,23</b>	<b>7,35</b>	<b>7,48</b>	KN	<b>AC16 surf 35/50 S+PET_Deformación</b>	<b>2,18</b>	<b>3,43</b>	<b>3,83</b>	<b>4,36</b>	<b>4,70</b>	<b>4,97</b>	<b>5,71</b>	mm	<b>AC16 35/50 S+PET_Coef. Marshall (Promedio probetas)</b>	<b>5,02</b>	<b>3,12</b>	<b>2,09</b>	<b>1,53</b>	<b>1,46</b>	<b>1,51</b>	<b>1,25</b>	mm
Promedio	8,30								Promedio	4,22								Promedio	2,14							
Desv. Estánd.	1,77								Desv. Estánd.	1,20								Desv. Estánd.	1,28							
C.V.	21,3								C.V.	28,5								C.V.	59,7							

AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	9,00	8,02	8,14	8,25	5,90	6,95	5,40	KN
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	8,42	8,29	7,79	7,83	7,44	5,97	6,25	KN
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	8,04	8,33	8,59	7,45	5,90	6,81	6,27	KN
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	10,79							KN
Valor máximo (2x75 golpes)	10,79	8,33	8,59	8,25	7,44	6,95	6,27	KN
Valor mínimo (2x75 golpes)	8,04	8,02	7,79	7,45	5,90	5,97	5,40	KN
<b>AC16 surf 50/70 S+PET_Estabilidad (Promedio)</b>	<b>8,49</b>	<b>8,21</b>	<b>8,18</b>	<b>7,84</b>	<b>6,41</b>	<b>6,58</b>	<b>5,98</b>	KN
Promedio	7,54							
Desv. Estánd.	1,27							
C.V.	16,8							

AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,64	4,41	4,24	4,54	5,41	/	5,37	mm
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,98	3,11	4,15	5,45	5,48	4,76	5,32	mm
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	3,03	3,13	5,13	4,09	4,82	6,25	5,73	mm
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,51							mm
Valor máximo (2x75 golpes)	3,03	4,41	5,13	5,45	5,48	6,25	5,73	mm
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,51	3,11	4,15	4,09	4,82	4,76	5,32	mm
<b>AC16 surf 50/70 S+PET_Deformación</b>	<b>2,88</b>	<b>3,55</b>	<b>4,51</b>	<b>4,69</b>	<b>5,24</b>	<b>5,50</b>	<b>5,47</b>	mm
Promedio	4,41							
Desv. Estánd.	1,12							
C.V.	25,4							

AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	3,41	1,82	1,92	1,81	1,09	/	1,00	mm
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,82	2,67	1,88	1,44	1,36	1,25	1,18	mm
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	2,66	2,67	1,68	1,82	1,22	1,09	1,09	mm
AC16 surf 50/70 S+PET (Serie I)	/							mm
Valor máximo (2x75 golpes)	3,41	2,67	1,92	1,82	1,36	1,25	1,18	mm
Valor mínimo (2x75 golpes)	2,66	1,82	1,68	1,44	1,09	1,09	1,00	mm
<b>AC16 50/70 S+PET_Coef. Marshall (Promedio probetas)</b>	<b>2,96</b>	<b>2,38</b>	<b>1,82</b>	<b>1,69</b>	<b>1,22</b>	<b>1,17</b>	<b>1,09</b>	mm
Promedio	1,79							
Desv. Estánd.	0,70							
C.V.	39,2							

### 5.5 Ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22)

[Ensayos en pista de laboratorio con dispositivo pequeño, procedimiento B en aire, a 60 °C y 10000 ciclos]

Espesor promedio	Contenido de PET (% s./ peso total de mezcla)	0,0	0,6	1,0	2,0	%
	T media de ensayo (°C)	60 ± 1	60 ± 1	60 ± 1	60 ± 1	°C
	Muestra 1 Lab.ULPGC	57,40	56,83	57,70	56,23	mm
	Muestra 2 Lab.ULPGC	57,21	57,29	57,20	56,60	mm
	Espesor medio máximo	57,40	57,29	57,70	56,60	mm
	Espesor medio mínimo	57,21	56,83	57,20	56,23	mm
	<b>Espesor promedio de las probetas (mm)</b>	<b>57,3</b>	<b>57,1</b>	<b>57,4</b>	<b>56,4</b>	<b>mm</b>
Densidad aparente	Muestra 1 Lab.ULPGC	2,44	2,446	2,345	2,356	Mg/m3
	Muestra 2 Lab.ULPGC	2,47	2,417	2,376	2,326	Mg/m3
	Densidad aparente máxima	2,466	2,446	2,376	2,356	Mg/m3
	Densidad aparente mínima	2,442	2,417	2,345	2,326	Mg/m3
	<b>Densidad aparente promedio de las probetas [Proced. D: Geométrico]</b>	<b>2,454</b>	<b>2,432</b>	<b>2,361</b>	<b>2,341</b>	<b>Mg/m3</b>
WTS [AIRE]	Muestra 1 Lab.ULPGC	0,191	0,199	0,384	0,380	mm/1000 ciclos
	Muestra 2 Lab.ULPGC	0,292	0,301	0,525	0,819	mm/1000 ciclos
	Valor máximo (WTS [AIRE])	0,292	0,301	0,525	0,819	mm/1000 ciclos
	Valor mínimo (WTS [AIRE])	0,191	0,199	0,384	0,380	mm/1000 ciclos
	<b>AC16 surf 50/70 S+PET_Promedio WTS AIRE (mm/1000 ciclos, entre 5000 y 10000 ciclos de carga)</b>	<b>0,242</b>	<b>0,250</b>	<b>0,455</b>	<b>0,600</b>	<b>mm/1000 ciclos</b>
	<b>Promedio</b>	<b>0,39</b>				
<b>Desv. Estánd.</b>	<b>0,21</b>					
<b>C.V.</b>	<b>53,21%</b>					

RD [AIRE]	Muestra 1 Lab.ULPGC	3,733	3,627	4,771	5,343	mm
	Muestra 2 Lab.ULPGC	4,656	4,381	5,867	7,913	mm
	Valor máximo (RD [AIRE])	4,656	4,381	5,867	7,913	mm
	Valor mínimo (RD [AIRE])	3,733	3,627	4,771	5,343	mm
	<b>AC16 surf 50/70 S+PET_Promedio RD AIRE (mm a 10000 ciclos)</b>	<b>4,195</b>	<b>4,004</b>	<b>5,319</b>	<b>6,628</b>	<b>mm</b>
<b>Promedio</b>	<b>5,04</b>					
<b>Desv. Estánd.</b>	<b>1,38</b>					
<b>C.V.</b>	<b>27,46%</b>					

PRD [AIRE]	Muestra 1 Lab.ULPGC	7,466	7,254	9,542	10,686	%
	Muestra 2 Lab.ULPGC	9,312	8,762	11,734	15,826	%
	Valor máximo (PRD [AIRE])	9,312	8,762	11,734	15,826	%
	Valor mínimo (PRD [AIRE])	7,466	7,254	9,542	10,686	%
	<b>AC16 surf 50/70 S+PET_Promedio PRD AIRE</b>	<b>8,39</b>	<b>8,01</b>	<b>10,64</b>	<b>13,26</b>	<b>%</b>
<b>Promedio</b>	<b>10,07</b>					
<b>Desv. Estánd.</b>	<b>2,77</b>					
<b>C.V.</b>	<b>27,46%</b>					

**5.6 Compactibilidad (UNE-EN 12697-10)**

[Ensayos con misma muestra para todos los niveles de energía de compactación, anotando las disminuciones de espesor]

**AC16 surf 35/50 S+PET**

Densidades aparentes por el método geométrico (Mg/m³)							
Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET (% s./ peso total de mezcla)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	%
Serie 1	2,410	2,260	2,195	2,208	2,134	2,095	Mg/m3
Serie 1	2,374	2,302	2,212	2,185	2,168	2,106	Mg/m3
Serie 1	2,439	2,303	2,228	2,177	2,152	2,115	Mg/m3
Serie 2	2,327	2,297	2,207	2,183	2,142	2,078	
Serie 2	2,394	2,288	2,236	2,221	2,133	2,070	
Serie 2	2,399	2,299	2,201	2,092	2,084	2,085	
<b>Promedio probetas (compactadas 2x75 golpes)</b>	<b>2,390</b>	<b>2,291</b>	<b>2,217</b>	<b>2,178</b>	<b>2,136</b>	<b>2,092</b>	<b>Mg/m3</b>
Valor máximo (2x100 golpes)	2,439	2,303	2,236	2,221	2,168	2,115	Mg/m3
Valor mínimo (2x100 golpes)	2,327	2,260	2,195	2,092	2,084	2,070	Mg/m3
<b>Promedio</b>	2,22						
<b>Desv. Estánd.</b>	0,10						
<b>C.V.</b>	4,72						

<b>Espesor Inicial calculado: t0 (mm)</b>	<b>79,97</b>	<b>82,07</b>	<b>83,14</b>	<b>84,65</b>	<b>84,68</b>	<b>92,36</b>	mm
<b>Espesor mínimo calculado: t∞ (mm)</b>	<b>61,38</b>	<b>62,11</b>	<b>64,43</b>	<b>65,78</b>	<b>66,85</b>	<b>66,87</b>	mm
<b>Resistencia a la compactación: T (21 Nm/golpes)</b>							
Serie 2	32,87	29,65	32,25	30,43	34,35	27,64	golpes
Serie 2	34,42	32,12	32,55	30,75	32,50	31,74	golpes
Serie 2	32,87	32,92	31,44	31,04	33,85	33,99	golpes
<b>Promedio probetas (compactadas 2x75 golpes)</b>	<b>33,39</b>	<b>31,56</b>	<b>32,08</b>	<b>30,74</b>	<b>33,57</b>	<b>31,12</b>	<b>golpes</b>
Valor máximo (2x100 golpes)	34,42	32,92	32,55	31,04	34,35	33,99	golpes
Valor mínimo (2x100 golpes)	32,87	29,65	31,44	30,43	32,50	27,64	golpes
<b>Promedio</b>	32,08						
<b>Desv. Estánd.</b>	1,74						
<b>C.V.</b>	5,43						

**AC16 surf 50/70 S+PET**

Densidades aparentes por el método geométrico (Mg/m³)							
Contenido de Betún (% s./ peso total de mezcla)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	%
Contenido de PET (% s./ peso total de mezcla)	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	%
Serie 1	2,349	2,250	2,247	2,096	2,094	2,065	Mg/m3
Serie 1	2,338	2,311	2,231	2,134	2,074	2,077	Mg/m3
Serie 1	2,344	2,305	2,233	2,116	2,103	2,066	Mg/m3
<b>Promedio probetas (compactadas 2x75 golpes)</b>	<b>2,344</b>	<b>2,289</b>	<b>2,237</b>	<b>2,115</b>	<b>2,090</b>	<b>2,070</b>	<b>Mg/m3</b>
Valor máximo (2x100 golpes)	2,349	2,311	2,247	2,134	2,103	2,077	Mg/m3
Valor mínimo (2x100 golpes)	2,338	2,250	2,231	2,096	2,074	2,065	Mg/m3
<b>Promedio</b>	2,19						
<b>Desv. Estánd.</b>	0,11						
<b>C.V.</b>	4,96						

<b>Espesor Inicial calculado: t0 (mm)</b>	<b>82,68</b>	<b>82,33</b>	<b>83,57</b>	<b>85,81</b>	<b>85,40</b>	<b>96,64</b>	mm
<b>Espesor mínimo calculado: t∞ (mm)</b>	<b>62,61</b>	<b>63,15</b>	<b>64,23</b>	<b>68,18</b>	<b>69,19</b>	<b>69,63</b>	mm
<b>Resistencia a la compactación: T (21 Nm/golpes)</b>							
Serie 1	34,60	33,74	33,45	34,13	36,89	31,80	golpes
Serie 1	37,37	33,59	31,55	34,53	42,89	40,79	golpes
Serie 1	38,34	35,40	33,96	35,85	30,58	40,94	golpes
<b>Promedio probetas (compactadas 2x75 golpes)</b>	<b>36,77</b>	<b>34,24</b>	<b>32,99</b>	<b>34,84</b>	<b>36,79</b>	<b>37,84</b>	<b>golpes</b>
Valor máximo (2x100 golpes)	38,34	35,40	33,96	35,85	42,89	40,94	golpes
Valor mínimo (2x100 golpes)	34,60	33,59	31,55	34,13	30,58	31,80	golpes
<b>Promedio</b>	35,58						
<b>Desv. Estánd.</b>	3,40						
<b>C.V.</b>	9,55						

5.7 Sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12)

[Probetas compactadas según UNE-EN 12697-30 con 2x50 golpes y rotas a tracción indirecta según UNE-EN 12697-23]

ITSd

Contenido de PET (% s./ peso total de mezcla)	0,0	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	%
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSd (Serie I)	1,83	2,45	1,60	1,19	1,39	1,18	1,23	kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSd (Serie I)	1,82	2,38	1,88	1,62	1,43	1,09	1,24	kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSd (Serie I)	1,95	2,44	1,45	1,33	1,32	1,07	1,15	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S+PET ITSd (Promedio Serie I)</b>	<b>1,87</b>	<b>2,42</b>	<b>1,64</b>	<b>1,38</b>	<b>1,38</b>	<b>1,11</b>	<b>1,21</b>	kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSd (Serie II)				1,51				kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSd (Serie II)				1,58				kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSd (Serie II)				1,41				kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S+PET ITSd (Promedio Serie II)</b>				<b>1,50</b>				kPa
Valor máximo	1,95	2,45	1,88	1,62	1,43	1,18	1,24	kPa
Valor mínimo	1,82	2,38	1,45	1,33	1,32	1,07	1,15	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S+PET ITSd (Promedio probetas 2x50 golpes)</b>	<b>1,87</b>	<b>2,42</b>	<b>1,64</b>	<b>1,44</b>	<b>1,38</b>	<b>1,11</b>	<b>1,21</b>	kPa
Promedio	1,57							
Desv. Estánd.	0,41							
C.V.	26,45							

ITSd

Contenido de PET (% s./ peso total de mezcla)	0,0	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	%
AC16 surf 50/70 S+PET ITSd (Serie III)	1,57	1,37	1,56	1,38	1,26	0,94	0,91	kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSd (Serie III)	1,41	1,62	1,53	1,32	1,31	0,92	0,89	kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSd (Serie III)	1,37	1,60	1,49	1,48	1,27	1,03	1,00	kPa
<b>AC16 surf 50/70 S+PET ITSd (Promedio Serie III)</b>	<b>1,45</b>	<b>1,53</b>	<b>1,53</b>	<b>1,39</b>	<b>1,39</b>	<b>0,97</b>	<b>0,93</b>	kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSd (Serie IV)				1,35	1,26			kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSd (Serie IV)				1,28	1,24			kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSd (Serie IV)				1,29	1,22			kPa
<b>AC16 surf 50/70 S+PET ITSd (Promedio Serie IV)</b>				<b>1,31</b>	<b>1,24</b>			kPa
Valor máximo	1,57	1,62	1,56	1,48	1,31	1,03	1,00	kPa
Valor mínimo	1,37	1,37	1,49	1,28	1,22	0,92	0,89	kPa
<b>AC16 surf 50/70 S+PET ITSd (Promedio probetas 2x50 golpes)</b>	<b>1,45</b>	<b>1,53</b>	<b>1,53</b>	<b>1,35</b>	<b>1,26</b>	<b>0,97</b>	<b>0,93</b>	kPa
Promedio	1,29							
Desv. Estánd.	0,22							
C.V.	16,95							

ITSR

Contenido de PET(% s./ peso total de mezcla)	0,0	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	%
B35/50+PET ITSr (Serie I)	70,11	92,84	93,61	94,10	98,18	96,60	95,04	%
B35/50+PET ITSr (Serie II)				85,92				%
<b>AC16 surf 35/50 S+PET ITSr (Promedio probetas 2x50 golpes)</b>	<b>70,11</b>	<b>92,84</b>	<b>93,61</b>	<b>90,01</b>	<b>98,18</b>	<b>96,60</b>	<b>95,04</b>	%
B50/70+PET ITSr (Serie III)	96,21	95,07	93,44	97,75	98,25	99,54	89,27	%
B50/70+PET ITSr (Serie IV)				83,18	84,10			%
<b>AC16 surf 50/70 S+PET ITSr (Promedio probetas 2x50 golpes)</b>	<b>96,21</b>	<b>95,07</b>	<b>93,44</b>	<b>90,46</b>	<b>91,18</b>	<b>99,54</b>	<b>89,27</b>	%

ITSw

Contenido de PET (% s./ peso total de mezcla)	0,0	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	%
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSsw (Serie I)	1,12	2,13	1,57	1,42	1,37	0,95	1,17	kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSsw (Serie I)	1,29	2,25	1,61	1,25	1,29	1,10	1,25	kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSsw (Serie I)	1,52	2,36	1,44	1,23	1,41	1,17	1,02	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S+PET ITSsw (Promedio Serie I)</b>	<b>1,31</b>	<b>2,25</b>	<b>1,54</b>	<b>1,30</b>	<b>1,36</b>	<b>1,08</b>	<b>1,15</b>	kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSsw (Serie II)				1,35				kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSsw (Serie II)				1,26				kPa
AC 16 surf 35/50 S+PET ITSsw (Serie II)				1,26				kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S+PET ITSsw (Promedio Serie II)</b>				<b>1,29</b>				kPa
Valor máximo	1,52	2,36	1,61	1,42	1,41	1,17	1,25	kPa
Valor mínimo	1,29	2,25	1,44	1,23	1,29	1,08	1,02	kPa
<b>AC 16 surf 35/50 S+PET ITSsw (Promedio probetas 2x50 golpes)</b>	<b>1,31</b>	<b>2,25</b>	<b>1,54</b>	<b>1,29</b>	<b>1,36</b>	<b>1,08</b>	<b>1,15</b>	kPa
Promedio	1,41							
Desv. Estánd.	0,36							
C.V.	25,73							

ITSw

Contenido de PET (% s./ peso total de mezcla)	0,0	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	%
Contenido de Betún (% s./ áridos, incluido el filler)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	%
AC16 surf 50/70 S+PET ITSsw (Serie III)	1,42	1,44	1,51	1,39	1,21	1,11	0,83	kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSsw (Serie III)	1,32	1,35	1,75	1,41	1,15	0,86	0,86	kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSsw (Serie III)	1,44	1,58	1,42	1,30	1,23	0,92	0,81	kPa
<b>AC16 surf 50/70 S+PET ITSsw (Promedio Serie III)</b>	<b>1,39</b>	<b>1,46</b>	<b>1,56</b>	<b>1,37</b>	<b>1,20</b>	<b>0,96</b>	<b>0,83</b>	kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSsw (Serie IV)				1,13	1,05			kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSsw (Serie IV)				1,06	1,08			kPa
AC16 surf 50/70 S+PET ITSsw (Serie IV)				1,07	1,00			kPa
<b>AC16 surf 50/70 S+PET ITSsw (Promedio Serie IV)</b>				<b>1,09</b>	<b>1,04</b>			kPa
Valor máximo	1,44	1,58	1,75	1,41	1,23	1,11	0,86	kPa
Valor mínimo	1,32	1,35	1,42	1,06	1,00	0,86	0,81	kPa
<b>AC16 surf 50/70 S+PET ITSsw (Promedio probetas 2x50 golpes)</b>	<b>1,39</b>	<b>1,46</b>	<b>1,56</b>	<b>1,23</b>	<b>1,12</b>	<b>0,96</b>	<b>0,83</b>	kPa
Promedio	1,21							
Desv. Estánd.	0,25							
C.V.	20,54							

**5.8 Módulo de rigidez dinámico (UNE-EN 12697-26) [Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY) compactadas por impacto según UNE-EN-12697-30 con 2x75 golpes]  
AC16 surf 50/70 S+PET (k=0.6)(T=20°C)**

**Densidades aparentes por el método geométrico (Probetas compactadas 2x75 golpes)**

% de Betún (s/peso total de mezcla)	6,00																			
	0%				0,60%				1%				2%				3%			
% de Pet (s/peso de árido)																				
Nº de probeta	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Peso en el aire	1185	1188	1173	1207	1179	1198	1185	1188	1171	1188	1182	1182	1176	1198	1179	1195	1171	1160	1189	1169
Altura	6,10	6,10	6,39	6,42	6,54	6,25	6,40	6,18	6,35	6,45	6,28	6,39	6,66	6,62	6,48	6,53	6,72	6,74	6,74	6,83
Radio	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08	5,08
Volumen de la probeta	495	495	518	520	530	507	519	501	515	523	509	518	540	537	525	529	545	546	546	554
Densidad aparente	2,40	2,40	2,26	2,32	2,22	2,36	2,28	2,37	2,27	2,27	2,32	2,28	2,18	2,23	2,24	2,26	2,15	2,12	2,18	2,11
<b>Promedio de las probetas</b>	<b>2,345</b>				<b>2,311</b>				<b>2,287</b>				<b>2,228</b>				<b>2,140</b>			

**Módulo de rigidez (Probetas compactadas 2x75 golpes)**

% de Pet (s/peso de árido)	0% Pet				0,6% Pet				1% Pet				2% Pet				3% Pet			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Nº de probeta																				
Módulo de Rigidez (Mpa)	5157	5031	4683	4163	4004	4688	4083	5021	4171	3711	4049	4328	3539	3766	3319	3702	3169	3075	3396	3059
Módulo girada 90° (Mpa)	5117	5256	4547	4058	3937	4265	4521	4575	3977	3618	3849	4083	3130	3643	3078	3615	3044	2890	3127	2949
Media de la probeta	5137	5144	4615	4110	3970	4476	4302	4798	4074	3664	3949	4205	3334	3705	3199	3659	3106	2982	3262	3004
<b>Promedio de las probetas</b>	<b>4751</b>				<b>4387</b>				<b>3973</b>				<b>3474</b>				<b>3089</b>			

**AC16 surf 35/50 S+PET (k=0.6)(T=20°C)**

**Densidades aparentes por el método geométrico (Probetas compactadas 2x75 golpes)**

% de Betún (s/peso total de mezcla)	6,00			
	1%			
% de Pet (s/peso de árido)				
Nº de probeta	1	2	3	4
Peso en el aire	1187	1185	1183	1191
Altura	6,03	6,08	6,11	6,03
Radio	5,08	5,08	5,08	5,08
Volumen de la probeta	489	493	495	489
Densidad aparente	2,43	2,40	2,39	2,44
<b>Promedio de las probetas</b>	<b>2,414</b>			

**Módulo de rigidez (Probetas compactadas 2x75 golpes)**

% de Pet (s/peso de árido)	0,6% Pet			
	1	2	3	4
Nº de probeta				
Módulo de Rigidez (Mpa)	4599	4385	4853	4453
Módulo girada 90° (Mpa)	4564	4547	4901	4369
Media de la probeta	4581	4466	4877	4411
<b>Promedio de las probetas</b>	<b>4584</b>			