



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación

Tesis Doctoral

**APLICACIÓN SOSTENIBLE DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN COMO ÁRIDO
RECICLADO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO**

Autor:

Breixo Gómez Meijide
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director:

Ignacio Pérez Pérez
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

A Coruña, Mayo de 2015



Memoria presentada por el Aspirante al Grado de Doctor Breixo Gómez Meijide

Bajo la Dirección del Dr. Ignacio Pérez Pérez

Breixo Gómez Meijide

Dr. Ignacio Pérez Pérez

Mayo de 2015

Universidade da Coruña

ETS Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Campus de Elviña s/n

15071 A Coruña



El presente documento está protegido con una Licencia **Creative Commons BY-NC-ND**. El uso comercial de la obra original así como la generación de obras derivadas no están permitidos. La autoría original deberá ser reconocida en todo caso.



El Dr. IGNACIO PÉREZ PÉREZ, Profesor e Investigador Titular de la Universidade da Coruña

CERTIFICA

Que BREIXO GÓMEZ MEIJIDE, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, ha realizado bajo su supervisión la tesis doctoral titulada APLICACIÓN SOSTENIBLE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN COMO ÁRIDO RECICLADO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO y que se recoge en esta memoria para optar al Grado de Doctor en Ingeniería Civil con Mención Internacional.

Y para que así conste y tenga los efectos oportunos, firmo este certificado en A Coruña, a Mayo de 2015.

Dr. Ignacio Pérez Pérez

La presente investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación por medio del Proyecto BIA2010-17751 “Aplicación sostenible de residuos de construcción y demolición en ingeniería civil: capas bituminosas en frío en firmes flexibles de medio/bajo tráfico”. Dicho proyecto, llevó asociada una Ayuda para la Formación de Personal Investigador (FPI) BES-2011-044377 con la que se financió al Autor de la presente tesis por un periodo de 4 años, así como dos Ayudas para la realización de estancias breves en otros centros de investigación, permitiendo al Autor realizar sendas estancias de 3 meses cada una, en la Nanyang Technological University de Singapur (EEBB-I-13-06126) y el Nottingham Transportation Engineering Centre de Nottingham, Reino Unido (EEBB-I-14-07956). Además de los equipos financiados por el anterior proyecto, El Ministerio de Ciencia e Innovación concedió, en la Convocatoria 2010 de Ayudas del Subprograma de Proyectos de Infraestructura Científico-Tecnológica cofinanciadas con el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (Línea Instrumental de Actuación de Infraestructuras Científico-Tecnológicas del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011), un equipo dinámico para la caracterización estructural de los materiales utilizados en capas de firmes de carreteras y de asiento de ferrocarriles (UNLC10-1E-780). Finalmente, los áridos reciclados fueron generosamente donados por el Grupo GESTAN y la emulsión bituminosa por la empresa ECOASFALT, S.A. sin coste alguno.

Agradecimientos

Mi gratitud va dirigida, en primer lugar, a mi estimado Director de Tesis, Ignacio Pérez Pérez, no solo por su inagotable dedicación, paciencia y esmero, sino también por haberme confiado una de una de las mejores Ayudas Estatales para mi formación como investigador, en un momento de gran dificultad personal y profesional.

La presente investigación no sería posible sin el consejo y apoyo de nuestra compañera Ana Rodríguez Pasandín. Sin duda, sus investigaciones han sido un inagotable modelo para la realización de mi propia tesis doctoral. Tampoco sería posible sin mi entrañable compañera, Natalia Pérez Barge, con la que tuve la suerte de trabajar codo con codo durante innumerables horas de laboratorio. Las frustraciones fueron muchas pero siempre recordaremos los pequeños éxitos.

También quisiera agradecer a todas aquellas personas de la Escuela que no dudaron en echar una mano siempre que así lo necesité, como el personal de la Biblioteca, los compañeros del Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación, así como los del Departamento de Tecnología de la Construcción y del Centro de Investigación en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC). En especial, a Juan Cagliao, con el que inicié mi carrera investigadora y a Margarita Martínez y María Recarey, por su gran capacidad de arrancar una sonrisa incluso en los peores momentos.

I would like to thank the kind hospitality offered by Dr. Yiik Diew Wong during my research stay at Nanyang Technological University (Singapore), as well as Dr. Gordon Airey and Dr. Nick Thom during my stay at the Nottingham Transportation Engineering Centre (UK). Both experiences gave me expertise, culture and new points of view.

Finalmente, o meu agradecemento máis persoal vai dirixido á miña familia, en especial aos meus pais e ao meu afillado, ás miñas amizades de Santiago e da Coruña, así como á parella coa que convivín e compartín tódalas miñas penas e alegrías durante estes inesquecibles 4 anos.

Resumen

En la presente tesis se investiga el empleo de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como áridos reciclados de mezclas bituminosas en frío. Esta nueva aplicación de los RCD en el ámbito de la construcción y mantenimiento de carreteras, contribuiría a reducir su deposición en vertederos, así como a limitar la explotación de canteras de árido natural.

Los RCD mostraron ciertas propiedades particulares que los diferencian sensiblemente de los áridos naturales. Entre éstas, destaca su elevada absorción y su baja densidad y resistencia a fragmentación.

Las mezclas bituminosas en frío, tipo grava-emulsión, con el 100% de árido reciclado y las de control, con el 100% de árido natural, fueron ensayadas para obtener sus propiedades volumétricas, afinidad árido-ligante y sensibilidad al agua, además de los parámetros propios de su comportamiento visco-elasto-plástico (resistencia a tracción indirecta, módulo resiliente a tracción indirecta, módulo dinámico, resistencia a la deformación permanente) y elástico no lineal (por medio de ensayos triaxiales como el de módulo resiliente y resistencia a la deformación permanente).

Los resultados muestran que los RCD no solo son aptos para el uso general en carreteras de medio/bajo tráfico sino que incluso mejoran algunas propiedades de las mezclas en comparación con las fabricadas con áridos naturales.

Resumo

Na presente tese investigase o emprego dos Residuos de Construción y Demolición (RCD) como áridos reciclados de mesturas bituminosas en frío. Esta nova aplicación dos RCD no ámbito da construción e mantemento de estradas, contribuiría a reducir a súa deposición en vertedoiros, así como a limitar a explotación de canteiras de árido natural.

Os RCD mostraron certas propiedades particulares que os diferencian sensiblemente dos áridos naturais. Entre estas, destaca a súa elevada absorción e a súa baixa densidade e resistencia á fragmentación.

As mesturas bituminosas en frío, tipo grava-emulsión, co 100% de árido reciclado e as de control, co 100% de árido natural, foron ensaiadas para obter as súas propiedades volumétricas, afinidade árido-ligante e sensibilidade á auga, ademais dos parámetros propios do seu comportamento visco-elasto-plástico (resistencia á tracción indirecta, módulo resiliente a tracción indirecta, módulo dinámico, resistencia á deformación permanente) e elástico non lineal (por medio de ensaios triaxiais coma o de módulo resiliente e resistencia á deformación permanente).

Os resultados mostran que os RCD non só son aptos para o uso xeral en estradas de medio/baixo tráfico senón que incluso melloran algunhas propiedades das mesturas en comparación coas fabricadas con áridos naturais.

Abstract

In this thesis, the use of Construction and Demolition Waste (CDW) as aggregates in cold asphalt mixtures is studied. This new application of the CDW in the scope of the construction and maintenance of roads, would help to reduce their disposal in landfills, as well as limit the working of natural quarries.

The CDW aggregates shown specific properties which make them different from other sorts of natural aggregates. Among them, it is particularly noteworthy the high absorption and the low density and resistance to fragmentation.

Cold asphalt mixtures, grave-emulsion type, with 100% of recycled aggregates and control mixes, with 100% of natural aggregates, were tested in order to obtain their volumetric properties, aggregate-binder affinity and resistance to water damage, as well as the parameters of their visco-elasto-plastic behavior (indirect tensile strength, indirect tensile stiffness modulus, dynamic modulus and resistance to permanent deformation) and non-linear elastic behavior (by means of triaxial tests, such as resilient modulus and resistance to permanent deformation).

The results show that CDW are not only suitable for general use in medium/low traffic roads, but also they improve some properties of cold asphalt mixes when compared with those made just with natural aggregates.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1	ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA.....	3
1.2	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.3	ORGANIZACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL	11

Capítulo 2

METODOLOGÍA

2.1	DESARROLLO METODOLÓGICO	15
-----	-------------------------------	----

Capítulo 3

LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO Y LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

3.1	LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO.....	23
3.2	LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	30
3.2.1	<i>Definición</i>	30
3.2.2	<i>Situación de la producción de RCD en el mundo</i>	33
3.3	UTILIZACIÓN DE LOS RCD COMO ÁRIDOS EN MEZCLAS BITUMINOSAS.....	36
3.3.1	<i>Introducción</i>	36
3.3.2	<i>Propiedades de los RCD como áridos</i>	37
3.3.3	<i>Propiedades de las mezclas bituminosas con áridos de RCD</i>	46

Capítulo 4

CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS

4.1	DESCRIPCIÓN, RECEPCIÓN Y OPERACIONES PREVIAS.....	65
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO.....	69
4.2.1	<i>Granulometría</i>	69
4.2.2	<i>Índice de Lajas</i>	72
4.2.3	<i>Caras de fractura</i>	74
4.2.4	<i>Densidad y absorción</i>	76

4.2.5	<i>Composición</i>	77
4.2.6	<i>Limpieza de los finos</i>	89
4.2.7	<i>Resistencia a la fragmentación del árido grueso</i>	90
4.3	CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO NATURAL.....	91
4.3.1	<i>Granulometría</i>	91
4.3.2	<i>Granulometría e Índice de Lajas</i>	93
4.3.3	<i>Caras de fractura</i>	94
4.3.4	<i>Densidad y absorción</i>	96
4.3.5	<i>Limpieza de los finos</i>	96
4.3.6	<i>Resistencia a la fragmentación del árido grueso</i>	98
4.4	CONTRASTE DE RESULTADOS	100
4.4.1	<i>Índice de Lajas</i>	101
4.4.2	<i>Caras de fractura</i>	101
4.4.3	<i>Densidad y absorción</i>	102
4.4.4	<i>Limpieza de los finos</i>	103
4.4.5	<i>Resistencia a la fragmentación</i>	103

Capítulo 5

DISEÑO DE LAS MEZCLAS Y FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

5.1	INTRODUCCIÓN.....	107
5.2	ELECCIÓN DEL TIPO DE MEZCLA	107
5.3	ELECCIÓN DE LA GRANULOMETRÍA.....	108
5.4	ELECCIÓN DE LA EMULSIÓN.....	110
5.5	ELECCIÓN DE LOS CONTENIDOS ÓPTIMOS DE BETÚN Y AGUA.....	112
5.6	PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	114
5.6.1	<i>Problemática encontrada y planteamiento del método</i>	114
5.6.2	<i>Fabricación de probetas de 100 mm de altura</i>	118
5.6.3	<i>Fabricación de probetas de 50 mm de altura</i>	120
5.6.4	<i>Fabricación de probetas de 200 mm de altura</i>	124

Capítulo 6

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS Y SENSIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS EN FRÍO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

6.1	CONTENIDO DE AGUA EN LAS PROBETAS	129
6.2	PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS.....	131
6.3	AFINIDAD ENTRE ÁRIDOS Y LIGANTE	133
6.3.1	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	133
6.3.2	<i>Ensayo de la botella giratoria</i>	134

6.3.3	<i>Boiling water test</i>	140
6.3.4	<i>Resumen de resultados</i>	142
6.4	SENSIBILIDAD AL AGUA. ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN	143
6.4.1	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	143
6.4.2	<i>Resultados</i>	145
6.4.3	<i>Tensiones y deformaciones de rotura</i>	151

Capítulo 7

COMPORTAMIENTO VISCO-ELASTO-PLÁSTICO DE LAS MEZCLAS EN FRÍO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

7.1	RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA.....	157
7.1.1	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	157
7.1.2	<i>Resultados</i>	157
7.1.3	<i>Tensiones y deformaciones de rotura</i>	162
7.2	RIGIDEZ SEGÚN EL MÓDULO RESILIENTE A TRACCIÓN INDIRECTA (ITSM)	165
7.2.1	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	165
7.2.2	<i>Resultados</i>	167
7.2.3	<i>Evolución de la rigidez con el tiempo de curado</i>	173
7.3	RIGIDEZ SEGÚN EL MÓDULO DINÁMICO $ E^* $	186
7.3.1	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	186
7.3.2	<i>Resultados</i>	190
7.3.3	<i>Relación entre módulo dinámico y módulo resiliente a tracción indirecta</i>	197
7.4	ENSAYO UNIAXIAL DE RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	200
7.4.1	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	200
7.4.2	<i>Deformación permanente inicial (tras acondicionamiento)</i>	203
7.4.3	<i>Deformación permanente final (tras 5000 ciclos)</i>	205
7.4.4	<i>Pendiente de la recta tangente en etapa secundaria</i>	206
7.4.5	<i>Punto de corte “a” de la recta tangente en etapa secundaria</i>	208
7.4.6	<i>Resumen de resultados</i>	210
7.5	RELACIÓN ENTRE LAS DIFERENTES PROPIEDADES ESTUDIADAS	211
7.5.1	<i>Relación entre resistencia a tracción indirecta y rigidez</i>	211
7.5.2	<i>Relación entre resistencia a compresión y resistencia a tracción indirecta</i>	215
7.5.3	<i>Relación entre resistencia a compresión y módulo ITSM</i>	218
7.5.4	<i>Relación entre deformación permanente inicial y módulo ITSM</i>	220
7.5.5	<i>Relación entre deformación permanente final y rigidez</i>	222
7.5.6	<i>Relación entre pendiente de la etapa secundaria de deformación y rigidez</i>	223
7.5.7	<i>Relación entre punto de corte “a” y rigidez</i>	225

Capítulo 8

COMPOTAMIENTO ELÁSTICO NO LINEAL DE LAS MEZCLAS EN FRÍO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

8.1	MÓDULO RESILIENTE SEGÚN ENSAYO TRIAXIAL DINÁMICO DE RIGIDEZ.....	229
8.1.1	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	229
8.1.2	<i>Resultados</i>	235
8.2	OBTENCIÓN DE LA LÍNEA DE FALLO DE MOHR-COULOMB.....	244
8.2.1	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	244
8.2.2	<i>Resultados</i>	247
8.3	ENSAYO TRIAXIAL DE RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE	250
8.3.1	<i>Descripción de los ensayos realizados</i>	250
8.3.2	<i>Resultados</i>	253

Capítulo 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

(CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

9.1	INTRODUCCIÓN.....	265
9.2	CONCLUSIONES RELATIVAS A LOS MATERIALES EMPLEADOS	265
9.3	CONCLUSIONES RELATIVAS A LA FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	267
9.4	CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS Y SENSIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS EN FRÍO CON RCD	267
9.4.1	<i>Contenido de agua de las probetas</i>	267
9.4.2	<i>Propiedades volumétricas</i>	268
9.4.3	<i>Sensibilidad al agua de las mezclas</i>	268
9.5	CONCLUSIONES RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO VISCO-ELÁSTO-PLÁSTICO DE LAS MEZCLAS EN FRÍO CON RCD.....	269
9.5.1	<i>Resistencia a tracción indirecta</i>	269
9.5.2	<i>Rigidez según el módulo resiliente a tracción indirecta (ITSM)</i>	270
9.5.3	<i>Rigidez según el módulo dinámico E^*</i>	272
9.5.4	<i>Resistencia a la deformación permanente. Ensayo uniaxial</i>	272
9.6	CONCLUSIONES RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO ELÁSTICO NO LINEAL DE LAS MEZCLAS EN FRÍO CON RCD	273
9.6.1	<i>Módulo resiliente</i>	274
9.6.2	<i>Obtención de las líneas de fallo de Mohr-Coulomb</i>	275
9.6.3	<i>Resistencia a la deformación permanente. Ensayo triaxial</i>	275
9.7	CONCLUSIONES RELATIVAS AL DISEÑO DE LAS MEZCLAS.....	276
9.8	RECOMENDACIONES	278
9.9	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	280

9.10	INTRODUCTION.....	281
9.11	CONCLUSIONS REGARDING THE MATERIALS USED	281
9.12	CONCLUSIONS REGARDING THE SPECIMENS PRODUCTION	283
9.13	CONCLUSIONS REGARDING THE VOLUMETRIC PROPERTIES AND RESISTANCE TO WATER DAMAGE OF MIXTURES WITH CDW	283
9.13.1	<i>Water contents of the specimens</i>	283
9.13.2	<i>Volumetric properties</i>	284
9.13.3	<i>Resistance to water damage</i>	284
9.14	CONCLUSIONS ACCORDING TO THE VISCO-ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF COLD ASPHALT MIXTURES WITH CDW	285
9.14.1	<i>Indirect tensile strength</i>	285
9.14.2	<i>Indirect tensile stiffness modulus (ITSM)</i>	286
9.14.3	<i>Dynamic modulus E* </i>	287
9.14.4	<i>Resistance to permanent deformation. Uniaxial test</i>	288
9.15	CONCLUSIONS ACCORDING TO THE NON-LINEAR ELASTIC BEHAVIOR OF COLD ASPHALT MIXTURES WITH CDW	289
9.15.1	<i>Resilient modulus</i>	289
9.15.2	<i>Mohr-Coulomb failure envelope</i>	290
9.15.3	<i>Resistance to permanent deformation. Triaxial test</i>	291
9.16	CONCLUSIONS ACCORDING TO THE MIX DESIGN	292
9.17	RECOMMENDATIONS.....	293
9.18	FUTURE LINES OF RESEARCH	295

Capítulo 10

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10.1	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	299
------	----------------------------------	-----

ANEXOS

I	GRÁFICAS DE TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE ROTURA	331
II	RESULTADOS DEL ENSAYO ESTÁTICO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL	339

Índice de Tablas

TABLA 3.1 RECOPIACIÓN DE DATOS DE PRODUCCIÓN DE RCD EN DIFERENTES PAÍSES	35
TABLA 3.2 PRODUCCIÓN Y PROCIÓN QUE SE RECICLA DE RCD EN LOS DIFERENTES PAÍSES DE EUROPA. FUENTE: COMISIÓN EUROPEA (DG ENV), 2011.....	36
TABLA 3.3 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (MPa) DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE CON DIFERENTES CONTENIDOS DE BETÚN Y ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN (PASANDÍN Y PÉREZ, 2014c)	52
TABLA 4.1 MASA MÍNIMA DE MUESTRAS DE ENSAYO DE DENSIDAD NORMAL DE PARTÍCULAS.....	69
TABLA 4.2 PORCENTAJES PERTENECIENTES A CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO RECICLADO ...	71
TABLA 4.3 ÍNDICES DE LAJAS TOTALES Y SEGÚN FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO MEDIO Y GRUESO	73
TABLA 4.4 MASA (G) Y PORCENTAJES DE CADA TIPO DE PARTÍCULAS SEGÚN EL CONTENIDO EN CARAS DE FRACTURA PARA CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO GRUESO RECICLADO	75
TABLA 4.5 MASA (G) Y PORCENTAJES DE CADA TIPO DE PARTÍCULAS SEGÚN EL CONTENIDO EN CARAS DE FRACTURA PARA CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO MEDIO RECICLADO.....	75
TABLA 4.6 MUESTRAS OBTENIDAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS Y LA ABSORCIÓN DEL ÁRIDO	76
TABLA 4.7 DENSIDADES Y ABSORCIONES OBSERVADAS PARA EL ÁRIDO RECICLADO.....	77
TABLA 4.8 RESULTADOS DEL ENSAYO DE CLASIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL ÁRIDO GRUESO RECICLADO	79
TABLA 4.9 EQUIVALENTES DE ARENA OBTENIDOS PARA EL ÁRIDO FINO RECICLADO	89
TABLA 4.10 VALORES OBTENIDOS DE COEFICIENTES DE LOS ANGELES PARA EL ÁRIDO RECICLADO	90
TABLA 4.11 PORCENTAJES PERTENECIENTES A CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO NATURAL....	91
TABLA 4.12 ÍNDICES DE LAJAS TOTALES Y SEGÚN FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO NATURAL.....	93
TABLA 4.13 MASA (G) Y PORCENTAJES DE CADA TIPO DE PARTÍCULAS SEGÚN EL CONTENIDO EN CARAS DE FRACTURA PARA CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO NATURAL 2/6,3 MM.....	95
TABLA 4.14 MASA (G) Y PORCENTAJES DE CADA TIPO DE PARTÍCULAS SEGÚN EL CONTENIDO EN CARAS DE FRACTURA PARA CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO NATURAL 6,3/12,5 MM	95
TABLA 4.15 MASA (G) Y PORCENTAJES DE CADA TIPO DE PARTÍCULAS SEGÚN EL CONTENIDO EN CARAS DE FRACTURA PARA CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO NATURAL 10/16 MM	95
TABLA 4.16 MASA (G) Y PORCENTAJES DE CADA TIPO DE PARTÍCULAS SEGÚN EL CONTENIDO EN CARAS DE FRACTURA PARA CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO NATURAL 16/32 MM	96
TABLA 4.17 DENSIDADES Y ABSORCIONES DEL ÁRIDO NATURAL.....	97
TABLA 4.18 EQUIVALENTES DE ARENA OBTENIDOS PARA EL ÁRIDO FINO NATURAL	97
TABLA 4.19 VALORES OBTENIDOS DEL COEFICIENTE DE LOS ANGELES PARA EL ÁRIDO NATURAL	99
TABLA 4.20 RESUMEN DE PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS NATURALES Y RECICLADOS	100
TABLA 4.21 VALORES MÁXIMOS DE ÍNDICE DE LAJAS PERMITIDOS POR EL PG-3 PARA MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	101
TABLA 4.22 PROPORCIÓN DE PARTÍCULAS TRITURADAS DEL ÁRIDO GRUESO EXIGIDA POR EL PG-3 PARA SU USO EN MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE (% EN MASA).....	102
TABLA 4.23 COEFICIENTE MÁXIMO DE DESGASTE LOS ANGELES PERMITIDO POR EL PG-3 PARA EL ÁRIDO GRUESO	104
TABLA 5.1 HUSOS GRANULOMÉTRICOS ESTABLECIDOS POR LA ATEB PARA GE1. CERNIDO ACUMULADO (% EN MASA).....	110
TABLA 5.2 RESULTADOS DE ESTABILIDAD DE LA EMULSIÓN AL SER MEZCLADA CON DIFERENTES ÁRIDOS	110
TABLA 5.3 CARACTERÍSTICAS DE LA EMULSIÓN EMPLEADA	111
TABLA 5.4 DENSIDAD APARENTE Y HUECOS MEDIDOS SOBRE PROBETAS COMPACTADAS CON DIFERENTES ENERGÍAS DE COMPACTACIÓN (PROBETAS 1 A 22) Y COMPARADAS CON LAS DE LAS PROBETAS DE REFERENCIA DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN (R1 A R4).....	116
TABLA 5.5 DEFORMACIÓN UNITARIA MEDIDA SOBRE PROBETAS COMPACTADAS CON DIFERENTES ENERGÍAS DE COMPACTACIÓN (PROBETAS 1 A 14) Y COMPARADAS CON LAS DE LAS PROBETAS DE REFERENCIA DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN (R1 A R10).....	117
TABLA 6.1 CONTENIDOS DE AGUA (EN % PESO ÁRIDO SECO) REMANENTES EN LAS PROBETAS TRAS SU COMPACTACIÓN, EN FUNCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN APORTADOS EN LA AMASADA	129

TABLA 6.2 CONTENIDOS DE AGUA (EN % PESO ÁRIDO SECO) REMANENTES EN LAS PROBETAS TRAS SU CURADO EN ESTUFA, EN FUNCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN APORTADOS EN LA AMASADA	130
TABLA 6.3 CONTENIDO DE HUECOS Y DENSIDAD DE MEZCLAS CON ÁRIDO RECICLADO Y ÁRIDO NATURAL SEGÚN SU CONTENIDO DE AGUA Y BETÚN	132
TABLA 6.4 CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN Y TIEMPOS DE CURADO EMPLEADOS PARA LOS ENSAYOS DE AFINIDAD ENTRE ÁRIDO Y LIGANTE	134
TABLA 6.5 RESULTADOS DE AFINIDAD ENTRE ÁRIDO Y LIGANTE SEGÚN EL MÉTODO DE LA BOTELLA GIRATORIA. RECUBRIMIENTOS TRAS 6H Y 24H	137
TABLA 6.6 RESULTADOS DE AFINIDAD ENTRE ÁRIDO Y LIGANTE SEGÚN EL MÉTODO DEL BOILING WATER TEST. RECUBRIMIENTOS TRAS 10 MIN EN AGUA HIRVIENDO	141
TABLA 6.7 RESISTENCIA SECA MEDIA (KPA) PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO	145
TABLA 6.8 RESISTENCIA HÚMEDA MEDIA (KPA) PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO	145
TABLA 6.9 RESISTENCIA CONSERVADA MEDIA (%) PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO.....	145
TABLA 6.10 RESISTENCIA SECA MEDIA (KPA) PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL	147
TABLA 6.11 RESISTENCIA HÚMEDA MEDIA (KPA) PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL	147
TABLA 6.12 RESISTENCIA CONSERVADA MEDIA (%) PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL	147
TABLA 7.1 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (EN KPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO	158
TABLA 7.2 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (EN KPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL	161
TABLA 7.3 MÓDULO RESILIENTE (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO A 2°C.....	168
TABLA 7.4 MÓDULO RESILIENTE (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO A 10°C.....	168
TABLA 7.5 MÓDULO RESILIENTE (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO A 20°C.....	169
TABLA 7.6 PÉRDIDA DE RIGIDEZ AL PASAR DE 2°C A 20°C (EN % DE RIGIDEZ A 2°C).....	169
TABLA 7.7 MÓDULO RESILIENTE (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL A 2°C.....	172
TABLA 7.8 MÓDULO RESILIENTE (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL A 10°C.....	172
TABLA 7.9 MÓDULO RESILIENTE (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL A 20°C.....	172
TABLA 7.10 PÉRDIDA DE RIGIDEZ AL PASAR DE 2°C A 20°C (EN % DE RIGIDEZ A 2°C).....	172
TABLA 7.11. MÓDULO RESILIENTE MEDIO A 20°C (MPA) DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO TRAS DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO	178
TABLA 7.12 VALORES MEDIOS DE LOS AUMENTOS PORCENTUALES DE LA RIGIDEZ CON RESPECTO A LA RIGIDEZ TRAS CURADO ARTIFICIAL EN MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL	179
TABLA 7.13. MÓDULO RESILIENTE MEDIO (MPA) DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL TRAS DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO	182
TABLA 7.14. VALORES MEDIOS DE LOS AUMENTOS PORCENTUALES DE LA RIGIDEZ CON RESPECTO A LA RIGIDEZ TRAS CURADO ARTIFICIAL EN MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL	182
TABLA 7.15. PÉRDIDA DE PESO (EN G) TRAS DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO EN PROBETAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO	184
TABLA 7.16 PÉRDIDA DE PESO (EN G) TRAS DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO EN PROBETAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL.	184
TABLA 7.17 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS PROBETAS COMPACTADAS CON COMPACTADOR GIRATORIO.....	187
TABLA 7.18 SECUENCIAS DE CARGAS DINÁMICAS EN EL ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO SEGÚN LA NORMA AMERICANA AASHTO TP 62-07	187
TABLA 7.19 MÓDULOS DINÁMICOS A TRACCIÓN INDIRECTA EN PROBETAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO	191

TABLA 7.20 MÓDULOS DINÁMICOS A TRACCIÓN INDIRECTA EN PROBETAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL.....	191
TABLA 7.21 PARÁMETROS DE LAS CURVAS MAESTRAS AJUSTADAS A LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS DIFERENTES MEZCLAS ENSAYADAS	196
TABLA 7.22 ITSM A 2°C, 20°C Y 40°C PARA PROBETAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y 100% DE ÁRIDO NATURAL ...	198
TABLA 7.23 PARÁMETROS ANALIZADOS EN EL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	203
TABLA 7.24 DEFORMACIÓN PERMANENTE INICIAL TRAS ACONDICIONAMIENTO, E_0 (%) DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO	204
TABLA 7.25 DEFORMACIÓN PERMANENTE INICIAL TRAS ACONDICIONAMIENTO, E_0 (%) DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL	204
TABLA 7.26 DEFORMACIÓN PERMANENTE FINAL TRAS 5000 CICLOS, E_{5000} (%) DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO	205
TABLA 7.27 DEFORMACIÓN PERMANENTE FINAL TRAS 5000 CICLOS, E_{5000} (%) DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL	206
TABLA 7.28 PENDIENTE DE RECTA TANGENTE EN ETAPA SECUNDARIA DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO	207
TABLA 7.29 PENDIENTE DE RECTA TANGENTE EN ETAPA SECUNDARIA DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL	207
TABLA 7.30 PUNTO DE CORTE "A" [LOG(μ E)] DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO.....	209
TABLA 7.31 PUNTO DE CORTE "A" [LOG(μ E)] DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL	209
TABLA 8.1 COMBINACIONES DE CONTENIDOS DE AGUA Y BETÓN ENSAYADAS EN EL ENSAYO DINÁMICO DE RIGIDEZ CON CONFINAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE.....	229
TABLA 8.2 NIVELES DE ESFUERZO (EN KPA) A APLICAR EN CADA UNA DE LAS SECUENCIAS DE ENSAYO SEGÚN NORMA UNE-EN 13286-7	232
TABLA 8.3 PARÁMETROS DEL MODELO DE HICKS AJUSTADOS PARA DIFERENTES MEZCLAS CON ÁRIDO RECICLADO Y ÁRIDO NATURAL Y TRAS SER SOMETIDAS A 0 Y 3 DÍAS DE CURADO EN ESTUFA	235
TABLA 8.4 PARÁMETROS DEL MODELO DE UZAN AJUSTADOS PARA DIFERENTES MEZCLAS CON ÁRIDO RECICLADO Y ÁRIDO NATURAL Y TRAS SER SOMETIDAS A 0 Y 3 DÍAS DE CURADO EN ESTUFA	235
TABLA 8.5 PARÁMETROS DEL MODELO NCHRP AJUSTADOS PARA DIFERENTES MEZCLAS CON ÁRIDO RECICLADO Y ÁRIDO NATURAL Y TRAS SER SOMETIDAS A 0 Y 3 DÍAS DE CURADO EN ESTUFA	236
TABLA 8.6 MÓDULOS CARACTERÍSTICOS (EN MPA) OBTENIDOS CON DIFERENTES MODELOS PARA MEZCLAS CON ÁRIDO RECICLADO TRAS SER SOMETIDAS O NO A CURADO EN ESTUFA ($\sigma_1 = 583,3$ KPA; $\sigma_3 = 83,3$ KPA)	241
TABLA 8.7 MÓDULOS CARACTERÍSTICOS (EN MPA) OBTENIDOS CON DIFERENTES MODELOS PARA MEZCLAS CON ÁRIDO NATURAL TRAS SER SOMETIDAS O NO A CURADO EN ESTUFA ($\sigma_1 = 583,3$ KPA; $\sigma_3 = 83,3$ KPA)	242
TABLA 8.8 MÓDULOS CARACTERÍSTICOS (EN MPA) OBTENIDOS CON DIFERENTES MODELOS PARA MEZCLAS CON ÁRIDO RECICLADO TRAS SER SOMETIDAS O NO A CURADO EN ESTUFA (P = 155 KPA, Q = 215 KPA).....	243
TABLA 8.9 MÓDULOS CARACTERÍSTICOS (EN MPA) OBTENIDOS CON DIFERENTES MODELOS PARA MEZCLAS CON ÁRIDO NATURAL TRAS SER SOMETIDAS O NO A CURADO EN ESTUFA (P = 155 KPA, Q = 215 KPA)	243
TABLA 8.10 PARÁMETROS DEL COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE LAS MEZCLAS ESTUDIADAS	249
TABLA 8.11 TENSIONES PRINCIPALES DE ROTURA PARA UNA PRESIÓN DE CONFINAMIENTO $\sigma_3 = 50$ KPA	250
TABLA 8.12 TENSIONES PRINCIPALES A PARTIR DE LAS CUALES SE PRODUJO LA APARICIÓN DE LA ETAPA TERCIARIA Y EL COLAPSO DE LAS PROBETAS ANTES DE 80.000 CICLOS DE CARGA	255
TABLA 8.13 PARÁMETROS DEL MODELO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA LAS DIFERENTES MEZCLAS ESTUDIADAS EN FUNCIÓN DEL STRESS RATIO.....	255
TABLA 8.14 PARÁMETROS DEL MODELO DE RELACIÓN DE A, B, C Y D CON EL STRESS RATIO	256

Índice de Figuras

FIGURA 3.1 EMISIONES Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE FABRICACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE MEZCLAS BITUMINOSAS (FUENTE: MIRANDA, 2008)	24
FIGURA 3.2 MATRIZ DE LA INFLUENCIA DEL TIPO Y CANTIDAD DE LIGANTE EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS DIFERENTES MEZCLAS (ASPHALT ACADEMY, 2009)	25
FIGURA 3.3 HIPÓTESIS DE COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES ESTABILIZADOS EN FRÍO CON EMULSIÓN SEGÚN JENKINS, LONG, Y EBELS. (A PARTIR DE PÉREZ ET AL., 2013)	26
FIGURA 3.4 EVOLUCIÓN DE LA RIGIDEZ DE MUESTRAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE Y MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO CON ESCORIAS DE ALTO HORNO (GGBS) Y CON CEMENTO PORTLAND (ELLIS, 2004)	29
FIGURA 3.5 JERARQUÍA DE LAS DIFERENTES ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE RCD CON SU IMPACTO AMBIENTAL (FUENTE, YUAN Y SHEN, 2011)	31
FIGURA 3.6 COMPARATIVA DEL CONSUMO DE MATERIALES, CONSUMO DE ENERGÍA Y EMISIÓN DE CO ₂ DE MEZCLAS CON DIFERENTES TIPOS DE SUBPRODUCTOS: FA1, FA2 Y FA3 CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MEZCLAS CON CENIZAS VOLANTES; CC1 Y CC2 SON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MEZCLAS CON HORMIGÓN RECICLADO; BFS ES UNA MEZCLA CON ESCORIA DE ALTO HORNO Y R1 ES LA MEZCLA DE CONTROL CON 100% DE ÁRIDO NATURAL (A PARTIR DE MROUEH ET AL., 2001)	37
FIGURA 3.7 IMAGEN MICROSCÓPICA FILLER DE GRANITO	40
FIGURA 3.8 IMAGEN MICROSCÓPICA FILLER DE HORMIGÓN TRATADO TÉRMICAMENTE	40
FIGURA 3.9 IMAGEN MICROSCÓPICA FILLER DE HORMIGÓN SIN TRATAR.....	40
FIGURA 3.10 IMAGEN MICROSCÓPICA DEL FILLER GRANÍTICO EN MATRIZ BITUMINOSA	40
FIGURA 3.11 IMAGEN MICROSCÓPICA DEL FILLER DE HORMIGÓN SIN TRATAR EN MATRIZ BITUMINOSA	40
FIGURA 3.12 IMAGEN MICROSCÓPICA DEL FILLER DE HORMIGÓN TRATADO EN LA MATRIZ MICROSCÓPICA.....	40
FIGURA 3.13 IMAGEN MICROSCÓPICA DEL FILLER DE LADRILLO	42
FIGURA 3.14 IMAGEN MICROSCÓPICA DEL FILLER DE CALIZA.....	42
FIGURA 3.15 PATRONES DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X PARA EL HORMIGÓN TRATADO TÉRMICAMENTE (ARRIBA) Y SIN TRATAR (ABAJO) (WONG ET AL., 2007)	44
FIGURA 3.16 COMPONENTES DE UNA MEZCLA BITUMINOSA. (ASPHALT INSTITUTE, 2007)	47
FIGURA 3.17 RESULTADOS DEL CONSTRUCTION ENERGY INDEX PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO (MILLS-BEALE Y YOU, 2010)	49
FIGURA 3.18 MÓDULO RESILIENTE PARA DIFERENTES TEMPERATURAS Y PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN (0%, 100%, 50% Y RECICLADO SOLO EN LOS GRUESOS) EMPLEANDO UN BETÚN AC-20 (A) Y AC-10 (B) (SHEN Y DU, 2005)	54
FIGURA 3.19 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE (ASTM D 4123-82) PARA DIFERENTES TEMPERATURAS Y PORCENTAJES DE ÁRIDO RECICLADO (MILLS-BEALE Y YOU, 2010)	55
FIGURA 3.20 CURVAS MAESTRAS DE MÓDULO DINÁMICO PARA DIFERENTES CONTENIDOS DE HORMIGÓN RECICLADO, DESDE UN 0% (CURVA VIOLETA) A UN 75% (CURVA VERDE) (MILLS-BEALE Y YOU, 2010)	56
FIGURA 3.21 RESULTADOS DEL ENSAYO ESTÁTICO (IZQUIERDA) Y DINÁMICO (DERECHA) DE RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE REALIZADO EN MEZCLAS BITUMINOSAS CON FILLER CALIZO Y CON FILLER PROCEDENTE DE POLVO DE LADRILLO (CHEN ET AL., 2011A)	58
FIGURA 3.22 DEFORMACIONES PERMANENTES PARA MEZCLAS CON DIFERENTES CONTENIDOS DE ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN (RCA) Y VÍRGENES (VA), DESDE UN 0% (LÍNEA ROJA) A UN 75% (LÍNEA AZUL OSCURO) (MILLS-BEALE Y YOU, 2010).....	59
FIGURA 3.23 DEFORMACIÓN PERMANENTE ACUMULADA CON MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE Y DEFERENTES CONTENIDOS DE ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN (PASANDÍN Y PÉREZ, 2013)	59
FIGURA 3.24 NÚMERO DE CICLOS HASTA ROTURA SEGÚN NIVEL DE DEFORMACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE CON FINOS RECICLADOS (RFAP) Y CON ÁRIDOS CALIZOS (LP) (CHEN ET AL., 2011B).....	61
FIGURA 4.1 ASPECTO DE LA FRACCIÓN 16/32 MM DEL ÁRIDO NATURAL	65
FIGURA 4.2 ASPECTO DE LA FRACCIÓN 0/2 MM DEL ÁRIDO NATURAL	66
FIGURA 4.3 BIG BAGS RECIBIDOS DE ÁRIDO RECICLADO	66

FIGURA 4.4 ASPECTO DE LA FRACCIÓN FINA (0/6 MM) DEL ÁRIDO RECICLADO	67
FIGURA 4.5 ASPECTO DE LA FRACCIÓN MEDIA (6/12 MM) DEL ÁRIDO RECICLADO	67
FIGURA 4.6 ASPECTO DE LA FRACCIÓN GRUESA (12/32 MM) DEL ÁRIDO RECICLADO	68
FIGURA 4.7 OPERACIÓN PREVIA DE CUARTEO DEL ÁRIDO RECICLADO SEGÚN NORMA UNE-EN 932-2:1999.....	68
FIGURA 4.8 PORCENTAJES (%) RETENIDOS EN CADA TAMIZ (ABERTURA EN MM) PARA CADA UNA DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO RECICLADO (FINO, MEDIO Y GRUESO)	71
FIGURA 4.9 PORCENTAJES ACUMULADOS (%) QUE PASAN POR CADA TAMIZ (ABERTURA EN MM) PARA CADA UNA DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO RECICLADO (FINO, MEDIO Y GRUESO)	72
FIGURA 4.10 ÍNDICES DE LAJAS POR FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS (d/D MM) DEL ÁRIDO MEDIO Y GRUESO	73
FIGURA 4.11 PORCENTAJES DE CADA TIPO DE PARTÍCULAS SEGÚN EL CONTENIDO EN CARAS DE FRACTURA PARA CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO GRUESO Y MEDIO RECICLADO	74
FIGURA 4.12 COMPOSICIÓN DEL ÁRIDO GRUESO RECICLADO	80
FIGURA 4.13 COMPOSICIÓN DEL ÁRIDO MEDIO RECICLADO	80
FIGURA 4.14 PARTÍCULAS TIPO RU PERTENECIENTES AL ÁRIDO GRUESO	81
FIGURA 4.15 PARTÍCULAS TIPO RC PERTENECIENTES AL ÁRIDO GRUESO	81
FIGURA 4.16 PARTÍCULAS TIPO RC PERTENECIENTES AL ÁRIDO MEDIO	82
FIGURA 4.17 PARTÍCULAS TIPO RU PERTENECIENTES AL ÁRIDO MEDIO	82
FIGURA 4.18 FLOTANTES PERTENECIENTES A LA FRACCIÓN GRUESA	83
FIGURA 4.19 FLOTANTES PERTENECIENTES A LA FRACCIÓN MEDIA	83
FIGURA 4.20 PARTÍCULAS TIPO X PERTENECIENTES AL ÁRIDO GRUESO	84
FIGURA 4.21 PARTÍCULAS TIPO X PERTENECIENTES AL ÁRIDO MEDIO	84
FIGURA 4.22 PARTÍCULAS TIPO Rb PERTENECIENTES AL ÁRIDO GRUESO	85
FIGURA 4.23 PARTÍCULAS TIPO Rb PERTENECIENTES AL ÁRIDO MEDIO	86
FIGURA 4.24 DIFRACTOGRAMA DE RAYOS X DE MUESTRA HALLADA DE MATERIAL BITUMINOSO	87
FIGURA 4.25 DIFRACTOGRAMA DE RAYOS X DE MUESTRA HALLADA DE ESCAYOLA	87
FIGURA 4.26 DIFRACTOGRAMA DE RAYOS X DE MUESTRA HALLADA DE HORMIGÓN	88
FIGURA 4.27 DIFRACTOGRAMA DE RAYOS X DE MUESTRA HALLADA DE ÁRIDO CALIZO CON INCRUSTACIONES DE CUARZO	88
FIGURA 4.28 PORCENTAJES (5) RETENIDOS EN CADA TAMIZ (ABERTURA EN MM) PARA CADA UNA DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO NATURAL (d/D MM).....	92
FIGURA 4.29 PORCENTAJES ACUMULADOS (5) QUE PASAN POR CADA TAMIZ (ABERTURA EN MM) PARA CADA UNA DE LAS MUESTRAS DE ÁRIDO NATURAL (d/D MM).....	92
FIGURA 4.30 ÍNDICES DE LAJAS SEGÚN FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO NATURAL	93
FIGURA 4.31 PORCENTAJES DE CADA TIPO DE PARTÍCULAS SEGÚN EL CONTENIDO EN CARAS DE FRACTURA PARA CADA FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL ÁRIDO NATURAL	94
FIGURA 4.32 ASPECTO DE LOS ENSAYOS DE EQUIVALENTE DE ARENA EN DISTINTAS FASES DEL PROCESO	98
FIGURA 4.33 ASPECTO DE UNA MUESTRA DE ENSAYO DE ÁRIDO NATURAL ANTES DE SER SOMETIDA AL TEST DE LOS ANGELES	99
FIGURA 4.34 ASPECTO DE UNA MUESTRA DE ENSAYO DE ÁRIDO NATURAL TRAS SER SOMETIDA AL TEST DE LOS ANGELES ...	100
FIGURA 5.1 EVOLUCIÓN DE LAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS INICIAL Y CORREGIDA TRAS LA COMPACTACIÓN	109
FIGURA 5.2 CURVAS DENSIDAD SECA - HUMEDAD PARA ÁRIDO RECICLADO Y NATURAL. COMPACTACIÓN CON MAZA PROCTOR MODIFICADO	113
FIGURA 5.3 COMPACTACIÓN DE PROBETAS EN PRENSA ESTÁTICA SEGÚN NORMA NLT-161/98	119
FIGURA 5.4 CURVA REGISTRADA DE CARGA (LÍNEA AZUL) Y DE POSICIÓN DEL PISÓN (LÍNEA AMARILLA) DURANTE LA COMPACTACIÓN EN PRENSA ESTÁTICA	119
FIGURA 5.5 CURADO DE PROBETAS EN ESTUFA A 50°C DURANTE 3 DÍAS SEGÚN PLIEGOS ATEB.....	120
FIGURA 5.6 PROCESO DE CORTE DE PROBETAS DE 101,6 MM (INMERSIÓN-COMPRESIÓN) EN DOS MITADES DE UNOS 50 MM PARA SU ENSAYO A TRACCIÓN INDIRECTA Y RIGIDEZ RESPECTIVAMENTE	121
FIGURA 5.7 ESQUEMA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE DOS PROBETAS “GEMELAS” DE 50 MM DE ALTURA A PARTIR DE UNA MISMA PROBETA “MADRE” DE 101,6 MM. LAS TRES PROBETAS TIENEN EXACTAMENTE LAS MISMAS PROPIEDADES INTRÍNSECAS (DENSIDAD, HUECOS, HUMEDAD, ETC).....	121

FIGURA 5.8 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (ITS) Y RIGIDEZ (ITSM) DEPENDIENDO DE SI LA MITAD EMPLEADA PARA EL ENSAYO DE RIGIDEZ ERA SUPERIOR O INFERIOR (QUEDANDO SU PAREJA PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL.....	123
FIGURA 5.9 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (ITS) Y RIGIDEZ (ITSM) DEPENDIENDO DE SI LA MITAD EMPLEADA PARA EL ENSAYO DE RIGIDEZ ERA SUPERIOR O INFERIOR (QUEDANDO SU PAREJA PARA EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL.....	123
FIGURA 6.1 DISPOSICIÓN DE LAS BOTELLAS CON 2 MUESTRAS DIFERENTES (3 SUB-MUESTRAS CADA UNA) EN EL ENSAYO DE LA BOTELLA GIRATORIA.....	135
FIGURA 6.2 RELACIÓN ENTRE RECUBRIMIENTOS TRAS 6H Y 12H DE ENSAYO Y EL CONTENIDO DE AGUA	138
FIGURA 6.3 RELACIÓN ENTRE RECUBRIMIENTOS TRAS 6H Y 12H DE ENSAYO Y EL CONTENIDO DE BETÚN	138
FIGURA 6.4 RELACIÓN ENTRE RECUBRIMIENTOS TRAS 6H Y 12H DE ENSAYO Y TIEMPO DE CURADO.....	139
FIGURA 6.5 COMPARATIVA DE DOS ENSAYOS DE BOTELLA GIRATORIA CON ÁRIDO RECICLADO (IZQUIERDA) Y ÁRIDO NATURAL (DERECHA)	139
FIGURA 6.6 ROTURA DE PROBETAS A COMPRESIÓN SIMPLE SEGÚN NORMA NLT-161/98.....	144
FIGURA 6.7 ACONDICIONAMIENTO DE PROBETAS EN BAÑO DE AGUA SEGÚN NORMA NLT-162/73	144
FIGURA 6.8 RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (SIN Y CON ACONDICIONAMIENTO EN BAÑO DE AGUA) Y RESISTENCIAS CONSERVADAS SEGÚN % DE BETÚN Y AGUA PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO.....	146
FIGURA 6.9 RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (SIN Y TRAS ACONDICIONAMIENTO) SEGÚN % DE BETÚN Y AGUA PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL	149
FIGURA 6.10 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS AL AIRE SEGÚN CONTENIDO DE AGUA.....	152
FIGURA 6.11 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS AL AIRE SEGÚN CONTENIDO DE BETÚN	153
FIGURA 6.12 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS AL AIRE SEGÚN CONTENIDO DE BETÚN.....	153
FIGURA 7.1 ASPECTO DE LA PROBETA RECIÉN FINALIZADO EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA SEGÚN NORMA UNE-EN 12697-23	158
FIGURA 7.2 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (EN KPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO	159
FIGURA 7.3 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (EN KPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO	159
FIGURA 7.4 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL	162
FIGURA 7.5 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL	162
FIGURA 7.6 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO SEGÚN PORCENTAJES DE AGUA.....	164
FIGURA 7.7 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO SEGÚN PORCENTAJES DE BETÚN.....	164
FIGURA 7.8 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL SEGÚN PORCENTAJES DE BETÚN.....	165
FIGURA 7.9 ENSAYO DINÁMICO DE RIGIDEZ SEGÚN NORMA UNE-EN 12697-26.....	166
FIGURA 7.10 MÓDULO RESILIENTE (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO A 2°C, 10°C Y 20°C (DE ARRIBA A ABAJO)	170
FIGURA 7.11 MÓDULO RESILIENTE (EN MPA) SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA Y BETÚN EN MEZCLA (PORCENTAJES REFERIDOS A MASA DE ÁRIDO SECO) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL A 2°C, 10°C Y 20°C (DE ARRIBA A ABAJO).....	171
FIGURA 7.12. ALMACENAMIENTO DE PROBETAS DURANTE PERIODO DE CURADO.....	177
FIGURA 7.13 MÓDULO RESILIENTE MEDIO A 20°C (MPA) DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO TRAS DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO	180

FIGURA 7.14 MÓDULO RESILIENTE MEDIO A 20°C (MPa) DE MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO TRAS DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO	181
FIGURA 7.15 EVOLUCIÓN CON EL TIEMPO DE LA RIGIDEZ DE ALGUNAS DE LAS MEZCLAS CON ÁRIDO RECICLADO Y ÁRIDO NATURAL	183
FIGURA 7.16 ESQUEMA GRÁFICO DE LA TRANSFORMACIÓN MEDIANTE EL SHIFT FACTOR DE LOS MÓDULOS OBTENIDOS PARA CONSEGUIR UNA ÚNICA CURVA MAESTRA (A PARTIR DE LEE ET AL., 2009)	189
FIGURA 7.17 MÓDULOS DINÁMICOS A TRACCIÓN INDIRECTA OBTENIDOS A 3 TEMPERATURAS DIFERENTES (2°C, 20°C Y 40°C) PARA LAS DISTINTAS MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO.....	192
FIGURA 7.18 MÓDULOS DINÁMICOS A TRACCIÓN INDIRECTA OBTENIDOS A 3 TEMPERATURAS DIFERENTES (2°C, 20°C Y 40°C) PARA LAS DISTINTAS MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL	193
FIGURA 7.19 CURVAS MAESTRAS OBTENIDAS A TRACCIÓN INDIRECTA DINÁMICA PARA PROBETAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO, 9% DE AGUA Y DIFERENTES CONTENIDOS DE BETÚN	194
FIGURA 7.20 CURVAS MAESTRAS OBTENIDAS A TRACCIÓN INDIRECTA DINÁMICA PARA PROBETAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL, 7% DE BETÚN Y DIFERENTES CONTENIDOS DE AGUA.....	194
FIGURA 7.21 CURVAS MAESTRAS OBTENIDAS A TRACCIÓN INDIRECTA DINÁMICA PARA PROBETAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL, 3% DE AGUA Y DIFERENTES CONTENIDOS DE BETÚN.....	195
FIGURA 7.22 CURVAS MAESTRAS OBTENIDAS A TRACCIÓN INDIRECTA DINÁMICA PARA PROBETAS CON 100% DE ÁRIDO NATURAL, 4% DE BETÚN Y DIFERENTES CONTENIDOS DE AGUA.....	195
FIGURA 7.23 SHIFT FACTOR EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA OBTENIDO PARA LAS DISTINTAS MEZCLAS CON ÁRIDO RECICLADO	197
FIGURA 7.24 CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE (ITSM) Y EL MÓDULO DINÁMICO ITE* A DIFERENTES FRECUENCIAS DE CARGA PARA PROBETAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO	199
FIGURA 7.25 CORRELACIÓN ENTRE EL MÓDULO RESILIENTE (ITSM) Y EL MÓDULO DINÁMICO ITE* A DIFERENTES FRECUENCIAS DE CARGA PARA PROBETAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL	199
FIGURA 7.26 CURVA TÍPICA DE DEFORMACIÓN AXIAL PERMANENTE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS DE CARGA (A PARTIR DE NORMA UNE-EN 12697-25)	201
FIGURA 7.27 DISPOSICIÓN DEL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE SEGÚN NORMA BSI DD 226.....	202
FIGURA 7.28 DEFORMACIÓN PERMANENTE TRAS EL ACONDICIONAMIENTO (E ₀) SEGÚN EL CONTENIDO DE AGUA Y BETÚN PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y NATURAL	205
FIGURA 7.29 DEFORMACIÓN PERMANENTE TRAS 5000 CICLOS (E ₅₀₀₀) SEGÚN EL CONTENIDO DE AGUA Y BETÚN PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y NATURAL	206
FIGURA 7.30 PENDIENTE DE RECTA TANGENTE EN ETAPA SECUNDARIA SEGÚN EL CONTENIDO DE AGUA Y BETÚN PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y NATURAL	207
FIGURA 7.31 PUNTO DE CORTE “A” SEGÚN EL CONTENIDO DE AGUA Y BETÚN PARA MEZCLAS CON 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y NATURAL	209
FIGURA 7.32 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (ITS) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO	212
FIGURA 7.33 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (ITS) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA	212
FIGURA 7.34 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (ITS) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	213
FIGURA 7.35 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (ITS) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL	213
FIGURA 7.36 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (ITS) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA.....	214
FIGURA 7.37 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (ITS) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	214
FIGURA 7.38 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE Y A TRACCIÓN INDIRECTA PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO	216

FIGURA 7.39 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE Y A TRACCIÓN INDIRECTA PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	216
FIGURA 7.40 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE Y A TRACCIÓN INDIRECTA PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA	217
FIGURA 7.41 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE Y A TRACCIÓN INDIRECTA PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	217
FIGURA 7.42 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	219
FIGURA 7.43 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE AGUA	219
FIGURA 7.44 RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	220
FIGURA 7.45 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN PERMANENTE INICIAL (TRAS ACONDICIONAMIENTO) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	221
FIGURA 7.46 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN PERMANENTE INICIAL (TRAS ACONDICIONAMIENTO) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN.....	221
FIGURA 7.47 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN PERMANENTE FINAL (TRAS 5000 CICLOS) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	222
FIGURA 7.48 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN PERMANENTE FINAL (TRAS 5000 CICLOS) Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN.....	223
FIGURA 7.49 RELACIÓN ENTRE PENDIENTE DE ETAPA SECUNDARIA Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	224
FIGURA 7.50 RELACIÓN ENTRE PENDIENTE DE ETAPA SECUNDARIA Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	224
FIGURA 7.51 RELACIÓN ENTRE PUNTO DE CORTE “A” Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	225
FIGURA 7.52 RELACIÓN ENTRE PUNTO DE CORTE “A” Y RIGIDEZ (ITSM) PARA UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y DISTINGUIENDO SEGÚN CONTENIDOS DE BETÚN	226
FIGURA 8.1 ENSAYO DINÁMICO DE RIGIDEZ CON CONFINAMIENTO TRIAXIAL SEGÚN NORMA UNE-EN 13286-7	230
FIGURA 8.2 TRAYECTORIAS DE TENSIONES EMPLEADAS SEGÚN LA NORMA UNE-EN 13286-7.....	232
FIGURA 8.3 EJEMPLO DE AJUSTE DE LOS MODELOS DE HICKS, UZAN Y NCHRP A LOS DATOS REALES OBTENIDOS (MEZCLA CON ÁRIDO RECICLADO, 9% DE AGUA, 6% DE BETÚN Y SIN CURADO).....	236
FIGURA 8.4 REPRESENTACIÓN DEL MODELO K- θ DE HICKS PARA MEZCLAS CON ÁRIDO RECICLADO Y DIFERENTES CONTENIDOS DE AGUA, BETÚN Y TIEMPOS DE CURADO.....	239
FIGURA 8.5 REPRESENTACIÓN DEL MODELO K- θ DE HICKS PARA MEZCLAS CON ÁRIDO NATURAL Y DIFERENTES CONTENIDOS DE AGUA, BETÚN Y TIEMPOS DE CURADO.....	239
FIGURA 8.6 DISTORSIÓN DE LOS MÓDULOS CARACTERÍSTICOS SEGÚN EL CRITERIO DE TENSIONES ELEGIDO.....	242
FIGURA 8.7 EJEMPLOS DE PROBETAS ROTAS TRAS ENSAYO TRIAXIAL DE DEFORMACIÓN PERMANENTE	245
FIGURA 8.8 RELACIÓN DE TENSIONES DE FALLO ($\sigma_{1,F}$ Y $\sigma_{D,F}$) OBTENIDAS PARA DIFERENTES PRESIONES DE CONFINAMIENTO (σ_3) EN PROBETAS CON ÁRIDO RECICLADO Y 0 DÍAS DE CURADO	248
FIGURA 8.9 DIAGRAMA DE MOHR OBTENIDO PARA PROBETAS DE ÁRIDO RECICLADO SIN CURADO Y TRAS SER ENSAYADAS CON 4 σ_3 DIFERENTES	248
FIGURA 8.10 ENVOLVENTES DE LOS CÍRCULOS DE MOHR DE LAS MEZCLAS ESTUDIADAS.....	250
FIGURA 8.11 CURVAS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA MEZCLAS DE ÁRIDO RECICLADO (9% DE AGUA Y 6% DE BETÚN) SIN SER SOMETIDAS A CURADO	257
FIGURA 8.12 EVOLUCIÓN DE LA RIGIDEZ CON EL NÚMERO DE CICLOS DE CARGA PARA MEZCLAS DE ÁRIDO RECICLADO (9% DE AGUA Y 6% DE BETÚN) SIN SER SOMETIDAS A CURADO	257
FIGURA 8.13 CURVAS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA MEZCLAS DE ÁRIDO RECICLADO (9% DE AGUA Y 6% DE BETÚN) TRAS 3 DÍAS DE CURADO A 50°C.....	258

FIGURA 8.14 EVOLUCIÓN DE LA RIGIDEZ CON EL NÚMERO DE CICLOS DE CARGA PARA MEZCLAS DE ÁRIDO RECICLADO (9% DE AGUA Y 6% DE BETÚN) TRAS 3 DÍAS DE CURADO A 50°C	258
FIGURA 8.15 CURVAS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA MEZCLAS DE ÁRIDO NATURAL (3% DE AGUA Y 4% DE BETÚN) SIN SER SOMETIDAS A CURADO	259
FIGURA 8.16 EVOLUCIÓN DE LA RIGIDEZ CON EL NÚMERO DE CICLOS DE CARGA PARA MEZCLAS DE ÁRIDO NATURAL (3% DE AGUA Y 4% DE BETÚN) SIN SER SOMETIDAS A CURADO	259
FIGURA 8.17 CURVAS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA MEZCLAS DE ÁRIDO NATURAL (3% DE AGUA Y 4% DE BETÚN) TRAS 3 DÍAS DE CURADO A 50°C	260
FIGURA 8.18 EVOLUCIÓN DE LA RIGIDEZ CON EL NÚMERO DE CICLOS DE CARGA PARA MEZCLAS DE ÁRIDO NATURAL (3% DE AGUA Y 4% DE BETÚN) TRAS 3 DÍAS DE CURADO A 50°C	260
FIGURA 8.19 RELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO A Y EL STRESS RATIO	261
FIGURA 8.20 RELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO B Y EL STRESS RATIO.....	261
FIGURA 8.23 RELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO C Y EL STRESS RATIO.....	262
FIGURA 8.24 RELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO D Y EL STRESS RATIO	262
FIGURA I.1 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS AL AIRE SEGÚN CONTENIDO DE BETÚN.....	333
FIGURA I.2 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS AL AIRE SEGÚN CONTENIDO DE AGUA.....	333
FIGURA 11.3 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS EN BAÑO DE AGUA A 49°C SEGÚN CONTENIDO DE BETÚN	334
FIGURA I.4 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS EN BAÑO DE AGUA A 49°C SEGÚN CONTENIDO DE AGUA	334
FIGURA I.5 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS AL AIRE SEGÚN CONTENIDO DE BETÚN	335
FIGURA I.6 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS AL AIRE SEGÚN CONTENIDO DE AGUA	335
FIGURA I.7 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS EN BAÑO DE AGUA A 49°C SEGÚN CONTENIDO DE BETÚN	336
FIGURA I.8 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL Y TRAS ACONDICIONAMIENTO DE 4 DÍAS EN BAÑO DE AGUA A 49°C SEGÚN CONTENIDO DE AGUA	336
FIGURA I.9 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO SEGÚN PORCENTAJES DE BETÚN.....	337
FIGURA I.10 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO RECICLADO SEGÚN PORCENTAJES DE AGUA.....	337
FIGURA I.11 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL SEGÚN PORCENTAJES DE BETÚN.....	338
FIGURA I.12 RELACIÓN ENTRE DEFORMACIÓN DE ROTURA Y RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA PARA MEZCLAS CON UN 100% DE ÁRIDO NATURAL SEGÚN PORCENTAJES DE AGUA	338
FIGURA II.1 TENSIONES PRINCIPALES DE ROTURA.....	340
FIGURA II.2 DIAGRAMA DE MOHR	340
FIGURA II.3 TENSIONES PRINCIPALES DE ROTURA.....	341
FIGURA II.4 DIAGRAMA DE MOHR	341
FIGURA II.5 TENSIONES PRINCIPALES DE ROTURA.....	342
FIGURA II.6 DIAGRAMA DE MOHR	342
FIGURA II.7 TENSIONES PRINCIPALES DE ROTURA.....	343
FIGURA II.8 DIAGRAMA DE MOHR	343

Abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATEB	Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas
BSi	British Standards Institution
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CEN	European Committee for Standardization
CWC	Clean Washington Center
DETR	Department of the Environment, Transport and the Regions
FHWA	Federal Highway Administration
GERD	Asociación Española de Gestores de RCD
HAUC	Highway Authorities and Utilities Committee
ITeC	Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña
MDOT	Michigan Department of Transportation
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y transportes
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NLA	National Lime Association
NLT	Normas del Laboratorio de Transporte

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y planteamiento general del problema

El término desarrollo sostenible fue definido por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland en 1987 (ONU, 1987). Esta definición, fruto de los trabajos de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, fue asumida en el Principio 3 de la Declaración de Río (ONU, 1992) como: *Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades.*

El desarrollo sostenible no es un concepto exclusivamente ambiental sino que se cimienta sobre tres pilares independientes que se refuerzan mutuamente: el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente (ONU, 2005). En definitiva, se trata de mejorar toda aquella tecnología que permite satisfacer las necesidades de la sociedad (alimentación, vivienda, trabajo, etc.) pero de modo que el ritmo al que la actividad humana afecta al medio ambiente sea menor que su capacidad de recuperación.

En el marco de la ingeniería civil, se pueden identificar dos grandes problemas que comprometen el desarrollo sostenible:

Por un lado, la producción de enormes masas de residuos cada vez que se procede a la demolición de una estructura existente o a la construcción de una nueva cuya única alternativa hasta hace pocas décadas (y que todavía sigue siendo una práctica habitual en ciertas zonas y países) es la de su deposición en vertederos. Estos vertederos, sobre todo cuando no están controlados y regulados, suponen un gran impacto ambiental en la zona, habitualmente situada en bosques y zonas poco habitadas.

En las últimas décadas la construcción no ha dejado de crecer de forma exponencial a nivel global, y con ella la producción de RCD, si bien es cierto que la actual crisis económica ha frenado dicha tendencia en países como España. Los datos de producción de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) varían entre distintos autores y publicaciones como el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (PNIR, 2009) indican que es imposible estimar de forma exacta la producción de RCD en nuestro país, aunque las

cifras suelen situarse entre los 30 y 40 millones de toneladas anuales. Estas cantidades llegaron a poner a España como 5º país europeo en producción de RCD (del Río, 2010) si bien seguía lejos de otros como EEUU en donde la producción llegó a estar estimada entre 610 y 780 millones de toneladas anuales en el año 2002.

Debido a la gran masa y volumen de estos residuos, su vertido en vertederos supone una serie de grandes daños al medio ambiente, como impacto visual y paisajístico, ruido, polvo, vibraciones, contaminación de suelos y acuíferos, deforestación y ocupación de suelo no aprovechable para la biodiversidad o para un uso social.

El segundo problema que se plantea, es la existente necesidad de áridos o materiales granulares durante las obras de construcción de nuevas instalaciones. Estos áridos provienen de depósitos sedimentarios, o de modo más habitual de la explotación de una o varias canteras. Al igual que en el caso anterior, estas operaciones suponen la generación de ruido, polvo, vibraciones, deforestación y ocupación de suelo. Además, una vez agotados los recursos naturales, las canteras suelen convertirse en zonas abandonadas cuyo estado natural puede tardar décadas en ser recuperado.

La necesidad de áridos puede ser enorme cuando las obras en cuestión son de gran envergadura, aspecto que suele ser común en las obras de tipo lineal, como las de construcción de carreteras. Por ello, y en el marco del desarrollo sostenible, se hace primordial el buscar nuevas fuentes que no impliquen la explotación de más recursos naturales.

Una solución a ambos problemas, consistente en el reciclaje de los RCD como áridos para la construcción de nuevas estructuras e infraestructuras, fue considerada ya desde la antigüedad. No obstante, no fue probablemente hasta los tiempos de la Segunda Guerra Mundial, cuando la idea empezó a concebirse como un concepto de producción a gran escala, motivado evidentemente por la destrucción y por la gran escasez y coste de los materiales básicos de construcción que imperaba en la dañada Europa de aquel entonces. Ejemplos de ello, fueron países como Francia y Alemania que destinaron grandes cantidades de escombros a la reconstrucción de sus redes de transporte (Lund, 1996).

Los avances de la tecnología y la ingeniería de las últimas décadas, han permitido que en la actualidad el uso de RCD esté cobrando el mayor auge de su historia y prueba de ello es la creciente investigación que se está realizando hoy en día por parte de diversos autores pertenecientes a instituciones y centros tecnológicos de todo el mundo (buena parte de la cual se presentará en el capítulo dedicado al Estado del Arte).

La gestión de los RCD se encuentra cada vez más regulada desde el punto de vista administrativo (por ejemplo con la implantación del Real Decreto 105/2008, de 1 de Febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, o la Ley 10/2008 de la Comunidad Autónoma de Galicia, de 3 de Noviembre, de residuos de Galicia). No obstante, no existen a día de hoy datos fiables de la cantidad de RCD que en realidad se reciclan. En España, el Gremio Español de Entidades de Reciclaje de Residuos de Demolición estableció dicha cantidad en un 40%, aunque según los datos de la Asociación Nacional de Gestores de RCD (GERD, 2010) baja al 15%. Por su parte, los datos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas indican que más del 80% de los RCD son llevados a vertedero (CEDEX, 2010) y según el PNIR solamente los RCD que se llevan a vertederos incontrolados suponen ya el 50% de la producción de RCD. Fuentes de la Comisión Europea (DG ENV, 2011) sitúan a España, con una tasa de reciclaje de los RCD del 14% (considerablemente inferior al 46% medio de la Unión Europea) solamente por delante de Italia, Portugal, Grecia, Suecia, Malta, Rumanía y Eslovaquia, pese a ser, según la misma fuente, el 6º país de Europa que más residuos de este tipo produce (Calvo et al., 2014).

Según el PNIR, en 2012 deberían de reciclarse el 25% de los RCD y aplicar otras formas de valorización a un 15% adicional, subiendo dichas cifras a un 35% y 20% respectivamente para el año 2015. La Directiva Marco de Residuos (Unión Europea, 2008) va más allá estableciendo como límite el año 2020 para que al menos un 70% de la fracción no peligrosa de los RCD (excepto las tierras y piedras) se emplee en alguna de las posibles formas de valorización.

En los últimos años se han investigado las posibles aplicaciones de residuos como materias primas en ingeniería civil. Por ejemplo, son muy conocidas ya las

mezclas bituminosas en caliente con polvo de neumático (FHWA 1997; Maupin y Payne, 1997; West et al., 1998; Hossain et al., 1999; Texas DOT, 2000; Tahmoressi, 2001; Airey et al., 2002; Hicks, 2002; Airey et al., 2003; Azizian et al., 2003; Bertollo et al., 2004; Lisi et al., 2004; Palit et al., 2004; Zborowski et al., 2004; Nunez et al., 2005; Reyes et al., 2005; Selim et al., 2005; Tortum et al., 2005; Khalid y Artamendi, 2006) y con escorias de alto horno (Bagampadde et al., 1999; Khan y Wahhab, 1998; Oregon DOT, 2000; Airey et al., 2004; Ellis et al. 2004; Pasetto y Baldo, 2011).

Por su parte, el procesado de los RCD puede llevar a la obtención de diferentes tipologías de árido reciclado, como los de hormigón, vidrio o cristal, plástico, materiales cerámicos, materiales asfálticos, etc. Sus distintas propiedades como árido (Tam et al., 2008; Mulder et al., 2007) así como sus aplicaciones en materiales de ingeniería civil también han sido estudiadas en los últimos años, por ejemplo, como materiales sueltos en sub-bases de carreteras y terraplenes (Bennert et al., 2000; Arm, 2001; Poon y Chan, 2006; Vegas et al., 2008; Melbouci, 2009; Alaejos Gutiérrez y Calvo Calzada, 2010; Disfani et al., 2011; Jiménez et al., 2011; Vegas et al., 2011; Arulrajah et al., 2013; Arulrajah et al., 2014a; Arulrajah et al., 2014b; Jayakody et al., 2014), como árido en hormigones (Li, 2008; Gómez-Soberón, 2002; González-Fonteboa y Martínez-Abella., 2007; Ouchagour, 2007; Rahal, 2007; González-Fonteboa y Martínez-Abella., 2008; González-Fonteboa et al., 2009; Breccolotti y Materazzi, 2010; Gokce et al., 2011; Limbachiya et al., 2012; Behera et al., 2014; Pepe et al., 2014), o como materiales tratados con conglomerantes hidráulicos (Hansen, 1992; Cross et al., 1996; Yeo y Sharp, 1997; Rakshvir y Barai, 2006).

También se han realizado numerosas investigaciones sobre mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados de vidrio (CWC, 1996; FHWA, 1997; Maupin, 1997; Maupin, 1998; Su y Chen, 2002; Airey et al., 2004), con plásticos (FHWA, 1997; Zoorob y Suparma, 2000; Justo y Veeraragavan, 2002; Ergun et al., 2005; Qadir y Imam, 2005) y sobre todo con áridos reciclados de tipo hormigón (Huang et al., 2002; Zaharieva et al., 2003; Shen y Du, 2005; Parnavithana y Mohajerani, 2006; Al Nageim y Gürer, 2007; Pérez et al., 2007; Won et al., 2007; Kong et al., 2010; Mills-Beale y You, 2010; Pérez et al., 2010; Chen et al., 2011; Rubio et al., 2011; Wu et al., 2011; Pérez et al., 2012; Bhusal y Wem, 2013; Rafi et al., 2014; Pasandín y Pérez, 2015).

En el caso de las mezclas bituminosas en frío con áridos reciclados, existen muchas menos investigaciones y sobre todo se centran en residuos con propiedades puzolánicas, como las cenizas volantes (Thanaya, 2003; Thanaya et al., 2009; Al Nageim et al., 2012; Al-Busaltan et al. 2012a).

Pese a todo este desarrollo ya realizado, el uso de áridos reciclados de RCD en materiales de ingeniería civil, sigue teniendo que enfrentarse hoy en día a numerosos retos. Por un lado, suele ser complicado que cumplan las exigencias técnicas de los áridos naturales utilizados hasta el momento, lo que suele implicar procesos de demolición selectiva, retirada de materiales de menor calidad (como papeles, plásticos, etc.) y pretratamientos que elevan su precio de forma considerable. Además, las plantas de gestión de este tipo de residuos son aún escasas, lo que provoca que no siempre sea fácil encontrar un suministrador cerca de la obra debiendo afrontar el sobre coste de transportes a largas distancias. Aunque algunos autores (Pasandín, 2013) indican que estas cuestiones provocan que el árido reciclado sea más caro que el árido natural, existen algunas otras publicaciones que contradicen esta tendencia (CEDEX, 2010) y lo cierto es que durante el desarrollo de la presente tesis doctoral, algunos gestores de residuos indicaron que a menudo regalaban el árido reciclado sin coste alguno, puesto que por ley están obligados a tratar este tipo de residuos sin que todavía exista una demanda capaz de dar salida a las stock que tienen almacenado y que no puede ser llevado a vertedero.

Al margen de cuestiones económicas, otro gran problema que se presenta es su falta de homogeneidad. En obras de gran envergadura que necesitan suministros durante largos periodos de tiempo, las empresas gestoras podrían tener que recurrir a diferentes fuentes (construcciones o demoliciones) lo que sin duda influirá en la composición y propiedades del producto. Lo mismo ocurre cuando una única empresa gestora no es capaz de suministrar las cantidades requeridas por la obra, bien por su limitada capacidad de procesado de áridos reciclados (cosa que también podría suceder en una cantera de áridos naturales) o bien porque no existen suficientes fuentes de RCD en un determinado momento. En este caso, también habría que recurrir a distintos proveedores, cada uno de ellos con un material de diversas características.

En definitiva, todavía queda un largo, pero necesario, camino por delante en el desarrollo de los RCD como árido reciclado en materiales de ingeniería civil, al final del cual, todos los residuos que se producen en la construcción y demolición de estructuras e infraestructuras se reciclarán y reutilizarán en la construcción de otras nuevas, ayudando a limitar la excesiva explotación de residuos naturales tan presente a día de hoy. Este camino pasa por el estudio y comprensión del comportamiento de estos áridos en diferentes aplicaciones, por el desarrollo de tecnologías que mejoren su calidad, por la redacción de normas y especificaciones que regulen sus usos, por la adopción de medidas que eliminen los vertederos ilegales y que graven la explotación de canteras naturales haciendo que los precios sean competitivos, por la proliferación de entidades gestoras de residuos y en definitiva, por un arraigado interés en los RCD como materias primas.

El cambio climático es ya una realidad y en las manos de la sociedad se encuentra la responsabilidad de desarrollar las herramientas necesarias para lograr un desarrollo más sostenible.

1.2 Objetivos de la investigación

El tipo de mezcla bituminosa más estudiado y empleado hoy en día son las mezclas bituminosas en caliente, cuya realización implica el calentamiento a elevadas temperaturas (alrededor de los 170°C) tanto de los áridos como del betún que las conforman. Desde el punto de vista económico y ecológico, esto supone grandes costes monetarios, emisiones de CO₂ a la atmosfera, consumo de combustibles, necesidades de grandes equipos difíciles de transportar e instalar y peores condiciones ambientales y de seguridad y salud para los trabajadores y la población local.

Por el contrario, las mezclas en frío se realizan mezclando a temperatura ambiente los áridos con emulsión bituminosa y agua, lo que permite eliminar del proceso de fabricación una de las fases que según los Análisis de Ciclo de Vida (LCA), más impacto ambiental producen: el calentamiento de los materiales (Ruiz et al., 2014). En definitiva, se reduce el coste, así como los problemas anteriormente citados. Es por ello que décadas atrás habían sido muy populares en el ámbito de la ingeniería de

carreteras, quizá con más relevancia en momentos clave como la crisis energética de los años 70.

No obstante, es innegable que las mezclas en caliente presentan en general mejores propiedades mecánicas además de no requerir de un periodo de maduración para alcanzar sus prestaciones de servicio. Esto unido a recientes épocas de bonanza económica produjo que la mayoría de proyectos de construcción e investigación se basaran en éstas, incluso para aplicaciones en las que el uso de mezclas en frío sería mucho más lógico.

Por ejemplo, las mezclas en frío son en general más flexibles (o menos rígidas) que las mezclas en caliente, lo que llega a suponer una ventaja cuando la explanada de la carretera es de baja calidad amoldándose a sus deformaciones sin llegar a fisurar (caso bastante habitual en las abundantes carreteras de medio y bajo tráfico). Además son almacenables pudiendo ser transportadas desde plantas de fabricación lejanas sin peligro de que endurezcan y no sirvan para su colocación y compactación una vez llegadas a la obra.

Todo ello, junto con los avances en las emulsiones bituminosas desarrollados en los últimos años y las actuales políticas de lucha contra el cambio climático (como el Protocolo de Kioto, en vigor desde 2005), han contribuido a que su uso vuelva a estar, cada día, más extendido a nivel mundial y que muchos investigadores las retomen como objeto de sus estudios (Thanaya, 2003; Kuhn et al., 2005; Oruc et al., 2007; Thanaya, 2006; Valencia et al., 2007; Khalid y Monney, 2009; Ozsahin y Oruc, 2008; Thanaya et al., 2009; Chávez- Thanaya, 2010; Al Nageim et al., 2012; Al-Busaltan et al. 2012a y 2012b; Al-Hdabi et al., 2013; Al-Hdabi et al., 2014a y 2014b; Ferrotti et al., 2014; Guo et al., 2014; Fang et al., 2015).

Ante este panorama, y con la intención de hallar una nueva aplicación de los RCD como áridos reciclados en el ámbito de la ingeniería civil, arranca en 2011 el Proyecto BIA2010-17751 “Aplicación sostenible de residuos de construcción y demolición en ingeniería civil: capas bituminosas en frío en firmes flexibles de medio/bajo tráfico”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con una Ayuda asociada al proyecto para la Formación de Personal Investigador (FPI) BES-

2011-044377. Fruto de los trabajos realizados por el autor en dicho proyecto, se obtuvo la presente tesis doctoral, cuyo objetivo fundamental es la aplicación sostenible de los RCD como áridos reciclados de un tipo de mezcla bituminosa que, de por sí, ya es más sostenible que las mezclas bituminosas en caliente: las mezclas en frío.

Así mismo, se han planteado los siguientes objetivos parciales:

1. Elaborar un estado del arte sobre la utilización de áridos reciclados procedentes de RCD en mezclas bituminosas en frío. Debido a la escasa presencia de publicaciones sobre este tema, será útil también información sobre investigaciones afines, como las mezclas en caliente con RCD, las mezclas en frío con áridos convencionales y las mezclas en frío con áridos reciclados diferentes a los RCD. Dichas investigaciones guiarán el camino a seguir a la hora realizar los ensayos de laboratorio, tomar decisiones y establecer comparativas entre los resultados aquí hallados y los obtenidos por otros autores.
2. Determinar las propiedades de los áridos reciclados de RCD empleados para la realización de la presente investigación, y compararlos con los áridos naturales de las muestras de control.
3. Desarrollar un método que permita fabricar probetas con idénticas propiedades (contenido de huecos, densidad, degradación de la granulometría, contenido de humedad residual, etc.) sin importar sus dimensiones y ensayo para el que fueron concebidas, para poder establecer diversas relaciones entre las propiedades estudiadas determinando en qué medida unas influyen sobre las otras
4. Determinar las propiedades de las mezclas bituminosas en frío con áridos reciclados y compararlas con las propiedades obtenidas con mezclas de control (árido 100% natural), así como con los resultados publicados por otros autores.

5. A la vista de los resultados, establecer criterios de diseño, recomendaciones y limitaciones a la hora de emplear mezclas bituminosas en frío con RCD en aplicaciones prácticas.

1.3 Organización de la tesis doctoral

En el **Capítulo 2**, se explica y esquematiza la metodología seguida para la consecución de los objetivos anteriormente descritos.

En el **Capítulo 3**, se resume el Estado del Conocimiento actual, a partir de la bibliografía publicada anteriormente por otros autores. En este Capítulo, se abordan aspectos clave para la realización de la presente investigación, como las propiedades particulares de las mezclas bituminosas en frío, las propiedades de los RCD y las propiedades de las mezclas bituminosas a las que se les ha añadido RCD como árido de sustitución.

El **Capítulo 4** abre la parte experimental de la tesis, con una exhaustiva caracterización de los áridos, tanto reciclados como naturales (de control), con los que se trabajó durante el transcurso de toda la investigación. Así, se exponen los trabajos realizados para la determinación de propiedades como la granulometría, índice de lajas, caras de fractura, densidad, absorción, composición del árido reciclado, limpieza de los finos (equivalente de arena e índice de azul de metileno) y resistencia a la fragmentación del árido grueso.

En el **Capítulo 5** se reúnen todas las consideraciones relativas al diseño de la mezcla de trabajo y al protocolo propuesto para la fabricación de las probetas. Así, se tratan temas como la elección del tipo de mezcla a estudiar, tipo de emulsión bituminosa a emplear, granulometría, dimensiones de las probetas y método de compactación. En este Capítulo se desarrolla y propone un método innovador con el que se consigue que todas las probetas empleadas durante el transcurso de la tesis tengan las mismas propiedades intrínsecas, como granulometría, contenido de huecos, densidad, etc., sin importar las dimensiones de probeta requeridas en cada ensayo.

En el **Capítulo 6** se describen los trabajos realizados para la determinación de las propiedades no mecánicas de las mezclas bituminosas en frío con RCD y con áridos naturales (de control). Las propiedades estudiadas son el contenido de agua de las probetas en diferentes fases de fabricación y curado, las propiedades volumétricas, la sensibilidad al agua y la afinidad entre áridos y ligante. La sensibilidad al agua fue determinada mediante el ensayo de inmersión-compresión, mientras que la afinidad árido-ligante fue evaluada por dos vías: el ensayo de la botella giratoria y el conocido como Boiling Water Test.

En el **Capítulo 7**, se estudia el comportamiento visco-elasto-plástico de las mezclas en frío, el cual está más acentuado una vez han alcanzado un estado avanzado de maduración, y que es semejante al de las mezclas bituminosas en caliente. Por ello, se emplearon ensayos propios de este tipo de mezcla, como el de resistencia a tracción indirecta, módulo resiliente a tracción indirecta (ITSM), módulo dinámico y el ensayo uniaxial de deformación permanente.

El **Capítulo 8** pone fin a la fase experimental de la tesis, con los ensayos triaxiales realizados para el estudio del comportamiento elástico no lineal de las mezclas bituminosas en frío, más evidente en etapas tempranas de maduración, en las que su comportamiento se asemeja más al de un material granular que al de una mezcla bituminosa en caliente. Así, en este caso, se recurrió a ensayar las probetas bajo condiciones de sollicitación triaxial y se repitió el proceso también sobre probetas sin curar, obteniendo propiedades como el módulo resiliente, resistencia a compresión (triaxial) y resistencia a la deformación permanente.

En el **Capítulo 9**, y una vez tenidos en cuenta todos los resultados obtenidos en la parte experimental, se desglosan las conclusiones de la investigación, así como las recomendaciones para el uso de este tipo de mezclas en aplicaciones prácticas. También se avanzan las posibles líneas de investigación que en un futuro continuarían las aquí iniciadas.

En el **Capítulo 10** se reúne la lista completa de referencias bibliográficas consultadas durante la realización de la presente tesis.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 Desarrollo metodológico

La metodología seguida para la consecución de los objetivos anteriormente expuestos se resume en las siguientes fases, las cuales se sucedieron en orden cronológico durante la realización de la presente tesis:

Fase I:

La primera fase consistió en la recopilación y revisión de la información publicada por otros autores e investigadores, relativa a la temática aquí estudiada.

- Se recogió la información particular sobre las mezclas bituminosas en frío, diferenciando los aspectos clave que las hacen diferentes de otras mezclas bituminosas de uso común, como las mezclas en caliente. Así, se analizaron no solo sus propiedades mecánicas, sino también los aspectos ecológicos y sociales derivados del empleo de las mismas. Finalmente, también se observaron sus limitaciones, así como las debilidades que se deberían mejorar para poder equipararlas a los demás tipos de mezcla.
- Se recopiló información sobre la problemática de los residuos de construcción y demolición mediante los datos estadísticos de producción, así como los porcentajes de los mismos que se reciclan o directamente se depositan en vertederos. También se analizó el punto en el que se encuentra actualmente la legislación y normativa que los regula.
- Se recogió información de otros investigadores sobre las propiedades de los áridos reciclados provenientes de los RCD para luego ser comparada con los datos obtenidos en la presente tesis.
- Se reunió la bibliografía publicada por otros autores sobre mezclas bituminosas en frío con áridos reciclados. Debido a la escasa investigación realizada sobre mezclas en frío con áridos reciclados de RCD, se analizó también la información publicada sobre otros tipos de mezcla (en caliente,

templadas, reciclados en frío, etc.), así como con otros tipos de árido reciclado (RAP, escorias de alto horno, cenizas volantes, etc.).

El resumen de los aspectos más importantes que se han obtenido de esta revisión bibliográfica se presenta en el Capítulo 3, mientras que todas las referencias citadas se reúnen en el Capítulo 10. Tal y como se puede observar, la bibliografía consultada se compone de libros, artículos de revistas científicas, actas de congresos, tesis doctorales y normativa, así como de diferentes páginas web en las que se puede encontrar información de gran utilidad relacionada con la ingeniería de carreteras.

Fase II:

La segunda fase se corresponde con la fase experimental de la investigación, la cual fue planificada en base a la información revisada en la Fase I. En un primer bloque de ensayos, se analizaron los siguientes puntos:

- a) En primer lugar se estudiaron las propiedades de áridos que se emplearon durante la realización de la tesis, tanto reciclados, como naturales (con los que se hicieron las mezclas de control). Estos resultados se recogen en el Capítulo 4.
- b) Se estableció un nuevo protocolo para fabricar todas las probetas con idénticas propiedades intrínsecas (densidad, contenido de huecos, contenido de agua intersticial, etc.) independientemente de las dimensiones de las mismas, así como del ensayo para el que fueron concebidas. Gracias a ello, se pudo establecer correlaciones entre diferentes propiedades y obtener conclusiones más globales (no solo ensayo a ensayo). La descripción de estos aspectos, junto a otros relativos al diseño de las mezclas de trabajo (como tipo de mezcla estudiada, granulometría y tipo de emulsión empleada), puede verse en el Capítulo 5.
- c) Se estudiaron las propiedades no mecánicas de las mezclas, como el contenido de agua tras la compactación, contenido de agua tras el curado,

densidad, afinidad entre áridos y ligante o sensibilidad al agua. Estos resultados ocupan el Capítulo 6.

Tras estos ensayos, se procedió al estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas en frío con RCD. Para ello, se tuvo en cuenta que, tal y como se expone más pormenorizadamente en el Capítulo 3, las mezclas realizadas con emulsión bituminosa combinan características de los materiales granulares, que muestran un comportamiento elástico no lineal (dependencia del nivel de esfuerzo) y de las mezclas en caliente, con comportamiento visco-elasto-plástico (dependencia de la temperatura y de la velocidad y frecuencia de aplicación de las cargas). De este modo, las mezclas en frío no se comportan ni como los primeros ni como los segundos, sino como un material que comparte características de ambos a la vez. Además, y aunque toda su vida van a compartir estas características, en las etapas tempranas de maduración es cuando las mezclas en frío acentúan su comportamiento elástico no lineal (asemejándose al de un material granular), mientras que en la segunda fase es cuando se acentúan más sus características visco-elasto-plásticas (más propias de las mezclas bituminosas en caliente).

Con el fin de estudiar este doble comportamiento de las mezclas en frío, los ensayos de propiedades mecánicas se agruparon en dos categorías:

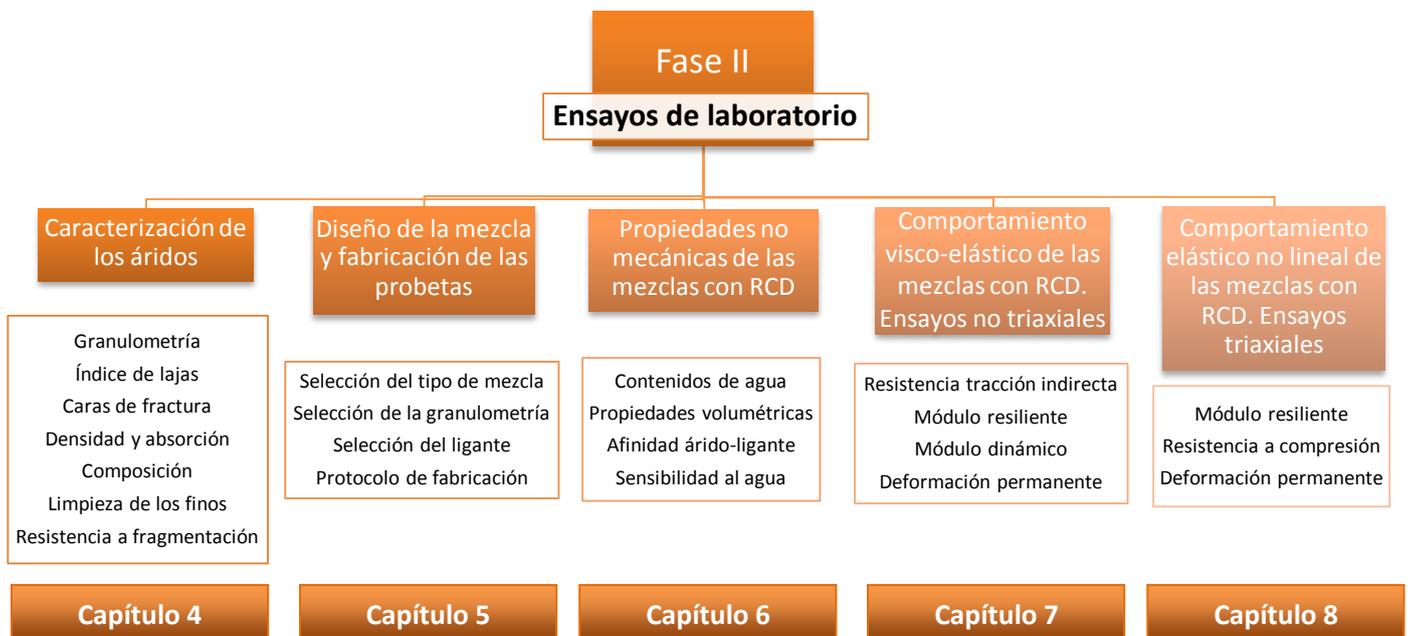
- d) Por un lado, se analizó el comportamiento visco-elasto-plástico, propio de las mezclas en caliente y que se acentúa en las mezclas en frío tras avanzados tiempos de maduración, lo cual se simuló sometiendo las probetas a un curado acelerado de 3 días a 50°C en estufa ventilada. Ante la falta de Normas específicas para las mezclas en frío, la mayor parte de las propiedades mecánicas se analizaron siguiendo Normas de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, como la resistencia a tracción indirecta, módulo resiliente a tracción indirecta (ITSM), módulo dinámico o deformación permanente mediante ensayo uniaxial. Los resultados de estos ensayos se recogen en el Capítulo 7.
- e) Por otro lado, se estudió el comportamiento elástico no lineal, recurriendo a Normas propias de materiales granulares sin ligante. Como este

comportamiento está presente en toda la vida de las mezclas en frío pero se ve acentuado en las etapas tempranas de maduración, se repitieron los ensayos sobre probetas curadas y sin curar. Así, se realizaron ensayos como el de módulo resiliente, compresión estática y deformación permanente, todos ellos bajo condiciones de sollicitación triaxial. Los resultados de estos ensayos conforman el Capítulo 8.

Todos los ensayos realizados fueron fielmente reproducidos en mezclas con un 100% de árido reciclado y en mezclas de control fabricadas exclusivamente con árido natural. Con ello, se pudo determinar claramente en qué manera los RCD afectan a las propiedades de las mezclas en frío. Finalmente, los resultados fueron comparados también con los de otros autores, así como con requerimientos establecidos en estándares y normativas.

Fase III

En vista de los resultados anteriormente obtenidos, se obtuvieron conclusiones y se estableció una serie de recomendaciones aplicables al empleo de RCD como áridos de mezclas en frío. También se plantearon posibles líneas de investigación que en un futuro continuarían las aquí tratadas. Todo ello queda reunido en el Capítulo 10 de la presente tesis.



CAPÍTULO 3

**LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO
Y LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN
Y DEMOLICIÓN**

3.1 Las mezclas bituminosas en frío

Fernández del Campo (1983) indicaba ya hace más de tres décadas que el gasto y la servidumbre del calentamiento en los materiales bituminosos de carreteras es en cualquier caso oneroso desde el punto de vista energético y económico. Implica, además, la utilización de grandes equipos, difíciles de transportar y de instalar y puede producir situaciones de contaminación y de rechazo por parte de la población. Por ello, ya en aquella época se hablaba de un creciente interés por perfeccionar unas técnicas en frío que fuesen más eficaces, económicas y ecológicas. Esta tendencia, desencadenada quizá años atrás, con la crisis energética del 1974, ha experimentado un nuevo auge con la llegada de las nuevas políticas ambientalistas, surgidas sobre todo, a partir del Protocolo de Kioto (en vigor desde 2005).

El elemento clave, que dio paso al desarrollo de la tecnología en frío, fue la aparición de las emulsiones bituminosas, que permitieron poner en obra betunes a temperatura ambiente y sin miedo a la presencia de humedad ni a los problemas que produce una mala adhesividad con los áridos. Así, desde sus inicios, fueron desplazando otras técnicas menos eficientes energética y ambientalmente, como los betunes fluidificados con derivados ligeros del petróleo cuyo destino final no era otro que su liberación a la atmósfera por evaporación.

El desarrollo de las emulsiones bituminosas y de la tecnología en frío experimentado en los últimos años, supuso una simplificación de la maquinaria a emplear, una mayor adaptabilidad ante climas y materiales, un evidente ahorro energético y una drástica reducción de contaminación y emisión de gases nocivos (entre otros, Thanaya, 2003; Kuhn et al., 2005; Oruc et al., 2007; Thanaya, 2006; Valencia et al., 2007; Khalid y Monney, 2009; Ozsahin y Oruc, 2008; Thanaya et al., 2009; Chávez-Thanaya, 2010; Al Nageim et al., 2012; Al-Busaltan et al. 2012a y 2012b; Al-Hdabi et al., 2013; Al-Hdabi et al., 2014a y 2014b; Ferrotti et al., 2014; Guo et al., 2014; etc.).

En la Figura 3.1 se puede apreciar el consumo energético de combustible, expresado en términos de litros por tonelada de mezcla bituminosa fabricada. Para la fabricación de una tonelada de mezcla en caliente convencional se consumen aproximadamente 7 litros de combustible. En este rango de temperaturas, por cada

incremento en la temperatura de fabricación de 20°C se incrementa el consumo en un litro más de combustible. Además, según la ATEB (ATEB, ref. a), desde el punto de vista de las emisiones de gases nocivos, la dependencia no es lineal sino exponencial, de modo que incrementos de 20°C y 40°C en la temperatura de fabricación, suponen multiplicar las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) por 9 y 40.

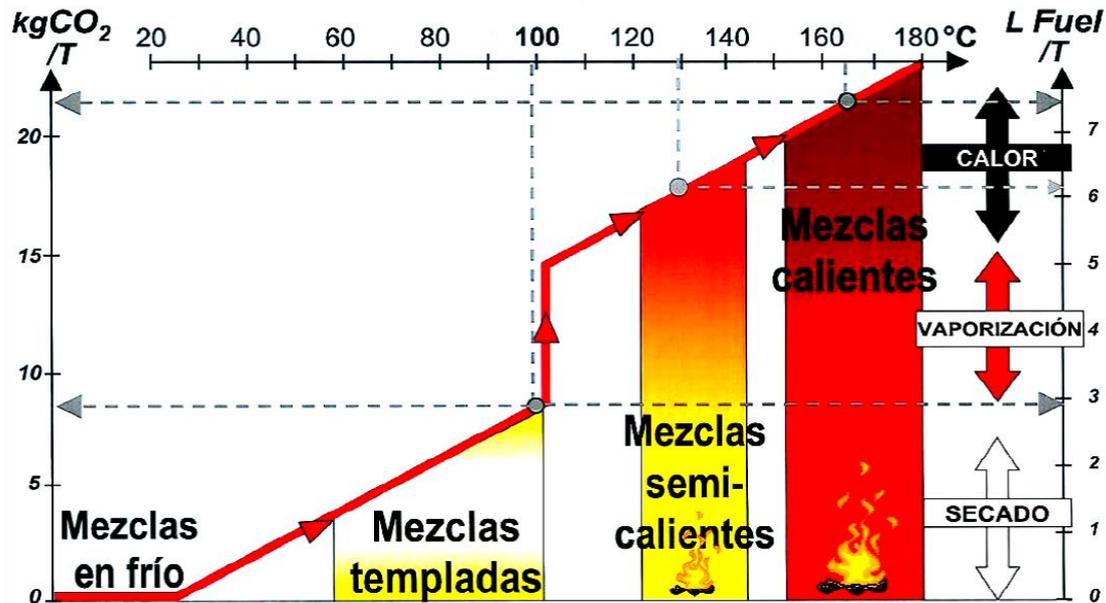


Figura 3.1 Emisiones y consumo de combustible en función de la temperatura de fabricación de diferentes tipos de mezclas bituminosas (Fuente: Miranda, 2008)

Esto ha generado un gran interés por las mezclas semicalientes (fabricadas entre 120-140°C), más recientemente por las mezclas templadas (60-80°C), y por supuesto, por las mezclas en frío (temperatura ambiente).

Tal y como indican Jenkins et al. (2007), las mezclas en frío combinan la influencia de los áridos minerales, ligante, agua y posibles polvos minerales activos para crear un material visco-elasto-plástico complejo con características anisótropas. En la Figura 3.2, se aprecia como estos materiales se sitúan en la zona central de la matriz (zona azul), justo en medio de los materiales granulares que muestran un comportamiento elástico no lineal (dependencia del nivel de esfuerzo) y de las mezclas

en caliente, con comportamiento visco-elástico (dependencia de la temperatura y de la velocidad y frecuencia de aplicación de las cargas). Tal y como Jenkins et al. (2007) indican, estos materiales no se comportan ni como los primeros ni como los segundos, compartiendo ciertas características con ambos a la vez.

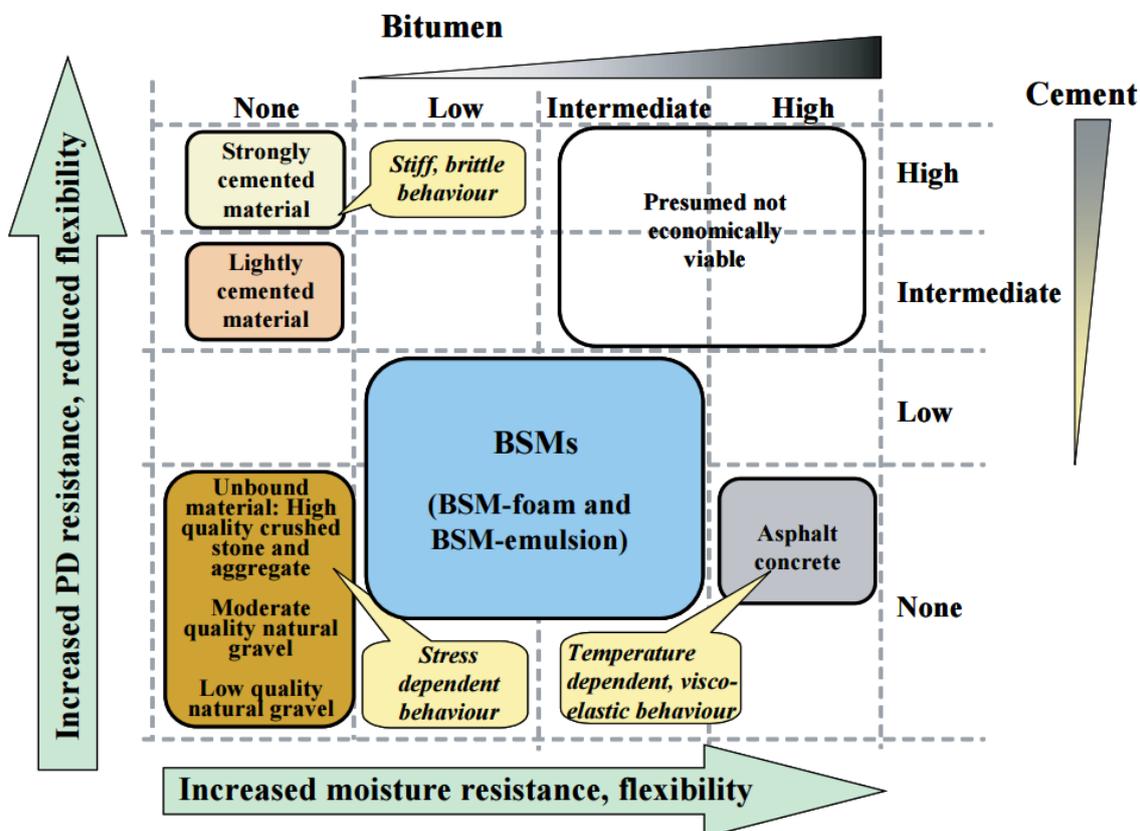


Figura 3.2 Matriz de la influencia del tipo y cantidad de ligante en el comportamiento de las diferentes mezclas (Asphalt Academy, 2009)

Por otro lado, Jenkins et al. (2007) indican que tras la fabricación y compactación de las mezclas en frío, se produce una primera fase en la que la rigidez tiende a crecer con el tiempo de maduración. Según el modelo propuesto por Ebels (2008), la fatiga solamente ocurre tras un considerable tiempo de servicio, mientras que son precisamente las deformaciones permanentes las que tienden a aparecer en esta etapa más temprana. Así, según este modelo se establece una primera fase de entre 6 y 18 meses en la que la mezcla se densifica aumentando la rigidez mientras decrece el contenido de agua, seguida de una segunda fase en la que la rigidez vuelve a decrecer (Figura 3.3). Por todo esto, y aunque como se había dicho, toda su vida van a compartir características de ambos tipos de materiales, en las etapas tempranas de maduración es

cuando estas mezclas acentúan su comportamiento elástico no lineal (asemejándose al de un material granular), mientras que en la segunda fase es cuando se acentúan más sus características visco-elasto-plásticas (más propias de las mezclas bituminosas en caliente) (Ebels, 2008; Jenkins y Yu, 2009).

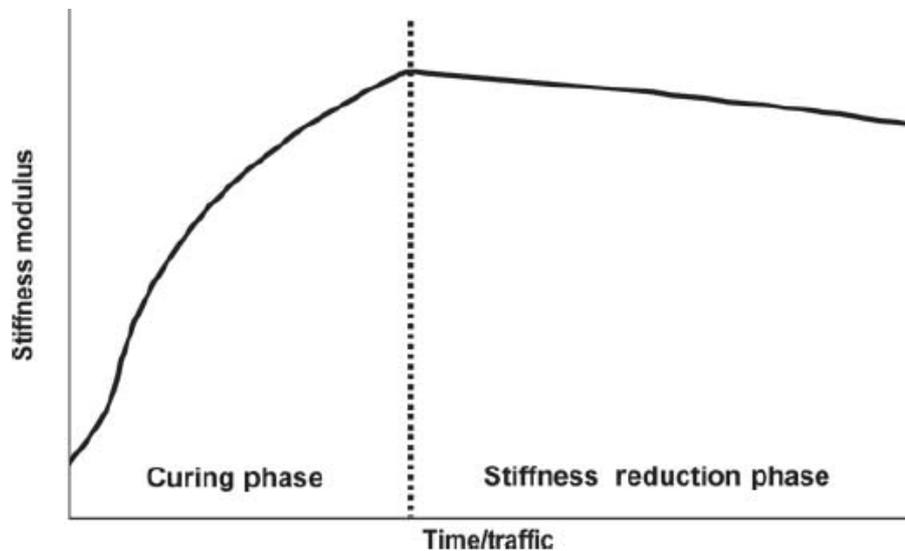


Figura 3.3 Hipótesis de comportamiento de los materiales estabilizados en frío con emulsión según Jenkins, Long, y Ebels. (A partir de Pérez et al., 2013)

Las mezclas en frío, presentan además ciertas ventajas sobre las mezclas en caliente, como una mayor flexibilidad que les permite adaptarse, sin romper, a las deformaciones permanentes de las capas inferiores, sobre todo cuando las explanadas son de mala calidad. También son almacenables, lo que les permite ser transportadas largas distancias sin necesidad de mantener una elevada temperatura que evite su prematuro endurecimiento y son más respetuosas con las condiciones de seguridad y salud de los operarios, tanto en plantas de fabricación como en obras de construcción. Recientes estudios de distintos organismos americanos han puesto de manifiesto que, fruto del manejo de mezclas bituminosas en caliente, los maquinistas de extendedoras y de tanques regadores, así como reglistas y personal que está en las inmediaciones de la obra, están sometidos a la agresión de una serie de compuestos nocivos muy superior a la que toleran las autoridades sanitarias y laborales. El empleo de emulsiones, especialmente si son de betún puro, elimina casi por completo estos riesgos. Las razones son tan evidentes que no es necesario insistir en ellas.

Sin embargo, estas mezclas también presentan también ciertos inconvenientes en comparación con las mezclas en caliente. Thanaya expuso en su tesis doctoral (Thanaya, 2003) que a grandes rasgos, los principales escollos con los que se encuentran las mezclas en frío son su alta porosidad (aún después de enérgicos procesos de compactación), su baja resistencia y rigidez a edades tempranas de vida, así como los largos períodos de curado que pueden llegar a necesitar hasta desarrollar todo su potencial.

Autores como Santagata et al. (2010) inciden también en que la rigidez en las etapas tempranas es limitada, lo que puede implicar problemas, no solo durante la construcción del firme, sino también una vez se ha abierto el tráfico. En estas etapas, pueden producirse deformaciones permanentes con efectos irreversibles en el firme desde un punto de vista estructural y de servicio. Como solución, Loizos y Papavasiliou (2006) recomiendan extender una capa de mezcla en caliente sobre la mezcla en frío antes de que se produzca el curado, aunque basándose en la experiencia de España, del Val y Rocci (1998) recomiendan esperar a que el agua se evapore completamente antes de extender otra capa encima.

Debido a estos inconvenientes, el Asphalt Institute propone una serie de limitaciones para el empleo de las mezclas en frío, las cuales se resumen del siguiente modo (Asphalt Institute, 1997):

- *Climáticas*: La construcción de firmes con mezclas frías no debe ser ejecutada con temperaturas por debajo de los 10°C (5°C según el Pliego Técnico de la ATEB, -ATEB, ref. b-) puesto que el mezclado puede llegar a ser dificultoso. Del mismo modo, puede ser necesaria una extra-manipulación para eliminar la cantidad de volátiles en condiciones de elevada humedad y baja temperatura.
- *Humedad superficial*: Aunque algunas emulsiones de rotura lenta e incluso algunas aniónicas de rotura media pueden requerir más humedad para ser mezcladas satisfactoriamente, en general con contenidos excesivos de humedad, surgen problemas a la hora de mezclar, compactar y curar las mezclas.

- *Aplicación:* Las mezclas frías pueden ser empleadas en capas superficiales, de base o sub-base siempre y cuando se diseñen adecuadamente. Son generalmente aceptables para capas de rodadura de carreteras de medio y bajo tráfico aunque algunas mezclas abiertas resultaron ser satisfactorias incluso para tráficos intensos. Para bases y sub-bases, son aceptables para cualquier nivel de servicio.
- *Control de calidad:* Se pueden obtener firmes de excelente calidad con mezclas en frío fabricadas *in situ*, siempre y cuando se preste la debida atención a asegurar la uniformidad en las cantidades de áridos, granulometrías, cantidades de ligante, etc. Dichos procesos suelen estar más controlados cuando las mezclas se realizan en planta, lo cual no exime a las ejecutadas *in situ* de poder ser igual de buenas si se realizan apropiadamente.

Estas cuestiones provocaron que se extendiese una falsa creencia de que las mezclas en frío son “peores” que las mezclas en caliente en general. Este aspecto, junto con la bonanza económica de las últimas décadas, ha propiciado que sean las mezclas en caliente las que se usen en la inmensa mayoría de las obras de carreteras, a menudo, sin una clara justificación ingenieril, marginando las mezclas en frío al uso meramente puntual en pequeñas obras y actuaciones de conservación. Así, se dan casos, hace años impensables, como el recurrir a la técnica de las mezclas en caliente para obras pequeñas de carreteras de medio/bajo tráfico con tipologías de firmes flexibles y/o alejadas de las correspondientes plantas de fabricación.

Los avances que se han realizado en los últimos años, en aspectos como los emulgentes y aditivos (emulsiones superestables), empleo de betunes modificados (mejora de susceptibilidad térmica, afinidad con los áridos, etc.), emulsiones de imprimación (alta capacidad de penetración), emulsiones termoadherentes, ecoemulsiones (fáciles de biodegradar, sin ácidos ni bases), y sistemas de fabricación, han devuelto a las mezclas y reciclados en frío a la actualidad, con una creciente popularidad entre productores y constructores (Pérez et al., 2003; Pérez et al., 2004).

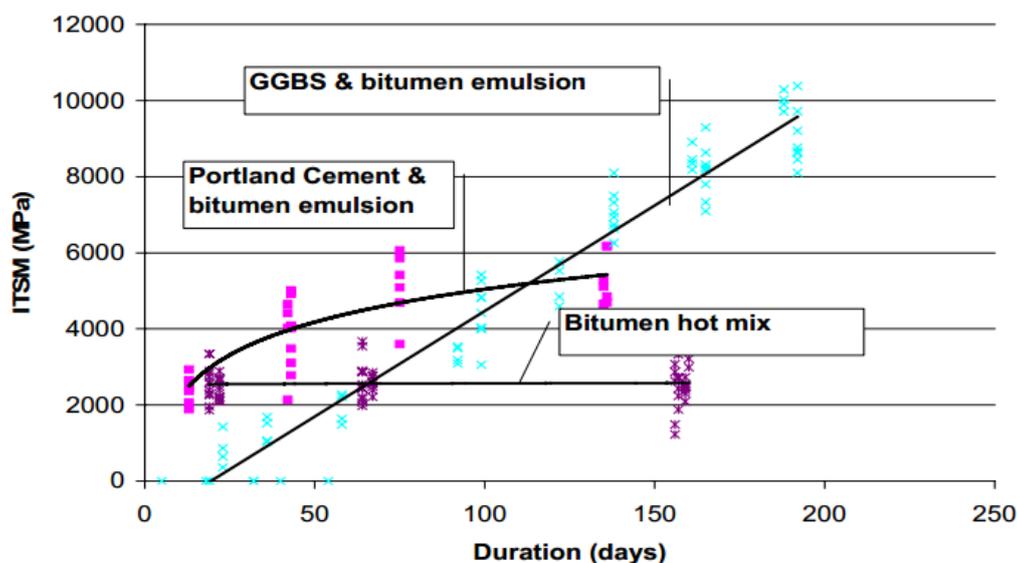


Figura 3.4 Evolución de la rigidez de muestras de mezclas bituminosas en caliente y mezclas bituminosas en frío con escorias de alto horno (GGBS) y con cemento Portland (Ellis, 2004)

También destacan los avances en el estudio de los aditivos, cuya dosificación es tan importante como la del agua y la emulsión. Por ejemplo, la adición de cemento en las mezclas bituminosas en frío fabricadas con emulsión, mejora el módulo resiliente (Needham, 1996; Oruc et al., 2007;), resistencia a la deformación permanente (Needham, 1996; Oruc et al., 2007; Thanaya, 2007; Thanaya et al., 2009), resistencia a fatiga (Needham, 1996; Thanaya, 2007; Al-Hdabi et al. (2014b)) o la sensibilidad al agua (Ishai y Nesichi, 1988; Lotman, 1982; Needham, 1996; Oruc et al., 2007). Esta mejora también se da en mezclas análogas, como los reciclados en frío con RAP, sobre los que existe una extensa bibliografía, aunque aquí solamente se expondrá a modo de ejemplo, las investigaciones de Miró et al. (2000), Yan et al. (2014) y Yan et al. (2015).

Con la sustitución del cemento por escorias granulares de alto horno, se puede introducir más cantidad debido a la lenta hidratación de éstas, lo que significa que la tendencia a fisurar térmicamente y a perder trabajabilidad queda reducida, aunque una mayor resistencia puede introducir fisuras en servicio (McKeen, 1999). Así, las escorias también ayudan a mejorar los aspectos anteriores (Issa et al., 2001; Ellis, 2004), al igual que otros como la ductilidad, cohesión en edades tempranas, tenacidad y homogeneidad de la mezcla (Figura 3.4). Otros materiales puzolánicos, como el filler calizo, las cenizas volantes y cenizas de fondo, presentan también mejoras similares a las ya citadas (Al

Nageim et al., 2012; Al-Busaltan et al. 2012a y 2012b; Al-Hdabi et al., 2013; Al-Hdabi et al., 2014a y 2014b; Guo et al., 2014; Vignali et al., 2014).

Así pues, persisten a día de hoy los esfuerzos por impulsar la tecnología en frío hasta una posición de honor en el mercado mundial y en el ámbito de la ingeniería de carreteras, que más que nunca se enfrenta a desafíos como la crisis económica y el calentamiento global.

3.2 Los residuos de construcción y demolición

3.2.1 Definición

El término Residuos de Construcción y Demolición (RCD) se usa generalmente cuando nos referimos a los residuos sólidos generados en el sector de la construcción. Más concretamente, el término se define como los residuos que surgen de las actividades de construcción, renovación y demolición, incluyendo excavaciones y demás movimientos de tierras, construcciones civiles y de edificación, trabajos de limpieza, demoliciones, obras de carreteras y restauración de edificios (Shen et al., 2004). Suelen estar compuestos por diferentes materiales como betún, cerámica, hormigón y mortero, áridos naturales, yeso e impurezas (madera, vidrio, plástico, metal, etc.) (Jiménez et al., 2011).

Existen numerosos efectos adversos relacionados con la producción de RCD, como la explotación de grandes áreas destinadas a vertederos (Poon et al., 2003), el impacto ambiental derivado sobre las zonas colindantes debido a residuos peligrosos (Esin y Cosgun, 2007) y el desperdicio de recursos naturales. Puesto que la producción de RCD es inevitable y una producción nula sería poco práctica, son numerosas las investigaciones dedicadas a su gestión en las últimas décadas. En esta línea, se han diferenciado cuatro estrategias (Figura 3.5) denominadas Reducción, Reúso, Reciclaje y Vertido (Peng et al., 1997). Los impactos relacionados con el empleo de cada una de ellas sobre el medio ambiente tienen un orden creciente de menos a más. Las tres que se enmarcan en el ámbito de estrategias de gestión sostenible de residuos sólidos son las de Reducción, Reúso, Reciclaje (conocidas como las tres erres) y son perfectamente aplicables en el sector de la construcción.

La reducción de residuos ofrece dos grandes beneficios: reducir su producción y con ello, reducir sus costes de transporte, vertido y reciclado (Poon, 2007b; Esin y Cosgun, 2007). Además es la estrategia más eficiente y sostenible desde un punto de vista económico y ambiental. Sin embargo, es prácticamente imposible conseguir una reducción total (existen tan solo algunos modelos de ciclo cerrado; Mulder, 2007) de modo que una cierta cantidad de RCD será siempre producida. En estos casos es cuando entran en práctica las estrategias de reuso y reciclaje, que permitirán reducir la cantidad vertida al medio ambiente. El reuso suele consistir en emplear el mismo material de construcción más de una vez, incluso a poder ser, para el mismo uso (por ejemplo, los encofrados de madera para obras de hormigón) (Ling y Leo, 2000). Otro tipo de reuso se da cuando un material se emplea como materia prima para un uso nuevo y diferente al original (por ejemplo, desechos de hormigón y acero empleados como material de sub-bases en carreteras) (Duran et al., 2006). Los materiales que no pueden ser reusados, pueden ser reciclados, como materias primas para nuevos tipos de materiales. Kartam et al. (2004) y Tam (2008a) identificaron los principales beneficios del reciclaje, los cuales incluían: (1) reducción de la demanda de nuevos recursos naturales; (2) reducción de los costes de producción y transporte; (3) empleo de desechos que de otro modo habría que depositar en vertederos; (4) conservación de zonas naturales para futuro desarrollo urbanístico; y (5) mejorar el estado general del medio ambiente. En última instancia, cuando ninguna de las técnicas expuestas puede ser llevada a cabo, los RCD se depositan en vertederos en los que los impactos sobre población, entorno y medio ambiente son los mínimos posibles.

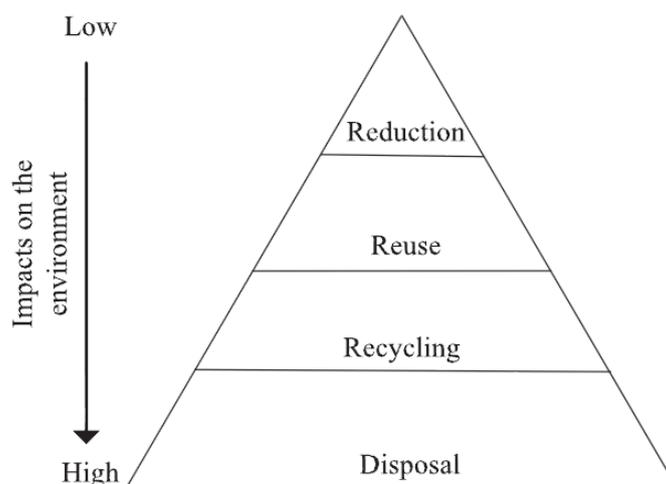


Figura 3.5 Jerarquía de las diferentes estrategias de gestión de RCD con su impacto ambiental (Fuente, Yuan y Shen, 2011)

A pesar de que estas estrategias están hoy en día bastante desarrolladas, se debe resaltar que su implementación práctica está aún lejos de ser efectiva (Lingard et al., 2000; Tam, 2008b; Osmani et al., 2006; Kofoworola y Gheewala, 2009). Osmani et al. (2006) afirmaron que la gestión de residuos no es prioritaria en los procesos de diseño. Estudios de Tam et al. (2007) y Jaillon et al. (2009) identificaron diferentes obstáculos para la aplicación de tecnologías *low-waste*, como la prefabricación en la construcción de Hong Kong. Otros estudios (por ejemplo, Kawano, 2003; Tam y Tam, 2006; Tam et al., 2009) revelaron que la escasa relación calidad/costes de los materiales reciclados sigue siendo un escollo para su aplicación en el sector de la construcción. Sin embargo, existe una presión importante para mitigar estas barreras. Tam y Tam (2006) y Hao et al. (2008) sugirieron que el esquema de carga de residuos promulgado por el gobierno de Hong Kong debería ser más extenso y Huang et al. (2002) propusieron un nuevo modelo de gestión de residuos para Taiwan, puesto que tal y como reconocían, con los actuales precios y sistemas de producción de subproductos derivados de los RCD, el mercado deja de ser rentable sin la ayuda de incentivos por parte de las Administraciones Públicas. Entre las numerosas razones que explican la baja eficacia de la gestión de RCD, una razón típica son las diferentes preocupaciones de los dos principales grupos involucrados en el proceso: por un lado las autoridades, administraciones y ONGs cuyo objetivo es minimizar los vertidos en vertedero; por otro lado, están los proyectistas, subcontratistas y clientes cuya mayor preocupación son los beneficios económicos.

En este sentido, un gran número de países europeos, Japón y diferentes agencias estatales en los Estados Unidos ya han modificado sus especificaciones para regular el empleo de los áridos reciclados en diferentes proyectos de construcción (Poon, 2007a). En España, de conformidad con la Directiva marco 2006/12/CE relativa a los residuos, el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) aprobó el Plan Nacional Integral de Residuos (PNIR) 2008-2015 (PNIR, 2009). Los objetivos fijados en el PNIR para los RCD es que el 100% de todos los materiales peligrosos contenidos en los RCD deberían ser gestionados ambientalmente de manera correcta en 2010. Asimismo, se establecía un objetivo de reciclado del 25% para 2012 y del 35% para 2015. Para otras operaciones de recuperación, incluido el relleno, el objetivo es del 15% y 20% respectivamente.

Por otra parte, en los últimos años, el gobierno español también ha publicado algunas normas sobre el uso de áridos reciclados. Una de ellas es la Orden/FOM/891/2004 del Ministerio de Obras Públicas, que modificó el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras (PG-3) a fin de permitir el uso de áridos reciclados como material granular en capas estructurales. Asimismo, en base al trabajo de investigación realizado por el Grupo GT 2/5 (ACHE, 2006), la nueva Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-2008) permite el uso de áridos reciclados gruesos para obtener hormigón estructural. Un nuevo Real Decreto (RD) regula la producción y gestión de RCD en España, que prohíbe el depósito de residuos no tratados en vertederos a fin de impulsar el reciclado y la valorización de la mayoría de los materiales que llegan a las plantas de tratamiento. Con el fin de cumplir las metas establecidas en el RD, se ha implementado en España un modelo de cuantificación de residuos (Solís Guzmán, 2007).

En definitiva, superar las mencionadas barreras y conseguir que el reciclaje sea un proceso eficiente y atractivo para todas las partes involucradas ha sido objeto de estudio en los últimos años y lo seguirá siendo en los próximos. Enmarcándose también en esta tarea, la presente tesis.

3.2.2 Situación de la producción de RCD en el mundo

Para una adecuada planificación del empleo de Residuos de Construcción y Demolición es evidentemente importante determinar, en primera instancia, la cantidad de estos que se han producido o se van a producir. Es por ello que existe un amplio número de publicaciones al respecto. Los valores que de ellas se extraen y que se repasarán a continuación difieren sensiblemente unos de otros. Esto es motivado por varias causas, como la falta de rigurosidad en algunos de los estudios, diferencia entre los poderes económicos de distintas zonas, tipo de población predominante (urbana, rural...), etc. (Martínez Lage et al., 2010).

El sector de la construcción ha crecido de forma exponencial en las últimas décadas, y con él, la producción de RCD. En Estados Unidos, se han realizado estudios que fijan valores de producción desde 136 (Sandler y Swingle, 2006) a entre 610 y 780 millones de toneladas anuales (Cochran y Townsend, 2010). Del total, se recicla entre

un 20% y un 30% (Sandler y Swingle, 2006). Además, se sabe que los RCD suponen el 23% del total de residuos sólidos generados en este país (Apotheker, 1990).

China produce el 29% del total de residuos sólidos del mundo y dentro de ello, un 40% son RCD (Dong et al., 2001; Wang et al., 2008) de los que se recicla entre un 30% y un 40%. La cantidad total de RCD se estimó según dos criterios dando diferentes resultados (Shi y Xu, 2006):

- Según la producción de cemento en 2004, se estimó una cantidad de 237,19 millones de toneladas o lo que es equivalente, 0,182 toneladas por habitante y año; según la prevista para 2010 se estimó en 239 millones de toneladas; y según la prevista para 2020, 638 millones de toneladas (lo que supone un crecimiento anual del 8%).
- Según la superficie en construcción en 2003 salen 183,26 millones de toneladas o 0,14 toneladas por habitante y año; según la estimada para 2010, 206 millones de toneladas y según la estimada para 2020, 264 millones de toneladas (tasa de crecimiento menor que en el caso anterior).

En Australia los RCD suponen entre un 16% y un 40% de los residuos sólidos totales (Bell, 1998) mientras que en Taiwan entre un 15% y un 20% (EPA, 1999) y en el Reino Unido entre un 10% y 15% DETR (2000). Solamente Hong Kong produce, cada día, 2900 toneladas (Hong Kong EPD, 2007) mientras que Irlanda con 160 kg por habitante y día (Brodersen et al., 2002) produce algo más de 700.000 toneladas diarias.

España llegó a ser el 5º país europeo en producción de residuos de construcción y demolición (del Río, 2010). La producción se estimó en el año 2006 en unos 2 kg por habitante y día (PNIR, 2009) aunque de acuerdo con el Gremio Español de Entidades de Reciclaje de Residuos de Demolición, la producción total fue de 37,5 millones de toneladas de los que se reciclan unos 15 millones, es decir, un 40%. Fuentes de la Comisión Europea (DG ENV, 2011) (Tabla 3.2) sitúan a España, con una tasa de reciclaje de los RCD del 14% (considerablemente inferior al 46% medio de la Unión Europea) solamente por delante de Italia, Portugal, Grecia, Suecia, Malta, Rumanía y

Eslovaquia, pese a ser, según la misma fuente, el 6º país de Europa que más residuos de este tipo produce (Calvo et al., 2014).

Estas cifras se reparten diferentemente entre Comunidades Autónomas. Por ejemplo, solo Madrid, produce 1200 kg por habitante y día (PNRCD, 2000), mientras que en Ceuta se producen 145 kg por habitante en todo el año (IIPNRCD, 2007). En Galicia la tasa es de 800 kg por habitante y año (Martínez Lage et al., 2010), en Castilla - La Mancha 1665 kg por habitante y año y en el País Vasco, se generan entre 1 y 1,5 toneladas anuales de las que se recicla tan solo un 20% (Urzelai et al., 2006). Finalmente, se debe mencionar también que la caída del sector de la construcción en los últimos años debido a la crisis económica, más del 50%, ha producido una reducción considerable de la producción de RCD.

Tabla 3.1 Recopilación de datos de producción de RCD en diferentes países

País	Producción RCD	% con respecto total	% Reciclado	Autor
Mundo	-	13-29	-	Bossink y Brouwers (1996)
China	-		30%-40%	Li (2008)
China	29% de residuos sólidos de todo el mundo	40%		Dong et al. (2001) Wang et al. (2008)
China	88 mill ton/año	-	-	Shi y Xu (2006)
Shanghai (China)	13,71 mill ton/año	-	-	Ding y Xiao (2014)
USA	136 mill tons/año		20-30	Sandler y Swingle (2006)
USA		23	-	Apotheker (1990)
USA	610-780 mill tons/2002	-	-	Cochran y Townsend (2010)
UK	70 mill tons/año	10-15%	-	DETR (2000)
Australia		16-40		Bell (1998)
Hong Kong	2900 tons/día	-	-	Hong Kong EPD (2007)
Taiwan		15-20	-	EPA (1999)
España	2 kg/hab/día	-	-	PNIR (2009)
España	37,5 mill ton en 2006	-	40%	GEERRD
Madrid	1200 kg/hab/día	-	-	PNRCD (2001)
Ceuta	145 kg/hab/2005	-	-	IIPNRCD (2007)
Castilla-La Mancha	1664 kg/hab/2005	-	-	IIPNRCD (2007)
Galicia	2,2 mill tons o 800 kg/hab/2011	-	-	Martínez Lage et al. (2010)
País Basco	1-1,5 ton/año	-	20	Urzelai et al. (2006)
Irlanda	160 kg/hab/día	-	-	Brodersen et al. (2002)

Tabla 3.2 Producción y Proción que se recicla de RCD en los diferentes países de Europa. Fuente: Comisión Europea (DG ENV), 2011

País	Producción de RCD (mill. ton)	Porción reciclada	País	Producción de RCD (mill. ton)	Porción reciclada
Denmark	5,27	94%	Malta	0,8	0%
Estonia	1,51	92%	Netherlands	23,9	98%
Finland	5,21	26%	Poland	38,19	28%
France	85,65	45%	Portugal	11,42	5%
Germany	72,40	86%	Romania	21,71	0%
Greece	11,04	5%	Slovakia	5,38	0%
Hungry	10,12	16%	Slovenia	2,00	53%
Ireland	2,54	80%	Spain	31,34	14%
Italy	46,31	0%	Sweden	10,23	0%
Letonia	2,32	46%	UK	99,10	75%
Lithuania	3,45	60%	EU-27	531,38	46%
Luxembourg	0,67	46%			

3.3 Utilización de los RCD como áridos en mezclas bituminosas

3.3.1 Introducción

Sustituyendo los áridos naturales de una determinada mezcla bituminosa, por áridos reciclados como los RCD, se puede llegar a mejorar considerablemente su sostenibilidad. Por ejemplo, Mroueh et al. (2001), analizaron diferentes parámetros, como el consumo de materiales naturales y energía o las emisiones de CO₂ empleando diferentes subproductos para un km dado de carretera construida según una sección tipo (Figura 3.6). Como se puede apreciar, los RCD configuran la mezcla de menor consumo energético y menores emisiones de CO₂, aunque la mayor reducción de materias primas naturales se consigue con las escorias de alto horno, siendo estos los materiales que menor carga ambiental producen.

Sin embargo, cuando estos residuos se incorporan a las mezclas bituminosas, sus distintas propiedades pueden verse afectadas, dejando de ser aptas para carreteras de uso general. A continuación se resumen las observaciones de otros autores sobre las propiedades particulares de los propios RCD como áridos, así como las propiedades de las mezclas bituminosas en las que se ha realizado una sustitución del árido natural por RCD.

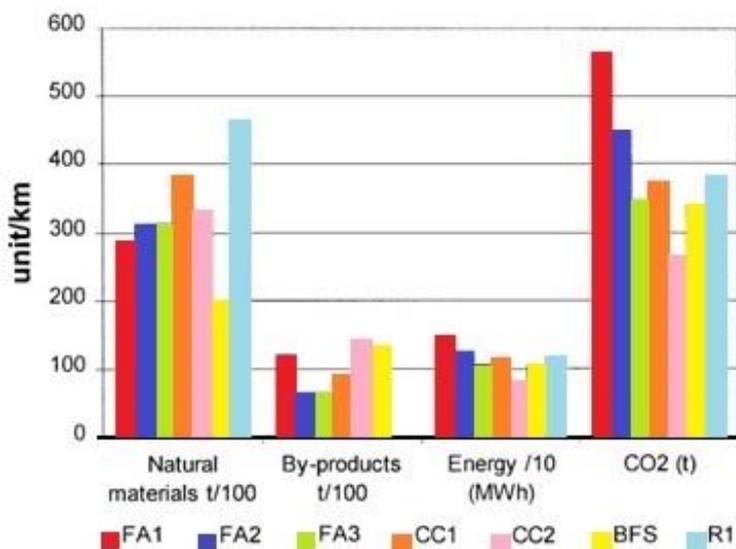


Figura 3.6 Comparativa del consumo de materiales, consumo de energía y emisión de CO₂ de mezclas con diferentes tipos de subproductos: FA1, FA2 y FA3 con diferentes configuraciones de mezclas con cenizas volantes; CC1 y CC2 son diferentes configuraciones de mezclas con hormigón reciclado; BFS es una mezcla con escoria de alto horno y R1 es la mezcla de control con 100% de árido natural (A partir de Mroueh et al., 2001)

3.3.2 Propiedades de los RCD como áridos

Como se ha visto, los residuos de construcción y demolición están compuestos por materiales muy diferentes, pudiendo contener asfalto, cerámicos, hormigón y mortero, áridos naturales, yeso e impurezas (madera, vidrio, plástico, metal) (Jiménez et al., 2011). Las proporciones en las que cada material aparece en diferentes muestras de RCD son muy variadas y por tanto, las propiedades que les confieren al producto final, también. No obstante, existen tendencias que en general siguen las propiedades generales de todos los RCD (densidades, absorción de agua, porosidad, etc.).

3.3.2.1 Propiedades volumétricas

Según Poon y Chan (2006) en general (según Norma BS 812 Parte 2), los áridos naturales tienen densidades ligeramente mayores que los áridos reciclados de hormigón y estos, a su vez, mayores que los de ladrillo. En cambio, los de ladrillo muestran las mayores absorciones de agua, seguidos por el hormigón reciclado y los áridos naturales.

Estos autores explican el doble fenómeno en base a la gran cantidad de mortero adherido al ladrillo, que cuenta con una baja densidad pero elevada absorción de agua.

Según Gómez-Soberón (2002), la porosidad total es la variable que muestra la mayor diferencia entre el árido reciclado y el natural. En los casos observados, dicho parámetro alcanza un máximo del 2,82% para los áridos naturales y un 14,86% para los reciclados. Al igual que el caso anterior, la densidad de los áridos reciclados es entre un 9% y un 14% menor que la de los naturales de referencia.

Estas tendencias fueron también respaldadas por otras investigaciones, como Huang et al. (2002), Li (2004), Shen y Du (2005), Parnavithana y Mohajerani (2006), Poon y Chan (2006), Pérez et al. (2007), Melbouci (2009), Mills-Beale y You (2010) o Gokce et al. (2011), así como Tam et al. (2008), quienes desarrollaron un método propio para medir la absorción de los áridos reciclados de un modo más preciso que los métodos convencionales.

3.3.2.2 Inestabilidad granulométrica

Durante las sollicitaciones típicas de la vida útil de un firme (cargas estáticas, cargas cíclicas, cargas térmicas, cargas de fricción, etc.), las partes más débiles tienden a desprenderse y fragmentarse. Este fenómeno provoca cambios casi impredecibles en la granulometría, afectando sensiblemente a la evolución de ciertas propiedades mecánicas (Jiménez et al., 2011).

La granulometría de los áridos reciclados tiende a verse modificada también durante los procesos de compactación y durante la realización de los propios ensayos de laboratorio. Por ejemplo, Melbouci (2009) apreció que en sus ensayos a cortante sobre muestras de áridos de hormigón reciclado, los granos se rompían incrementando la cantidad de finos y disminuyendo la cantidad de gruesos. Esto ocurría incluso ante niveles de sollicitación medios e incluso bajos. Como es lógico, en esta situación, la porosidad se reduce y los granos pierden rugosidad y angulosidad favoreciendo el movimiento de las partículas y por tanto aumentando las deformaciones.

Además, la granulometría puede comenzar a fragmentarse también en operaciones previas, como durante el mezclado (sobre todo en caliente) en donde la elevada temperatura y fricción propicia la aparición del citado fenómeno. En este caso, destaca el trabajo de Kong et al. (2010) sobre mezclas bituminosas en caliente con un betún de penetración grado 70 y un árido reciclado de hormigón cuya resistencia a compresión estaba comprendida entre los 30 y 40 MPa. Para comprobar los cambios en la granulometría, las muestras se sometieron a un proceso de calentamiento y mezclado a 140°C durante 5 minutos para luego enfriarlas y volver a obtener su granulometría. Se observó como el porcentaje de material que pasa en cada tamiz aumenta, haciéndolo además, en mayor medida cuanto menor es el tamaño. Según los autores, durante el calentamiento, la pasta de cemento se vuelve frágil debido a su deshidratación y durante el mezclado, estas partículas rozan y chocan entre sí, rompiéndose y separándose de los áridos, lo cual se traduce en un incremento de los finos en detrimento de los gruesos. Así, los investigadores sugieren que para cumplir las especificaciones o para obtener la granulometría óptima de diseño con la que se desee trabajar, los porcentajes de paso de cada fracción granulométrica deberían ser ligeramente inferiores antes del calentamiento y amasada.

Como conclusión, y dado que el empleo de mezclas bituminosas en frío evita el calentamiento de los áridos, ayudaría a evitar que la granulometría se vea afectada a los niveles que ocurre con mezclas en caliente.

3.3.2.3 Forma de las partículas

En general, es siempre deseable que las partículas que conforman el árido presenten pocas lascas y muchas caras de fractura, para mejorar el rozamiento interno y evitar que se rompan ante las sollicitaciones del tráfico.

Debido a que estos áridos se obtienen por machaqueo, los áridos de RCD suelen contener elevados contenidos de caras de fractura, resultando en un gran porcentaje de granos angulosos (Adams, 2012).

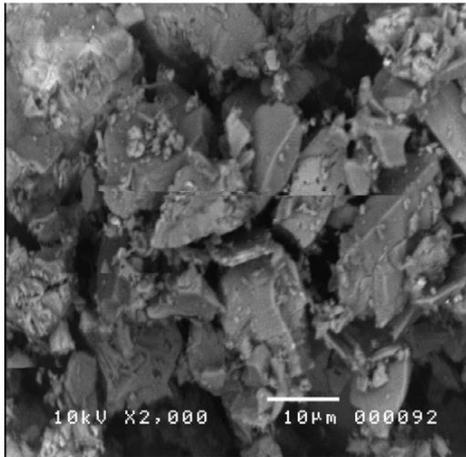


Figura 3.7 Imagen microscópica filler de granito

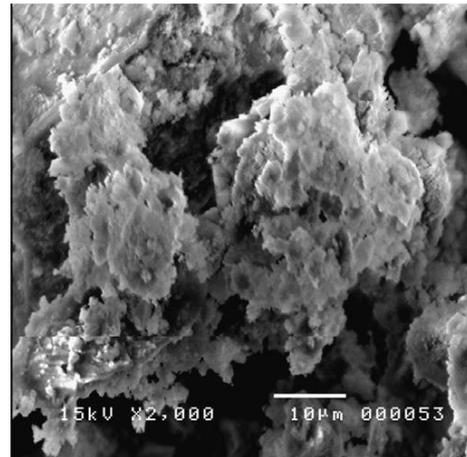


Figura 3.8 Imagen microscópica filler de hormigón tratado térmicamente

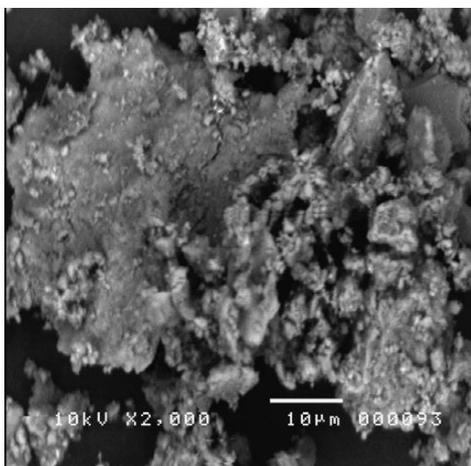


Figura 3.9 Imagen microscópica filler de hormigón sin tratar

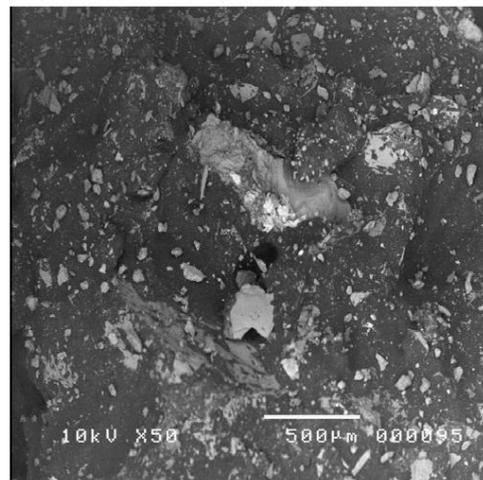


Figura 3.10 Imagen microscópica del filler granítico en matriz bituminosa

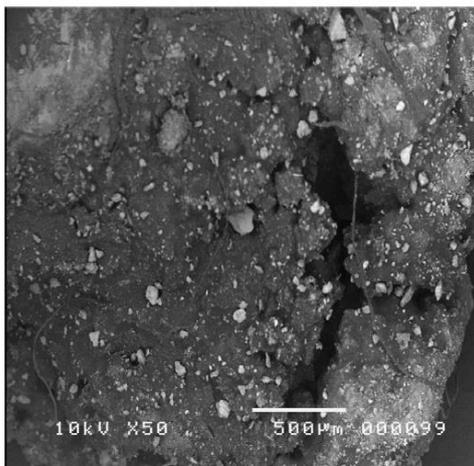


Figura 3.11 Imagen microscópica del filler de hormigón sin tratar en matriz bituminosa

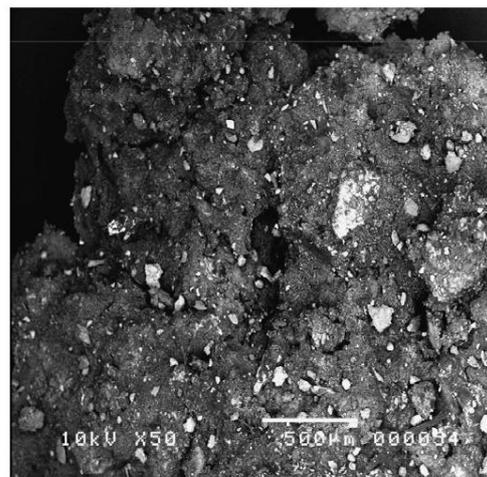


Figura 3.12 Imagen microscópica del filler de hormigón tratado en la matriz microscópica

Al mismo tiempo, aunque la forma depende del método de machaqueo empleado, el hormigón tiende a romper con forma cúbica, por lo que en general estos áridos no suelen presentar elevados índices de lajas (GERD, 2010), siendo incluso menores en general que los presentados por áridos naturales (CEDEX, 2010).

De este modo, se encontraron diversas publicaciones en las que ambos parámetros cumplen los requisitos exigidos por las pertinentes normativas (Pérez et al., 2007, 2010, 2012; Mills-Beale y You, 2010; Jiménez et al., 2011).

3.3.2.4 Textura

Al margen de que los áridos reciclados tengan menor resistencia a la fragmentación, su textura e irregularidades suele ser mayor que la de los áridos naturales, debido a la presencia de mortero adherido (Shen y Du, 2005). De este modo, lograrán un mayor rozamiento interno aunque una mayor dificultad a la hora de conseguir una buena envuelta con ligante.

El microscopio electrónico permite obtener imágenes de la superficie de las partículas de los áridos, del ligante así como de sus uniones a diferentes contenidos de betún. Esta técnica es aún más interesante si cabe, cuando se estudia las mezclas con áridos reciclados, ya que permite ver en detalle cómo es la interacción de las partículas finas de ambos áridos (natural y reciclado) con la matriz bituminosa. Mediante un análisis morfológico (Figura 3.7 - Figura 3.12), se ha comprobado que el filler granítico muestra ángulos afilados mientras que los de hormigón aparecen aplanados y agrupados en una estructura. Esto propicia que los granos de hormigón (más friables) rompan antes que el árido pétreo en operaciones como las de compactación, creando fillers que rellenan los huecos y dan integridad a la mezcla (Wong et al., 2007).

Wong et al. (2007) emplearon dos tipos de hormigón, uno tratado térmicamente, con el objeto de convertir parte del carbonato cálcico constituyente (calcita) en cal libre (óxido de calcio), y el otro sin tratar. El hormigón tratado, presenta una estructura menos aplanada y más porosa, lo que explica que las mezclas que lo incorporan sean más flexibles, tengan menor módulo resiliente y un contenido de betún óptimo (según

ensayo Marshall) mayor. Al mismo tiempo, una estructura con más huecos rellenos de ligante resulta ser más elástica y por tanto, comportarse mejor ante las deformaciones permanentes observadas en el ensayo de deformación permanente.

Además, se aprecia más superficie visible de áridos de hormigón que de granito dentro de la matriz bituminosa, lo que sugiere que la unión del granito con el ligante es mejor que la del hormigón (Wong et al., 2007).

Se debe mencionar que exactamente las mismas conclusiones y explicaciones fueron obtenidas para otros materiales porosos como el filler procedente del polvo de ladrillo, de morfología similar al filler de hormigón (Chen et al., 2011a) (Figura 3.13 y Figura 3.14).

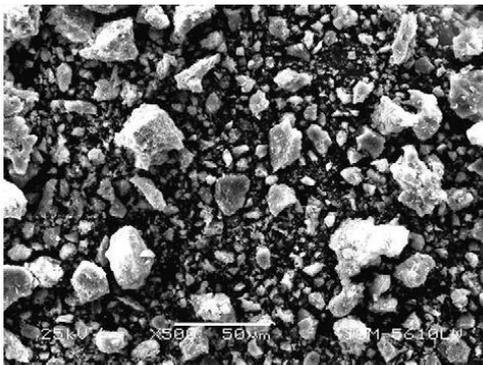


Figura 3.13 Imagen microscópica del filler de ladrillo

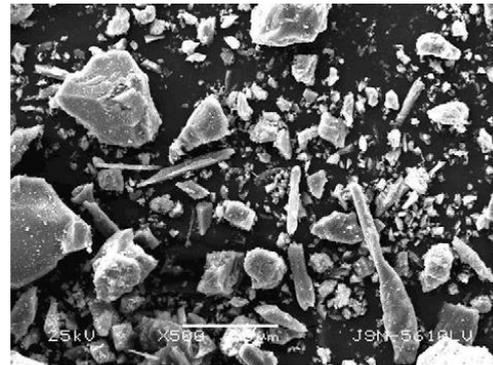


Figura 3.14 Imagen microscópica del filler de caliza

3.3.2.5 Composición

Los áridos reciclados procedentes de RCD suelen estar en su mayoría compuestos por hormigón y mortero. Por ejemplo, en las investigaciones de Jiménez et al. (2011) se analizaron 3 muestras diferentes de RCD y en todas ellas, este tipo de material constituía entre un 71% y un 76%. El resto suele estar constituido principalmente por áridos sin mortero adherido (en este caso entre un 20% y un 25%) o materiales cerámicos, como restos de ladrillo y azulejo (entre 1% y 3,5%). Finalmente, las impurezas de yeso, madera, vidrio, etc. suelen representar contenidos menores al 1%, aunque pueden modificar sensiblemente el comportamiento de la mezcla.

Por otra parte, el contenido de mortero tiende a aumentar cuanto menor es la fracción granulométrica, debido a que es un material menos resistente a la fragmentación. Según Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez (2009), el contenido de mortero puede oscilar entre un 25% y un 70% según la fracción estudiada sea más o menos gruesa. Además, este contenido también depende del proceso de machaqueo empleado y de las características del hormigón original del que provienen los residuos, como el tipo de árido natural que tenía o la dosificación del hormigón (MDOT, 2011).

Pese a su pequeña presencia en la composición total, Vegas et al. (2008) identificaron que el contenido de compuestos de azufre totales puede llegar a ser una propiedad crítica de los áridos reciclados, que según el PG-3 no debe ser, en general, superior al 1%. En este tipo de áridos, se producen con cierta frecuencia contenidos excesivos, debido fundamentalmente a una mayor presencia de yeso (Jiménez et al., 2011).

La tecnología de Rayos-X se ha hecho muy popular en los últimos años debido a que permite, mediante diferentes variaciones, determinar propiedades de áridos y mezclas bituminosas de forma no invasiva ni destructiva. Así, por ejemplo, la espectrometría de fluorescencia de Rayos X permite determinar la composición elemental de los granos de un árido mientras que la técnica de difracción de Rayos X se emplea para medir la composición de una fase dentro de una mezcla.

En esta línea de investigación, destacan los trabajos de Wong et al. (2007) sobre las mezclas bituminosas con hormigón reciclado (tratado y sin tratar térmicamente). Para diferentes granulometrías obtenidas (diferentes niveles de machaqueo), se pudo apreciar claramente que las fases mayormente presentes en ambos hormigones eran el cuarzo (SiO_2), la calcita (CaCO_3) y la portlandita (Ca(OH)_2) lo que demostró que los procesos mecánicos no cambiaban la mineralogía de los áridos. No obstante, sí se encontraron diferencias entre el hormigón tratado y sin tratar (Figura 3.15), en donde los picos de calcita sobre los 23° y $29,5^\circ$ así como los de los 47° y 48° desaparecen con el tratamiento térmico, mientras que por otro lado, aparecen picos de cal libre en los $32,2^\circ$ y $37,3^\circ$. Esto resultó ser una ventaja, puesto que la presencia de cal hidratada aumenta los años de vida de las mezclas, reduciendo la sensibilidad al agua y el envejecimiento

por oxidación. Además, el polvo de cal mejora la resistencia a las deformaciones a altas temperaturas y añade rigidez a bajas temperaturas (NLA, 2006).

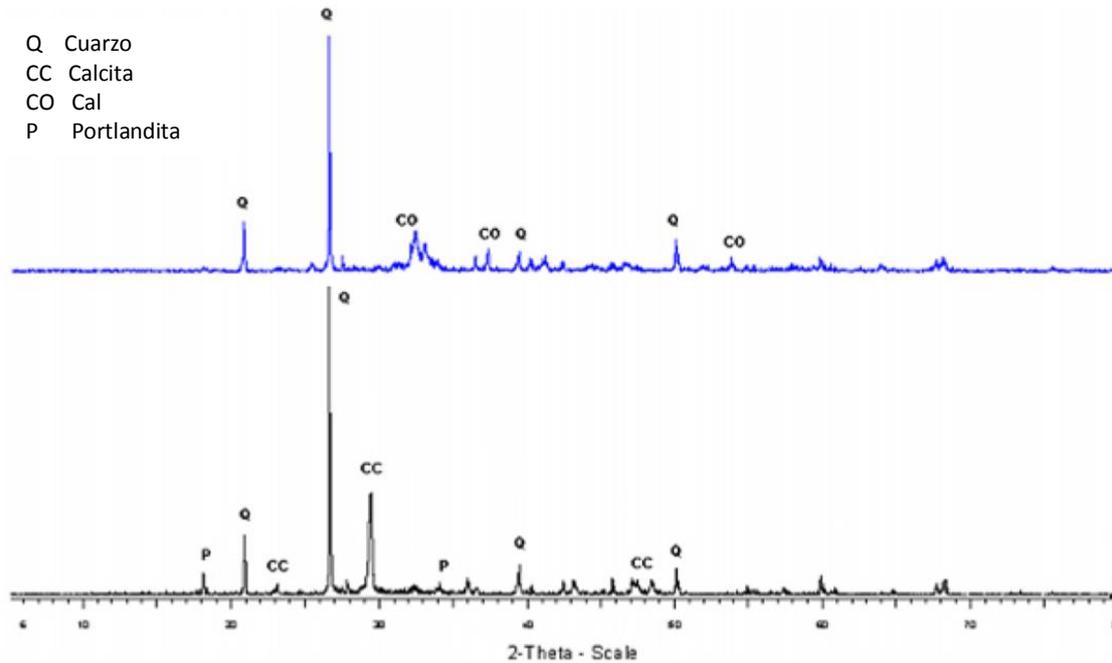


Figura 3.15 Patrones de difracción de Rayos X para el hormigón tratado térmicamente (arriba) y sin tratar (abajo) (Wong et al., 2007)

3.3.2.6 Limpieza de los finos

Los finos arcillosos afectan a la resistencia y durabilidad, comprometiendo la adherencia del árido con el ligante e incluso presentando fenómenos expansivos y pérdidas de rozamiento interno en presencia de agua.

Para evaluar la limpieza de los finos o la no presencia de finos plásticos, se emplea habitualmente el equivalente de arena. Dicho parámetro suele ser bastante bajo en el caso de áridos reciclados de RCD puesto que precisamente las fracciones más finas suelen estar compuestas por restos de hormigón (GERD, 2010). Así, los resultados publicados por otros autores suelen cumplir ampliamente las especificaciones técnicas pertinentes (Jiménez et al., 2011; Pérez et al., 2007 y 2012).

3.3.2.7 Resistencia a la fragmentación

Melbouci (2009) obtuvo para muestras de hormigón reciclado procedente de machaqueo valores de 31 en el ensayo de Los Angeles y de 34 en el Micro-Deval. Con un material análogo, Zaharieva et al. (2003) obtuvieron para un material similar, coeficientes de Los Angeles en un rango de entre 27 y 35. Huang et al. (2002) obtuvieron un valor de 28,6 para RCD de una planta taiwanesa; y Vegas et al. (2008) obtuvieron un valor de 37, también para hormigón reciclado. Como estos últimos indican, estos valores elevados, se relacionan directamente con la naturaleza de materiales contenidos en la mezcla, como cerámicos o vidrios. Estos materiales se rompen formando escamas que presentan un comportamiento frágil. Algunas publicaciones (ALT-MAT European Project, 2000) mencionan que los resultados de los ensayos de Los Angeles deben ser interpretados siempre con precaución cuando se realizan sobre materiales secundarios aunque como reportan los propios Vegas et al. (2008) no encontraron ningún tipo de incongruencia en sus resultados. Existe más literatura al respecto, con coeficientes de Los Angeles obtenidos de 32,9 y 43,6 (Park, 2003), 33,5 (Etxeberria, 2007), 40,8 (Shen y Du, 2005), 43 (Mills-Beale y You (2010) y 39,65 (Pérez et al., 2007), destacando el excelente valor de 11,15 obtenido por los investigadores Rubio et al. (2011) para residuos de piedra decorativa Silestone®. Destacan también los trabajos de Jiménez et al. (2011) en los que se hallaron los coeficientes de Los Angeles de 7 muestras de RCD comparándolas con el de una muestra patrón de árido natural consistente en una zahorra artificial caliza. Aunque ninguna muestra de material reciclado alcanzó valores tan buenos como el árido natural, sí se puede afirmar que mientras altos contenidos de hormigón producen resultados bastante aceptables, otros como los materiales asfálticos y cerámicos tienden a empeorarlos.

3.3.2.8 Otras propiedades de interés

Finalmente, mencionar los áridos de hormigón presentan algunas particularidades que los hacen todavía más diferentes de los áridos naturales. Por ejemplo, debido fundamentalmente a la presencia de cemento no hidratado en el mortero adherido, presentan unas propiedades autocementantes que provocan

crecimientos de resistencia con el paso del tiempo, así como bases granulares muy resistentes (Arm, 2001; Poon y Chan, 2006; FHWA, 2004).

Además, la disolución alcalina de los poros del hormigón con los minerales silíceos que forman parte de la composición de algunos áridos, puede dar lugar, en presencia de agua, a la aparición de reacciones de tipo álcali-sílice (ASR), apareciendo un gel que aumenta de volumen (Segarra, 2005). Aunque según algunos autores, éste no es un problema preocupante a la hora de diseñar mezclas bituminosas (MDOT, 2011), otros como Mills-Beale y You cuestionan su viabilidad. Geiger (2010) propone limitar el uso de fracciones finas, polvo mineral y agentes activantes de la adhesividad, así como su uso en pistas aeroportuarias en las que el árido microfisurado a causa de la ASR, pueda recibir fuertes impactos.

3.3.3 Propiedades de las mezclas bituminosas con áridos de RCD

3.3.3.1 Propiedades volumétricas y contenido de ligante

Las propiedades volumétricas de las mezclas con áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición, tales como la densidad, el contenido de huecos en mezcla o huecos en aire (V_m), huecos en árido mineral (VMA) y huecos rellenos de ligante (VFB) están totalmente condicionadas por el tipo de árido empleado, lo cual afecta, a su vez, al comportamiento mecánico de las mismas (Mallick y El-Korchi, 2009) (Figura 3.16).

En general, los áridos reciclados de RCD son más porosos que los naturales y además producen grandes absorciones de ligante hacia el interior de los granos, conduciendo a reducciones en los espesores de película que envuelven el árido. Por ello, con la incorporación de estos a las mezclas bituminosas, el volumen de huecos rellenos de aire aumenta, mientras que el de huecos rellenos de betún y el de espacios intergranulares (VMA), tienden a decrecer (Paranavithana y Mohajerani, 2006; Pérez et al., 2010; Shen y Du, 2005; Wong et al., 2007).

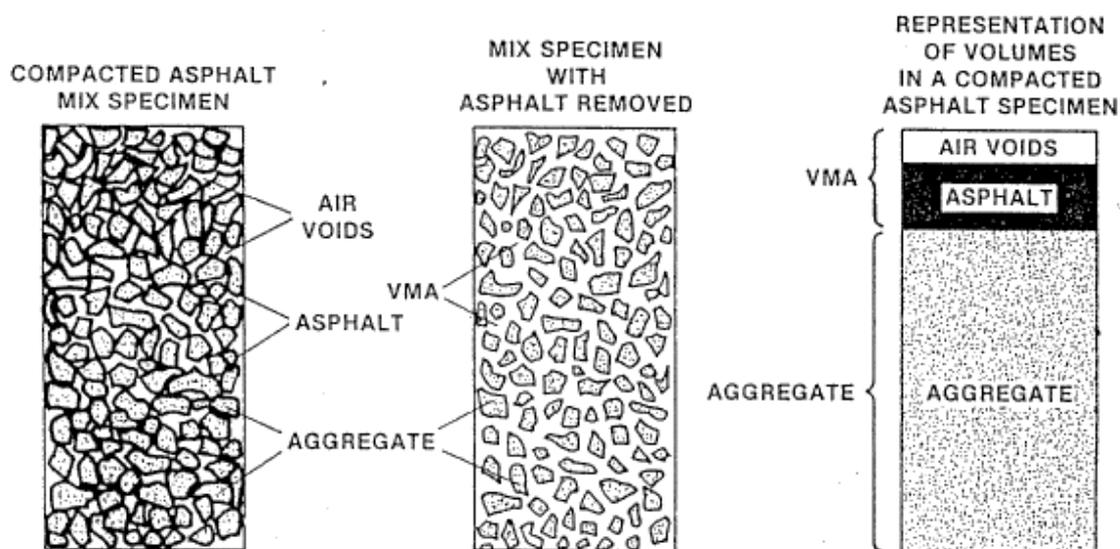


Figura 3.16 Componentes de una mezcla bituminosa. (Asphalt Institute, 2007)

Dado que los contenidos excesivos de huecos de aire provocan un efecto negativo sobre la durabilidad de las mezclas, se tiende a suponer que para que ésta mejore, el contenido de huecos en mezcla debe ser mínimo. Así, aunque es cierto que contenidos altos aceleran los procesos de envejecimiento (Khandal y Chakraborty, 1996) y que contenidos superiores al 6% en mezclas en caliente producen una mayor susceptibilidad a fallar por fatiga (Murali Krishnan y Rajagopal, 2004), también es cierto que un cierto contenido mínimo puede ser beneficioso para algunos usos. Por ejemplo, según estos últimos autores, un contenido mínimo del 3% de huecos en mezcla ayuda a prevenir la aparición de roderas.

Los huecos en el árido mineral también suponen ciertas ventajas, como dotar a las mezclas de mayor flexibilidad y resistencia a la fisuración a bajas temperaturas, así como de un mayor espacio que facilite la expansión del betún y permita una cierta post compactación debida al tráfico durante la vida de servicio (Pennsylvania Department of Transportation, 2003).

Valores bajos de densidad de la mezcla compactada suelen estar asociados a bajas calidades de los áridos, lo que puede acarrear pobres comportamientos una vez formen parte de un determinado firme. No obstante, la adición de materiales reciclados a las mezclas bituminosas conduce también, por norma general, a densidades

ligeramente inferiores sin que necesariamente éstas sean de peor calidad. Según Poon y Chan (2006) en general, los áridos naturales tienen densidades ligeramente mayores que los áridos reciclados de hormigón y estos, a su vez, mayores que los de ladrillo. Gómez-Soberón (2002) estableció que la densidad de los áridos reciclados es entre un 9% y un 14% menor que la de los naturales de referencia. Li (2004) también dejó constancia de la gran importancia del mortero adherido en los áridos reciclados de hormigón, atribuyéndole a éste, la culpa de muchas diferencias de comportamiento entre áridos naturales y reciclados. Así, por ejemplo, las densidades aparentes del árido reciclado resultaron de entre 1290 y 1470 kg/m³ y las densidades SSD (Saturated Surface Dry Basis) de entre 2310 y 2620 kg/m³, situándose así a medio camino entre las densidades típicas de un árido de roca natural y de un árido ligero. Además se han encontrado numerosas publicaciones adicionales como Huang et al. (2002), Paravithana y Mohajerani (2006), Pérez et al. (2007), Melbouci (2009), Mills-Beale y You (2010) y Gokce et al. (2011) que coinciden en esta misma tendencia.

Por otro lado, los áridos reciclados suelen ser también, además de ligeros, muy absorbentes, fundamentalmente debido a la presencia de altas cantidades de materiales como el mortero de cemento, ladrillo e incluso partículas de madera. Si una absorción normal suele ser menor de un 1,5% en el caso de áridos naturales de cantera, autores como los antes citados encontraron valores de 10,3% y 30,9% en áridos finos de hormigón y ladrillo respectivamente (Poon y Chan, 2006); entre 4% y 9,5% según Li (2004); de hasta un 8,8% (Shen y Du, 2005); de un 8,16% (Gómez-Soberón, 2002), etc. Dicho fenómeno deberá ser tenido en especial consideración cuando se trabaje con mezclas que requieran la adición de importantes cantidades de agua o más bien, aquellas que requieran una precisa dosificación de la misma, como es el caso de las mezclas bituminosas en frío realizadas con emulsión (grava-emulsión, lechadas, etc.).

Esta elevada absorción repercute también en la necesidad de mayores contenidos de ligante. Por ejemplo, en las investigaciones de Akbulut y Güner (2007) se realizó el ensayo Marshall a mezclas con áridos de mármol, andesita y dos tipos diferentes de caliza. Todas las muestras dieron unos contenidos óptimos alrededor del 4,5%, a excepción de la andesita, que produjo un contenido óptimo de 8,10%, es decir, de casi el doble. Este efecto fue directamente achacado a la elevada porosidad del árido.

Debido a la elevada porosidad que presenta en general el hormigón reciclado y a partir de los datos que se acaban de exponer, es lógico que Wong et al. (2007) encontraran un mayor contenido óptimo (en mezclas en caliente) conforme iba aumentando la sustitución de árido natural por el procedente de residuos de construcción y demolición. En este caso, los contenidos óptimos llegaron al 7% pese a que todos los parámetros Marshall se mantuvieron dentro de los límites aceptables, a excepción de un par de mezclas que dieron valores inferiores para el porcentaje de huecos rellenos con ligante. Por su parte, Paranavithana y Mohajerani (2006) y Pérez et al. (2010), confirmaron la tendencia en mezclas en caliente, aunque según los últimos, la variación del contenido óptimo en las mezclas con áridos procedentes de RCD y mezclas con 100% de árido natural fue para todos los casos inferior al 1%.

Autores como Thanaya (2010) publicaron sobre mezclas en frío con áridos reciclados de hormigón y ladrillo, apreciando que estos mostraban un peso específico menor de lo esperado y un porcentaje de abrasión más que satisfactorio ($29,78\% < 40\%$) por lo que para que alcanzaran el nivel de huecos deseado (5%-10%) fue necesaria una compactación con martillo Marshall muy enérgica (de 300 golpes).

Además de lo visto, se sabe también que el porcentaje de huecos desciende a medida que se aumenta el contenido de ligante y el nivel de compactación, mientras que aumenta con la cantidad de hormigón reciclado, debido fundamentalmente a la elevada porosidad del mortero adherido a los áridos.

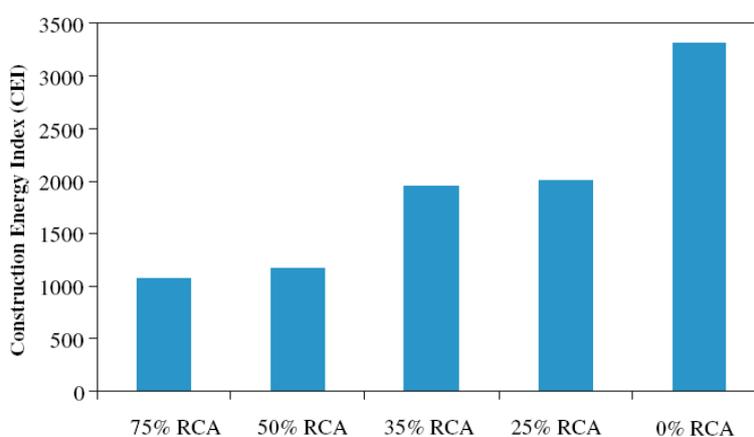


Figura 3.17 Resultados del Construction Energy Index para diferentes porcentajes de sustitución del árido reciclado (Mills-Beale y You, 2010)

Finalmente, también se ha determinado que la energía de compactación necesaria (estimada mediante el Construction Energy Index según la teoría de Mahmoud y Bahia, 2004) es menor cuanto mayor es la cantidad de hormigón reciclado en la tal y como se muestra en la Figura 3.17 mezcla (Mills-Beale y You, 2010). Esto se traduce en ahorros a la hora de compactar la mezcla en obra.

3.3.3.2 Sensibilidad al agua

El *stripping* es un fenómeno por medio del cual disminuye la adherencia entre el ligante y el árido provocando fisuras y facilitando la aparición de deformaciones permanentes, normalmente bajo las sollicitaciones del tráfico y con presencia de humedad en el interior de la mezcla. Suele empezar en las zonas bajas de los firmes e ir evolucionando hacia la superficie lo cual lo convierte en un fenómeno difícilmente detectable a simple vista hasta que los daños causados son demasiado evidentes y nocivos. Es por ello, que se estudia en laboratorio la sensibilidad potencial de las mezclas a la presencia de agua (CTRE, 2005).

Existen numerosos factores que potencian su aparición, como el tipo y uso de la mezcla bituminosa, características tanto de las mezclas como de los áridos, factores medioambientales durante y después de la puesta en obra, el uso o no de aditivos anti-stripping, etc. Dichas causas desencadenan uno de los dos tipos de mecanismos de rotura que se han estudiado hasta el momento: el fallo en la adhesión árido-ligante (fallo de adherencia) y/o el fallo de cohesión entre las partículas del propio ligante (fallo de cohesión). De los dos mecanismos, el más ampliamente aceptado es el primero y años atrás muchos autores llegaron a considerarlo como el único que realmente provocaba este fenómeno (Kennedy, 1982; Majidzadeh, 1968; Tunicliff, 1982).

En los últimos años se ha avanzado por varios frentes en el estudio de la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados. No obstante, la enorme heterogeneidad de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición provoca que diversos autores hayan encontrado resultados sensiblemente dispares, aunque la tendencia general es de un aumento de la sensibilidad al agua.

Así, por ejemplo, según Mills-Meale y You (2010) la susceptibilidad al agua aumenta a medida que aumenta el contenido de árido reciclado en la mezcla, llegando a niveles inaceptables a partir del 75% de sustitución de árido reciclado de hormigón. Esta misma tendencia fue confirmada por Paravithana y Mohajerani (2006) y Pérez et al. (2010a), en donde algunas mezclas estudiadas, como las gruesas con un 50% de RCD obtuvieron valores de resistencia conservada del 50%, muy por debajo del 75% fijado como mínimo en la mayoría de Normas. En esta investigación, se señala además, que los huecos no crecen excesivamente con la incorporación de áridos reciclados por lo que el fallo no es debido a una mayor entrada de agua al interior. Los malos resultados, por tanto, pueden ser achacados a la propia naturaleza del árido reciclado, el cual contiene mortero adherido que favorecería la retención de agua en el interior de la mezcla, desplazando el betún de la superficie de los granos.

Shen y Du (2005), por su parte, obtuvieron en sus investigaciones que la sustitución de árido natural por RCD hacía aumentar la sensibilidad al agua con respecto a las mezclas con 100% de árido natural. No obstante, en este caso, los descensos no fueron tan pronunciados, obteniéndose un resultado mínimo de resistencia conservada del 87,71% para mezclas con un 100% de árido reciclado. Además, en mezclas con una sustitución solamente de las fracciones gruesas se dieron reducciones muy pequeñas, del orden de un 1% con respecto a la mezcla de referencia.

También Pérez et al. (2012) concluyeron tras estudiar mezclas en caliente con porcentajes de sustitución de árido reciclado del 0%, 20%, 40% y 60%, y tanto con filler de cemento como filler de cal, que en general, dichas mezclas mostraban una elevada sensibilidad al agua, cumpliéndose los límites establecidos por la Norma española PG-3 en solamente 2 de los 8 casos estudiados. También Pérez et al. (2010b) comprobaron caídas en la resistencia conservada con la adición de áridos reciclados, achacados posiblemente a una pobre adhesión entre dichos áridos y ligante.

Existen también investigaciones sobre tipos de RCD que llegan a mejorar algunas propiedades relacionadas con la sensibilidad al agua. Es el caso, por ejemplo, de los residuos de piedra decorativa Silestone® (Rubio et al., 2011) o el polvo de ladrillo, con el que mejora la sensibilidad a ciclos de hielo y deshielo (Chen et al., 2011a).

Finalmente, mencionar que la sensibilidad al agua se puede mejorar también en base a pretratamientos sobre las mezclas. Uno de ellos, consiste en dejar la mezcla suelta durante 4 h en estufa a temperatura de mezclado antes de ser compactada, con lo que Pasandín y Pérez (2013) obtuvieron valores de resistencia a tracción indirecta conservada realmente buenos, por encima del 90%. Pasandín y Pérez (2014c) realizaron también un recubrimiento previo del los RCD con un 5% emulsión bituminosa, con lo que también consiguieron superar, en general, la condición mínima del 80% de resistencia conservada requerida por el PG-3.

3.3.3.3 Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta es un parámetro fácil de medir así como representativo, que permite simular el comportamiento resistente de una mezcla en el momento de rotura.

Chen et al. (2011), dentro del test de sensibilidad al agua, encontraron que la resistencia a tracción indirecta, sin ningún acondicionamiento previo, es mayor en mezclas bituminosas en caliente con polvo mineral reciclado de ladrillo, que con filler natural calizo, alcanzando valores por encima de 1,2 MPa. Los valores de resistencia obtenidos por Pasandín y Pérez (2014c) para mezclas en caliente con hasta un 30% de árido reciclado de hormigón también rondaron este último valor (Tabla 3.3) aunque los mismos autores reportaron en Pasandín y Pérez (2013) que la resistencia disminuía al aumentar el contenido de árido reciclado, coincidiendo exactamente con las conclusiones de otros autores como Bhusal y Wen (2013).

Tabla 3.3 Resistencia a tracción indirecta (MPa) de mezclas bituminosas en caliente con diferentes contenidos de betún y árido reciclado de hormigón (Pasandín y Pérez, 2014c)

Contenido árido reciclado	Contenido de betún		
	3,5%	4,0%	4,5%
5%	1,438	1,436	1,601
10%	1,342	1,734	1,705
20%	1,651	1,657	1,402
30%	1,437	1,475	1,525

La adición de algunos materiales puzolánicos, como las escorias siderúrgicas, puede mejorar la resistencia, tal y como observaron Pasetto y Baldo (2011), en cuyas investigaciones la resistencia de mezclas en caliente con este tipo de residuo era mayor que la de la mezcla de control realizada con árido natural, alcanzando así valores en torno a 1,5 MPa. Esta tendencia es importante puesto que tal y como se vio anteriormente, los RCD muestran igualmente ciertas propiedades autocementantes por lo que su influencia en la resistencia podría ser similar.

3.3.3.4 Rigidez

Conocer la rigidez de las mezclas bituminosas es un factor clave para el análisis y diseño de los firmes flexibles, puesto que está directamente relacionado con la capacidad del material para distribuir las cargas, además de conformar un indicador sintético de las propiedades estructurales de las mezclas (Pasetto y Baldo, 2011). Así, algunos autores definen el módulo resiliente (o módulo de rigidez) como una estimación del módulo elástico del material basada en la medición de la tensión y deformación que experimenta una probeta de material bituminoso bajo cargas cíclicas de rápida frecuencia -similar a las que experimenta un firme ante las sollicitaciones del tráfico- (Dávila, 2005).

Por otro lado, se debe tener también en cuenta otro efecto propio de materiales como las mezclas bituminosas: cuando un material presenta un comportamiento visco-elástico, los picos de tensiones y deformaciones procedentes de sollicitaciones cíclicas no coinciden en el tiempo y por tanto no tendría demasiado sentido calcular un módulo que simplemente relacionase una tensión con una deformación en un determinado instante de tiempo. Es por ello, que se definió el módulo dinámico $|E^*|$ como el valor absoluto del módulo complejo calculado mediante el cociente de la máxima tensión (pico de tensión) y la máxima deformación axial (pico de deformación) para cada ciclo de sollicitación sinusoidal, aunque ambos picos no se den en el mismo instante de tiempo.

En base a las publicaciones de otros autores, no está totalmente claro cómo los áridos reciclados, y particularmente los RCD, afectan a estos módulos al ser

introducidos en una mezcla bituminosa. Como muestra, en el caso de las mezclas en caliente, dependiendo de la procedencia de los RCD se han encontrado resultados favorables y desfavorables.

Por ejemplo, se ha observado que las mezclas con filler procedente de polvo de ladrillo tienen un módulo resiliente mayor que las mezclas con árido natural bajo temperaturas de 5°C y 40°C pero menor a 25°C lo que puede indicar un mejor comportamiento a fatiga que las demás, puesto que este tipo de fallo suele darse a esta última temperatura (Chen et al., 2011a). Por su parte, Shen y Du (2005) encontraron también resultados muy dispares, dependiendo de la temperatura de ensayo y grado de penetración del betún, no habiendo encontrado un porcentaje de sustitución del árido óptimo para todos los casos. Aun así, sí es cierto que en general, las mezclas con árido reciclado resultaron más rígidas que las de control (Figura 3.18).

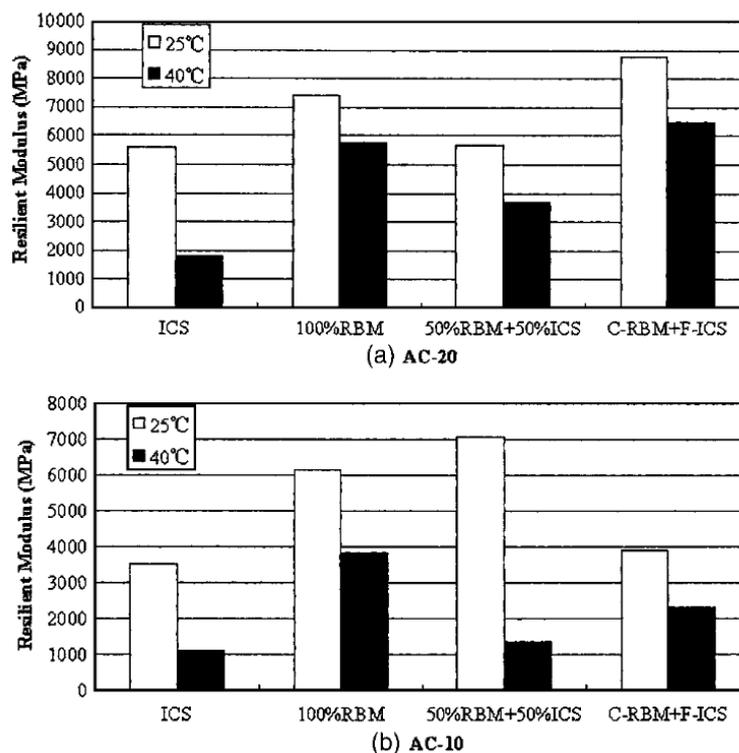


Figura 3.18 Módulo resiliente para diferentes temperaturas y porcentajes de sustitución (0%, 100%, 50% y reciclado solo en los gruesos) empleando un betún AC-20 (a) y AC-10 (b) (Shen y Du, 2005)

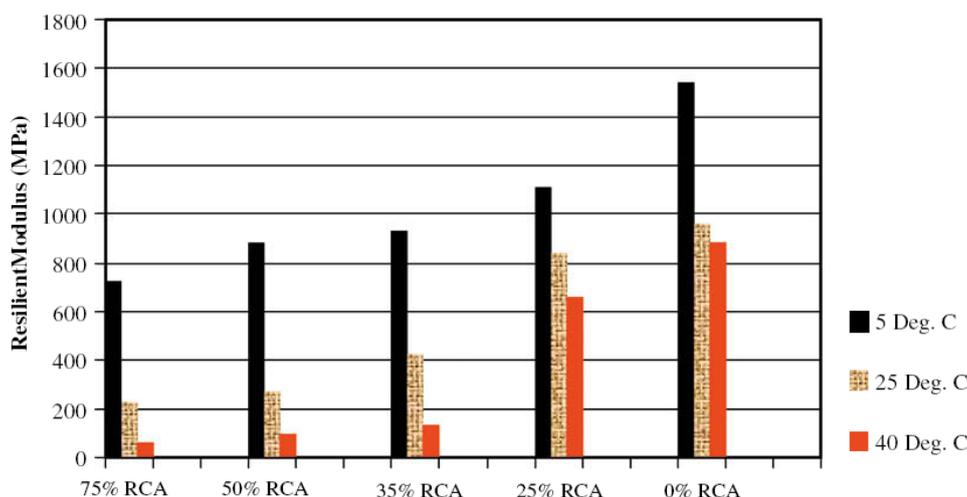


Figura 3.19 Resultados de los ensayos de Módulo Resiliente (ASTM D 4123-82) para diferentes temperaturas y porcentajes de árido reciclado (Mills-Beale y You, 2010)

Al margen de esto, se han encontrado también numerosas publicaciones en las que, en general, el módulo resiliente tiende a descender a medida que aumenta el contenido de árido reciclado y a medida que aumenta también el contenido de betún (Figura 3.19), lo cual puede ser atribuido al empleo de un mortero bituminoso de baja resistencia junto con el uso de un árido de mala calidad (Paranavithana y Mohajerani, 2006; Mills-Beale y You 2010; Pasandín y Pérez, 2014c).

Finalmente, lo que también parece claro, es que por medio de la aplicación de pretratamientos, el módulo resiliente de las mezclas con RCD puede verse incrementada considerablemente. Como ejemplo, Pasandín y Pérez (2013) demostraron que con simplemente dejar la mezcla suelta en estufa durante 2h y 4h, se eleva el ITSM llegando a alcanzar los 11.000 MPa a 20°C exigidos por el PG-3 para mezclas de alto módulo.

En cuanto al módulo dinámico $|E^*|$, Pérez et al. (2010a) ponen de manifiesto que, en mezclas en caliente, la sustitución del 50% de todas las fracciones granulométricas por RCD, incrementa levemente el módulo dinámico en el caso de mezclas gruesas (sin finos) y de forma más acentuada con mezclas densas. Del mismo modo, los investigadores Mills-Beale y You estudiaron en 2010 el módulo dinámico de mezclas que contenían distintos porcentajes de hormigón reciclado aunque a diferencia de Pérez et al. (2010a) que emplearon la Norma española NLT-350 (flexotracción 3 puntos), estos emplearon la americana AASTHO T 62-03 de compresión axial sobre

probetas cilíndricas. De este modo crearon curvas maestras (Figura 3.20) que evidencian una tendencia distinta a Pérez et al. (2010a), de modo que cuanto mayor era la cantidad de hormigón reciclado incorporado a la mezcla, menor resultaba su módulo dinámico. A la vista de estas curvas maestras, se pueden extraer también otras conclusiones importantes: por una parte, se aprecia cómo a bajas frecuencias (izquierda) todas las mezclas con árido reciclado se comportan igual sin depender del contenido del mismo, y siempre con un módulo dinámico menor que el de la muestra con un 100% de árido natural. Esto indica que a altas temperaturas, las mezclas con árido reciclado no resultarán tan rígidas como la mezcla con árido natural y por tanto serán más propensas a la aparición de deformaciones permanentes. Por otro lado, a altas frecuencias (derecha) se ve cómo el módulo dinámico desciende cuanto mayor es el contenido de árido reciclado. Esto quiere decir que a bajas temperaturas las mezclas con mayor cantidad de árido reciclado no serán tan rígidas y por tanto serán menos propensas a fisurar, lo que las hace idóneas para climas fríos.

Finalmente, se encuentran otras publicaciones como Bhusal y Wen (2013) en donde se corrobora nuevamente esta tendencia a la baja del módulo dinámico, cada vez que se incorporan áridos reciclados de hormigón a mezclas bituminosas en caliente.

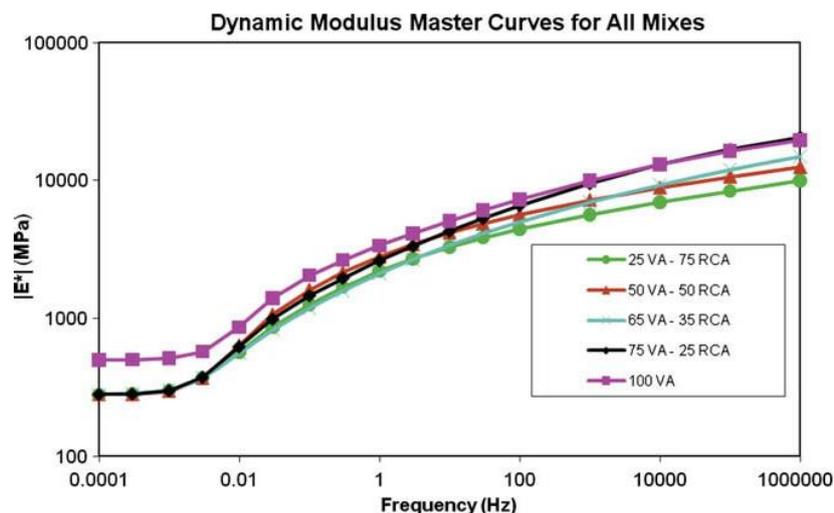


Figura 3.20 Curvas maestras de módulo dinámico para diferentes contenidos de hormigón reciclado, desde un 0% (curva violeta) a un 75% (curva verde) (Mills-Beale y You, 2010)

3.3.3.5 *Deformación permanente o Rutting*

La aparición de deformaciones permanentes puede estar motivada por una baja resistencia a cortante de las mezclas bituminosas empleadas en superficies de firmes flexibles. No obstante, suele estar también relacionada con el contenido de ligante, nivel de compactación y factores asociados a los áridos como la angulosidad, distribución de tamaños de partículas, forma de los granos y rugosidad (FCEIA, 2006). Características propias de los RCD como una gran rugosidad superficial o su forma angular (provenientes de machaqueo) ayudarían a dotar a la mezcla de una mayor resistencia, aunque por otra parte, cabría esperar que su tendencia a aumentar el contenido de huecos produjese efectos perjudiciales adelantando la aparición de deformaciones permanentes.

A la vista de la bibliografía publicada por otros autores, la sustitución de árido natural por RCD, produce efectos casi impredecibles por lo que su uso debe estar muy controlado. Por ejemplo, según los ensayos de pista (Wheel Tracking Test) realizados por Shen y Du (2005) las mezclas en caliente con un 50% de árido natural y un 50% de árido reciclado (tanto en fracción fina como en fracción gruesa) mostraron una deformación permanente mínima (de todas las obtenidas con otras proporciones e incluso con 100% de árido natural) cuando el test se realizaba a 25°C pero máxima cuando se realizaba a 60°C. Por ello, llegaron a catalogar dicha sustitución de árido como no apta para el uso.

Sin embargo, Pérez et al (2012) concluyeron tras realizar el mismo ensayo sobre mezclas en caliente con unos porcentajes de sustitución de árido reciclado del 0%, 20%, 40% y 60%, y tanto con filler de cemento como filler de cal, que todas ellas presentaban un buen comportamiento ante la deformación permanente, puesto que en los 8 casos estudiados, el ratio de deformación permaneció por debajo del máximo exigido por la Norma española PG-3.

En otros estudios, las mezclas con áridos gruesos procedentes de RCD mostraron comportamientos similares a las de control que contenían solamente árido natural (Paranavithana y Mohajerani, 2006; Pérez et al., 2012; Pasandín y Pérez, 2014b y 2014c) lo cual puede considerarse como un resultado favorable. También fueron

similares los resultados del ensayo de pista obtenidos por Rubio et al. (2011) para mezclas de control y mezclas con residuos de piedra decorativa Silestone® pese a tener una forma de grano más desfavorable (índice de lajas del 18% frente al 5% del árido natural).

Esta tendencia fue reafirmada también por Wong et al. (2007) sustituyendo incluso los finos y el filler natural por hormigón reciclado en pequeñas cantidades (6% del total). También comprobaron que para mayores sustituciones (de hasta el 45%) los resultados (según Norma Australiana AS 2891.12.1) llegaban a mejorar notablemente, siendo necesario un número de ciclos de carga de hasta 2-3 veces mayor para alcanzar la misma deformación.

Materiales de sustitución más porosos y adsorbentes, como el polvo de ladrillo empleado como filler, también confieren a las mezclas mejores comportamientos a altas temperaturas, con deformaciones permanentes menores (Chen et al., 2011a). En este estudio, se realizaron ensayos tanto estáticos como dinámicos a 60°C y en todos ellos las deformaciones de las mezclas con polvo de ladrillo fueron sensiblemente menores que las de control (con el 100% de piedra caliza), tal y como se aprecia en la Figura 3.21.

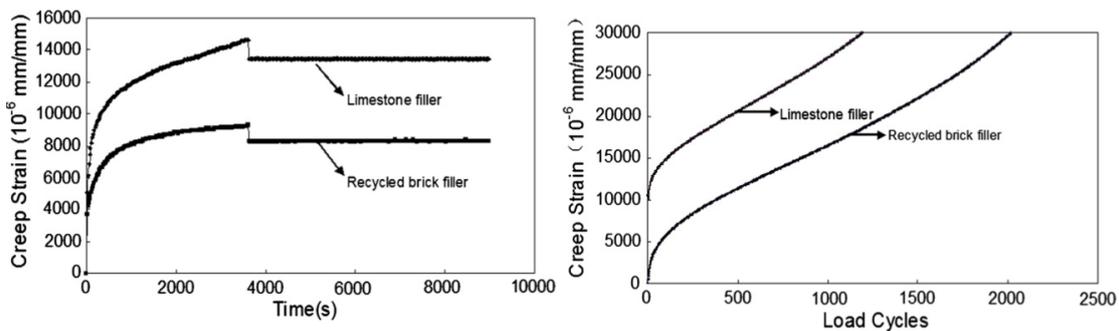


Figura 3.21 Resultados del ensayo estático (izquierda) y dinámico (derecha) de resistencia a la deformación permanente realizado en mezclas bituminosas con filler calizo y con filler procedente de polvo de ladrillo (Chen et al., 2011a)

Por el contrario, se debe decir que también otras investigaciones mostraron efectos adversos, como la llevada a cabo por Mills-Beale y You (2010), con un *Asphalt Pavement Analyzer* y a una temperatura de 52°C, en la que, para cada número de ciclos

de carga, a mayor contenido de hormigón reciclado en la mezcla, mayor fue también la deformación permanente (Figura 3.22). Pasandín y Pérez (2013), encontraron que aunque las mezclas en caliente con áridos reciclados de hormigón mostraban un comportamiento aceptable, dicho comportamiento empeoraba a medida que aumentaba el contenido de este tipo de árido (Figura 3.23). Este empeoramiento fue confirmado finalmente en otras publicaciones como Bhusal y Wen (2013).

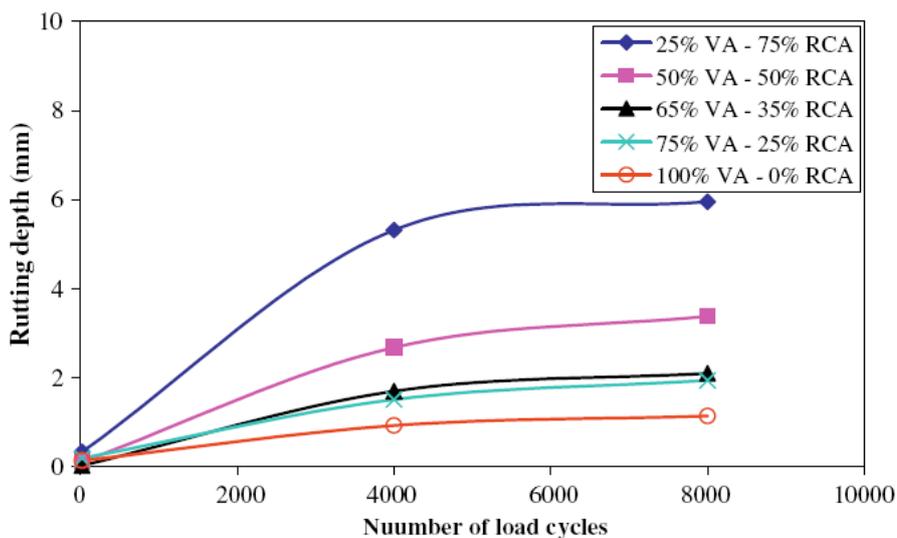


Figura 3.22 Deformaciones permanentes para mezclas con diferentes contenidos de áridos reciclados de hormigón (RCA) y vírgenes (VA), desde un 0% (línea roja) a un 75% (línea azul oscuro) (Mills-Beale y You, 2010)

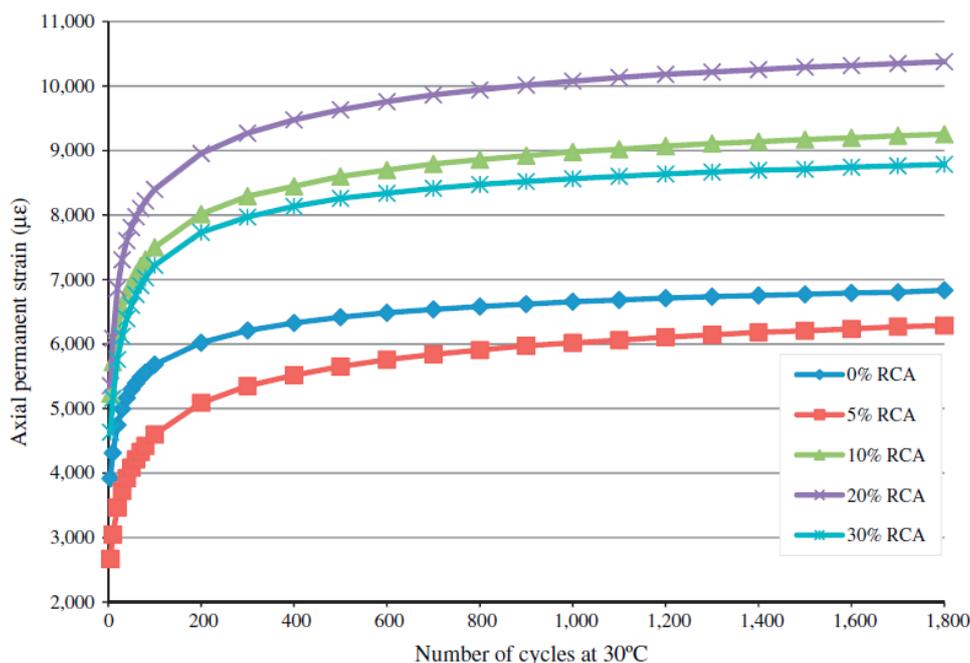


Figura 3.23 Deformación permanente acumulada con mezclas bituminosas en caliente y diferentes contenidos de árido reciclado de hormigón (Pasandín y Pérez, 2013)

3.3.3.6 Resistencia a Fatiga

La fatiga se define como la reducción de la resistencia de un material bajo la aplicación repetida de una carga, cuando se compara con la resistencia bajo la aplicación individual de una carga (Norma UNE-EN 12697-24:2006). Las mezclas bituminosas se conciben para que, durante su vida útil, estén solicitadas por cargas de este tipo fundamentalmente, por lo que será un factor muy a tener en cuenta ya incluso desde las fases iniciales de su diseño, si se quieren evitar patologías de frecuente aparición como la conocida “piel de cocodrilo”.

Autores como Kim et al. (1985) indicaron que el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente a fatiga está estrechamente relacionado con las características de fractura de la matriz bituminosa. De hecho, se ha comprobado también que, en términos generales, cuanto mayor es el módulo de rigidez de una mezcla, mejor se comporta también a fatiga (Pasetto y Baldo, 2011). A igual nivel de sollicitación, un aumento en la rigidez de la mezcla supondrá un menor desarrollo de deformaciones por lo que el riesgo de aparición de fisuras disminuirá. No obstante, diversos factores pueden afectar a dicha ley de comportamiento, como la sustitución de parte o de la totalidad del árido natural por otro tipo de árido. Los RCD, por ejemplo, tienden a empeorar de forma general las leyes de fatiga (Pérez et al., 2010a), si bien es cierto que el efecto registrado fue más acentuado en mezclas con abundante cantidad de finos (como mezclas semi-densas) que en mezclas gruesas, cuyos valores no difieren demasiado de los de las mezclas de referencia, sin áridos reciclados.

Por su parte, Pasandín y Pérez (2013) encontraron que las mezclas en caliente con áridos reciclados de hormigón mostraban un comportamiento similar a las mezclas de control convencionales, al menos hasta contenidos de RCD del 20%. Este comportamiento fue mejorado tratando el árido con una pre-envuelta con un 5% de emulsión (Pasandín y Pérez, 2014c).

Chen et al. (2011b) determinaron que las mezclas con finos reciclados mostraban un comportamiento a fatiga mejor incluso que los áridos con finos calizos para cualquiera de las deformaciones estudiadas (entre 400 y 700 $\mu\epsilon$) (Figura 3.24). Concretamente, el polvo de ladrillo introducido en las mezclas como filler, dota a las

mezclas de una mayor vida a fatiga con respecto a las mezclas de control sin filler reciclado, llegando a ser de 1.73 y 1.75 veces mayor para 500 y 600 $\mu\epsilon$ respectivamente (Chen et al., 2011a).

Por el contrario, Bhusal y Wen (2013) encontraron que el comportamiento a fatiga de estas mezclas empeoraba cuanto mayor era el contenido de árido reciclado de hormigón.

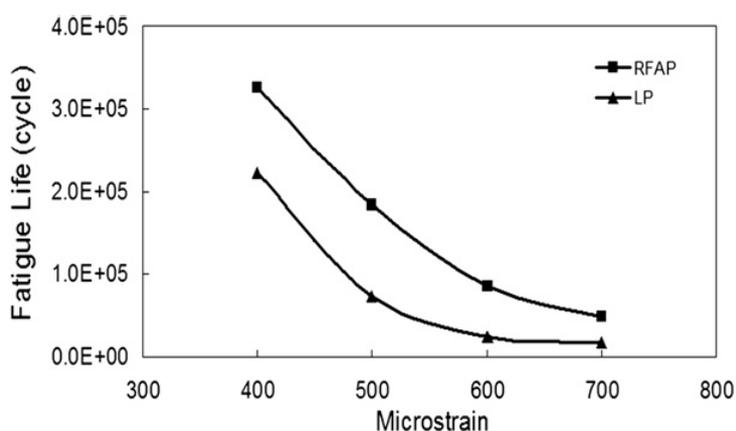


Figura 3.24 Número de ciclos hasta rotura según nivel de deformación de mezclas bituminosas en caliente con finos reciclados (RFAP) y con áridos calizos (LP) (Chen et al., 2011b)

3.3.3.7 Resistencia al deslizamiento

Las mezclas empleadas en las capas de rodadura deben proporcionar una suficiente resistencia al deslizamiento que ha de mantenerse en el tiempo. Para ello, es preciso, si se trata de carreteras con tráfico intenso y rápido, que el árido grueso empleado no sea pulimentable y que la macrotextura de la mezcla sea suficientemente rugosa, aunque intentando que no sea excesivamente ruidosa (Kraemer et al., 2004).

No se han hallado publicaciones referentes al estudio de la resistencia al deslizamiento de las mezclas bituminosas con áridos reciclados. No obstante, cabría esperar que su utilización en capas de rodadura tienda a producir, con el tiempo, superficies menos rugosas debido a que su resistencia a la fragmentación y al pulimento es, en general, menor que la de los áridos naturales. Por tanto, dicha utilización podría ser contraproducente en estos casos.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS

4.1 Descripción, recepción y operaciones previas

Los áridos con los que se realizó la presente tesis pertenecen a dos tipos diferentes. Por un lado, se contó con una Corneana, árido 100% natural y de tipo silíceo proveniente de una cantera en Astariz (Ourense). Dicho árido, fue proporcionado en sacos plásticos de entre 30 y 40 kg separado en las siguientes 5 fracciones granulométricas (d/D): 0/2 mm, 2/6,3 mm, 6,3/12,5 mm, 10/16 mm y 16/32 mm (Figura 4.1). Dichos sacos plásticos, no solamente fueron capaces de proteger al árido frente a pérdidas de material sino que incluso mantuvieron la humedad con la que salieron de la cantera, lo cual se pudo apreciar, especialmente, en las fracciones más finas que incluso llegaban a aglutinarse formando terrones (Figura 4.2).



Figura 4.1 Aspecto de la fracción 16/32 mm del árido natural

Por su parte, el árido reciclado fue proporcionado por el Grupo Gestán en 6 “big bags” de aproximadamente una tonelada cada uno (Figura 4.3), dividido en tres fracciones granulométricas: 0/6 mm (que de aquí en adelante se denominará fracción fina), 6/12 mm (fracción media) y 12/32 (gruesa). El aspecto de dichas fracciones, tras su recepción, se puede apreciar en la Figura 4.4 a Figura 4.6. Pudo distinguirse a simple vista, que la mayor parte del árido estaba constituido por fragmentos de roca o bien de hormigón, aunque se encontraron algunas “impurezas” como pequeños trozos de yeso,

madera, ladrillo y hormigón con grapas metálicas todavía ancladas. Para preservar mejor las propiedades del árido durante todo el período de realización de la tesis, y con el fin de obtener porciones más manejables, todos los big bags fueron cuarteados manualmente con cuarteador, siguiendo para ello, las indicaciones recogidas en la Norma UNE-EN 932-2:1999 (Figura 4.7) y metidos en sacos de entre 20 y 25 kg.



Figura 4.2 Aspecto de la fracción 0/2 mm del árido natural



Figura 4.3 Big bags recibidos de árido reciclado



Figura 4.4 Aspecto de la fracción fina (0/6 mm) del árido reciclado



Figura 4.5 Aspecto de la fracción media (6/12 mm) del árido reciclado



Figura 4.6 Aspecto de la fracción gruesa (12/32 mm) del árido reciclado



Figura 4.7 Operación previa de cuarteo del árido reciclado según Norma UNE-EN 932-2:1999

4.2 Caracterización del árido reciclado

4.2.1 Granulometría

La Norma UNE-EN 933-1 establece las masas mínimas de muestra que se deben ensayar para determinar la granulometría de un árido de forma representativa, siendo dicho valor, dependiente del tamaño máximo (D) del mismo, según la Tabla 4.1. Dado que a priori, no se conocía dicho parámetro, se confió en las especificaciones del proveedor, contando con encontrar tres fracciones diferentes de árido reciclado. De este modo, se planeó una primera tanda de ensayos con masas mínimas de 0,6 kg, 2,6 kg y 10 kg respectivamente. Sin embargo, tras los mencionados ensayos, se detectaron tamaños máximos de 40 mm para la fracción gruesa, 16 mm para la fracción media y 12,5 para la fracción fina. Por ello, la campaña definitiva de ensayos granulométricos, consistió en dos muestras para cada fracción con masas mínimas de 17,74 kg, 2,6 kg y 1,725 kg respectivamente, resultantes de la interpolación entre los parámetros fijados en la Tabla 4.1. Se debe señalar que tras los cinco ensayos realizados (el preliminar, dos granulométricos y dos específicos de lajas) solamente en uno de ellos, se ha encontrado, de forma aislada, un bolo retenido por el tamiz con abertura de 50 mm. No obstante, por tratarse de un caso tan aislado, no se ha considerado como tamaño máximo.

Tabla 4.1 Masa mínima de muestras de ensayo de densidad normal de partículas

Tamaño máximo del árido (D) mm	Masa mínima de la muestra de ensayo kg
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

Los tamices de ensayo empleados pertenecen a la serie descrita en la UNE-EN 933-2 aunque con el fin de obtener una granulometría más precisa, y al mismo tiempo, poder emplear la muestra una vez separada en fracciones para la determinación de los correspondientes índices de lajas, se han superpuesto también, los tamices de aberturas propuestos por la Norma UNE-EN 933-3. De este modo, la serie completa fue la siguiente (se indican con letra cursiva los pertenecientes a la UNE-EN 933-3):

0,063 mm – 0,125 mm – 0,250 mm – 0,500 mm – 1 mm – 2 mm – 4 mm – 5 mm – 6,3 mm – 8 mm – 10 mm – 12,5 mm – 16 mm – 20 mm – 25 mm – 31,5 mm – 40 mm – 50 mm – 63 mm – 80 mm

Los resultados de los ensayos, expresados como valores promedio de todos aquellos obtenidos de las operaciones de tamizado se recogen en la Tabla 4.2, y gráficamente en la Figura 4.8 y Figura 4.9.

El porcentaje medio de finos ($< 0,063$ mm) es de un 3,6% para el árido fino, de un 0,85% para el árido medio y de un 0,25% para el árido grueso. Se debe tener en cuenta, que aunque dichas cifras puedan parecer relativamente bajas, las partidas de árido medio y árido grueso no deberían contener prácticamente nada de finos, puesto que el proveedor las habría separado convenientemente antes. Sin embargo, el hecho de que sí aparezca cierta cantidad de finos, incluso después de haber lavado las muestras indica que la simple operación de tamizado basta para degradar y fragmentar el árido. Es una característica del árido reciclado que se manifestará claramente en ensayos más específicos como el de abrasión de Los Angeles.

Se puede observar que mientras la frontera entre los áridos medio y grueso está bastante bien definida en torno a los 12,5 mm (lo que indica una efectiva operación de cribado en planta) la frontera entre el árido medio y fino no resulta tan evidente. El árido medio contiene cantidades representativas de material por encima del tamaño 2 mm mientras que el árido fino cuenta con un tamaño máximo de 12,5 mm, muy superior a los 2 mm. Entre los 2 y los 12 mm, ambos áridos cuentan con cantidades muy significativas de material, lo que indica que las operaciones de cribado no han sido suficientemente efectivas si bien podría establecerse una frontera en torno a los 4 mm.

Además, se puede apreciar como los picos de contenido de material se dan en torno a la fracción 2/4 para el árido fino, 8/10 para el árido medio y 20/25 para el árido grueso.

Tabla 4.2 Porcentajes pertenecientes a cada fracción granulométrica de las muestras de árido reciclado

Fracción granulométrica	Fino		Medio		Grueso	
	%	% acum.	%	% acum.	%	% acum.
63/80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50/63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
40/50	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	5,7
31,5/40	0,0	0,0	0,0	0,0	18,1	23,8
25/31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	19,4	43,2
20/25	0,0	0,0	0,0	0,0	19,8	63,0
16/20	0,1	0,1	0,1	0,1	16,7	79,8
12,5/16	0,5	0,6	0,1	0,1	14,7	94,5
10/12,5	0,4	1,0	16,8	17,0	4,0	98,4
8/10	0,7	1,7	28,8	45,8	0,2	98,6
6,3/8	1,4	3,1	24,8	70,6	0,1	98,8
5/6,3	7,1	10,1	14,8	85,5	0,1	98,9
4/5	15,0	25,2	5,1	90,6	0,1	99,0
2/4	24,7	49,9	2,9	93,5	0,2	99,1
1/2	17,3	67,2	1,4	94,9	0,1	99,2
0,500/1	12,7	79,9	1,3	96,2	0,1	99,3
0,250/0,500	10,4	90,3	1,2	97,4	0,2	99,5
0,125/0,250	6,1	96,4	1,2	98,7	0,2	99,7
0,063/0,125	3,0	99,3	0,7	99,4	0,2	99,8
Filler	0,7	100,0	0,6	100,0	0,2	100,0

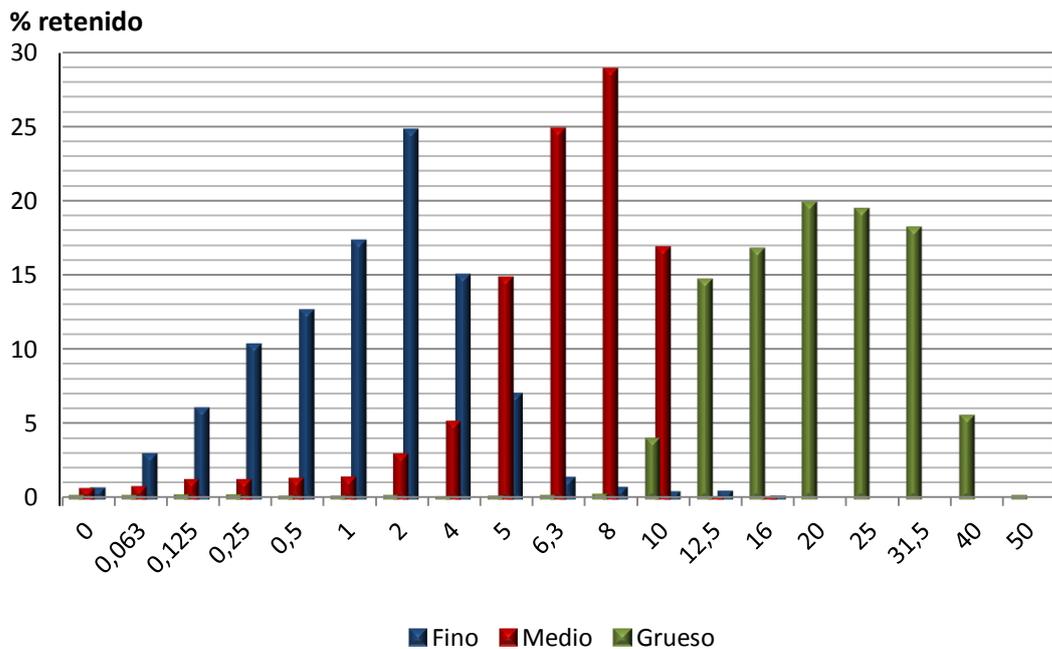


Figura 4.8 Porcentajes (%) retenidos en cada tamiz (apertura en mm) para cada una de las muestras de árido reciclado (Fino, Medio y Grueso)

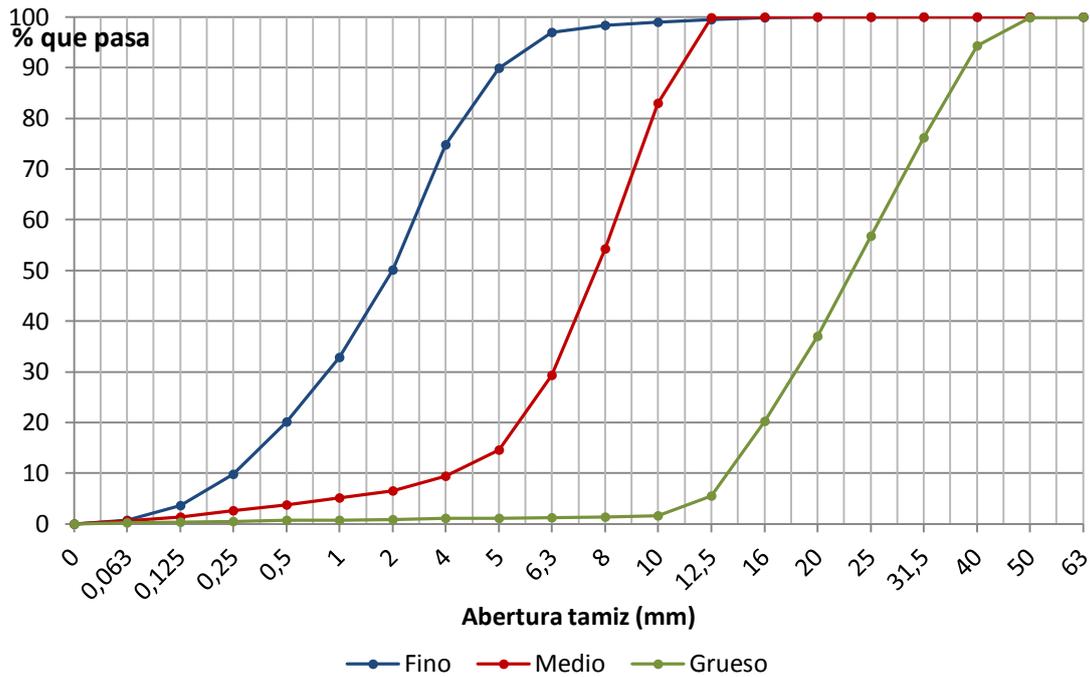


Figura 4.9 Porcentajes acumulados (%) que pasan por cada tamiz (apertura en mm) para cada una de las muestras de árido reciclado (Fino, Medio y Grueso)

4.2.2 Índice de Lajas

El contenido de lajas ha sido determinado por el Índice de Lajas, definido en la Norma UNE-EN 933-3, para cada fracción granulométrica “i” como:

$$IL_i = \frac{m_i}{R_i} \cdot 100$$

Donde R_i es la masa de cada fracción granulométrica d_i/D_i en gramos; m_i es la masa del material de cada fracción granulométrica d_i/D_i que pasa a través del tamiz de barras correspondiente de anchura $D_i/2$, en gramos. Los resultados medios obtenidos se detallan en la Tabla 4.3 y Figura 4.10.

Como se puede observar, existe una gran inestabilidad en los resultados pertenecientes a las fracciones más finas del árido grueso y a las más gruesas del árido medio. Esto es debido a que en dichas fracciones, la cantidad de muestra bruta obtenida es pequeña en términos absolutos y por tanto, el simple hecho de que una partícula

perteneciente a las mismas sea o no una laja, hace variar el porcentaje de lajas considerablemente.

Tabla 4.3 Índices de Lajas totales y según fracción granulométrica del árido medio y grueso

Fracción granulométrica	Medio	Grueso
63/80	0,0%	0,0%
50/63	0,0%	0,0%
40/50	0,0%	0,0%
31,5/40	0,0%	3,7%
25/31,5	0,0%	3,3%
20/25	0,0%	4,6%
16/20	0,0%	3,6%
12,5/16	0,0%	3,5%
10/12,5	7,3%	2,1%
8/10	6,1%	5,0%
6,3/8	5,2%	2,3%
5/6,3	4,7%	6,3%
4/5	4,2%	3,4%
TOTAL	5,4%	3,5%

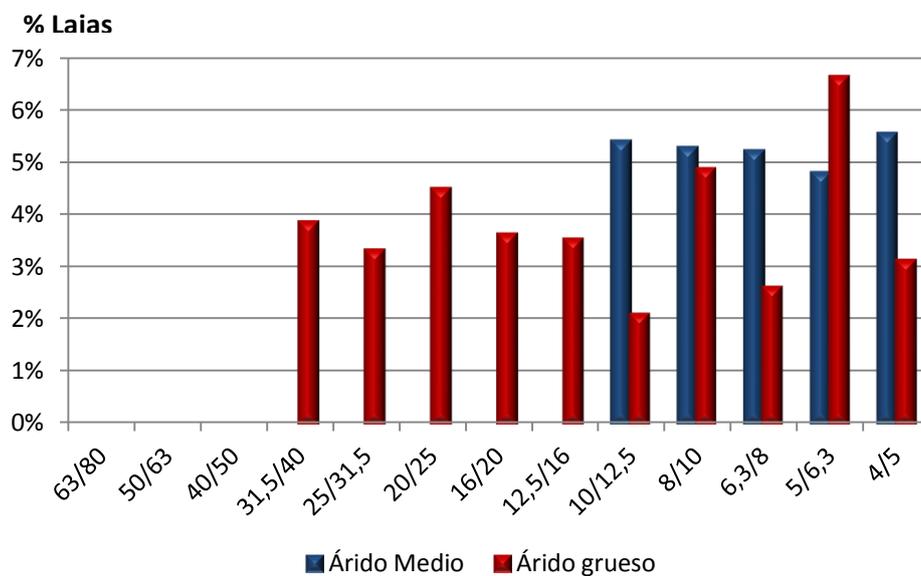


Figura 4.10 Índices de Lajas por fracciones granulométricas (d/D mm) del árido medio y grueso

4.2.3 Caras de fractura

Para estudiar las caras de fractura, solamente se emplearon muestras de árido grueso y medio, dejando el árido fino, puesto que la propia Norma UNE-EN 933-5 obliga a rechazar todas aquellas partículas que no logre retener el tamiz de abertura 4 mm. Las masas mínimas de ensayo se interpolaron entre los parámetros establecidos por la Norma para tamaños máximos de árido de 40 mm y 16 mm. Dichas masas mínimas resultaron ser de 16,06 kg y 1 kg respectivamente. Dado que las muestras ensayadas fueron de 17.524,7 kg y 3.088,8 kg, ambas lograron satisfacer dicho requisito.

Tal y como indica la Norma, las muestras se separaron previamente por fracciones granulométricas (rechazando las partículas menores de 4 mm) y a continuación se clasificó cada partícula en dos fases: a) se separaron las partículas redondeadas (con un 50% o menos de caras de fractura) y trituradas (con más de un 50% de caras de fractura); b) en cada uno de los grupos anteriores se separaron respectivamente las partículas totalmente redondeadas (con más del 90% de la superficie redondeada) y totalmente trituradas (con más del 90% de caras de fractura). Los resultados para el árido grueso y árido medio se muestran en la Tabla 4.4 y Tabla 4.5 y en la Figura 4.11.

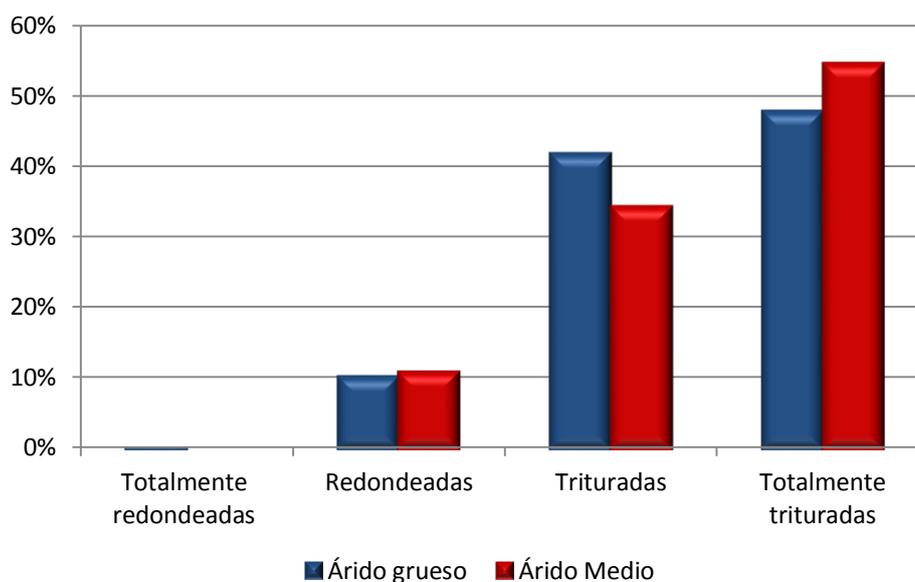


Figura 4.11 Porcentajes de cada tipo de partículas según el contenido en caras de fractura para cada fracción granulométrica del árido grueso y medio reciclado

Como se puede apreciar, el árido grueso cuenta con un 89,6% de partículas trituradas, siendo un 47,8% pertenecientes a la clasificación de “totalmente trituradas”. Por su parte, el árido medio muestra valores similares, con un 88,9% de partículas trituradas, siendo el 54,5% totalmente trituradas.

Tabla 4.4 Masa (g) y porcentajes de cada tipo de partículas según el contenido en caras de fractura para cada fracción granulométrica del árido grueso reciclado

Fracción granulom.	Masa total	Totalmente redondeadas		Redondeadas		Trituradas		Totalmente trituradas	
40/50	760,6	0,0	0,0%	0,0	0,0%	504,7	66,4%	255,9	33,6%
31,5/40	3399,8	19,1	0,6%	314,2	9,2%	1306,9	38,4%	1759,6	51,8%
25/31,5	3274,6	0,0	0,0%	527,0	16,1%	1489,1	45,5%	1258,5	38,4%
20/25	3744,6	0,0	0,0%	393,8	10,5%	1745,7	46,6%	1605,1	42,9%
16/20	2892,6	0,0	0,0%	348,6	12,1%	1108,5	38,3%	1435,5	49,6%
12,5/16	2640,1	0,0	0,0%	145,4	5,5%	855,3	32,4%	1639,4	62,1%
10/12,5	642,4	0,0	0,0%	53,1	8,3%	252,8	39,4%	336,5	52,4%
8/10	30,8	0,0	0,0%	3,9	12,7%	12,8	41,6%	14,1	45,8%
6,3/8	21,6	0,0	0,0%	2,6	12,0%	6,7	31,0%	12,3	56,9%
5/6,3	17,9	0,0	0,0%	2,2	12,3%	7,3	40,8%	8,4	46,9%
4/6,3	16,5	0,0	0,0%	2,7	16,4%	5,9	35,8%	7,9	47,9%
TOTAL	17441,5	19,1	0,1%	1793,5	10,3%	7295,7	41,8%	8333,2	47,8%

Tabla 4.5 Masa (g) y porcentajes de cada tipo de partículas según el contenido en caras de fractura para cada fracción granulométrica del árido medio reciclado

	Masa total Mi	Totalmente redondeadas		Redondeadas		Trituradas		Totalmente trituradas	
10/12,5	780,2	0,0	0,0%	104,9	13,4%	287,3	36,8%	388,0	49,7%
8/10	1022,7	0,0	0,0%	102,0	10,0%	269,1	26,3%	651,6	63,7%
6,3/8	809,3	0,0	0,0%	75,5	9,3%	313,9	38,8%	419,9	51,9%
5/6,3	346,6	0,0	0,0%	46,2	13,3%	142,8	41,2%	157,6	45,5%
4/6,3	23,8	0,0	0,0%	1,3	5,5%	12,7	53,4%	9,8	41,2%
TOTAL	2982,6	0,0	0,0%	329,9	11,1%	1025,8	34,4%	1626,9	54,5%

4.2.4 Densidad y absorción

Para la determinación de la densidad de las partículas y la absorción de los áridos se ha seguido la Norma UNE-EN 1097-6:2000, la cual especifica cinco métodos para áridos normales y otro para áridos ligeros. Los métodos empleados son el de la balanza hidrostática para áridos que pasan el tamiz de 63 mm y que quedan retenidos en el tamiz de 31,5 mm y el del picnómetro para los áridos que pasan por el tamiz de 31,5 mm y quedan retenidos en el tamiz de 0,063 mm, si bien existen también diferencias en el procedimiento según si el árido pasa o queda retenido en el tamiz de 4 mm.

Como se ha visto en el apartado 4.1, para el presente estudio se cuenta con tres fracciones de árido: una gruesa con tamaño máximo de 40 mm, una media de hasta 16 mm y una fina de hasta 12,5 mm. De este modo, ha sido necesario dividir cada una en porciones con los tamices de 31,5 mm y 4 mm. En definitiva, para cada método se obtuvieron las muestras recogidas en la Tabla 4.6. Como se puede apreciar, aunque existe una cierta cantidad de material perteneciente a la fracción 0,063/4 mm dentro del árido grueso y medio, así como una cierta cantidad de árido mayor de 4 mm en la fracción fina, éstas son tan reducidas que directamente se han despreciado a la hora de realizar ensayos específicos sobre las mismas. Se debe recordar que al fin y al cabo, todas las fracciones provienen del mismo material original por lo que dichas porciones son sencillamente de material mal cribado y separado, pero con las mismas características que el resto.

Tabla 4.6 Muestras obtenidas para la determinación de la densidad de las partículas y la absorción del árido

Método	Fracción granulométrica	Muestra	Procedencia
Balanza hidrostática	31,5/63 mm	G1.2	Árido grueso
		G12	Árido grueso
Picnómetro	4/16 mm	G1	Árido grueso
		G2	Árido grueso
		M1	Árido medio
		M2	Árido medio
		M3	Árido fino
Picnómetro	0,063/4 mm	F1	Árido fino
		F2	Árido fino

Se puede apreciar como los resultados son bastante homogéneos, lo cual deriva, tal y como ya se ha expuesto, del hecho de que todas las fracciones provienen del mismo material común. En general, el árido grueso cuenta con unas densidades y absorción ligeramente inferiores al árido medio (hecho que se ve acentuado en las muestras M1, M2 y M3, las cuales solamente llegan a un tamaño máximo de 16 mm) y éste, a su vez, menores que el árido fino. Tal y como cabía esperar según los resultados obtenidos por otros autores y recogidos en capítulos anteriores, el árido fino destaca por su mayor absorción, si bien sigue lejos de valores como los 10,3% y 30,9% registrados por Poon y Chan (2006) para árido de hormigón reciclado y ladrillo reciclado respectivamente.

Tabla 4.7 Densidades y absorciones observadas para el árido reciclado

Muestra	Masa de ensayo (gr)	Densidad aparente (Mg/m ³)	Densidad seca (Mg/m ³)	Densidad saturada y superficie seca (Mg/m ³)	Absorción
G12	7083,7	2,58	2,19	2,34	6,9%
G1.2	7084,5	2,60	2,22	2,36	6,6%
Media > 31,5 mm	-	2,59	2,20	2,35	6,8%
G1	5010,8	2,63	2,24	2,39	6,6%
G2	5000,2	2,62	2,22	2,37	6,8%
Media 4/31,5 mm	-	2,62	2,23	2,38	6,7%
M1	3636,8	2,63	2,24	2,39	6,6%
M2	3226,2	2,63	2,26	2,40	6,3%
M3	3162,1	2,64	2,24	2,39	6,7%
Media 4/16 mm	-	2,63	2,25	2,39	6,6%
F1	1102,8	2,69	2,23	2,40	7,7%
F2	1046,7	2,70	2,23	2,41	7,7%
Media 0,063/4 mm	-	2,70	2,23	2,41	7,7%

4.2.5 Composición

La clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados se realizó según lo establecido en la Norma UNE-EN 933-11. Dicha Norma, propone la clasificación según los siguientes tipos de material:

- FL - Partículas Flotantes

- Rc – Hormigón, productos de hormigón, mortero y unidades de albañilería de hormigón
- Ru – Áridos no tratados, piedra natural y áridos tratados con conglomerantes hidráulicos
- Rb – Unidades de albañilería de arcilla (es decir, ladrillos y tejas), unidades de albañilería de silicato cálcico y hormigón aireado no flotante
- Ra – Materiales bituminosos
- Rg – Vidrio
- X – Otros: cohesivos (es decir, arcilla y arena), varios (metales ferrosos y no ferrosos, madera no flotante, plástico y caucho) y yeso

Debido a que éste es un ensayo que únicamente se aplica en partículas de tamaños superiores a los 4 mm, la fracción fina no se ha considerado y de las fracciones media y gruesa solamente aquella cantidad de material que lograra permanecer retenida por el tamiz de abertura 4 mm. Las masas mínimas de ensayo, según la citada Norma, son de 50 kg para áridos de tamaño máximo igual a 63 mm y de 20 kg para áridos de tamaño máximo igual a 32 mm o menor. Dado que las fracciones de estudio tienen unos tamaños máximos de 40 mm y 16 mm respectivamente, las muestras deberían cumplir las cantidades mínimas de 27,74 kg para el grueso y 20 kg para el fino. Los resultados del ensayo se muestran en la Tabla 4.8, Figura 4.12 y Figura 4.13.

Como se puede observar, la gran mayoría de material pertenece al tipo Rc, es decir, que estará fundamentalmente constituido por hormigón y mortero. La proporción es mayor en el caso del árido grueso debido a que todas aquellas partículas de hormigón (tipo Rc) que fueron machacadas y pasadas a la fracción de árido medio, tuvieron más posibilidades de fragmentarse y dividirse entre mortero suelto (tipo Rc) y áridos de piedra limpia (tipo Ru) (Figura 4.14 a Figura 4.17).

Tabla 4.8 Resultados del ensayo de clasificación de componentes del árido grueso reciclado

Parámetro	Árido Grueso	Árido Medio	
Temperatura de secado (°C)	40,0	40,0	
Masa seca (g)	28789,0	20017,0	
Masa retenida por tamiz 63 mm(g)	0,0	0,0	
Masa que pasa por el tamiz 4 mm (g)	214,0	798,0	
Masa restante (4 mm < M < 63 mm) (g)	28578,0	19219,0	
Masa 1000 partículas* (g)	20402,2	2503,9	
Volumen de flotantes V _{FL} (cm ³)	5,63	2,41	
Proporción FL (cm ³ /kg)	0,20	0,13	
Proporción de material X	Hormigón con metal	1,121%	0,00%
	Metal	0,002%	0,029%
	Hormigón con fibra textil	0,146%	0,042%
	Yeso	0,103%	0,012%
	Ligeros (papel y celofanes)	0,001%	0,002%
	Piezas de plástico sueltas	0,015%	0,0%
	Otros (no identificables)	0,0%	0,008%
	TOTAL X	1,3%	0,1%
Proporción de material Rc	70%	55%	
Proporción de material Ru	25%	40%	
Proporción de material Rb	Hormigón aireado no flotante	3,4%	3,9%
	Cerámicos	0,2%	0,2%
	TOTAL Rb	3,7%	4,1%
Proporción de material Ra	0,0%	0,0%	
Proporción de material Rg	0,0%	0,0%	

* Llegado a este punto del ensayo, la Norma permite una reducción de la muestra a un mínimo de 1000 partículas, para lo cual propone unas masas de muestra orientativas de 20,32 kg para un tamaño máximo de árido de 40 mm y 2 kg para un tamaño máximo de 16 mm. Se tomaron unas masas algo superiores y se comprobó, contando, que ambas muestras superaban ampliamente el margen de las 1000 partículas.

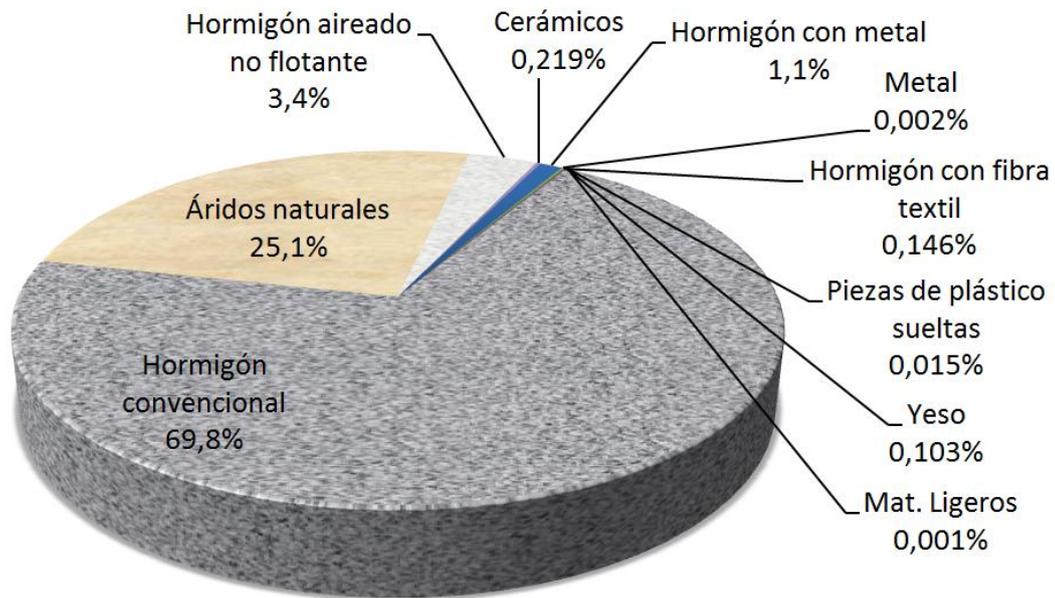


Figura 4.12 Composición del árido grueso reciclado

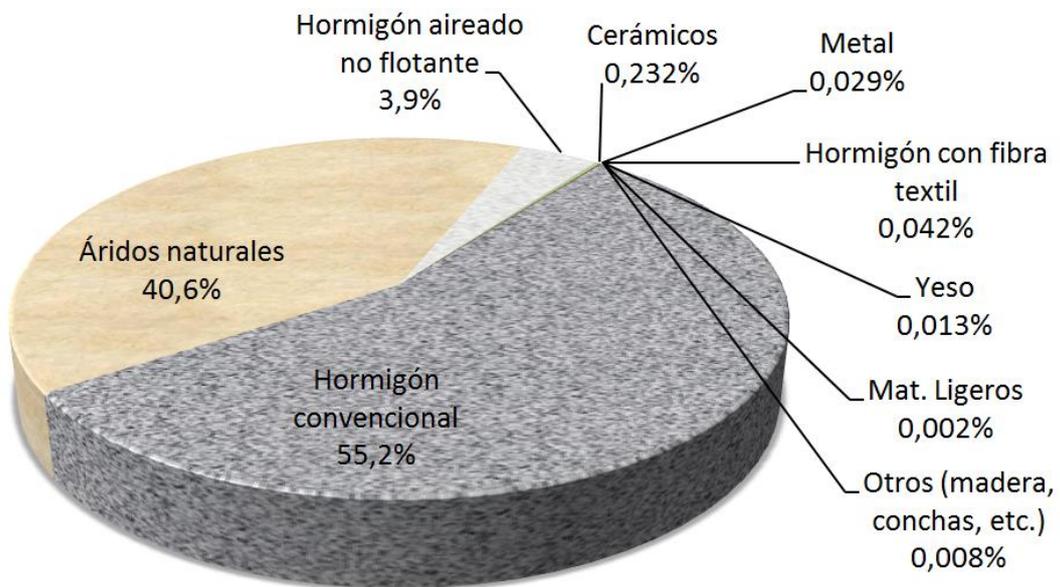


Figura 4.13 Composición del árido medio reciclado



Figura 4.14 Partículas tipo Ru pertenecientes al árido grueso



Figura 4.15 Partículas tipo Rc pertenecientes la árido grueso



Figura 4.16 Partículas tipo Rc pertenecientes al árido medio



Figura 4.17 Partículas tipo Ru pertenecientes al árido medio

La cantidad de flotantes es reducida en ambos casos, aunque ligeramente superior en el caso del árido grueso. El tamaño de estas partículas no está bien definido puesto que suelen ser materiales flexibles capaces de traspasar o de quedarse retenidas en cribas y tamices de forma casi aleatoria. Tal y como se aprecia en la Figura 4.18 y Figura 4.19 la mayor parte de estos materiales son trozos de madera, papel, fibra textil pegada a pequeñas partículas de hormigón y plásticos ligeros como celofanes o trozos de bolsa.



Figura 4.18 Flotantes pertenecientes a la fracción gruesa



Figura 4.19 Flotantes pertenecientes a la fracción media

La fracción X tampoco cuenta con una presencia demasiado importante dentro del total de la muestra, especialmente en el árido medio. No obstante, sí se debe mencionar que la mayor parte del que se recoge para la fracción gruesa es hormigón con pequeñas fibras metálicas todavía adheridas, de modo que aquellas que por machaqueo en planta lograron fragmentarse, soltaron las fibras separándose en dos grupos: hormigón (que entra en la clase Rc) y metal suelto; lo cual explica que en la fracción media aparezca una cantidad considerablemente mayor de estas fibras metálicas (ver Figura 4.20 y Figura 4.21). Los demás materiales que se pueden apreciar son hormigón con fibra textil adherida, yesos, restos de materiales ligeros como el papel y cartón, piezas de plástico (de forma marginal se halló parte de una regleta eléctrica) y en un porcentaje muy reducido, pequeñas fracciones de diferentes materiales no identificados (Probablemente pertenecientes a materiales de cubiertas, aislantes, adhesivos, resinas, etc.).

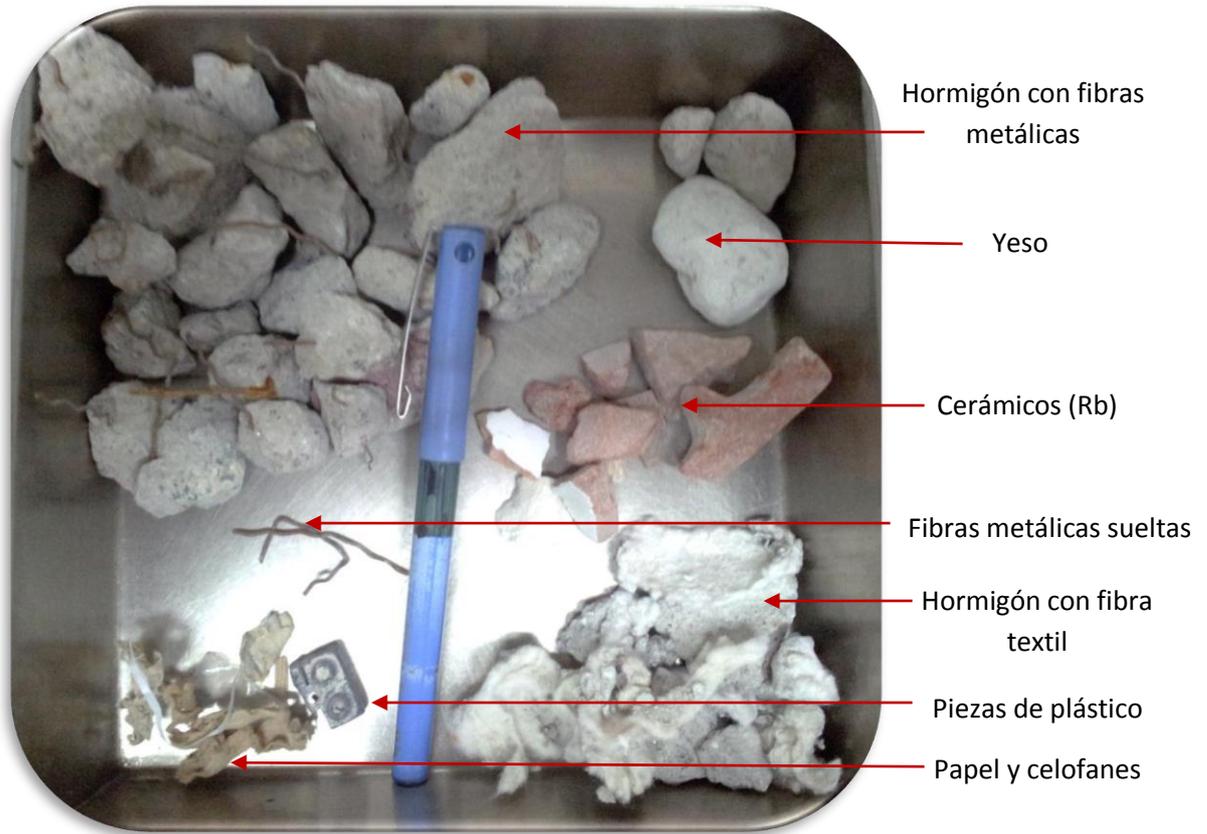


Figura 4.20 Partículas tipo X pertenecientes al árido grueso



Figura 4.21 Partículas tipo X pertenecientes al árido medio

Las partículas tipo Rb no tienen un enorme peso dentro de la masa total, pero sí serán capaces de conferirle, al árido, una serie de importantes características que influirán notablemente en su comportamiento. De este modo, la presencia de cerámicos y hormigón aireado de elevada porosidad, se traducirá en una mayor absorción de agua, menor densidad, etc.

En la Figura 4.22 puede apreciarse un plano de detalle de las partículas de gran tamaño de hormigón aireado encontradas en el árido grueso. La porción de materiales cerámicos encontrados en éste puede ser apreciada en la Figura 4.20 los cuales, al igual que ocurre en el árido medio, están compuestos fundamentalmente por fracciones de ladrillo, teja y azulejo o baldosa. En la Figura 4.23, se muestran los materiales tipo Rb encontrados en el árido medio. Son lógicamente de menor tamaño pero de idénticas características que los ya explicados del árido grueso.



Figura 4.22 Partículas tipo Rb pertenecientes al árido grueso

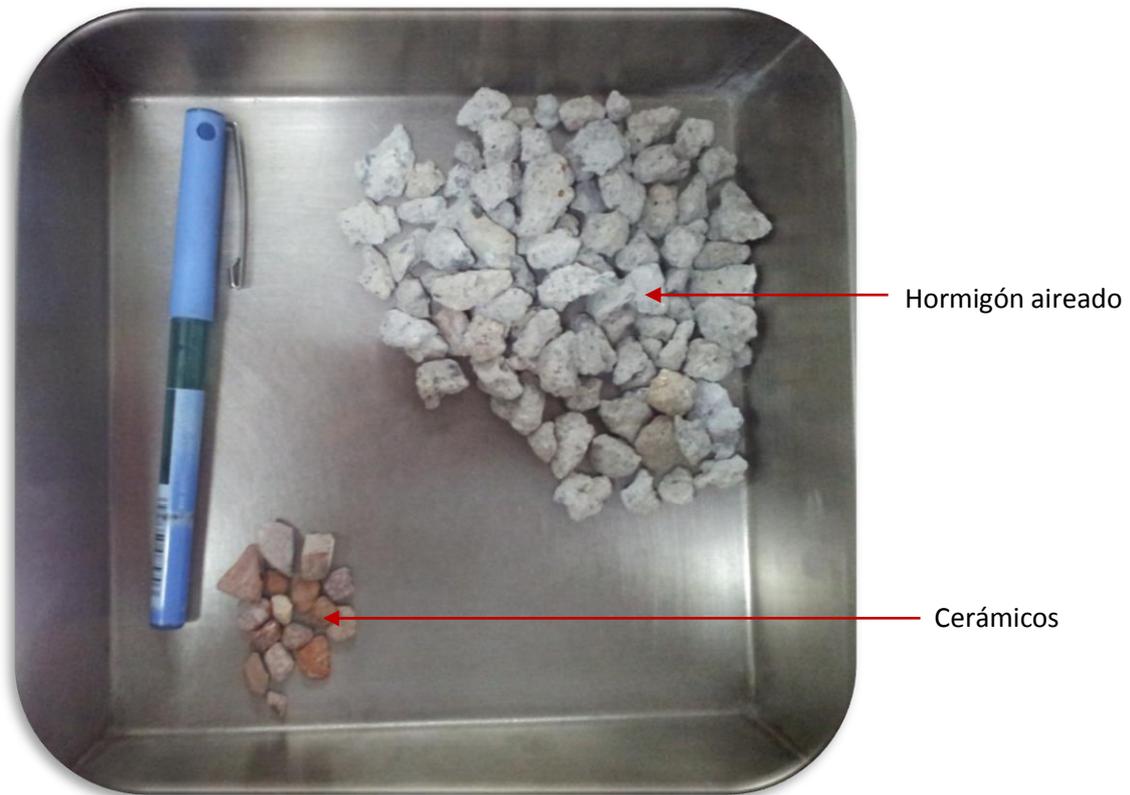


Figura 4.23 Partículas tipo Rb pertenecientes al árido medio

De forma complementaria al ensayo visual se realizaron también diversos análisis mediante difracción de rayos X lo cual permitió identificar la procedencia de algunas partículas difícilmente reconocibles a simple vista. Por ejemplo, el difractograma de rayos X de la Figura 4.24 indicó la presencia de árido granítico (cuarzo + mica + feldespato), pero en la zona de 10 a 14° (2-theta) aparecen también 2 picos bien definidos que aunque no han podido ser identificados con claridad sí se sabe que corresponden a asfaltenos u otro tipo de compuesto orgánico, por lo que con toda probabilidad queda así demostrada la presencia de partículas procedentes de un material bituminoso. De igual modo, se hallaron indicios de la presencia de escayola (el difragtograma indica una composición fundamentalmente de yeso y mezcla calcita/dolomita con una pequeña cantidad de cuarzo) (Figura 4.25); hormigón (el difragtograma muestra la presencia de granito junto con la presencia de sulfato cálcico presente en la capa superficial apreciable en el corte) (Figura 4.26); y árido calizo (el corte y difragtograma revelan que se trata de una masa homogénea de calcita con la presencia de partículas minerales de cuarzo)(Figura 4.27).

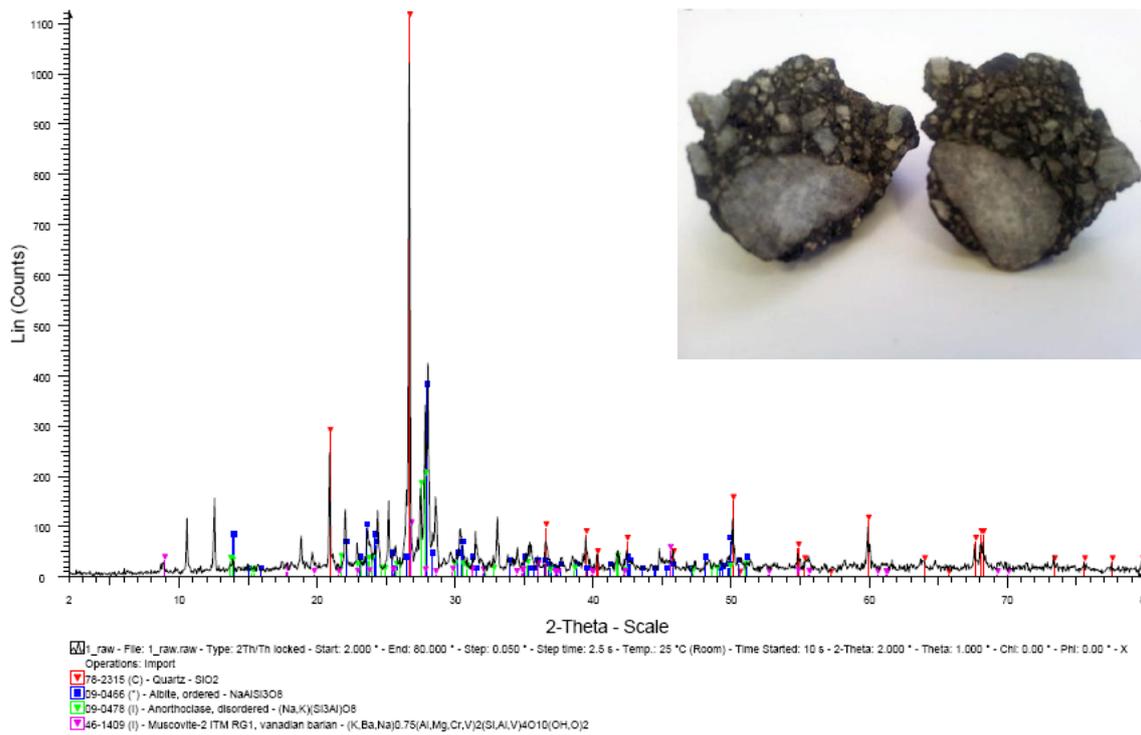


Figura 4.24 Difractograma de Rayos X de muestra hallada de material bituminoso

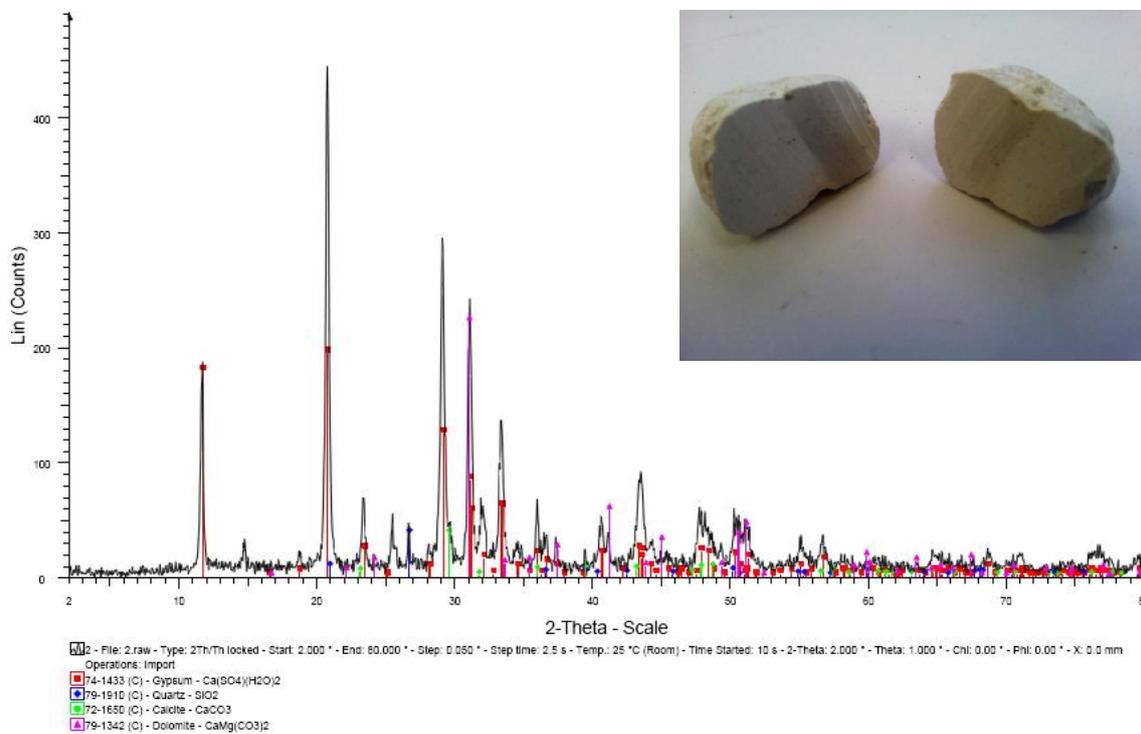


Figura 4.25 Difractograma de Rayos X de muestra hallada de escayola

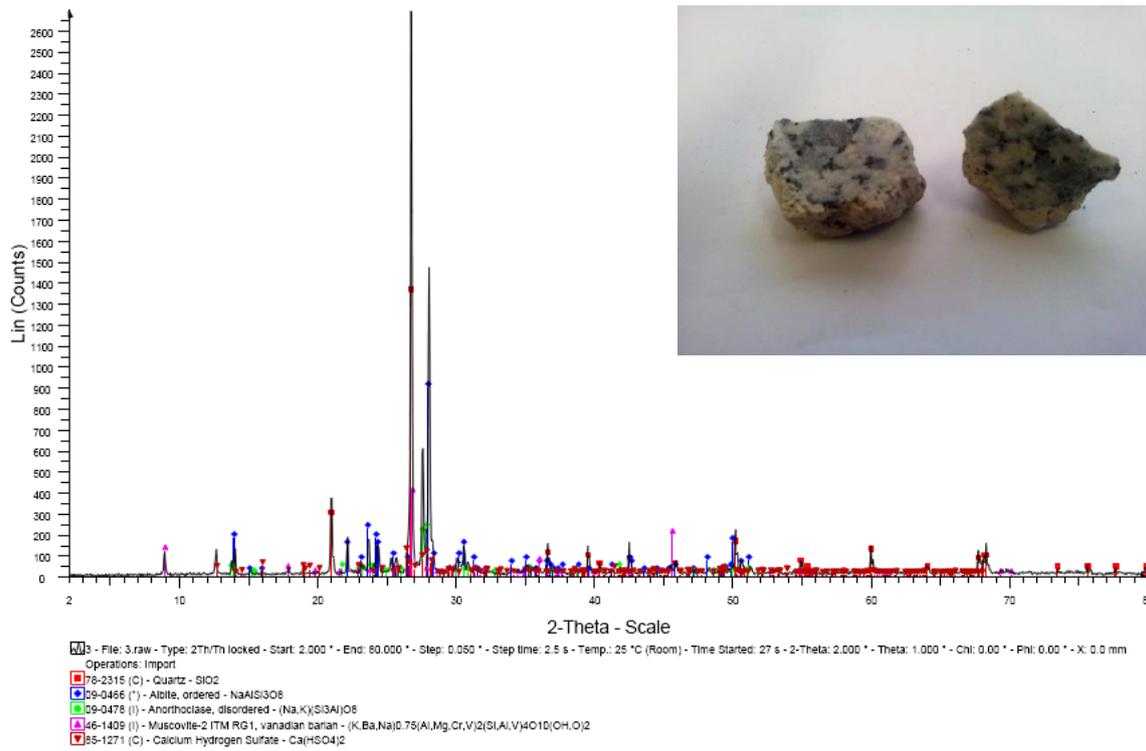


Figura 4.26 Difractograma de Rayos X de muestra hallada de hormigón

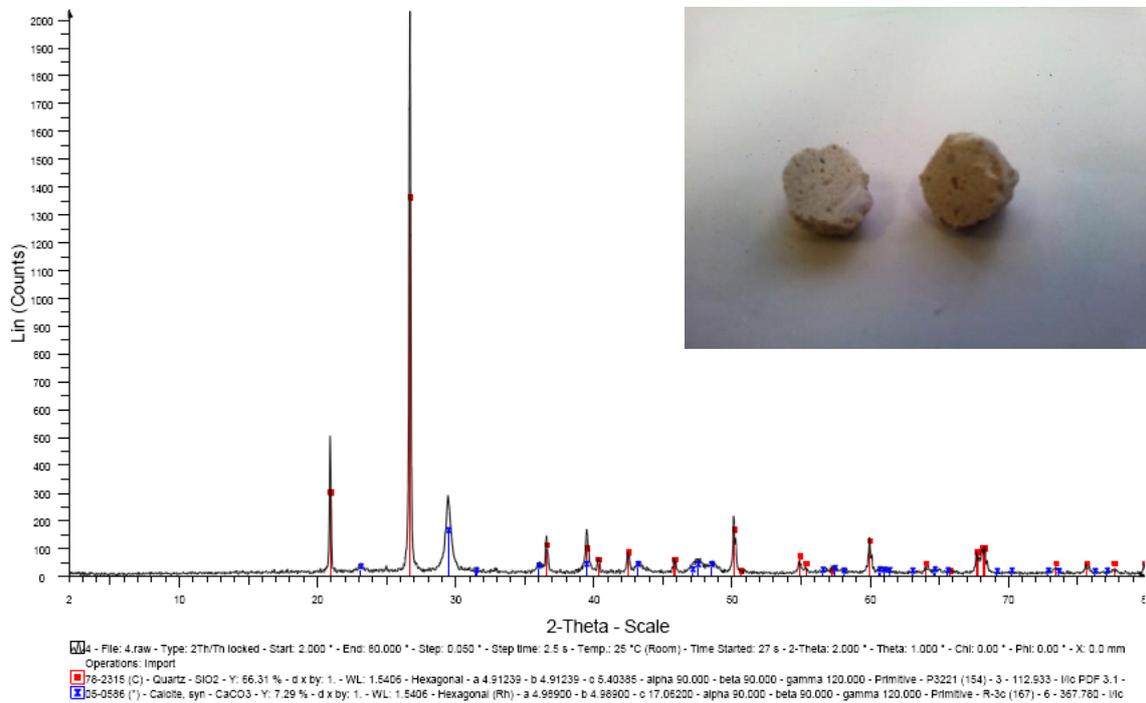


Figura 4.27 Difractograma de Rayos X de muestra hallada de árido calizo con incrustaciones de cuarzo

4.2.6 Limpieza de los finos

4.2.6.1 *Equivalente de arena*

La limpieza se estudió en primer lugar mediante el equivalente de arena, según lo establecido en la Norma UNE-EN 933-8:2000. Debido a la elevada dificultad del ensayo y con el fin de amortiguar la gran sensibilidad de los resultados a variables intrínsecas del mismo, se separaron 4 muestras de árido divididas, a su vez, en dos submuestras y se realizó el mismo ensayo sobre cada una de las 8 submuestras (Tabla 4.9).

Tal y como indica la Norma, se desecharon los resultados de aquellas muestras en las que los valores obtenidos para ambas submuestras difiriesen en más de 4 puntos. Éste es el caso de las muestras 2 y 4. Para corroborar los resultados de las muestras válidas, se realizó una quinta muestra dividida, a su vez, en tres submuestras. Los tres resultados fueron aptos y en consonancia con los obtenidos anteriormente por lo que el valor definitivo del equivalente de arena se calculó como el promedio de los resultados obtenidos para las muestras 1, 3 y 5. A la vista de los resultados, se puede observar como las submuestras 2-A y 4-B, pese a no haberlas podido tener en cuenta, produjeron resultados muy parecidos a los aptos. El equivalente resultante es, por tanto, de 77.

Tabla 4.9 Equivalentes de arena obtenidos para el árido fino reciclado

Muestra	Submuestra	Equivalente	Equivalente medio
1	1-A	77,1	77,2
	1-B	77,3	
2	2-A	74,0	No Válido
	2-B	68,5	
3	3-A	80,3	79,7
	3-B	79,1	
4	4-A	84,1	No Válido
	4-B	73,8	
	5-A	74,4	
5	5-B	73,1	74,1
	5-C	74,9	
EQUIVALENTE DE ARENA TOTAL			77,0

4.2.6.2 Azul de metileno

También se obtuvo el valor de azul de metileno mediante la aplicación de la Norma UNE-EN 933-9:2010. De dicho ensayo se extrajo un valor de 1,3 gramos de colorante por kilogramo de fracción granulométrica 0/2 mm.

4.2.7 Resistencia a la fragmentación del árido grueso

Para cuantificar la resistencia a la fragmentación del árido reciclado, se sometieron 4 muestras del mismo al ensayo de Los Angeles para finalmente estimar el correspondiente Coeficiente de Los Angeles como valor promedio de los cuatro.

Para cumplir la Norma UNE-EN 1097-2:2010, las muestras de ensayo, de 5 kg y con un tamaño de árido máximo y mínimo de 14 mm y 10 mm respectivamente, se obtuvieron tras reducir mediante cuarteo, muestras primitivas de 15 kg cada una, con la siguiente granulometría: 5 kg para la fracción 10/11,2 mm; 5 kg para la fracción 11,2/12,5 mm; y 5 kg para la fracción 12,5/14 mm. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 4.10.

Tal y como indica la Norma, el Coeficiente LA debe aproximarse al entero más próximo por lo que en este caso, se concluye que dicho valor es de 38.

Tabla 4.10 Valores obtenidos de Coeficientes de Los Angeles para el árido reciclado

Muestra	Coeficiente de Los Angeles
1	36,28
2	38,15
3	37,26
4	38,33
LA promedio	37,51

4.3 Caracterización del árido natural

4.3.1 Granulometría

El árido natural se ha recibido dividido en cinco fracciones (d/D) diferentes: 0/2 mm, 2/6,3 mm, 6,3/12,5 mm, 10/16 mm y 16/32 mm empaquetados en sacos plásticos. Para la determinación de la granulometría se han seguido los mismos pasos descritos en el apartado 4.2.1, según Norma UNE-EN 933-1. Para cumplir las masas mínimas de ensayo que han de tener las muestras, se realizaron, correspondientemente, muestras de 208,9 g, 476,5 g, 1,912 kg, 2,745 kg y 10,184 kg. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.11 y en las Figuras Figura 4.28 y Figura 4.29.

Tabla 4.11 Porcentajes pertenecientes a cada fracción granulométrica de las muestras de árido natural

Fracción granulométrica	0/2		2/6,3		6,3/12,5		10/16		16/32	
	%	% acum.	%	% acum.	%	% acum.	%	% acum.	%	% acum.
31,5/40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25/31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,69
20/25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,06	18,75
16/20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,71	16,71	34,39	53,14
12,5/16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,82	67,53	31,13	84,28
10/12,5	0,00	0,00	0,00	0,00	3,91	3,91	24,56	92,10	14,14	98,41
8/10	0,00	0,00	0,00	0,00	39,54	43,45	6,73	98,83	1,05	99,46
6,3/8	0,00	0,00	0,15	0,15	32,80	76,26	0,45	99,28	0,17	99,63
5/6,3	0,00	0,00	2,94	3,09	19,32	95,58	0,19	99,47	0,06	99,70
4/5	0,00	0,00	30,65	33,73	1,90	97,48	0,05	99,52	0,01	99,71
2/4	0,73	0,73	63,01	96,74	0,72	98,20	0,17	99,69	0,02	99,73
1/2	18,00	18,73	2,06	98,80	0,43	98,63	0,09	99,78	0,01	99,73
0,500/1	26,44	45,16	0,39	99,19	0,37	99,00	0,04	99,82	0,01	99,74
0,250/0,500	25,88	71,05	0,26	99,44	0,42	99,42	0,04	99,86	0,02	99,77
0,125/0,250	16,88	87,93	0,21	99,66	0,27	99,69	0,04	99,90	0,06	99,82
0,063/0,125	11,74	99,66	0,30	99,96	0,27	99,96	0,08	99,99	0,14	99,96
0/0,063	0,34	100,00	0,04	100,00	0,04	100,00	0,01	100,00	0,04	100,00

Como puede observarse, en este caso, las fracciones se encuentran bien cribadas y los tamaños máximos y mínimos se corresponden con los indicados por el proveedor. No obstante, se han encontrado, mediante el lavado, elevadas cantidades de finos

menores a 0,063 mm en casi todas las fracciones llegando a ser de un 14,8% en la fracción 0/2 mm.

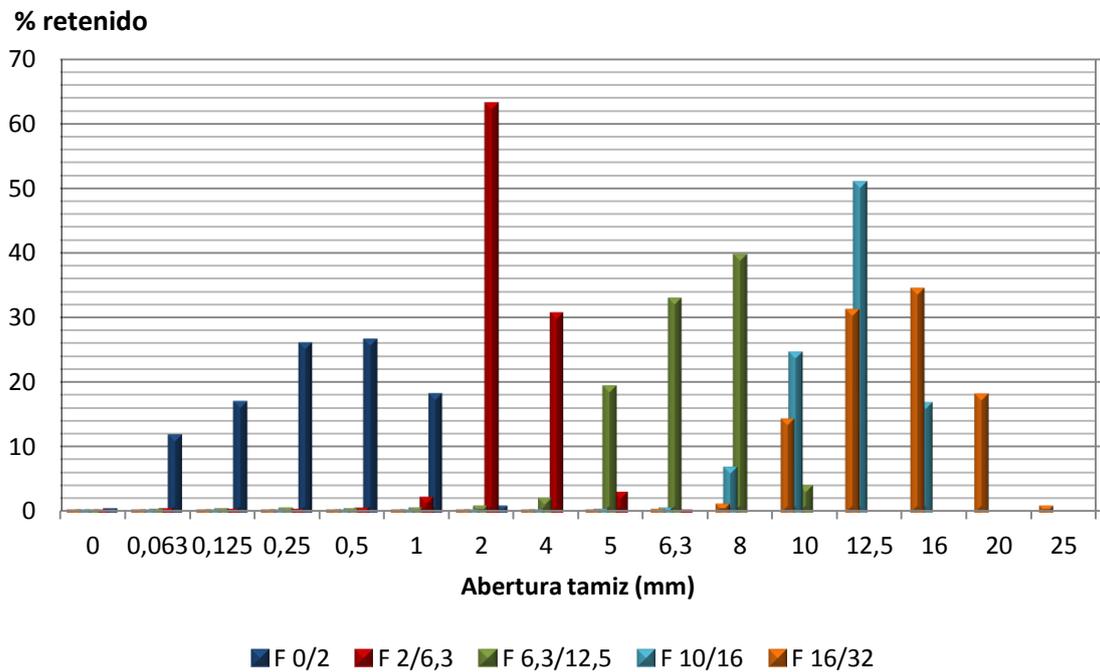


Figura 4.28 Porcentajes (5) retenidos en cada tamiz (abertura en mm) para cada una de las muestras de árido natural (d/D mm)

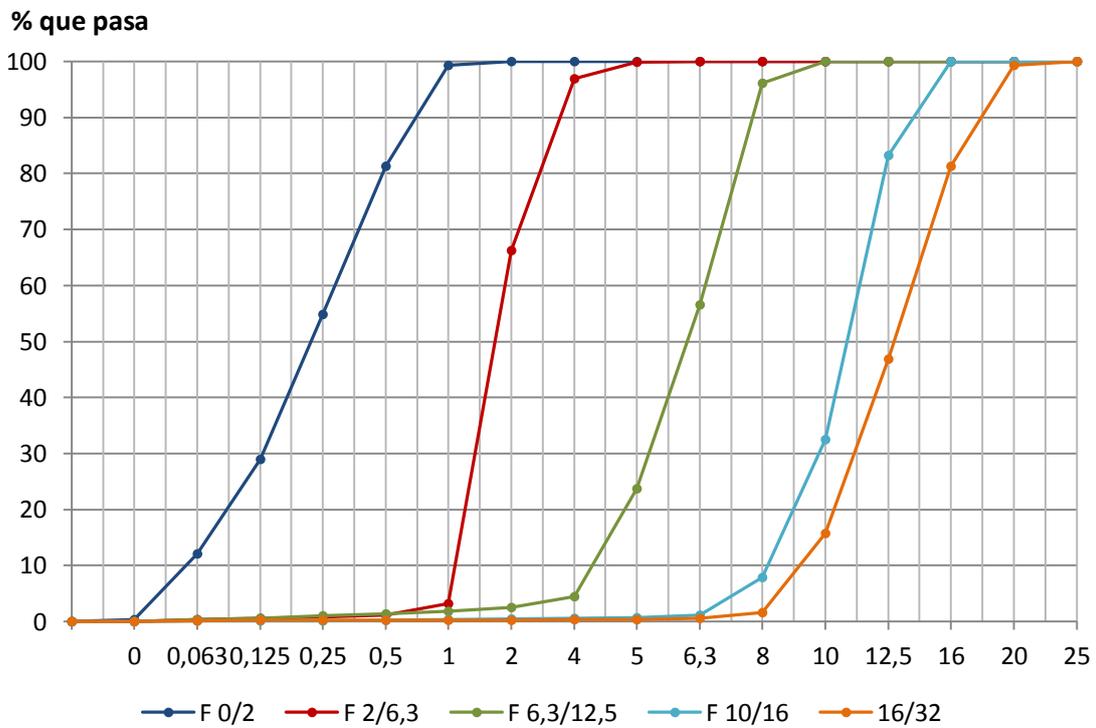


Figura 4.29 Porcentajes acumulados (5) que pasan por cada tamiz (abertura en mm) para cada una de las muestras de árido natural (d/D mm)

4.3.2 Granulometría e Índice de Lajas

El contenido de lasijas se determinó nuevamente según la Norma UNE-EN 933-3. Se aprecia en la Tabla 4.12 y Figura 4.30 como la mayoría de valores, rondan el 20% de lasijas. Llama la atención el 100% que sale para la fracción 2/6,3 en el uso granulométrico 6,3/8 mm. No obstante, se debe señalar que la muestra recogida por el tamiz de abertura 6,3 mm solamente consistía en una partícula de 0,7 g que resultó ser una lasija, por lo que el resultado no es, ni mucho menos, representativo. Lo mismo ocurre con la fracción 10/16 mm en el uso 4/5 mm, cuya masa recogida suponía tan solo el 0,05% de la masa total de la muestra.

Tabla 4.12 Índices de lasijas totales y según fracción granulométrica del árido natural

Fracción granulométrica	2/6,3	6,3/12,5	10/16	16/32
25/31,5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
20/25	0,0%	0,0%	0,0%	22,8%
16/20	0,0%	0,0%	17,1%	17,0%
12,5/16	0,0%	0,0%	14,0%	14,7%
10/12,5	0,0%	24,9%	17,9%	13,6%
8/10	0,0%	20,4%	21,0%	25,2%
6,3/8	100,0%	20,4%	28,5%	27,0%
5/6,3	22,6%	19,7%	18,9%	27,4%
4/5	25,5%	24,1%	57,1%	33,3%
TOTAL	25,6%	20,5%	16,1%	16,8%

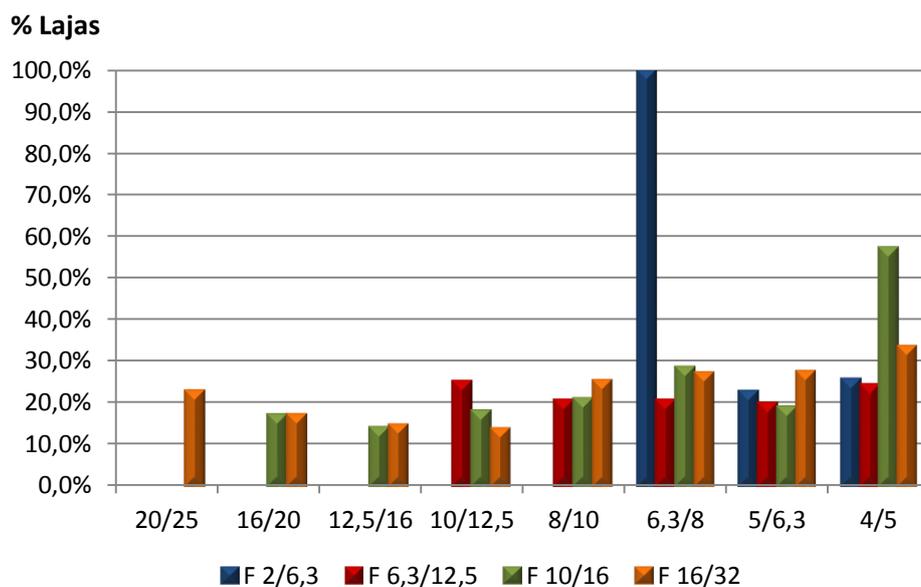


Figura 4.30 Índices de lasijas según fracción granulométrica del árido natural

4.3.3 Caras de fractura

Siguiendo la Norma UNE-EN 933-5, solamente se ensayaron las partículas que pudiesen quedar retenidas por un tamiz de abertura igual a 4 mm. Por ello, la fracción 0/2 mm quedó descartada desde un principio, realizando el ensayo únicamente sobre las demás. Las masas de las muestras de ensayo fueron de 157,3 g para la fracción 2/6,3 mm; de 1849,4 para la fracción 6,2/12,5 mm; de 2719,7 g para la fracción 10/16 mm; y de 10.040,4 gr para la fracción 16/32 mm. De este modo, se sobrepasaron, con creces, las masas mínimas establecidas por la Norma (0,1 kg; 0,6 kg; 1 kg; 6 kg respectivamente). Los resultados obtenidos para cada fracción granulométrica se muestran en la Figura 4.31, Tabla 4.13, Tabla 4.14 y Tabla 4.15.

Como se puede observar, el porcentaje de partículas trituradas (sin discernir entre total o parcialmente trituradas) es de un 91,6% para la fracción 2/6,3 mm; de un 98,0% para la fracción 6,3/12,5 mm; de un 91,6% para la fracción 10/16 mm y de un 94,6% para la fracción 16/32 mm. Además, se aprecia como en todo caso, las partículas totalmente trituradas conforman el grupo mayoritario con el 48,1%, 55,6%, 54,6% y 52,5% respectivamente de las masas totales, cumpliéndose así, las exigencias del PG-3 para cualquier tipo de capa en tráfico T3 y T4 y hasta T0 en capas de base e intermedias.

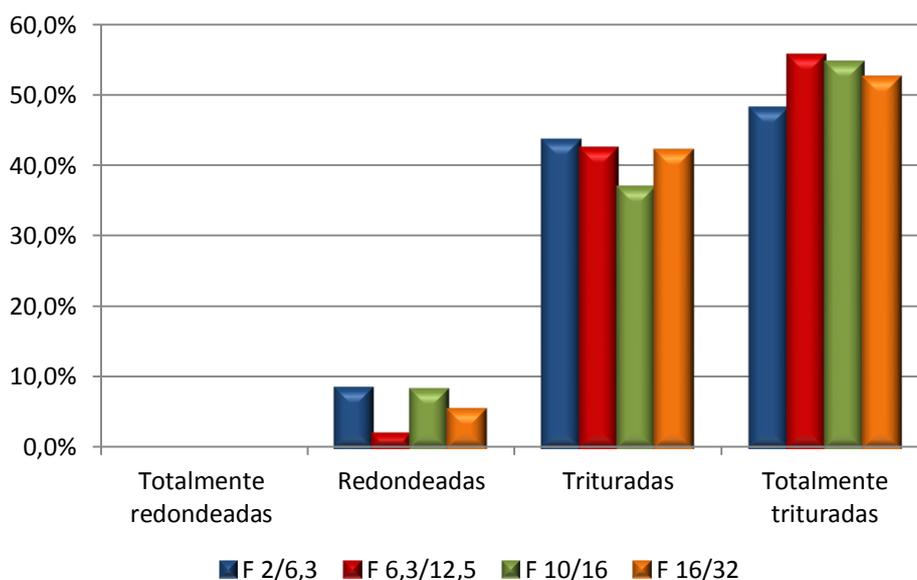


Figura 4.31 Porcentajes de cada tipo de partículas según el contenido en caras de fractura para cada fracción granulométrica del árido natural

Tabla 4.13 Masa (g) y porcentajes de cada tipo de partículas según el contenido en caras de fractura para cada fracción granulométrica del árido natural 2/6,3 mm

Fracción granulom.	Masa total	Totalmente redondeadas		Redondeadas		Trituradas		Totalmente trituradas	
6,3/8	0,7	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0,7	100%	0,0	0,0%
5/6,3	13,8	0,0	0,0%	1,1	8,0%	5,2	37,7%	7,5	54,3%
4/6,3	142,8	0,0	0,0%	12,2	8,5%	62,5	43,8%	68,1	47,7%
TOTAL	157,3	0,0	0,0%	13,3	8,5%	68,4	43,5%	75,6	48,1%

Tabla 4.14 Masa (g) y porcentajes de cada tipo de partículas según el contenido en caras de fractura para cada fracción granulométrica del árido natural 6,3/12,5 mm

Fracción granulom.	Masa total	Totalmente redondeadas		Redondeadas		Trituradas		Totalmente trituradas	
10/12,5	74,1	0,0	0,0%	4,6	6,2%	25,3	34,1%	44,2	59,6%
8/10	750,6	0,0	0,0%	17,1	2,3%	351,3	46,8%	382,2	50,9%
6,3/8	622,7	0,0	0,0%	5,6	0,9%	227,8	36,6%	389,3	62,5%
5/6,3	366,5	0,0	0,0%	7,9	2,2%	169,8	46,3%	188,8	51,5%
4/6,3	35,5	0,0	0,0%	1,4	3,9%	10,5	29,6%	23,6	66,5%
TOTAL	1849,4	0,0	0,0%	36,6	2,0%	784,7	42,4%	1028,1	55,6%

Tabla 4.15 Masa (g) y porcentajes de cada tipo de partículas según el contenido en caras de fractura para cada fracción granulométrica del árido natural 10/16 mm

Fracción granulom.	Masa total	Totalmente redondeadas		Redondeadas		Trituradas		Totalmente trituradas	
16/20	456,9	0,0	0,0%	40,1	8,8%	202,6	44,3%	214,2	46,9%
12,5/16	1388,6	0,0	0,0%	122,7	8,8%	493,8	35,6%	772,1	55,6%
10/12,5	671,4	0,0	0,0%	53,1	7,9%	209,1	31,1%	409,2	60,9%
8/10	184,0	0,0	0,0%	10,2	5,5%	96,3	52,3%	77,5	42,1%
6,3/8	12,3	0,0	0,0%	0,5	4,1%	3,9	31,7%	7,9	64,2%
5/6,3	5,1	0,0	0,0%	0,2	3,9%	0,8	15,7%	4,1	80,4%
4/6,3	1,4	0,0	0,0%	0,3	21,4%	0,5	35,7%	0,6	42,9%
TOTAL	2719,7	0,0	0,0%	227,1	8,4%	1007,0	37,0%	1485,6	54,6%

Tabla 4.16 Masa (g) y porcentajes de cada tipo de partículas según el contenido en caras de fractura para cada fracción granulométrica del árido natural 16/32 mm

Fracción granulom.	Masa total	Totalmente redondeadas		Redondeadas		Trituradas		Totalmente trituradas	
25/31,5	69,4	0,0	0,0%	0,0	0,0%	69,4	100%	0,0	0,0%
20/25	1819,1	0,0	0,0%	94,7	5,2%	740,1	40,7%	984,3	54,1%
16/20	3462,7	0,0	0,0%	271,0	7,8%	1332,0	38,5%	1859,7	53,7%
12,5/16	3135,2	0,0	0,0%	95,5	3,0%	1396,6	44,5%	1643,1	52,4%
10/12,5	1423,5	0,0	0,0%	73,8	5,2%	630,1	44,3%	719,6	50,6%
8/10	105,8	0,0	0,0%	6,7	6,3%	51,4	48,6%	47,7	45,1%
6,3/8	17,0	0,0	0,0%	2,1	12,4%	6,9	40,6%	8,0	47,1%
5/6,3	6,2	0,0	0,0%	1,0	16,1%	1,7	27,4%	3,5	56,5%
4/6,3	1,5	0,0	0,0%	0,1	6,7%	0,6	40,0%	0,8	53,3%
TOTAL	10040,4	0,0	0,0%	544,9	5,4%	4228,8	42,1%	5266,7	52,5%

4.3.4 Densidad y absorción

En este caso, se ha seguido igualmente la Norma UNE-EN 1097-6:2000. Como el procedimiento a seguir varía según los áridos sean mayores o menores de 4 mm, ha sido necesario dividir la fracción 2/6,3 mm en dos de 2/4 mm y 4/6,3 mm respectivamente. Para cada fracción, se separaron dos muestras y se ensayaron obteniéndose los resultados recogidos en la Tabla 4.17.

Llama la atención especialmente la baja absorción del árido natural (en torno a un 0,5%), sobre todo en comparación con los valores obtenidos para el árido reciclado (en torno a un 7%) (Tabla 4.17), lo cual conduce a una menor diferencia entre los valores de los distintos tipos de densidades estudiadas, los cuales se sitúan ligeramente por debajo de los 2,8 Mg/m³.

4.3.5 Limpieza de los finos

4.3.5.1 Equivalente de arena

En este caso, se realizaron tres ensayos, cada uno de ellos, con dos submuestras tal y como se establece en la Norma UNE-EN 933-8:2000. En los tres casos, los valores obtenidos para ambas submuestras difirieron en menos de 4 puntos (Tabla 4.18) por los que todos ellos se consideraron válidos. Finalmente, se calculó el Equivalente de Arena

como media de los resultados y redondeando al entero más próximo, obteniendo un valor de 78, es decir, prácticamente idéntico al obtenido para los áridos reciclados y por tanto, perfectamente válidos según las especificaciones del PG-3.

Tabla 4.17 Densidades y absorciones del árido natural

Muestra	Densidad aparente (Mg/m ³)	Densidad seca (Mg/m ³)	Densidad SSS (Mg/m ³)	Absorción
16/32 D1	2,78	2,75	2,76	0,45%
16/32 D2	2,78	2,75	2,76	0,40%
Media 16/32 mm	2,78	2,75	2,76	0,42%
10/16 D1	2,77	2,74	2,75	0,44%
10/16 D2	2,78	2,74	2,76	0,46%
Media 10/16 mm	2,78	2,74	2,75	0,45%
6,3/12,5 D1	2,79	2,75	2,77	0,56%
6,3/12,5 D2	2,78	2,73	2,75	0,65%
Media 6,3/12,5 mm	2,79	2,74	2,76	0,60%
4/6,3 D1	2,78	2,73	2,74	0,64%
4/6,3 D2	2,78	2,73	2,75	0,62%
Media 4/6,3 mm	2,78	2,73	2,74	0,63%
2/4 D1	2,78	2,72	2,74	0,76%
2/4 D2	2,75	2,70	2,72	0,77%
Media 2/4 mm	2,76	2,71	2,73	0,76%
0/2 D1	2,75	2,74	2,74	0,20%
0/2 D2	2,80	2,78	2,79	0,16%
Media 0/2 mm	2,77	2,76	2,76	0,18%

Tabla 4.18 Equivalentes de arena obtenidos para el árido fino natural

Muestra	Submuestra	Equivalente	Equivalente medio
1	1-A	79,1	78,5
	1-B	77,9	
2	2-A	76,3	77,4
	2-B	78,4	
3	3-A	76,5	76,7
	3-B	76,9	
EQUIVALENTE DE ARENA TOTAL			77,5

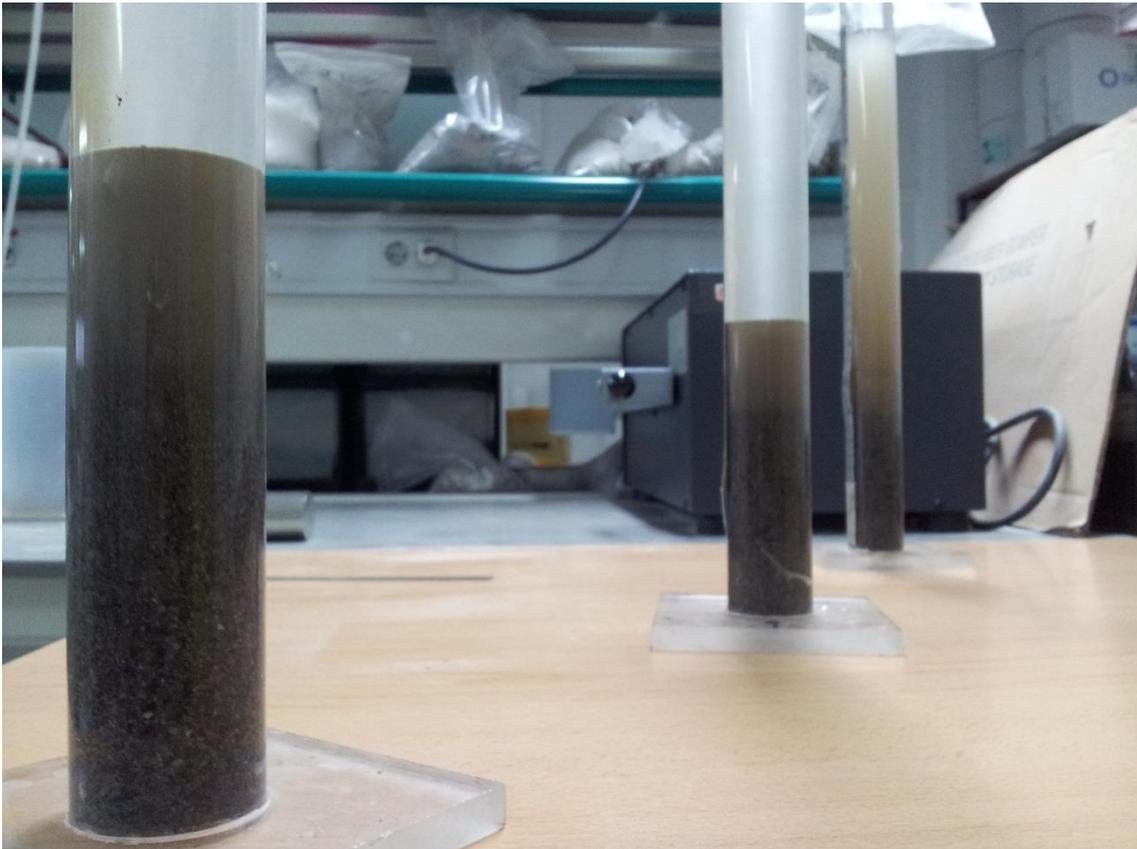


Figura 4.32 Aspecto de los ensayos de equivalente de arena en distintas fases del proceso

4.3.5.2 Azul de metileno

Del ensayo de azul de metileno se extrajo un valor de 1,6 gramos de colorante por kilogramo de fracción granulométrica 0/2 mm.

4.3.6 Resistencia a la fragmentación del árido grueso

Para estimar la resistencia a la fragmentación del árido grueso natural, se realizó el ensayo de Los Angeles sobre tres submuestras de 5 kg obtenidas mediante cuarteo a partir de muestras de 15 kg, de igual modo que para el caso de los áridos reciclados. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.19.

Tal y como indica la Norma, se debe redondear el coeficiente obtenido al número entero más próximo, por lo que se concluye que en este caso, el coeficiente de

Los Angeles del árido natural es de 14, configurando un árido apto, según lo establecido en el PG-3, para todo tipo de capas y categorías de tráfico.

Tabla 4.19 Valores obtenidos del coeficiente de Los Angeles para el árido natural

Muestra	Coefficiente de Los Angeles
1	14,06
2	13,35
3	14,14
LA promedio	13,85



Figura 4.33 Aspecto de una muestra de ensayo de árido natural antes de ser sometida al test de Los Angeles



Figura 4.34 Aspecto de una muestra de ensayo de árido natural tras ser sometida al test de Los Angeles

4.4 Contraste de resultados

En la Tabla 4.20 se recopilan los principales datos obtenidos de la caracterización de los áridos naturales y reciclados, los cuales se comentan a continuación.

Tabla 4.20 Resumen de propiedades de los áridos naturales y reciclados

Propiedad	-----Árido reciclado-----			-----Árido natural-----				
	0/6 mm	6/12 mm	12/32 mm	0/2 mm	2/6,3 mm	6,3/12,5 mm	10/16 mm	16/32 mm
Humedad natural	2,5%	2,9%	3,7%	0,2%	0,4%	0,1%	0,1%	0,3%
Índice de Lajas	-	5,4%	3,5%	-	25,6%	20,5%	16,1%	16,8%
% Part. trituradas	-	88,9%	89,6%	-	91,6%	98,0%	91,6%	94,6%
Densidad aparente	2,70	2,63	2,60	2,77	2,77	2,79	2,78	2,78
Densidad seca	2,23	2,25	2,22	2,76	2,72	2,74	2,74	2,75
Den. Sat. y sup. seca	2,41	2,39	2,37	2,76	2,73	2,76	2,75	2,76
Absorción	7,7%	6,6%	6,7%	0,18%	0,69%	0,60%	0,45%	0,42%
Equivalente Arena	-----77-----			-----78-----				
Coefic. Los Angeles	-----38-----			-----14-----				

4.4.1 Índice de Lajas

El PG-3, en su Artículo 541 - Mezclas bituminosas en frío, el cual se encuentra derogado y sin vigencia a día de hoy, establecía un Índice de Lajas máximo de 35 para todas las fracciones granulométricas excepto la 25/40 mm, para la cual permitía hasta un valor de 40. En el Artículo 514 – Grava-emulsión (también derogado) ni siquiera se hacía referencia a las lajas y en el Artículo 542 – Mezclas bituminosas en caliente (éste sí en vigor) se establecen los valores máximos recogidos en la Tabla 4.21. Por su parte, la ATEB fija en su pliego de grava-emulsión (ATEB, ref. b) un valor de 30 para carreteras con tráfico pesado T2 o superior y 35 en los demás casos.

Los resultados concuerdan con los obtenidos por otros autores como Jiménez et al. (2011) o Pérez et al. (2007), no solo en la magnitud de las cifras sino en que a mayores cantidades de árido natural y/o menores de hormigón, mayor es el índice de lajas total. Como se puede apreciar, el árido reciclado cumple perfectamente para cualquier tipo de capa y categoría de tráfico pesado. Sin embargo, es el árido natural el que presenta más problemas, sobre todo en la fracción 2/6,3 mm, la cual no sería válida para mezclas en caliente y tráfico T00, T0 y T1. No obstante, sería totalmente aplicable en mezclas en frío.

Tabla 4.21 Valores máximos de Índice de Lajas permitidos por el PG-3 para mezclas bituminosas en caliente

Tipo de mezcla	Categoría de tráfico pesado				
	T00	T0 y T1	T2	T3 y arcenes	T4
Densa, semidensa y gruesa	≤ 20	≤ 25	≤ 30		≤ 35
Drenante	≤ 20	≤ 25		≤ 25	

4.4.2 Caras de fractura

El PG-3 establecía antiguamente unos porcentajes mínimos de partículas trituradas del 50% para grava-emulsión, un 75% para mezclas en frío y los valores recogidos en la Tabla 4.22 para mezclas en caliente (estos últimos todavía vigentes). Además, la ATEB (ATEB, ref. b) recomienda que dichos porcentajes para grava-emulsión sean del 90% para tráfico T2 o superior, 75% para T3 y 50% para T4. Por tanto, ambos tipos de árido son aplicables en mezclas frías e incluso también de práctica aplicabilidad en mezclas en caliente con categorías de tráfico pesado T2, T3 y T4.

Tabla 4.22 Proporción de partículas trituradas del árido grueso exigida por el PG-3 para su uso en mezclas bituminosas en caliente (% en masa)

Tipo de capa	Categoría de tráfico pesado				
	T00	T0 y T1	T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura	100	100	100	≥ 90	≥ 75
Intermedia	100	100	≥ 90	≥ 90	≥ 75
Base	100	≥ 90	≥ 75	≥ 75	

Señalar también que con respecto a otras publicaciones, como Jiménez et al. (2011), los valores hallados en este caso son bastante elevados y por tanto, de buena calidad en lo que a caras de fractura se refiere.

4.4.3 Densidad y absorción

Ninguno de estos parámetros se encuentra regulado ni en el PG-3 ni en los pliegos de la ATEB (ATEB, ref. a y b). No obstante, sí son factores de gran importancia a la hora de dosificar y encontrar una fórmula de trabajo óptima.

Como se puede apreciar, en general, los áridos reciclados pueden llegar a mostrar absorciones de hasta 15 veces mayores que la de los áridos naturales, fundamentalmente debido a la gran cantidad de mortero adherido al árido y a su elevada porosidad, lo cual sigue la línea ya descrita por mencionados autores como Poon y Chan (2006), Gómez-Soberón (2002) o Gokce et al. (2011). Dichos condicionantes provocan, de este modo, que aunque ambos tipos de árido muestran en principio densidades aparentes similares (aunque siempre inferiores con RCD), una vez que se extrae toda la humedad y se calcula la densidad seca, los valores difieren sensiblemente. Este hecho, será de especial relevancia a la hora de dosificar las mezclas en frío, puesto que en planta, los áridos no suelen ser secados antes de su incorporación a las mezclas, siendo especialmente difícil determinar la cantidad final de agua (agua de la emulsión + agua de aportación + humedad de los áridos) contenida en las mismas. No obstante, el hecho de que sus densidades secas sean diferentes, indica *a priori*, que el comportamiento mecánico y químico del árido reciclado será también peor que el del árido natural (Li, 2004; Shen y Du, 2005).

4.4.4 Limpieza de los finos

4.4.4.1 Equivalente de arena

Los valores de 77 para el árido reciclado y 78 para el árido natural cumplen sobradamente todos los valores especificados: 45 según el Artículo 514 del PG-3 referente a grava-emulsión; 40 para capas de base y 45 para capas intermedias y de rodadura según el Artículo 541 de mezclas bituminosas en frío; 50 según el Artículo 542 de mezclas bituminosas en caliente; y 45 para tráfico T2 o superior, 40 para T3 y 35 para los demás casos según el pliego de grava-emulsión de la ATEB (ATEB, ref. b).

Los valores hallados son superiores a los publicados por autores como Jiménez et al. (2011) o Pérez et al. (2007) pero también ligeramente inferiores a los de otros investigadores como Gómez-Soberón (2002), cuyos equivalentes de arena superaban el 93% tanto para áridos naturales como para reciclados.

4.4.4.2 Azul de metileno

El antiguo PG-3 no recoge ningún tipo de límite para el azul de metileno, ni en el artículo de grava-emulsión ni en el de mezclas bituminosas en frío. Por el contrario sí se establece un límite máximo de 10 para áridos empleados en mezclas bituminosas en caliente cuando estos no cumplen los límites del equivalente de arena. Tanto el árido reciclado (1,3) como el natural (1,6) cumplen sobradamente esta condición.

4.4.5 Resistencia a la fragmentación

Según el antiguo PG-3, el coeficiente de Los Angeles de los áridos en grava-emulsión será inferior a 30 para bases de tráfico pesados y medios y a 35 en el resto de los casos. En el caso de mezclas bituminosas en frío, será inferior a 30 en capas de base y a 25 en capas intermedias y de rodadura; y en el caso de mezclas en caliente, los valores máximos se recogen en la Tabla 4.23. Finalmente, el pliego de la ATEB de grava-emulsión (ATEB, ref. b) establece unos valores de 30 para calzadas T2 o superior y 35 para el resto de casos, si bien permite un LA de 40 en el caso de empleo del huso granulométrico GE3, solamente aplicable en carreteras cuya intensidad media diaria de vehículos pesados es inferior a 10.

Como se puede apreciar, el árido natural (LA=13,85) cumple todas y cada una de las mencionadas restricciones, mientras que el árido reciclado (LA=37,51) no cumple apenas ninguna. No obstante, se debe mencionar que los resultados no son anómalos en absoluto, sobre todo a la vista de los presentes en otras publicaciones: 31 (Melbouci, 2009), entre 27 y 35 (Zaharieva et al., 2003), 37 (Vegas et al., 2008), 32,9 y 43,6 (Park, 2003), 33,5 (Etxeberria, 2007), 40,8 (Shen y Du, 2005), 43 (Mills-Beale y You (2010), entre 31 y 41 (Jiménez el al., 2011) o 39,65 (Pérez et al., 2007).

Tabla 4.23 Coeficiente máximo de desgaste Los Angeles permitido por el PG-3 para el árido grueso

Tipo de capa	Categoría de tráfico pesado			
	T00 y T0	T1 y T2	T3 y arcenes	T4
Rodadura drenante	≤ 15	≤ 20	≤ 25	-
Rodadura convencional	≤ 20	≤ 25	≤ 25	≤ 25
Intermedia	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 25
Base	≤ 25	≤ 30	≤ 30	≤ 30

CAPÍTULO 5

**DISEÑO DE LAS MEZCLAS Y
FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS**

5.1 Introducción

En el presente Capítulo se reúnen todos los aspectos de diseño que fueron considerados a la hora de definir la mezcla objeto de estudio (como el tipo de mezcla en frío, granulometría de trabajo y tipo de emulsión a emplear), así como el proceso de fabricación con el que se elaborarían todas las probetas ensayadas durante la realización de la presente investigación.

Debido a la falta de normativa específica para la realización de ensayos sobre mezclas en frío, se ha desarrollado un nuevo protocolo de fabricación de probetas que permite obtener muestras con idénticas propiedades intrínsecas (como huecos, densidad, modificación de la granulometría tras mezclado y compactación, contenido de agua tras compactación y curado, etc.) independientemente de las dimensiones de las probetas y del ensayo para el cual hayan sido concebidas, lo cual será de una enorme utilidad a la hora de correlacionar los resultados de diferentes ensayos. Dicho método está basado en la compactación estática, por ser el más adecuado para mezclas en frío, presente además en Normas como la NLT-161 y NLT-162 de frecuente aplicación en ensayos de este tipo de mezclas (ATEB, ref. a y b). El método ha sido respaldado por un análisis estadístico para comprobar la aplicabilidad, universalidad y estabilidad del mismo ante diferentes tipos mezcla.

5.2 Elección del tipo de mezcla

La técnica de los firmes en frío abarca diferentes materiales en función de factores, como la granulometría o el tipo de ligante empleado (lechadas bituminosas, microaglomerados en frío, mezclas abiertas en frío, reciclados con emulsión, etc.).

Dado que no existen investigaciones sobre ningún otro tipo de mezcla en frío con RCD, se creyó conveniente iniciar dicha línea de investigación con el empleo de un tipo de mezcla que sea lo más versátil posible para diferentes usos y tipos de capa (preferiblemente, evitando aquellas que se usan exclusivamente en capas de rodadura por la baja resistencia al pulimento de los RCD). Además, dado que los RCD son menos resistentes mecánicamente, sería bueno elegir una tipología que de por sí suela ofrecer buenos comportamientos estructurales. Finalmente, también sería interesante la elección

de una tipología que habitualmente fuese empleada en capas gruesas de firme (como bases o subbases) y con granulometrías que recogiesen todos los husos (evitando granulometrías discontinuas como las de las mezclas abiertas). Esto permitiría el aprovechamiento de la mayor cantidad posible de los RCD producidos en otras actividades y que en caso contrario serían depositados en vertederos. La tipología que mejor satisfacía todas estas expectativas fue la grava-emulsión.

La grava-emulsión cuenta con una granulometría continua que proporciona un esqueleto mineral similar al de una zahorra artificial y transmite los esfuerzos de compresión por rozamiento interno. Los gruesos quedan además encajados por un mortero muy rico en ligante, con árido fino y agua, que rellena los huecos y dota a la mezcla de cohesión, flexibilidad e impermeabilidad. Tras una enérgica compactación y tras un determinado periodo de curado, el agua es expulsada, obteniéndose una capa con buenas propiedades estructurales.

De este modo, la grava-emulsión suele emplearse en capas inferiores de base y subbase en firmes de nueva generación. No obstante, debido a su gran versatilidad, son ideales también para usos, como capas de base en refuerzos, capas anti-remonte de fisuras, regularizaciones, ensanches o reparaciones.

Como se mencionaba, su presencia en las capas más gruesas del firme (base y subbase) y la presencia de todas las fracciones granulométricas (incluidas las finas y el polvo mineral), la hace también idónea para utilizar la mayor cantidad posible de RCD.

5.3 Elección de la granulometría

Para una correcta interpretación de los resultados y tratando de dejar únicamente dos grados de libertad (cantidad de agua y ligante) la granulometría estuvo rigurosamente controlada en todo momento. Por ello, en lugar de intentar conseguir curvas granulométricas válidas (dentro de unos determinados husos permisibles) mediante el mezclado de diferentes fracciones, directamente se han fabricado las granulometrías de cada probeta aportando la cantidad exacta de árido saliente de cada tamiz, una vez lavado y secado.

Los husos granulométricos se corresponden con los de una grava-emulsión GE1 (Tabla 5.1), por ser la única válida para categorías de tráfico pesado T3 o superior, según los pliegos técnicos de la ATEB (ATEB, ref. b). En contraposición, las granulometrías GE2 y GE3, aportan una menor capacidad estructural, siendo las últimas solamente utilizables en calzadas con intensidades medias de tráfico por debajo de 10 vehículos pesados por día.

La curva granulométrica se determinó inicialmente como la línea media entre los husos máximo y mínimo de la ATEB (ATEB, ref. b). No obstante, tras la realización de diversas extracciones de betún en probetas compactadas, se comprobó que su granulometría era diferente a la inicial, produciéndose una inestabilidad granulométrica que eleva la curva en las fracciones más finas (Figura 5.1 y Tabla 5.1). Por este motivo fue necesaria una corrección de la granulometría, aportando inicialmente una menor cantidad de finos y ajustando así la curva al límite inferior. De este modo, mientras que la curva inicial se salía fuera tras la compactación, con la curva corregida esto no ocurrió, adoptando esta nueva granulometría para la fabricación de todas las probetas.

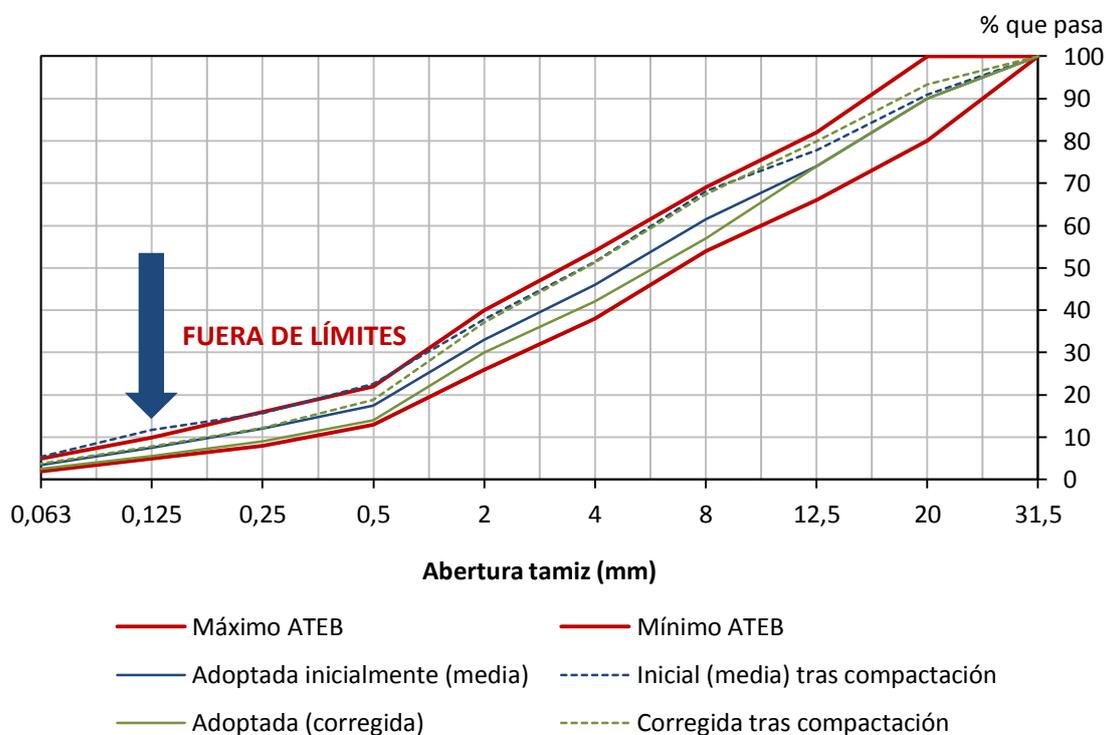


Figura 5.1 Evolución de las curvas granulométricas inicial y corregida tras la compactación

Tabla 5.1 Husos granulométricos establecidos por la ATEB para GEI. Cernido acumulado (% en masa)

Tamiz (mm)	Máximo permitido	Mínimo permitido	Adoptada Inicial	Adoptada Corregida
40	-	-	0	0
31,5	100	100	100	100
20	100	80	90	90
12,5	82	66	74	74
8	69	54	61,5	57
4	54	38	46	42
2	40	26	33	30
0,5	22	13	17,5	14
0,25	16	8	12	9
0,125	10	5	7,5	5,5
0,063	5	2	3,5	2,5

5.4 Elección de la emulsión

Se sabe también, que los áridos finos y absorbentes pueden desencadenar que las emulsiones rompan cuando se realiza el mezclado y amasado entre ambos. De hecho, la Norma UNE-EN 12848:2003 diseñada para evaluar la estabilidad de las emulsiones describe un sencillo procedimiento que básicamente consiste en mezclar 100 ml de una determinada emulsión bituminosa con 50 g de cemento CEM I, de tipo R y 150 ml de agua para luego observar la cantidad de mezcla que ha alcanzado la suficiente consistencia como para quedar retenida en un tamiz de abertura 2 mm.

Para intentar estimar si el árido fino reciclado podría, de igual modo, afectar a la rotura de la emulsión, se ha realizado el procedimiento anteriormente descrito pero siempre para una misma emulsión y esta vez mezclándola con el filler del árido natural, el filler del árido reciclado y cemento CEM I, de tipo R. Los valores de la estabilidad (S_c), que según la mencionada Norma se mide según los gramos de material retenidos en el tamiz de 2 mm fueron los recogidos en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Resultados de estabilidad de la emulsión al ser mezclada con diferentes áridos

Árido empleado	Estabilidad
Cemento CEM I - R	26,6 g
Filler reciclado	17,6 g
Filler natural	1,4 g

Tabla 5.3 Características de la emulsión empleada

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	NORMA	VALOR	CLASE
Emulsión original				
Propiedades perceptibles	--	1425	APTO	--
Temperatura	°C	N.A.	15-35	--
Contenido de ligante	%	1428	58-62	CLASE 5
Tiempo de fluencia (40 °C, 2mm)	s	12846-1	15-45	CLASE 3
Residuo (tamizado), (Tamiz 0,5 mm)	%	1429	≤ 0,1	CLASE 2
pH	--	12850	≤ 7	--
Estabilidad al almacenamiento	%	12847	≤ 10	CLASE 3
Índice de rotura	g	13075-1	120-180	CLASE 5
Adhesividad	%	13614	≥ 90	CLASE 3
Ligantes recuperados por evaporación (UNE-EN 13074-1)				
Penetración a 25 °C	0,1 mm	1426	≤ 100	CLASE 3
Punto de reblandecimiento	°C	1427	≥ 43	CLASE 4
Ligantes estabilizados (UNE-EN 13074-1 + UNE-EN 13074-2)				
Penetración a 25 °C	0,1 mm	1426	≤ 100	CLASE 1
Punto de reblandecimiento	°C	1427	≥ 43	CLASE 1
Ligantes envejecidos (UNE-EN 13074-1 + 13074-2 + UNE-EN 14769)				
Penetración a 25 °C	0,1 mm	1426	≤ 100	CLASE 2
Punto de reblandecimiento	°C	1427	≥ 43	CLASE 2

Como se puede apreciar, el árido reciclado se queda a medio camino entre el cemento y el árido natural, incluso tendiendo más hacia el valor obtenido para el cemento. Es decir, que mientras que polvo mineral del árido natural apenas consiguió romper la emulsión y de ahí que solamente se formase 1,4 g de material con la suficiente consistencia como para quedar retenido en el tamiz, el árido reciclado produjo unas 12 veces más. Por tanto, aunque no llega a romper la emulsión con la potencia del cemento sí se prevén posibles problemas a la hora de fabricar las mezclas con él. Es por ello por lo que se ha elegido el empleo de una emulsión tipo ECL-2d (según clasificación del Artículo 213 del PG-3/99) o C60B5 GE (según la nueva clasificación europea de la UNE-EN 13808:2013/1M:2014) de rotura lenta y con ligante residual de elevada dureza, cuyas características se recogen en la Tabla 5.3, en cumplimiento de lo establecido en la Normativa (PG-3, ATEB ref. c).

Se verá en posteriores capítulos que la cantidad de agua que queda en el seno de la probeta tras la compactación es prácticamente independiente de la cantidad de agua que se aporte durante el amasado. Sin embargo, se prevé que aun así, sea necesario aportar altas cantidades de agua durante el mezclado, evitando la rotura prematura de la emulsión y la aparición de grumos que dificulten la correcta envuelta del árido.

5.5 Elección de los contenidos óptimos de betún y agua

Existen numerosos métodos destinados a determinar el contenido óptimo de ligante en las mezclas bituminosas en frío (método del Asphalt Institute, método Marshall modificado para emulsiones, método de la Universidad de Illinois para mezclas densas con emulsiones asfálticas, método de Provisa, etc.), así como diversas fórmulas empíricas (Asphalt Institute, 1997; ATEB, ref. d; ATEB, ref. e). No obstante, a día de hoy, sigue sin haber uno que prevalezca sobre los demás o bien esté aceptado de modo universal.

En España, los métodos tradicionales suelen seguir los siguientes pasos (Fernández, 1998):

1. Seleccionar una emulsión compatible con los áridos y climatología.
2. Determinar el contenido de agua que permita el correcto mezclado de los áridos con el ligante, intentando que sea próximo al que permita alcanzar la máxima densidad durante la compactación de las probetas.
3. Obtener el contenido de emulsión con el cual se alcancen las mejores propiedades en la mezcla una vez compactadas y curadas, y de acuerdo a unas exigencias prefijadas.

Así, el PG-3 original del año 1976 indicaba en su *Artículo 514 – Grava-Emulsión* (derogado en el año 2004), que la compactación debería hacerse con un contenido óptimo de líquidos determinado por medio del ensayo Proctor modificado, según la Norma NLT-108/72 mientras que el contenido óptimo de emulsión se

determinaría por medio del ensayo de inmersión-compresión según la Norma NLT-162/73. Este método es idéntico al que aún hoy en día aparece en los Pliegos de la ATEB (ATEB, ref. b).

Debido a esta falta de uniformidad en los métodos de diseño, los ensayos de la presente tesis se realizaron sobre una amplia gama de mezclas con diferentes combinaciones de contenidos agua/ligante, con el fin de obtener los verdaderos óptimos en base a los resultados de las diferentes propiedades ensayadas (no solamente en base a, por ejemplo, el ensayo de inmersión-compresión, tal y como indica la ATEB).

No obstante, de forma previa a comenzar con los ensayos, se procedió a la realización de un ensayo Proctor Modificado con sendas muestras de árido reciclado y natural respectivamente (Figura 5.2) para al final de la tesis determinar si los óptimos de agua hallados se corresponden realmente con estos, tal y como suponen los métodos de diseño tradicionales.

Como era de esperar, teniendo en cuenta que el árido reciclado es menos denso y más absorbente que el árido natural, la humedad óptima resultó ser considerablemente mayor para el caso del primero (en torno al 12,5% frente al 6% del segundo) a la vez que la densidad seca resultó ser menor (1,903 t/m³ frente a 2,286 t/m³).

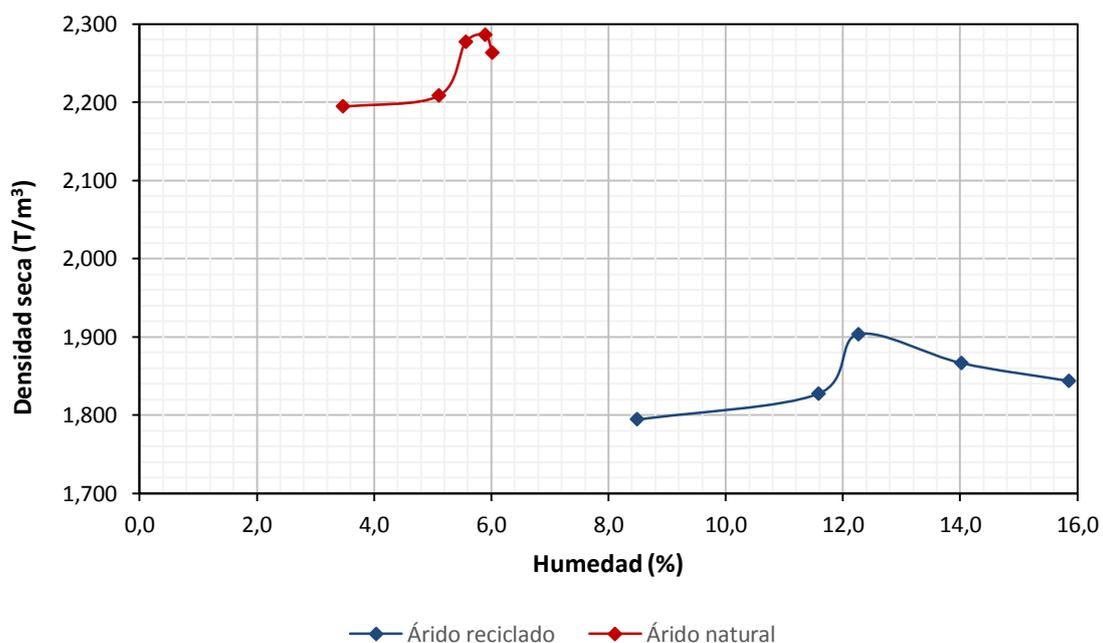


Figura 5.2 Curvas densidad seca - humedad para árido reciclado y natural. Compactación con maza Proctor modificado

5.6 Proceso de fabricación de las probetas

5.6.1 Problemática encontrada y planteamiento del método

A lo largo de la presente investigación se planteó como objetivo el poder correlacionar los resultados de los diferentes ensayos realizados, dilucidando si existe algún tipo de relación entre las diferentes propiedades estudiadas. Así, por ejemplo, se podría ver si el hecho de que las mezclas sean más rígidas influye realmente en que también sean más resistentes a compresión y tracción indirecta o que se comporten mejor ante la aparición de deformaciones permanentes.

Por un lado, para el ensayo de sensibilidad al agua (inmersión-compresión) se requieren, según la Normas NLT-161 y NLT-162, probetas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de altura.

Sin embargo, para la realización de ensayos mecánicos no triaxiales, como el de resistencia a la tracción indirecta, rigidez y deformación permanente, fue necesaria la obtención de probetas menores, con el fin de satisfacer las indicaciones de las correspondientes Normas. Para homogeneizar el proceso de fabricación de las probetas se buscó una altura apta para todos los ensayos, la cual debería, por ejemplo, estar comprendida entre 35 y 75 mm (según UNE-EN 12697-23), entre 30 y 75 mm (UNE-EN 12697-26) y entre 40 y 100 mm (BSi DD 226). Dado que las posibles alturas son inferiores a los 101,6 mm de las probetas de inmersión-compresión, era lógico pensar (y así se comprobó experimentalmente) que aplicando el mismo tipo de compactación, las probetas resultantes serían diferentes, y por tanto con unas propiedades no comparables a las anteriores.

Por otro lado, aunque estas últimas Normas fueron concebidas para mezclas en caliente, se decidió mantener la compactación de las probetas mediante prensa estática, más adecuada para mezclas en frío y avalada por Normas específicas para este tipo de mezclas como son la de inmersión-compresión (NLT-162/73) o la del tradicional Ensayo Duriez (NF P98-251-1/4). Además, la experiencia no recomienda el empleo de métodos como el martillo Marshall para la compactación de este tipo de probetas, sobre todo con grandes cantidades de agua.

El objetivo, por tanto, consistió en la obtención de probetas cuyas propiedades fuesen idénticas a las empleadas para inmersión-compresión pero de altura inferior, empleando para ello la prensa estática. Para intentar lograr la máxima verosimilitud, se fabricaron probetas de 60 mm de altura con diferentes cantidades de mezcla y sometidas a diferentes cargas, estableciéndose los siguientes criterios a cumplir:

- La granulometría de las probetas no debe modificarse, bajo las cargas de compactación, de modo que se salga fuera de los husos granulométricos. Si esto ocurriese, se consideraría que la energía de compactación es excesiva para la cantidad de material compactada.
- La deformación unitaria que sufre el material, entre la precarga de compactación y la carga máxima, debe ser similar a la de las probetas de inmersión-compresión. Si se acorta demasiado se entenderá que la carga máxima de compactación resultó excesiva mientras que si la deformación es inferior habría que tantear con mayores cargas.
- Las densidades y huecos deben resultar similares a los de las probetas de inmersión-compresión. De este modo, se asegurará que el ordenamiento interno de las probetas es similar, esperándose comportamientos análogos.

Se pudo comprobar que la desviación de las curvas granulométricas tras la compactación era similar para las diferentes energías de compactación, sin embargo, no se pudo conseguir una solución que cumpliera todos los criterios a la vez. De este modo, se comprobó que la carga de compactación debería llegar hasta los 21 MPa para igualar la densidad y porcentaje de huecos de las probetas de inmersión-compresión (Tabla 5.4) pero la deformación unitaria apreciada para este nivel tensional resultó ser demasiado alta, no debiendo pasar de 13 MPa (Tabla 5.5).

Del mismo modo, para los ensayos triaxiales de rigidez, compresión y deformación permanente (Norma UNE-EN 13286-7) serían necesarias probetas con un diámetro de al menos 5 veces el tamaño máximo de árido (es decir, 100 mm) y una altura mínima de 2 veces el diámetro, es decir, de 200 mm. Aunque directamente no se realizaron experimentos como los anteriormente citados, se dio por hecho que el nivel

de compactación, ordenamiento interno de las partículas minerales y nivel de compactación serían igualmente diferentes de las obtenidas con probetas de 100 mm.

Tabla 5.4 Densidad aparente y huecos medidos sobre probetas compactadas con diferentes energías de compactación (probetas 1 a 22) y comparadas con las de las probetas de referencia de inmersión-compresión (R1 a R4)

Probeta	Energía Compactación (MPa)	Altura Probeta (mm)	Densidad (t/m ³)	Huecos (%)
1	21	58,9	1,964	20,69
2	21	59,2	1,977	20,19
3	21	58,7	1,972	20,37
4	21	62,0	1,982	19,97
5	21	62,1	1,974	20,31
6	21	62,1	1,958	20,94
Media			1,971	20,41
7	13	60,0	1,923	22,35
8	13	60,4	1,9281	22,15
9	13	60,6	1,953	21,14
10	13	60,8	1,9041	23,12
11	13	63,7	1,912	22,79
12	13	63,7	1,935	21,87
13	13	63,4	1,916	22,65
14	13	63,1	1,914	22,74
Media			1,923	22,35
15	10	61,1	1,8994	23,33
16	10	61,9	1,892	23,64
17	10	61,7	1,911	22,85
18	10	62,0	1,904	23,12
19	10	64,8	1,902	23,22
20	10	65,4	1,898	23,36
21	10	64,9	1,898	23,36
22	10	64,7	1,907	23,01
Media			1,901	23,24
R1	21	100,8	1,974	20,32
R2	21	101,4	1,965	20,66
R3	21	101,9	1,979	20,12
R4	21	101,1	1,973	20,33
Media			1,972	20,36

Tabla 5.5 Deformación unitaria medida sobre probetas compactadas con diferentes energías de compactación (probetas 1 a 14) y comparadas con las de las probetas de referencia de inmersión-compresión (R1 a R10)

Probeta	Energía compactación	Altura probeta	Deformación unitaria
1	21	61,95	0,291
2	21	62,00	0,287
3	21	62,08	0,318
4	21	61,58	0,294
Media			0,297
5	13	63,70	0,233
6	13	63,80	0,224
7	13	63,30	0,225
8	13	63,20	0,230
9	13	63,20	0,215
Media			0,225
10	10	64,90	0,205
11	10	65,40	0,203
12	10	64,90	0,198
13	10	64,70	0,203
14	10	65,30	0,196
Media			0,201
R1	21	100,53	0,242
R2	21	100,20	0,216
R3	21	101,60	0,242
R4	21	100,60	0,224
R5	21	100,60	0,218
R6	21	99,30	0,212
R7	21	101,50	0,224
R8	21	100,40	0,217
R9	21	99,80	0,219
R10	21	99,00	0,215
Media			0,223

Como solución, se planteó fabricar siempre, para toda la investigación, probetas de 100 mm de altura siguiendo para ello, lo indicado en las Normas NLT-161 y NLT-162 de frecuente aplicación en ensayos de mezclas en frío y todavía referenciadas por la ATEB (ATEB, ref. b). A partir de éstas, se obtuvieron las de 50 mm mediante un corte por el plano medio y las de 200 mm mediante el apilamiento de 2 probetas de 100 mm.

Como beneficio extra, se obtuvo que al cortar las probetas de 100 mm para obtener 2 iguales de 50 mm, cada una de éstas pudo ser destinada a un ensayo diferente (como módulo resiliente y tracción indirecta o deformación permanente) con la absoluta certeza de que necesariamente éstas tendrían las mismas propiedades.

5.6.2 Fabricación de probetas de 100 mm de altura

Aunque estas probetas serían las que se fabricarían para la realización de toda la investigación, como tal, sin haberlas cortado o apilado, solamente se emplearían para el ensayo de inmersión-compresión. Así fueron fabricadas de acuerdo con la Norma NLT-161 y NLT-162. El procedimiento permite la obtención de probetas cilíndricas de 101,6 mm de altura por 101,6 mm de diámetro (medidas que pese a no ser exactamente iguales a 100 mm cumplen los requisitos de todas las Normas empleadas), aplicando para ello un proceso de compactación estática con una precarga de 1 MPa durante 1 minuto seguida de una carga de 21 MPa durante 2 minutos (Figura 5.3 y Figura 5.4):

En los casos en los que se estudiaron las mezclas una vez éstas han alcanzado un avanzado nivel de maduración, fue necesario aplicar un proceso de curado acelerado, de modo que, siguiendo las recomendaciones de la ATEB (ATEB, ref. b), las probetas fueron introducidas en estufa a 50°C durante 3 días (Figura 5.5). No obstante, no está nada clara la equivalencia de este curado acelerado con el tiempo real en condiciones de campo (Doyle et al., 2013). Por ejemplo, Rukel et al. (1983) propusieron que un curado de 3 días a 40°C equivalía a 1 mes en condiciones reales, lo que contrasta con las recomendaciones de la Asphalt Academy (Kekwick, 2005) en donde se sugería que ese mismo curado artificial equivalía a 6 meses en campo. El curado de 3 días a 60°C, es equivalente a un periodo de tiempo muy variable entre 23 y 200 días, según Acott (1980, citado en Jenkins, 2000) pero otros autores como Maccarrone (1994) estimaban la equivalencia en 1 año.

Por otro lado, existen autores como Hugener et al., 2014, que aseguran que curados a más de 40°C podrían producir mayores presiones internas de vapor así como tensiones térmicas entre la parte húmeda (interior) y la parte seca (exterior) de la probeta, dañando las muestras y produciendo resultados peores.

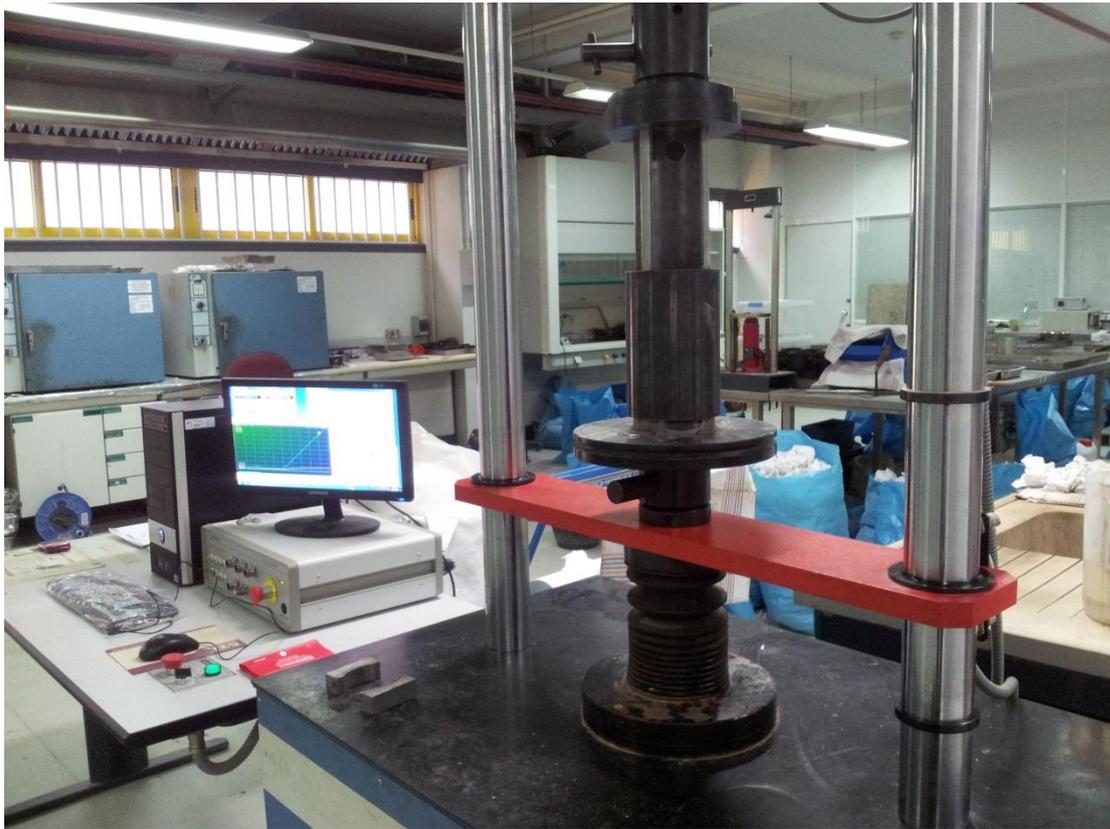


Figura 5.3 Compactación de probetas en prensa estática según Norma NLT-161/98

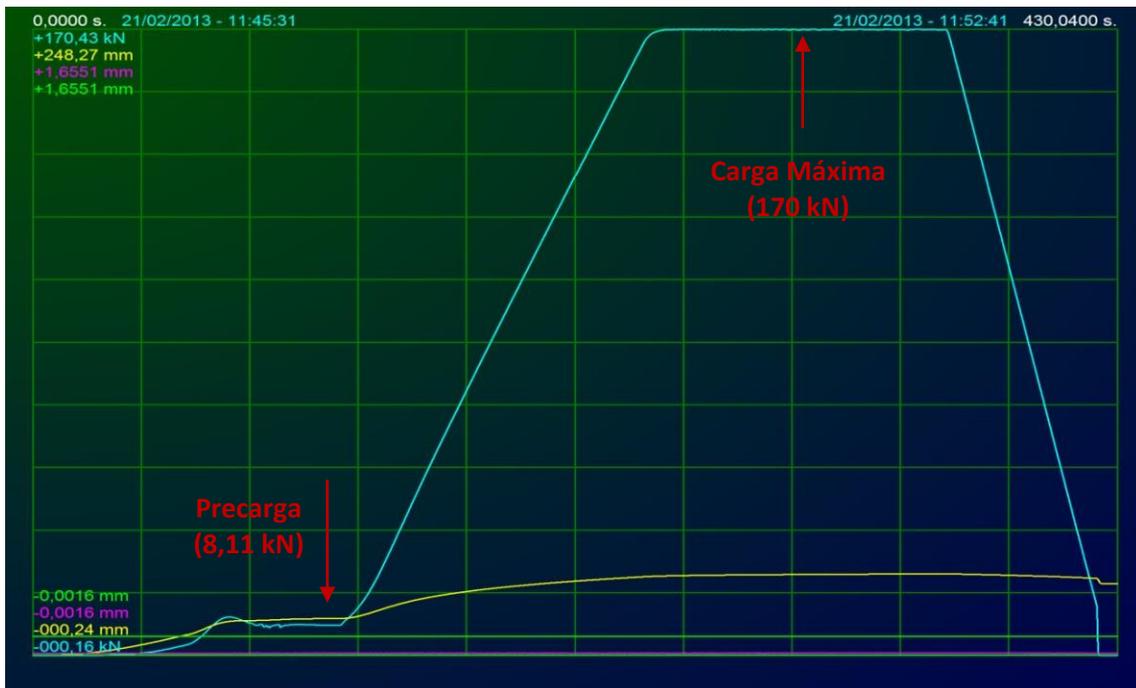


Figura 5.4 Curva registrada de carga (línea azul) y de posición del pisón (línea amarilla) durante la compactación en prensa estática



Figura 5.5 Curado de probetas en estufa a 50°C durante 3 días según Pliegos ATEB

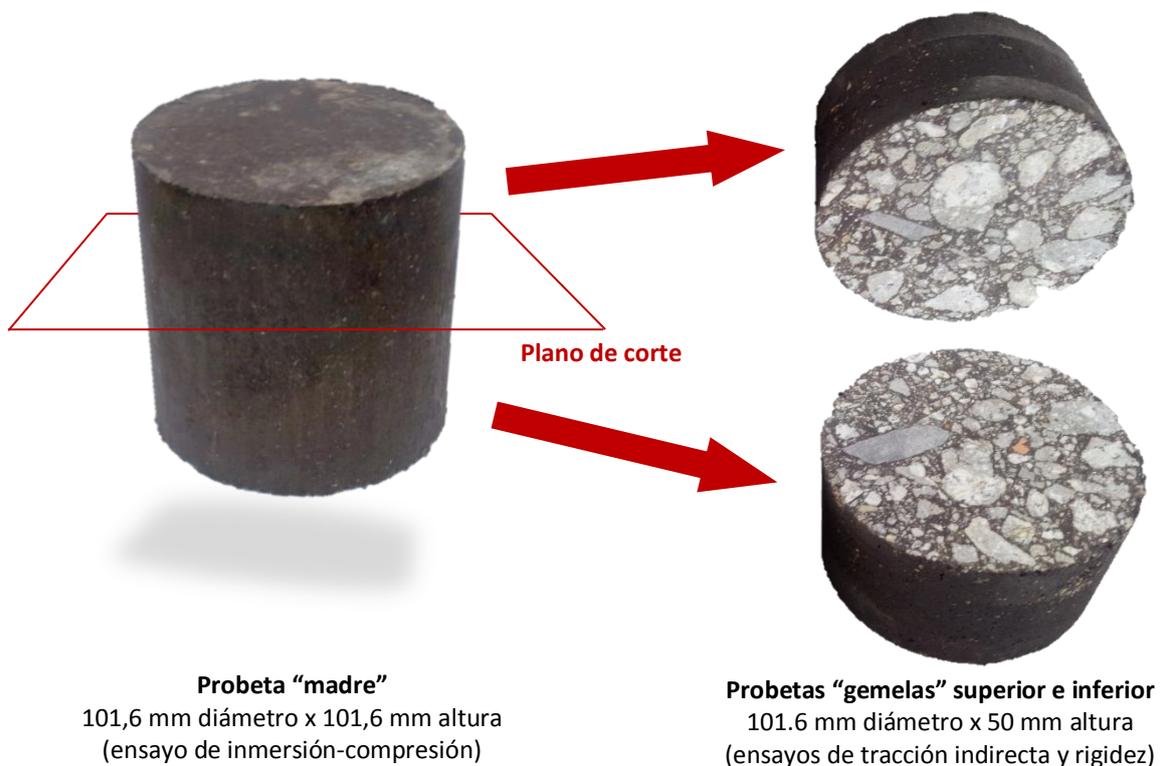
5.6.3 Fabricación de probetas de 50 mm de altura

Como se adelantó anteriormente, estas probetas fueron obtenidas mediante el corte de las probetas de inmersión-compresión (101,6 mm de altura) por su plano medio (Figura 5.6 y Figura 5.7).

Esta novedosa solución no solo consigue que las nuevas probetas tengan las mismas propiedades que las de inmersión compresión (contenido de huecos, granulometría, humedad residual, etc.) sino que además, son idénticas entre ellas. Esto supone un beneficio extra, al poder ser ensayadas de diferentes formas, pudiendo establecerse una relación clara y directa entre ambos comportamientos y para cada probeta. De este modo, se podrá asegurar que las posibles analogías o las posibles anomalías observables al intentar relacionar diferentes propiedades mecánicas no se deben, en ningún caso, a diferencias entre probetas ensayadas puesto que literalmente son idénticas.



Figura 5.6 Proceso de corte de probetas de 101,6 mm (inmersión-compresión) en dos mitades de unos 50 mm para su ensayo a tracción indirecta y rigidez respectivamente



Probeta "madre"

101,6 mm diámetro x 101,6 mm altura
(ensayo de inmersión-compresión)

Probetas "gemelas" superior e inferior

101.6 mm diámetro x 50 mm altura
(ensayos de tracción indirecta y rigidez)

Figura 5.7 Esquema del proceso de obtención de dos probetas "gemelas" de 50 mm de altura a partir de una misma probeta "madre" de 101,6 mm. Las tres probetas tienen exactamente las mismas propiedades intrínsecas (densidad, huecos, humedad, etc)

Para comprobar la fiabilidad del método, se sometió el mismo a una serie de análisis estadísticos. En primer lugar, se representaron en el mismo diagrama (Figura 5.8) todas las parejas de valores ITS-ITSM obtenidas con pares de probetas “gemelas” procedentes de diferentes probetas “madre” (distintos contenidos de agua y betún pero todas con un 100% de árido reciclado) y diferenciando las parejas en las que la mitad “gemela” superior de la probeta “madre” fue destinada al ensayo de ITSM y la inferior al de ITS (■) de las parejas en las que se realizaron los ensayos de modo opuesto (◆).

Debe tenerse en cuenta que como los puntos rojos y azules pertenecen a conjuntos complementarios, si la mitad superior de las probetas madre fuese más rígida y resistente que la inferior, los puntos azules sufrirían un corrimiento hacia arriba a la izquierda y los rojos hacia abajo a la derecha duplicándose y evidenciándose así un efecto de separación de ambas nubes de puntos aproximadamente en la dirección de una perpendicular trazada sobre las líneas de tendencia representadas. Si la mitad inferior fuese más resistente y rígida que la superior, los corrimientos se darían en sentidos opuestos a los descritos anteriormente. Como se puede apreciar, ambas nubes de puntos prácticamente se superponen a la perfección así como sus líneas de tendencia lo que evidencia que ambas mitades “gemelas” son idénticas y que por tanto, el método propuesto para obtenerlas no afecta a sus propiedades.

Con el fin de asumir esta hipótesis tan crítica, se ha realizado el correspondiente contraste estadístico de hipótesis. Para ello, se ha definido una nueva variable como producto de los valores ITS e ITSM obtenidos cada uno con la respectiva mitad “gemela” de la misma probeta “madre”. Así, en el contraste de hipótesis se ha asumido como hipótesis nula (H_0) que la variable $ITS*ITSM$ (medida en MPa^2) no depende de si la mitad “gemela” superior de la probeta madre fue destinada al ensayo de tracción indirecta y la inferior al de rigidez o viceversa.

Los valores medios de ambos grupos fueron $2824,5 MPa^2$ y $2636,5 MPa^2$ que a simple vista parecen bastante similares. Asumiendo igualdad de varianzas una vez hecho el correspondiente test de Levene ($F = 0,13$ con significancia de $0,909 > 0,05$) se obtuvo un estadístico t de Student de $1,373$ con una significancia de $0,172 > 0,05$. Por tanto, la hipótesis nula H_0 no debe ser rechazada y se puede concluir que con un nivel de confianza del 95% la variable $ITS*ITSM$ no depende de cuál de las mitades ha sido

destinada al ensayo de tracción indirecta y cuál al de rigidez y que por lo tanto, ambas son idénticas desde un punto de vista estadístico.

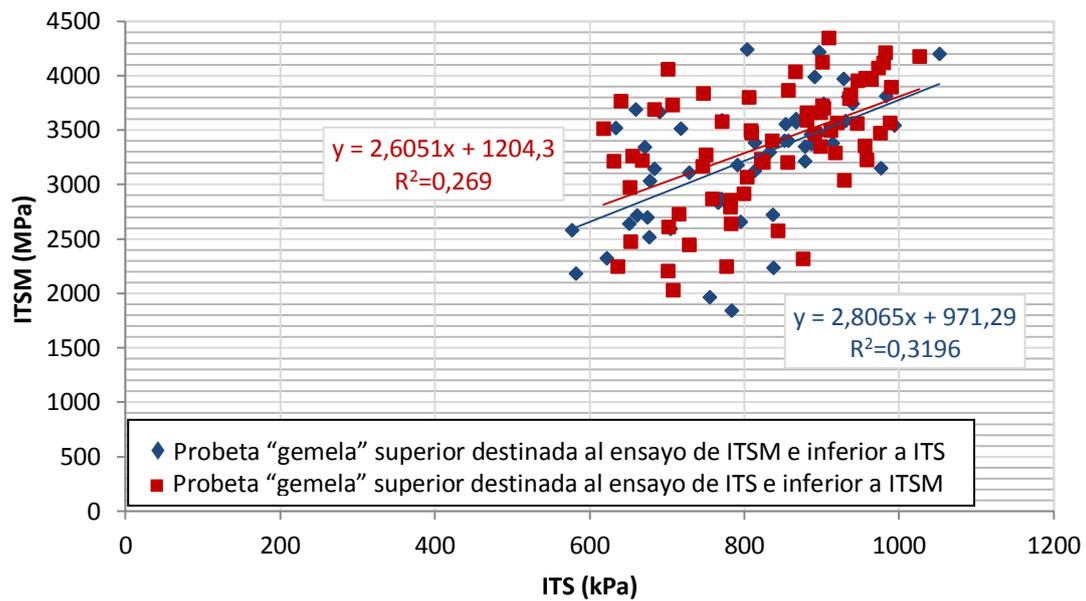


Figura 5.8 Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) dependiendo de si la mitad empleada para el ensayo de rigidez era superior (◆) o inferior (■) (quedando su pareja para el ensayo de tracción indirecta) para un 100% de árido natural

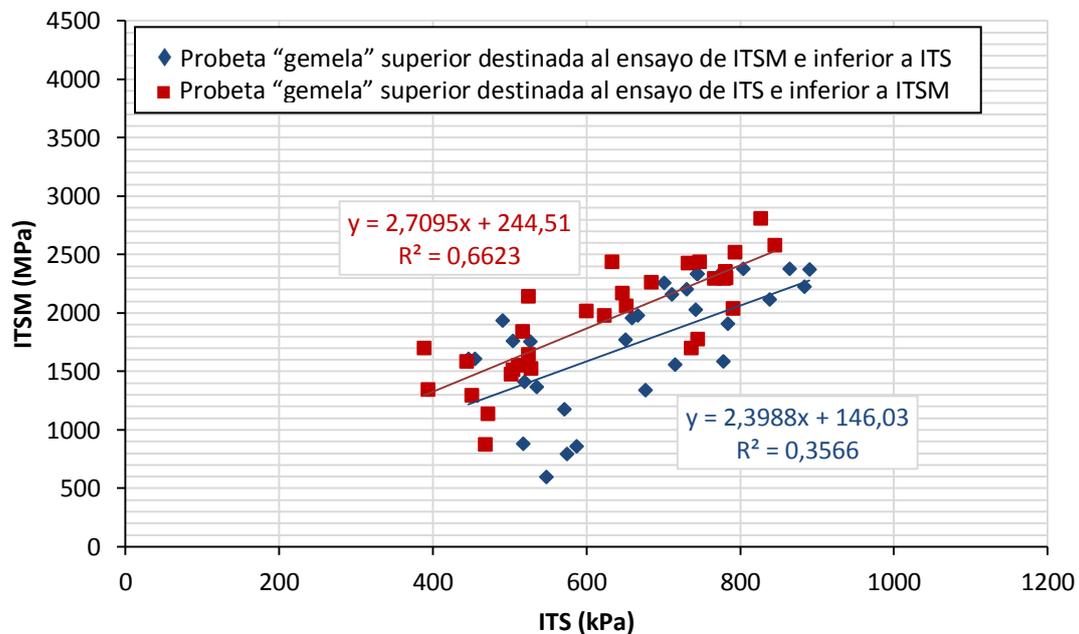


Figura 5.9 Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) dependiendo de si la mitad empleada para el ensayo de rigidez era superior (◆) o inferior (■) (quedando su pareja para el ensayo de tracción indirecta) para un 100% de árido natural

Para ver la aplicabilidad del método en diferentes tipos de materiales, se repitió el estudio con probetas de mezclas bituminosas con un 100% de árido natural (Figura 5.9). En este caso, los valores medios resultaron de 1263,6 MPa² y 1.209,6 MPa² respectivamente. De nuevo, asumiendo igualdad de varianzas tras el test de Levene ($F = 2,4 \times 10^{-4}$ con significancia de 0,988 > 0,05) se encontró un estadístico t de Student de 0,404 con una significancia de 0,688 > 0,05. Por tanto, de nuevo, con un nivel de confianza del 95%, se puede concluir que la mitad “gemela” superior de las probetas “madre” es idéntica a la mitad “gemela” inferior. Sin embargo, sí se debe mencionar que en este caso, se aprecia una cierta separación entre las líneas de tendencia lo que hace intuir que ambas mitades ya no son tan idénticas como en el caso del árido reciclado. Se cree, por tanto, que debido a la alta absorción y porosidad del árido reciclado, éste ayuda a evitar segregaciones entre árido y betún, provocando que el árido permaneciese en el fondo del molde mientras en la parte superior se formase una película rica en árido fino, agua y betún. El árido reciclado ayuda a mantener el ligante unido al árido y las mezclas salen más homogéneas.

En resumen, el método de obtención de probetas pequeñas a partir de la misma probeta mayor ha resultado ser suficientemente estable, ampliamente aplicable a muy diversos tipos de materiales y como consecuencia, las probetas obtenidas para los ensayos de inmersión-compresión, tracción indirecta y rigidez cuentan con idénticas propiedades intrínsecas, lo cual permitirá correlacionar de una forma fiable los resultados de los diferentes test.

5.6.4 Fabricación de probetas de 200 mm de altura

Para el apilamiento de probetas de 101,6 mm con el que se consiguieron probetas del orden de los 200 mm, no se realizó ningún tipo de comprobación estadística, puesto que otros autores (Ebels, 2008; Kim y Labuz, 2007) habían recurrido ya a este método, comprobando que era seguro y no afectaba a los resultados. A lo largo de la presente investigación, en la que estas probetas solamente se utilizaron para ensayos de compresión, se comprobó que ambas trabajaban como una sola, puesto que:

1. Mostraron la típica forma de barril una vez eran deformadas a compresión, con su mayor diámetro a media altura, es decir, en el plano de unión entre probetas.
2. Las probetas rotas a compresión, mostraron un plano de corte a unos 65°-70° con la vertical que atravesaba la superficie de contacto entre probetas como si el conjunto fuese una sola.
3. Tras el ensayo, ambas probetas eran difíciles de despegar, existiendo una gran rugosidad en la superficie de contacto entre ambas, motivada por la hincas de las partículas mayores de la una en el mástico de la otra.

CAPÍTULO 6

**PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS Y
SENSIBILIDAD AL AGUA DE LAS
MEZCLAS EN FRÍO CON RCD**

6.1 Contenido de agua en las probetas

Como se ha explicado anteriormente, para la fabricación de las probetas, una determinada cantidad de árido (1550 g en el caso del árido reciclado y 1875 g en el caso del árido natural) es mezclada y amasada mecánicamente, junto con los correspondientes contenidos de emulsión y agua que se deseen ensayar, durante un tiempo total de 2 minutos. De este modo, el contenido total de agua en la mezcla es la suma del agua aportada más el agua que forma parte de la propia emulsión.

Sin embargo, durante la compactación estática, una parte importante de esta agua es drenada hacia el exterior de las probetas, de modo que la cantidad remanente en el interior de las mismas es inferior a la que inicialmente contenía la mezcla suelta. Dicha cantidad remanente, fue obtenida mediante partición y posterior secado completo en estufa de las probetas fabricadas para tal fin y los resultados se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 *Contenidos de agua (en % peso árido seco) remanentes en las probetas tras su compactación, en función de los contenidos de agua y betún aportados en la amasada*

100% Árido Reciclado						100% Árido Natural			
% betún	Agua total en amasado (% peso árido seco)					% betún	Agua total en amasado (% peso árido seco)		
	9%	12%	15%	18%	21%		6%	9%	12%
2%	9,6%	9,6%	9,7%	9,3%	9,1%	2%	3,4%	3,5%	3,6%
3%	9,5%	9,5%	9,5%	9,3%	8,8%	3%	2,2%	2,5%	2,5%
4%	9,0%	9,0%	9,0%	8,7%	8,6%	4%	1,5%	1,8%	1,8%
5%	8,6%	8,4%	8,3%	8,1%	8,4%	5%	1,3%	1,5%	1,6%
6%	8,2%	8,0%	7,9%	7,8%	7,9%	-	-	-	-

Tal y como se puede observar, dicha cantidad depende en gran medida del tipo de árido empleado. Así, mientras que el árido natural, mucho menos absorbente, permite la fácil liberación del agua, el árido reciclado ayuda a que una parte importante de ésta se quede en el interior de la probeta.

Por otro lado, resulta paradójico que mientras que el contenido remanente de agua depende (ligeramente) del contenido de betún, es prácticamente independiente del contenido de agua presente en la amasada. Así, se entiende que el betún ayuda a

impermeabilizar el árido, rellenando o tapando los poros, de modo que nuevamente la expulsión del agua intersticial resulta más fácil, pero el hecho de aportar una mayor o menor cantidad de agua no afecta a la drenabilidad de la mezcla durante la compactación.

Tras la compactación, las probetas se someten durante 3 días a un proceso de curado acelerado en estufa a 50°C. Tras dicho proceso, el contenido remanente de agua es todavía más bajo, llegando a ser prácticamente nulo para el caso de mezclas con un 100% de árido natural (Tabla 6.2). Sin embargo, tal y como se puede observar, para el caso de probetas con árido reciclado todavía existe una pequeña cantidad (en torno a un 2%-3%) que permanece en el interior a pesar del curado.

Por tanto, nuevamente se aprecia como el contenido remanente de agua depende en gran medida del árido empleado, depende ligeramente del contenido de betún y prácticamente es independiente del contenido inicial de agua que contenía la mezcla en la amasada. También se evidencia cómo, mientras que tras la compactación eran las probetas con menores cantidades de betún las que retenían más agua, tras el curado son éstas mismas las que menos agua conservan, debido a que la falta de betún endurecido recubriendo los poros ayuda a la evacuación del agua.

Tabla 6.2 *Contenidos de agua (en % peso árido seco) remanentes en las probetas tras su curado en estufa, en función de los contenidos de agua y betún aportados en la amasada*

100% Árido Reciclado						100% Árido Natural			
% betún	Agua total en amasado (% peso árido seco)					% betún	Agua total en amasado (% peso árido seco)		
	9%	12%	15%	18%	21%		6%	9%	12%
2%	2,1%	2,2%	2,2%	2,1%	2,1%	2%	0,1%	0,1%	0,2%
3%	2,3%	2,4%	2,5%	2,5%	2,4%	3%	0,1%	0,2%	0,1%
4%	2,5%	2,9%	2,8%	2,9%	2,8%	4%	0,2%	0,2%	0,3%
5%	3,2%	3,2%	3,1%	2,8%	3,2%	5%	0,6%	0,6%	0,3%
6%	3,5%	3,4%	3,2%	3,5%	3,5%	-	-	-	-

Debido a esta gran variación en el contenido de agua según la fase en la que se encuentren las probetas, a lo largo de la presente tesis, cuando se trate (por ejemplo) la variación de una determinada propiedad con el “contenido de agua”, se estará haciendo referencia, de modo general y en caso de que no se explicita lo contrario, al contenido inicial, es decir, al que tenía la mezcla en el momento del mezclado.

6.2 Propiedades volumétricas

Se ha realizado un análisis volumétrico con el fin de determinar el contenido de huecos en las mezclas estudiadas. Los parámetros analizados fueron los huecos en árido mineral o VMA (Voids in Mineral Aggregate) los cuales incluyen todos los huecos rellenos de aire, betún o agua; huecos rellenos de agua o V_{aw} y huecos rellenos de aire o V_a ; así como la densidad aparente, que se pueden obtener mediante el uso de las fórmulas propuestas por el Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1997):

$$G = \frac{D}{F - E} \quad [\text{Ec. 6-1}]$$

$$VMA (\%) = \left[\left(\frac{100 + A + K}{G} - \frac{100}{C} \right) \div \left(\frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \times 100 \quad [\text{Ec. 6-2}]$$

$$V_{aw} (\%) = \left[\left(\frac{100 + A + K}{G} - \frac{100}{C} - \frac{A}{B} \right) \div \left(\frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \times 100 \quad [\text{Ec. 6-3}]$$

$$V_a (\%) = V_{aw} - \left[\left(\frac{K \times 100}{L} \right) \div \left(\frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \quad [\text{Ec. 6-4}]$$

Donde G es el peso específico aparente; D es la masa de la probeta al aire (g); E es la masa de la probeta sumergida en agua (g); F es la masa de la probeta saturada con superficie seca (g); A es el betún residual como porcentaje sobre masa de árido seco; B es el peso específico del betún; L es el peso específico del agua y K es el contenido de agua en el momento del ensayo (%) que puede ser calculada, a su vez, del siguiente modo:

$$K (\%) = \frac{\text{masa de agua (g)}}{\text{masa de mezcla seca (g)}} \times (100 + A) \quad [\text{Ec. 6-5}]$$

En la Tabla 6.3 se recoge, tanto para mezclas con un 100% de árido reciclado como para mezclas con un 100% de árido natural los parámetros VMA, V_{aw} , V_a y peso específico aparente. Como era de esperar, y debido a la alta porosidad del árido reciclado, los resultados de VMA, V_{aw} , y V_a son sensiblemente mayores para mezclas con este tipo de árido que con árido natural. En general, VMA tiende a crecer ligeramente al aumentar el contenido de betún, dependiendo prácticamente nada del contenido de agua durante el amasado. Sin embargo, V_{aw} , y V_a tienden a caer de una forma más pronunciada al aumentar el contenido de bitumen y también lo hacen, de forma mucho menos marcada, al aumentar el contenido de agua. Aun así, el contenido de huecos de aire en mezclas con árido reciclado nunca llega a ser menor del 10%,

siendo en algunas ocasiones superiores al 20%, valor más propio de materiales granulares y mezclas abiertas (ATEB, ref. d). Además, debido a la menor densidad del árido reciclado, se puede apreciar como las mezclas fabricadas con éste muestran un menor peso específico (alrededor de un 18% menor).

Puede apreciarse como las mezclas con árido natural alcanzan un máximo de peso específico con el 4% de contenido de betún mientras que en las mezclas con árido reciclado el peso específico sigue creciendo debido a que todavía cuentan con un alto contenido de huecos que pueden seguir siendo rellenados con agua y/o betún. Debido a la elevada carga de compactación se prevé que estos pesos específicos sean mayores que los obtenibles en condiciones de campo (Martínez-Echevarría et al., 2012).

Tabla 6.3 Contenido de huecos y densidad de mezclas con árido reciclado y árido natural según su contenido de agua y betún

% betún	100% Árido Reciclado					% bitumen	100% Árido Natural		
	Agua total en amasada (% peso árido seco)						Agua total en amasada (% peso árido seco)		
	9%	12%	15%	18%	21%		6%	9%	12%
VMA (Huecos en árido mineral)									
2%	28,7%	28,6%	28,5%	28,1%	28,3%	2%	17,4%	17,5%	17,5%
3%	29,0%	28,6%	28,3%	28,3%	28,7%	3%	18,2%	17,6%	17,3%
4%	29,4%	28,6%	28,5%	28,7%	28,8%	4%	17,1%	17,5%	17,1%
5%	29,7%	29,4%	29,0%	28,9%	29,0%	5%	18,0%	18,6%	18,0%
6%	29,9%	29,9%	30,0%	29,8%	29,8%	-	-	-	-
V_{aw} (Huecos rellenos de aire y agua)									
2%	24,6%	25,0%	24,5%	24,2%	23,2%	2%	12,9%	13,1%	13,0%
3%	23,3%	23,3%	22,8%	22,9%	22,8%	3%	11,5%	10,9%	10,6%
4%	22,4%	21,5%	21,4%	21,5%	21,8%	4%	8,2%	8,5%	8,2%
5%	21,2%	20,3%	20,1%	19,9%	19,9%	5%	7,0%	7,6%	6,9%
6%	19,4%	19,2%	19,2%	19,2%	19,2%	-	-	-	-
V_a (Huecos rellenos de aire)									
2%	21,1%	20,7%	19,8%	18,1%	17,5%	2%	12,5%	12,8%	12,6%
3%	18,8%	18,4%	17,7%	17,1%	16,7%	3%	11,3%	10,6%	10,3%
4%	16,9%	16,1%	16,0%	16,2%	16,3%	4%	7,7%	8,0%	7,5%
5%	14,9%	14,3%	14,2%	14,6%	14,9%	5%	5,6%	6,3%	6,2%
6%	12,2%	12,9%	13,2%	12,5%	12,1%	-	-	-	-
Peso específico aparente									
2%	1,925	1,920	1,922	1,932	1,937	2%	2,344	2,346	2,345
3%	1,941	1,938	1,938	1,940	1,944	3%	2,361	2,359	2,366
4%	1,947	1,951	1,957	1,958	1,954	4%	2,401	2,390	2,400
5%	1,952	1,959	1,968	1,970	1,967	5%	2,391	2,378	2,391
6%	1,958	1,965	1,967	1,972	1,973	-	-	-	-

6.3 Afinidad entre áridos y ligante

6.3.1 Descripción de los ensayos realizados

La afinidad entre áridos y ligante es un indicador de la susceptibilidad de la mezcla al descubrimiento del árido o *stripping*. Dicha susceptibilidad, tal y como se determinará en el presente apartado es una medida indirecta de la capacidad de un ligante para adherirse a los diferentes áridos empleados a lo largo de la tesis.

Para tal fin, se emplearon dos métodos diferentes:

- a) En primer lugar se usó el método de la botella giratoria en el que la afinidad se expresa mediante una inspección visual del grado de recubrimiento de ligante sobre el árido sin compactar tras ser sometido a una agitación mecánica en presencia de agua. Dicho ensayo está regido por la Norma UNE-EN 12697-11:2012.
- b) El segundo método fue el ensayo conocido como *Boiling Water Test*, en el que nuevamente se inspecciona visualmente el grado de recubrimiento del árido tras sumergir la mezcla sin compactar en agua hirviendo bajo unas condiciones específicas. Dicho ensayo se recoge en la Norma ASTM D 3625

Aunque ambas modalidades de ensayo fijan una cantidad de ligante a añadir, en el presente estudio se realizó el ensayo con diferentes contenidos de ligante (fijando una cantidad de agua) y con diferentes contenidos de agua (fijando una cantidad de ligante). Además, con el fin de ver en qué medida el curado afecta a la afinidad entre áridos y ligante, se fijaron unos contenidos de agua y betún y se repitió el ensayo dejando previamente curar la mezcla suelta durante 0 días (sin curado), 3 días (tiempo de curado artificial habitualmente empleado en la mayoría de ensayos de la presente tesis) y 7 días (tiempo que asegure el curado completo de la mezcla). Así pues, se podrán comparar los resultados obtenidos de la gama de ensayos resumida en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 *Contenidos de agua y betún y tiempos de curado empleados para los ensayos de afinidad entre árido y ligante*

Árido	Botella giratoria			Boiling water test		
	Betún	Agua	Curado	Betún	Agua	Curado
Reciclado	5%	9%	3 días	5%	9%	3 días
		12%			12%	
		15%			15%	
		18%			18%	
	3%	15%	3 días	3%	15%	3 días
	4%			4%		
	5%			5%		
	5%	15%	0 días	5%	15%	0 días
			3 días			3 días
			7 días			7 días
Natural	4%	3%	3 días	4%	3%	3 días
		6%			6%	
		9%			9%	
		12%			12%	
	2%	3%	3 días	2%	3%	3 días
	3%			3%		
	4%			4%		
	5%			5%		
	4%	3%	0 días	4%	3%	0 días
			3 días			3 días
			7 días			7 días

6.3.2 Ensayo de la botella giratoria

Para la realización del ensayo sobre mezclas en frío, fue necesario adaptar la Norma UNE-EN 12697-11:2012, puesto que ésta es específica de mezclas en caliente. Así, se tomaron muestras de 510 ± 2 g de árido seco perteneciente a la fracción granulométrica 8/11,2 mm y se mezclan con la correspondiente cantidad de ligante (aunque la Norma especifica un 3% de betún sobre peso de mezcla, en este caso se realizó el ensayo con distintos contenidos de betún residual apreciándose que con el 3% no era suficiente para conseguir el recubrimiento total del árido). Del mismo modo, tampoco fue necesario calentar los materiales y por tanto, la mezcla no necesitó ser enfriada a temperatura ambiente como indica la Norma. Sí se extendieron las partículas sobre una plancha metálica, se dejaron a temperatura ambiente durante 24 h y se les aplicó un determinado proceso de curado en estufa a 50°C (nada, 3 días o 7 días).

A continuación, las partículas se agrupan en 3 sub-muestras de 150 ± 2 g y se depositan en botellas estandarizadas rellenas con agua destilada a $5 \pm 2^\circ\text{C}$. En cada botella se introduce junto con la muestra, una varilla de vidrio estandarizada y se cierra herméticamente con el tapón roscado.

Las botellas se tumban y se rotan a una velocidad de 60 rpm (Figura 6.1). Al cabo de 6 h, se extraen las partículas sobre una cubeta de ensayo y se determina visualmente el grado de recubrimiento de betún sobre las mismas redondeando al $\pm 5\%$ más cercano. Finalmente se devuelven las muestras a las botellas (con la misma agua de ensayo) y se continúa hasta completar las 24 h, repitiendo la estimación visual. Todas las observaciones fueron realizadas por dos operarios de modo que el resultado final fue determinado como la media de los registros de ambos operarios sobre las tres sub-muestras.



Figura 6.1 Disposición de las botellas con 2 muestras diferentes (3 sub-muestras cada una) en el ensayo de la botella giratoria

Como se explicó anteriormente, para cada tipo de árido se realizaron varios ensayos en los que solamente se modificaba una de las tres variables: contenido de betún, contenido de ligante y tiempo de curado. Los resultados se muestran en la Tabla 6.5 y en las Figura 6.2 a Figura 6.4. También se muestra el tiempo de envuelta, que es el tiempo necesario de mezclado de los áridos con el ligante y el agua hasta obtener el completo recubrimiento del árido.

En primer lugar, se puede apreciar que los recubrimientos son mayores cuando se emplea árido natural por lo que la afinidad entre éste y el betún de la emulsión empleada es mayor que cuando se emplea árido reciclado. No obstante, los recubrimientos aquí encontrados tienden a ser del mismo orden o ligeramente superiores a los publicados por autores como Pasandín y Pérez (2014a), cuando estos ensayaron mezclas bituminosas en caliente y con diferentes tipos de filler, no solo reciclado, sino también cal, cemento y cenizas volantes. Valores superiores al 80% solo fueron alcanzados por Pasandín y Pérez (2014a) cuando añadieron filler cemento o tras aplicar algún tipo de pretratamiento a la mezcla, como una preenvuelta de los áridos reciclados en un 5% de emulsión bituminosa o dejando la mezcla suelta en estufa a 170°C durante 4 h.

El hecho de aumentar los contenidos de agua ayuda a reducir el tiempo de envuelta, siendo éste considerablemente mayor cuando se emplearon los contenidos mínimos de agua. Por otro lado, no parece afectar a los recubrimientos aunque como excepción, se puede ver que con árido reciclado, el contenido mínimo dio resultados considerablemente menores (73% a las 6 h y 63% a las 24 h).

El aportar cada vez más contenido de betún permitió ver que ayuda a las mezclas con árido reciclado a obtener recubrimientos mayores, pasando de un 63% (a las 24 h) con un 3% de betún a un 78% con un 5% de betún. En el caso del árido natural, todos los recubrimientos obtenidos son, en general, excelentes aunque precisamente el de mayor contenido (5%) dio resultados malos (78% y 59% tras 6 h y 24 h). Esto podría indicar que una vez sobrepasado un cierto contenido límite de betún, la película que envuelve el árido es tan gruesa que acaba desprendiéndose con facilidad formando

agregados de betún independizados del árido. Por otro lado, no se aprecia que el contenido de betún afecte en gran medida al tiempo de envuelta.

Tabla 6.5 Resultados de afinidad entre árido y ligante según el método de la botella giratoria. Recubrimientos tras 6h y 24h

Tipo de Árido	Contenido de betún	Contenido de agua	Tiempo curado	Recubrimiento		Tiempo envuelta (s)	
				6 horas	24 horas		
Reciclado	5%	9%	3 días	73%	63%	27	
		12%		95%	90%	25	
		15%		91%	78%	17	
		18%		92%	83%	18	
	3%	15%	3 días	78%	63%	27	
	4%			89%	73%	14	
	5%			91%	78%	17	
	5%	15%	0 días	83%	71%	16	
			3 días	91%	78%	17	
			7 días	89%	73%	15	
	Natural	4%	3%	3 días	100%	100%	56
			6%		100%	95%	9
9%			100%		100%	17	
12%			100%		100%	10	
2%		3%	3 días	100%	97%	53	
3%				100%	100%	35	
4%				100%	100%	56	
5%				78%	59%	60	
4%		3%	0 días	100%	94%	20	
			3 días	100%	100%	56	
			7 días	100%	100%	90	

Finalmente, variando el tiempo de curado, no se aprecian grandes diferencias en el recubrimiento aunque sí es cierto que cuando las muestras fueron ensayadas sin ningún tipo de curado previo, los resultados fueron peores que con 3 y 7 días en estufa a 50°C. En el caso de las mezclas con árido reciclado, el curado de 7 días produjo recubrimientos ligeramente inferiores al de 3 días lo que podría ser un síntoma del envejecimiento del betún debido a la pérdida de volátiles en estufa. No obstante, no se han encontrado evidencias de lo mismo en mezclas con árido natural.

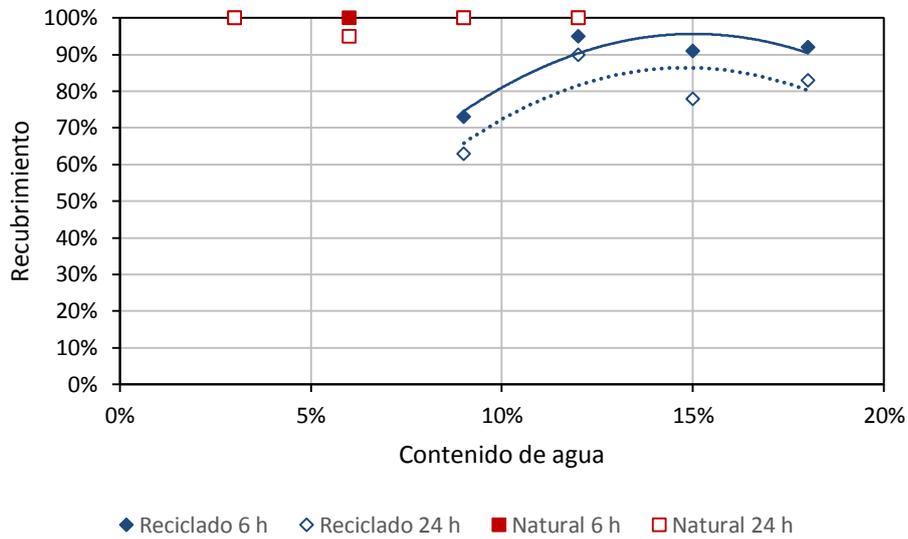


Figura 6.2 Relación entre recubrimientos tras 6h y 12h de ensayo y el contenido de agua

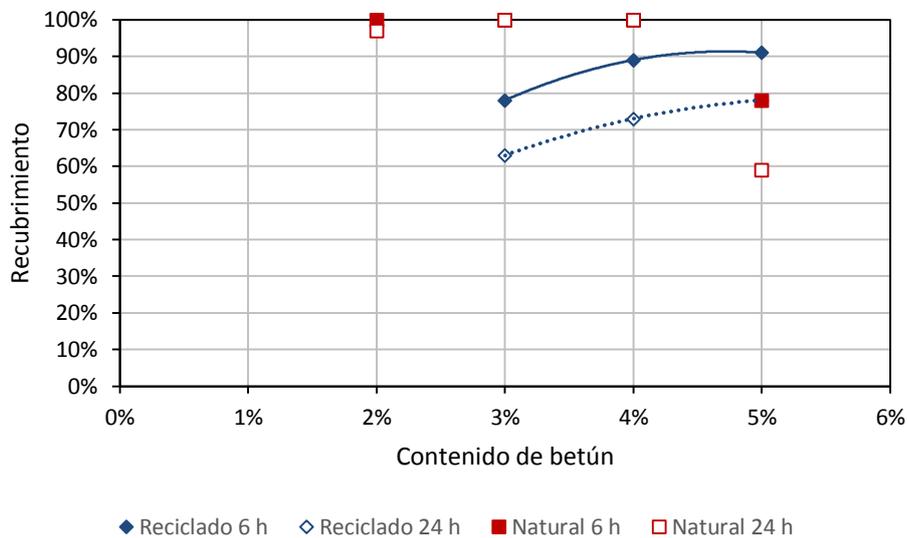


Figura 6.3 Relación entre recubrimientos tras 6h y 12h de ensayo y el contenido de betún

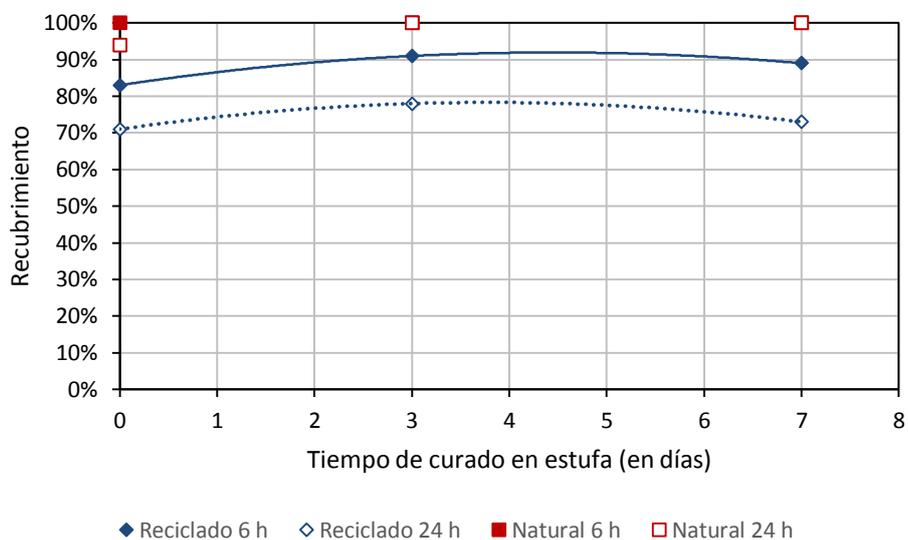


Figura 6.4 Relación entre recubrimientos tras 6h y 12h de ensayo y tiempo de curado



Figura 6.5 Comparativa de dos ensayos de botella giratoria con árido reciclado (izquierda) y árido natural (derecha)

6.3.3 Boiling water test

De modo análogo al ensayo anterior, para la realización de este ensayo se adaptó la Norma ASTM D 3625 al caso de mezclas en frío en el que no es necesario calentar los materiales antes de la mezcla pero sí es necesario aplicar un cierto proceso de curado a posteriori. Se colocaron muestras de 250 g de árido seco perteneciente a la fracción granulométrica 8/12 mm en una cubeta, se añadieron diversos contenidos de agua y emulsión (aunque la Norma indica solamente un contenido del 2% de betún) y se mezcló durante el tiempo de envuelta necesario para que todo el árido quedase envuelto uniformemente.

A continuación, se extendieron las partículas recubiertas del árido sobre una plancha metálica y se dejaron durante 24 h para luego ser sometidas a un determinado proceso de curado en estufa a 50°C (nada, 3 días, 7 días). Tras ello, las partículas se llevaron a una temperatura comprendida entre los 85°C y la temperatura de ebullición del agua y se introdujeron en una cuba con agua destilada hirviendo durante un tiempo de ensayo de 10 min.

Transcurridos los 10 min se retiraron las partículas sueltas de betún, se dejó enfriar las partículas de árido recubiertas de betún y tras retirar el agua, se extendieron éstas sobre toallas blancas de papel dejándolas al aire un tiempo de 24 h.

Finalmente, se procedió a la inspección visual del nivel de recubrimiento. Dicha inspección fue llevada a cabo por dos observadores diferentes de modo que el resultado final se determinó como la media de ambas estimaciones.

Según Kiggundu y Roberts (1988), los recubrimientos mínimos que aseguran una buena adhesividad entre árido y ligante, para mezclas bituminosas en caliente, son de un 85%-90%. Tal y como se puede apreciar en la Tabla 6.6, todas las muestras sobrepasaron claramente este umbral, con la única excepción de la mezcla con árido reciclado, 5% de betún y solamente un 9% de agua.

En primer lugar, se aprecia que los resultados son mejores que los obtenidos para el ensayo de la botella giratoria. Esto se puede apreciar más claramente en el caso

de las mezclas con árido reciclado, puesto que con árido natural siguen saliendo resultados muy buenos, siempre en torno al 100%.

Tabla 6.6 Resultados de afinidad entre árido y ligante según el método del Boiling Water Test. Recubrimientos tras 10 min en agua hirviendo

Tipo de Árido	Contenido de betún	Contenido de agua	Tiempo curado	Recubrimiento		Tiempo envuelta (s)	Tiempo rotura (s)	
				6 h	24 h			
Reciclado	5%	9%	3 días	70%	60%	57	97	
		12%		95%	95%	19	47	
		15%		95%	95%	22	56	
		18%		95%	95%	9	26	
	3%	15%	3 días	95%	95%	19	37	
	4%			90%	90%	19	34	
	5%			95%	95%	22	56	
	5%	15%	0 días	95%	95%	7	28	
			3 días	95%	95%	22	56	
			7 días	90%	90%	12	40	
	Natural	4%	3%	3 días	100%	100%	21	49
			6%		100%	100%	25	131
9%			100%		100%	19	*	
12%			100%		100%	15	*	
2%		3%	3 días	100%	100%	20	107	
3%				100%	100%	31	97	
4%				100%	100%	21	49	
5%				100%	100%	41	53	
4%		3%	0 días	100%	95%	28	88	
			3 días	100%	100%	21	49	
			7 días	100%	95%	31	46	

* La emulsión de estas mezclas no llegó a romper ni tras 3 minutos de mezclado

Con este ensayo no es posible distinguir una clara relación entre los contenidos de agua y betún y el recubrimiento puesto que en general, todos los resultados son muy altos (a excepción de la mencionada mezcla de árido reciclado, 5% de betún residual y 9% de agua). No obstante, las mezclas sometidas a ningún tipo de curado sometidas al curado de 7 días vuelven a dar resultados ligeramente inferiores a las de 3 días debido en el primer caso a que no se ha eliminado el agua de amasada y en el

segundo al envejecimiento (o pérdida de volátiles) del ligante durante los 7 días que permaneció en la estufa.

Llama la atención que estos resultados resultaron sensiblemente superiores a los obtenidos por Pasandín y Pérez (2014a) con mezclas en caliente con árido reciclado, en donde solamente se alcanzó un recubrimiento del 80% con la incorporación de filler cemento. Tratamientos como la preenvuelta de los áridos reciclados en un 5% de emulsión, así como el hecho de dejar la mezcla suelta en estufa a 170°C durante 4 h, resultaron de gran efectividad, mejorando los recubrimientos hasta un 90% y 95% respectivamente, valores generalmente igualados en la presente investigación.

Al igual que también ocurría en el ensayo de la botella giratoria, el contenido de betún parece no afectar sensiblemente al tiempo de envuelta. Sin embargo, aumentando el contenido de agua se consiguen claras reducciones en dichos tiempos (por ejemplo, en mezclas con árido reciclado se pasa de 57 s con un 9% de agua a 9 s con un 18%).

6.3.4 Resumen de resultados

En definitiva, se puede decir que el árido reciclado muestra una peor afinidad con el betún de la emulsión lo cual puede ser indicativo de una peor resistencia al descubrimiento del árido. El hecho de aumentar el contenido de betún ayuda pero sin llegar a los valores de afinidad que se consigue con el árido natural.

El contenido de agua, por su parte, no parece afectar en gran medida a los recubrimientos registrados, siempre y cuando este no sea demasiado bajo. No obstante sí facilita la envuelta del árido, reduciendo el tiempo necesario de mezclado para conseguir la completa envuelta del árido.

Finalmente, se destaca que en general, el ensayo del Boiling Water Test arroja resultados más favorables que el de la botella giratoria, bien sea por la propia naturaleza del ensayo o porque la adhesividad entre áridos y betún se ve más afectada por la agitación mecánica en presencia de agua que por la temperatura.

6.4 Sensibilidad al agua. Ensayo de inmersión-compresión

6.4.1 Descripción de los ensayos realizados

Para la determinación de la sensibilidad al agua de mezclas bituminosas en frío, existe una Norma española específica (de algún modo derivada del ensayo Duriez, NF P98-251) y que tradicionalmente ha sido la más usada para este tipo de mezcla. Dicha Norma es la NLT 162/00 y el procedimiento consiste en la realización del ensayo de inmersión-compresión, o lo que es lo mismo, del ensayo de compresión simple (NLT 161) sobre un grupo de probetas acondicionadas en un baño de agua, comparando los resultados con los obtenidos para otro grupo análogo acondicionado al aire.

Así, se realizó una serie de ensayos de inmersión-compresión, tanto para el árido reciclado como para el árido natural, sobre grupos de 10 probetas (5 acondicionadas en cámara climática más 5 acondicionadas en baño de agua a 49°C durante 4 días) de modo que cada grupo contuviese una combinación diferente de porcentajes de agua y betún. Las probetas, tras el acondicionamiento fueron sometidas a una compresión axial hasta rotura (según NLT-161) obteniéndose un valor medio de resistencia a compresión simple para cada grupo de 5 probetas. Finalmente, el índice de resistencia conservada sería hallado mediante el cociente de las resistencias de ambos grupos:

$$IRC (\%) = \frac{R_2}{R_1} \cdot 100 \quad [Ec. 6-6]$$

Siendo R_2 la resistencia a compresión del grupo acondicionado en baño de agua y R_1 la del grupo acondicionado al aire.

De este modo, para el caso de mezclas con un 100% de árido reciclado, los contenidos de betún ensayados fueron del 2%, 3%, 4%, 5% y 6%, cada uno de ellos combinado con un contenido de agua del 12%, 15% y 18%. Para el caso de las mezclas de control con un 100% de árido natural, los contenidos de betún y agua necesarios para obtener un óptimo fueron del 2%, 3%, 4% y 5% y del 6%, 9% y 12% respectivamente.



Figura 6.6 Rotura de probetas a compresión simple según Norma NLT-161/98

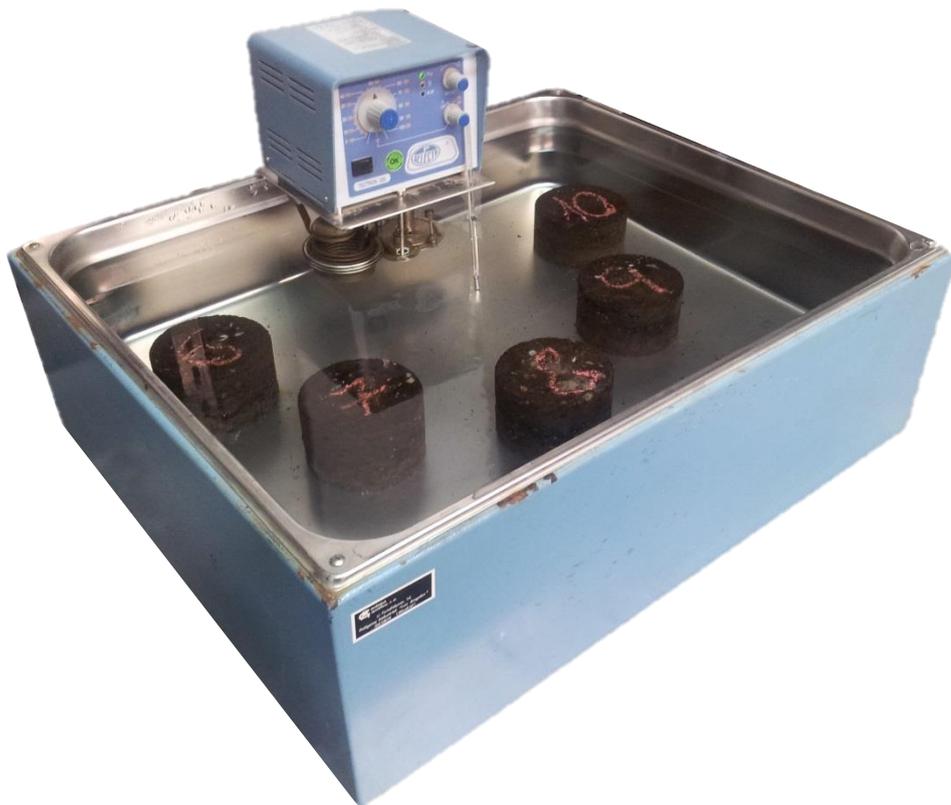


Figura 6.7 Acondicionamiento de probetas en baño de agua según Norma NLT-162/73

6.4.2 Resultados

Los resultados de resistencias secas y húmedas (en términos medios) así como de resistencias conservadas se recogen en la Tabla 6.7, Tabla 6.8 y Tabla 6.9.



Tabla 6.7 Resistencia seca media (kPa) para mezclas con 100% de árido reciclado

% betún	% de agua durante mezclado		
	12%	15%	18%
2%	3412,1	3776,5	3508,7
3%	3907,8	4214,6	3920,2
4%	3883,3	4411,6	4209,8
5%	3439,9	4001,3	3973,3
6%	3052,2	2777,9	3345,0

Tabla 6.8 Resistencia húmeda media (kPa) para mezclas con 100% de árido reciclado

% betún	% de agua durante mezclado		
	12%	15%	18%
2%	2704,9	2892,6	2860,4
3%	2735,7	3197,7	2888,7
4%	2675,0	3030,1	2791,4
5%	2321,3	2566,1	2448,8
6%	2049,5	1884,7	2009,2

Tabla 6.9 Resistencia conservada media (%) para mezclas con 100% de árido reciclado

% betún	% de agua durante mezclado		
	12%	15%	18%
2%	79,2%	76,6%	81,5%
3%	70,0%	75,9%	73,7%
4%	68,9%	68,7%	66,3%
5%	67,5%	64,1%	61,6%
6%	67,1%	67,8%	60,1%

De las 15 combinaciones agua-betún estudiadas, 3 de ellas obtuvieron un valor de resistencia conservada entre 60%-65%, 6 entre 65%-70%, 2 entre un 70%-75%, 3 entre 75%-80% y una superior al 80%. En general y a la vista de la Tabla 6.9, se observa una fuerte caída de resistencia conservada al aumentar la cantidad de ligante (porcentajes de resistencia conservada menores), sobre todo, para grandes cantidades

del mismo, lo cual es lógico, puesto que el acondicionamiento afecta especialmente al ligante y a su adherencia con los áridos, y por tanto, el efecto de la pérdida de resistencia se apreciará menos cuanto menor cantidad de ligante se encuentre en la mezcla. En cuanto al contenido de agua, se aprecia también como la resistencia conservada tiende a decrecer ligeramente a medida que aumenta el contenido de agua en la mezcla. Este fenómeno podría ser debido a que, en mezclas con mucha agua, ésta sale en mayor cantidad hacia afuera durante el curado provocando probetas más porosas y con una mayor cantidad de capilares por los que puede penetrar el agua del acondicionamiento.

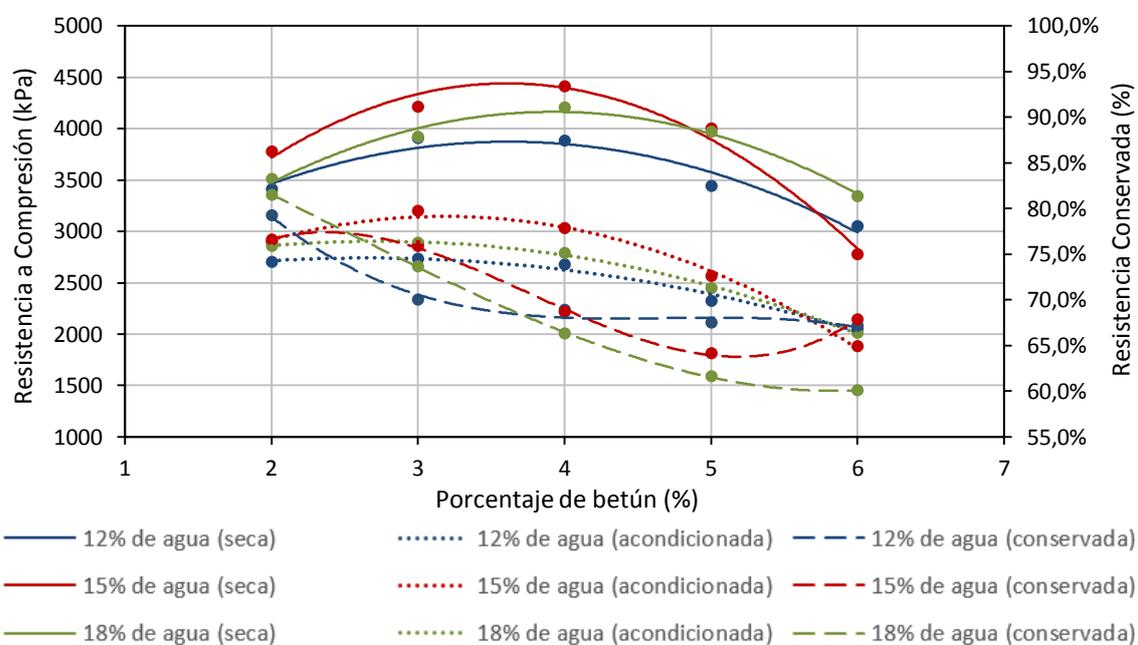


Figura 6.8 Resistencia a compresión simple (sin y con acondicionamiento en baño de agua) y resistencias conservadas según % de betún y agua para un 100% de árido reciclado

No obstante, no se debe confundir la resistencia conservada con las resistencias obtenidas en términos absolutos, cuyos valores medios se pueden observar en la Tabla 6.7 y Tabla 6.8. Así pues, a simple vista puede apreciarse como los contenidos de agua y betún que producen las mayores resistencias conservadas no coinciden con aquellos que logran las mayores resistencias en términos absolutos. No obstante, todos los valores hallados superan los límites mínimos de resistencia seca (1,2 MPa), resistencia húmeda

(1,0 Mpa) y resistencia conservada (60%) de la ATEB (ATEB, ref. b) para tráficos T3 y T4, así como el 50% genérico que establecía el antigua PG-3 para todo tipo de tráfico.

A la vista de la Figura 6.8, las resistencias, tanto seca como húmeda, parecen mostrar máximos entre el 3% y 4% de betún y un 15% de agua. Puede apreciarse también que las resistencias obtenidas para bajas y altas cantidades de betún son similares, no dependiendo en gran medida de la cantidad de agua. No obstante, para cantidades cercanas al óptimo de betún (3%-4%), las resistencias crecen sensiblemente en torno al óptimo de agua (curvas del 15%) mientras que no lo hacen tanto para los demás contenidos de agua (curvas del 12% y 18%). En consecuencia, las curvas del 15% de agua son mucho más pronunciadas que las demás (que son mucho más planas), evidenciándose todavía más el punto óptimo de betún en torno al 3%-4%.

Tabla 6.10 Resistencia seca media (kPa) para mezclas con 100% de árido natural

% betún	% de agua durante mezclado		
	6%	9%	12%
2%	2520,4	2514,2	2384,2
3%	2914,9	2570,8	2761,7
4%	2431,1	2483,2	2467,6
5%	1579,2	1624,0	2074,1

Tabla 6.11 Resistencia húmeda media (kPa) para mezclas con 100% de árido natural

% betún	% de agua durante mezclado		
	6%	9%	12%
2%	1991,8	1920,8	1822,7
3%	2379,6	2256,0	2232,7
4%	2075,3	2179,8	2100,6
5%	1396,8	1286,1	1918,6

Tabla 6.12 Resistencia conservada media (%) para mezclas con 100% de árido natural

% betún	% de agua durante mezclado		
	6%	9%	12%
2%	79,0%	76,4%	76,5%
3%	81,6%	87,8%	80,8%
4%	85,4%	87,8%	85,1%
5%	88,4%	79,2%	92,5%

Comparando estos resultados con los obtenidos para una mezcla con un 100% de árido natural (Tabla 6.10, Tabla 6.11, Tabla 6.12 y Figura 6.9) se aprecia en primer lugar como tanto las resistencias sin acondicionamiento (secas) como con acondicionamiento (húmedas) son sensiblemente mayores para el caso del 100% de árido reciclado. Así, los óptimos pasan a ser de 2914,9 kPa y 2379,6 kPa para el 100% de árido natural a 4411,6 kPa y 3197,7 kPa para el 100% de árido reciclado, es decir, unos incrementos del 51,3% y 34,4% respectivamente. Sin embargo, debido a que la resistencia húmeda no se incrementa tanto como la seca, los porcentajes de resistencia conservada disminuyen, aunque se debe tener en cuenta que la resistencia tras acondicionamiento con un 100% de árido reciclado (3197,7 kPa) sigue siendo 282,8 kPa mayor que la resistencia sin acondicionamiento con un 100% de árido natural (2914,9 kPa) de lo que se concluye que, pese a que el agua afecte más a las mezclas, el resultado sigue siendo todavía considerablemente mejor con el árido reciclado.

Los resultados de resistencia conservada fueron ligeramente inferiores a los encontrados por Ling et al. (2003) para mezclas en frío con árido natural (72,0% y 84,3% para unos contenidos del 3,5% y 5% de betún residual). No obstante, estos no acondicionaban las probetas en agua caliente durante 3 días, sino que introducían una cierta cantidad de agua en el interior de la probeta mediante la aplicación de vacío.

Hugener et al. (2014) estudiaron la resistencia a compresión de reciclados de firmes en frío con emulsión y con un contenido de RAP del 100%. En sus investigaciones, dejaron curar las probetas bien a 23°C o a 40°C durante días, realizando los ensayos de compresión cada cierto tiempo. Valores de resistencia a compresión seca, como los 4411,6 kPa aquí obtenidos para un 100% de árido reciclado, solamente fueron alcanzados tras 60 días a 40°C o tras 120 días a 23°C. En cuanto a la resistencia conservada, sus valores también rondaron el 70% aunque debido a que ellos siguieron la Norma UNE-EN 12697-12, el acondicionamiento del grupo húmedo consistió en 7 días en baño de agua a 18°C, por lo que los resultados no son directamente comparables. Los valores de resistencia conservada obtenidos en reciclados con espuma de betún (Iwanski y Chomicz-Kowalska, 2013) son muy parecidos, superando el 80% solamente con elevados contenidos de ligante y con una adición de cemento Portland del 2%.

Comparando con los resultados de otros autores para mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados, se aprecia por ejemplo, que en general los valores de resistencia conservada están ligeramente por debajo del 89,54% y 87,71% obtenido por Shen y Du (2005) aunque estos no observaron la resistencia a compresión, sino la estabilidad Marshall. Tampoco se alcanzaron los porcentajes de resistencia conservada de Pasandín y Pérez (2013) superiores al 90% ni de Pasandín y Pérez (2014c), aunque en estas ocasiones el parámetro analizado fue la resistencia a tracción indirecta y además de ser mezclas en caliente, habían aplicado sendos pretratamientos con los que consiguieron mejorar sensiblemente la sensibilidad al agua. En comparación con los resultados de Pérez et al. (2012), se puede decir que los valores de resistencia a compresión conservada son bastante parecidos aunque ellos no consiguieron alcanzar el 81,5% para ninguna de sus mezclas con árido reciclado, en las que además, solo se llegó a contenidos del 60%. También los resultados de Pérez et al. (2010) son inferiores, con valores de resistencia conservada que apenas superaban el 60% con contenidos máximos de sustitución de árido del 50%.

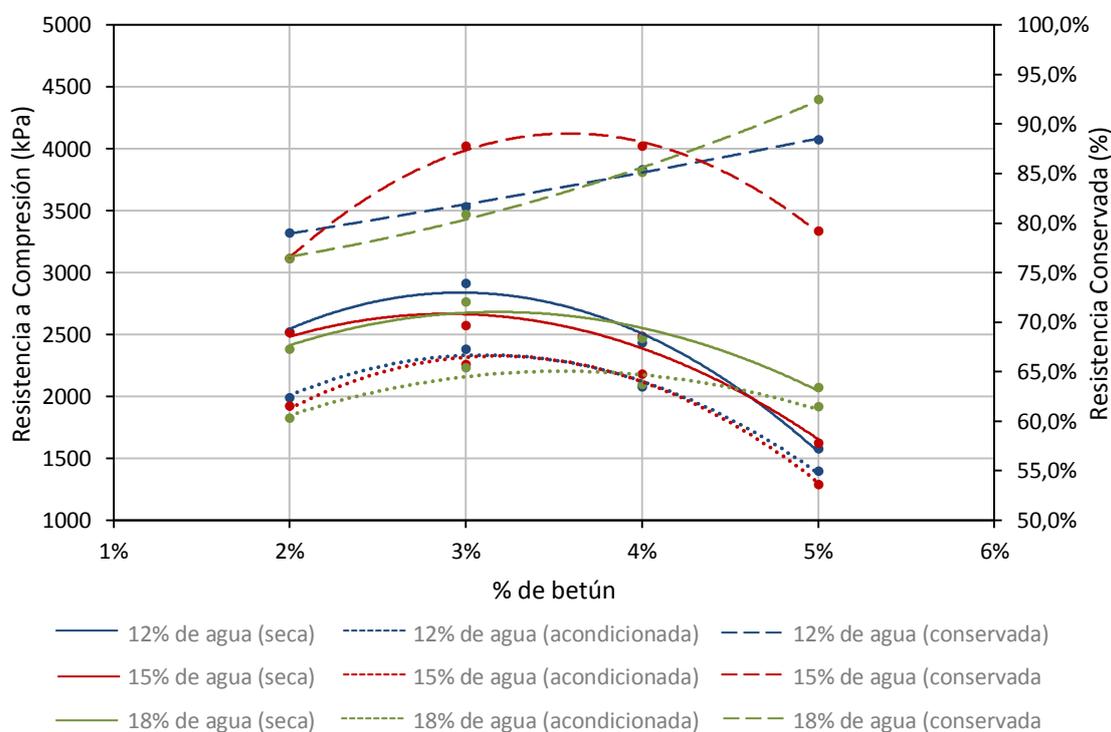


Figura 6.9 Resistencia a compresión simple (sin y tras acondicionamiento) según % de betún y agua para un 100% de árido natural

En cuanto a los contenidos óptimos de betún y agua, se puede apreciar que nuevamente se sitúan, para el caso del árido natural, en torno al 3% de betún (a lo sumo una diferencia a la baja de un 0,5% de betún con respecto al óptimo del 100% reciclado) aunque el contenido de agua baja hasta el 6%. Sin embargo, en este caso las curvas son tan parecidas entre sí que no tiene demasiado sentido discernir un valor óptimo de agua. Esta reducción del contenido óptimo de agua puede estar vinculado a una mayor tendencia del árido reciclado a producir la rotura prematura de la emulsión desde las fases tempranas de mezclado y compactación, tal y como sea analizado anteriormente. De este modo, es necesaria una cantidad elevada de agua en la dosificación que mantenga la emulsión líquida durante más tiempo, consiguiendo un mejor mezclado y una óptima envuelta del árido.

Existe una gran disparidad en cuanto a los resultados publicados por otros autores: 6% de betún residual (Thanaya, 2007), 6,69% de emulsión bituminosa y 3% de agua total (Oruc et al., 2007), 4% de betún residual en peso total de mezcla y 7% de agua total sobre masa de áridos secos (Khalid y Monney, 2009) o 7,3% y 6,7% de betún residual respectivamente para mezclas de control y mezclas con emulsión modificada (Chávez-Valencia et al., 2007). Estos últimos realizaron ensayos de compresión simple llegando a alcanzar resistencias de hasta 1600 kPa, considerablemente inferiores a los resultantes de la presente investigación. También existe constancia de incrementos en los contenidos óptimos de betún de hasta el 12% cuando se añaden a la mezcla bituminosa áridos reciclados (Thanaya, 2010).

Se ha realizado un estudio estadístico de los resultados mediante un análisis de la varianza de dos factores (ANOVA) para determinar tanto el efecto del agua (12%, 15% y 18%) como del betún (2%, 3%, 4%, 5% y 6%) en la resistencia a compresión de las mezclas bituminosas con árido reciclado. Los resultados muestran que estadísticamente hablando, solamente el betún es significativo con un intervalo de confianza del 99% tanto para la resistencia a compresión seca ($p_{betún}=0.002<0.01$) como para la húmeda ($p_{betún}<0.001$). Los p-valores para el agua no fueron estadísticamente significativos, ni siquiera para un nivel de confianza del 95% ($p_{agua}=0.126>0.05$ y $p_{agua}=0.069>0.05$ respectivamente). Lo mismo ocurre para el árido natural. Los contenidos de betún (2%, 3%, 4% y 5%) y agua (6%, 9% y 12%) fueron estudiados pero solo el contenido de betún fue significativo tanto para la resistencia a compresión seca ($p_{betún}<0.001$) como

para la húmeda ($p_{betún} < 0.001$). Los p-valores del contenido de agua no fueron significantes ni con un intervalo de confianza del 95% ($p_{agua} = 0.094 > 0.05$ y $p_{agua} = 0.389 > 0.05$ respectivamente). De este modo, se concluye que aunque los contenidos óptimos de betún se aprecian claramente (3% para árido natural y entre un 3% y 4% para árido reciclado), los contenidos óptimos de agua hallados son simples aproximaciones, debiendo ser determinados en función de los resultados de otros ensayos o bajo otras consideraciones.

6.4.3 Tensiones y deformaciones de rotura

Finalmente, se han relacionado las tensiones y deformaciones soportadas por las probetas en el momento de la rotura a compresión simple. Con el fin de simplificar el análisis de los resultados, a continuación solamente se mostrarán y comentarán las Figuras más representativas, mientras que en el Anexo I de la presente tesis, se recogerán gráficamente todos los casos posibles (con o sin acondicionamiento en baño de agua, con un 100% de árido natural o reciclado) y todos ellos diferenciando los puntos, según contenidos de agua y betún, con el fin de intentar vislumbrar alguna tendencia y la influencia que dichos porcentajes pueden tener de modo independiente.

En primer lugar, cuando todos los puntos se representan diferenciándolos según su contenido de agua (Figura 6.10), los diferentes colores se entremezclan de modo que la única conclusión plausible es que el contenido de agua poco o nada afecta a la rotura de las probetas.

Sin embargo, todo lo contrario ocurre en la Figura 6.11. En ella, la discretización se ha llevado a cabo según los contenidos de betún y ahora, se aprecia claramente como en general las deformaciones de rotura aumentan con el contenido de betún, de modo que los colores ya casi no se mezclan entre sí. De este modo, se aprecia como las curvas tensión-deformación de rotura avanzan de izquierda a derecha a medida que aumenta el contenido de betún a la vez que alcanzan un valor máximo de resistencia a compresión simple a partir del cual la resistencia vuelve a descender. En este caso (probetas con el 100% de árido reciclado y con acondicionamiento al aire), tal y como se había comentado anteriormente, el contenido de betún que logra la mayor resistencia a

compresión simple es el 4%. Sin embargo, también se debe tener en cuenta que la deformación que alcanzan dichas probetas es también mayor que la alcanzada en mezclas con menores contenidos de betún.

Exactamente lo mismo ocurre para el caso de las mezclas con un 100% de árido natural (Figura 6.12) y para las probetas acondicionadas en baño de agua, tal y como se recoge en el Anexo I.

Se deben mencionar también dos aspectos importantes de las curvas obtenidas (Anexo I). Por un lado, que los contenidos de betún inmediatamente anteriores y posteriores a los óptimos, recogen niveles de resistencia muy similares pero la deformación siempre es mayor en el caso del contenido de betún mayor. Por otro lado, las curvas muestran cierta asimetría con el pico desplazado hacia la izquierda (sobre todo en casos como el de la Figura 6.12). Todo ello indica que tanto pequeñas escaseces o excesos en la dosificación del betún no afectan demasiado a la resistencia obtenida. No obstante, mientras que las escaseces mejoran las deformaciones de rotura (las reducen), los excesos pueden llegar a disparar los valores de las mismas, lo que va a propiciar una mayor tendencia a las deformaciones plásticas.

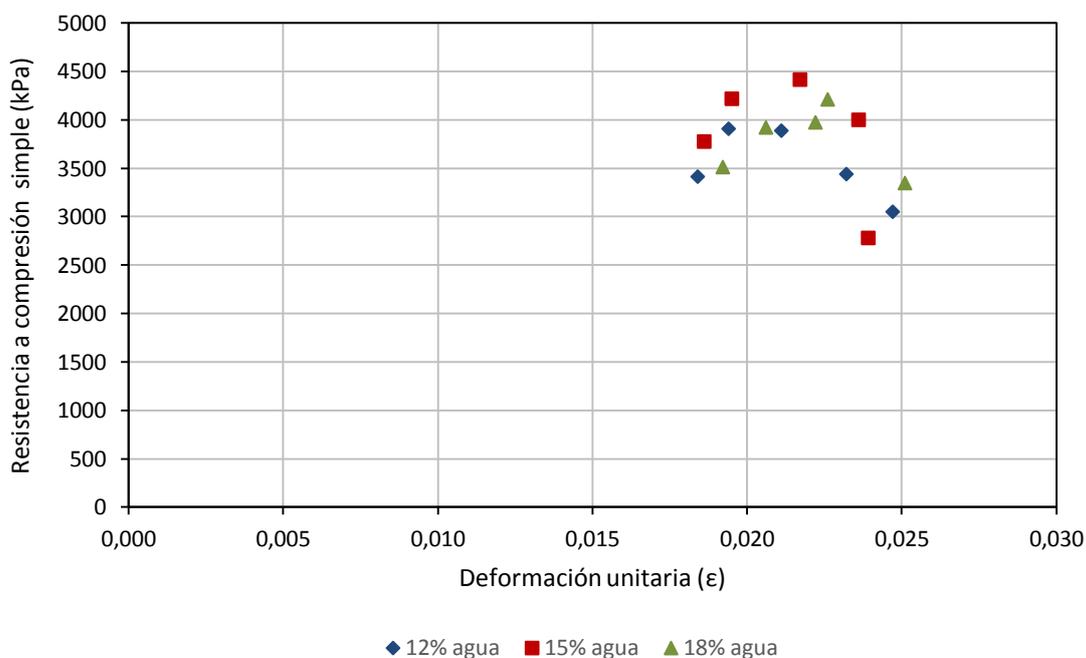


Figura 6.10 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido reciclado y tras acondicionamiento de 4 días al aire según contenido de agua

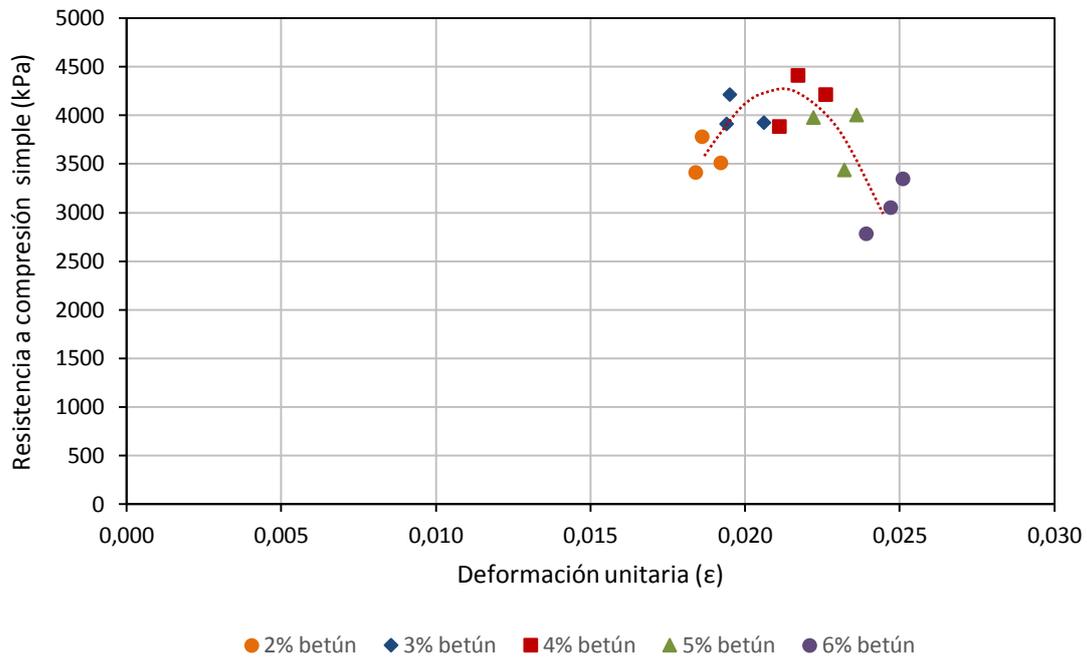


Figura 6.11 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido reciclado y tras acondicionamiento de 4 días al aire según contenido de betún

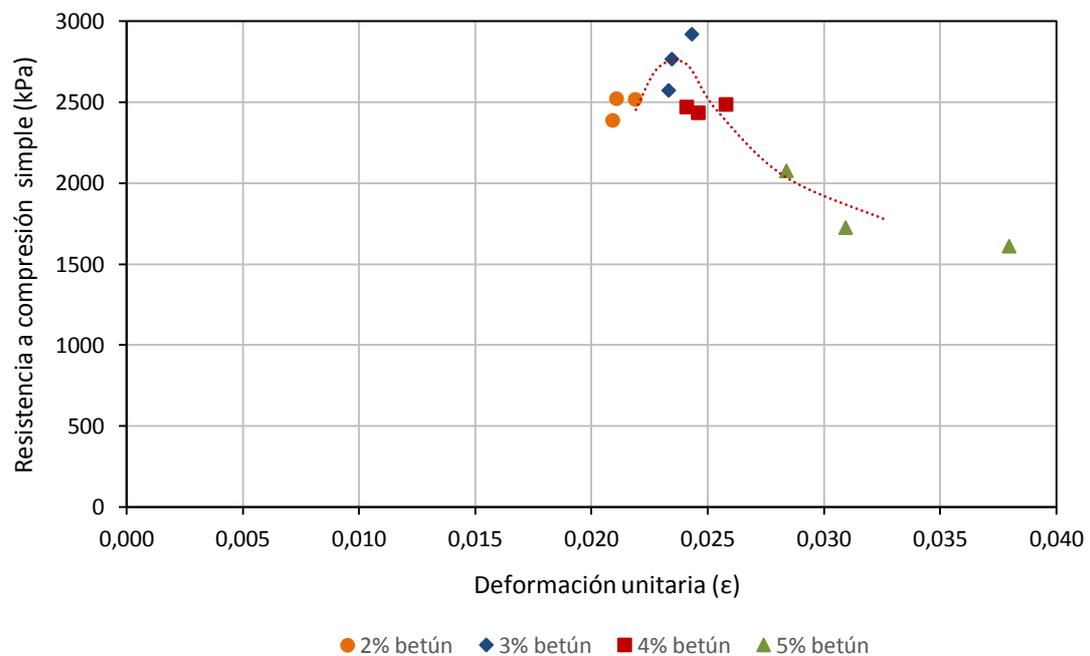


Figura 6.12 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido natural y tras acondicionamiento de 4 días al aire según contenido de betún

Finalmente, también se puede concluir que las mezclas con árido reciclado no solamente presentan mayores resistencias a compresión simple, tanto con acondicionamiento al aire como en baño de agua, que las mezclas fabricadas con árido natural (aspecto ya comentado anteriormente), sino que además, también presentan, en general, menores deformaciones de rotura, por lo que se prevé que se comporten mejor ante la aparición de deformaciones permanentes.

CAPÍTULO 7

**COMPORTAMIENTO VISCO-ELASTO-
PLÁSTICO DE LAS MEZCLAS EN FRÍO
CON RCD**

7.1 Resistencia a tracción indirecta

7.1.1 Descripción de los ensayos realizados

Una vez cortadas las probetas y seleccionadas las mitades destinadas al ensayo de tracción indirecta, se procedió a su ejecución según la Norma UNE-EN 12697-23. En total, se realizaron 120 ensayos (en grupos de 5 probetas) con un 100% de árido reciclado y con diferentes porcentajes de betún y agua hasta conseguir determinar una cantidad óptima de ambos. Además, con el fin de obtener un valor de referencia, fueron necesarios otros 63 ensayos (en grupos de 3 probetas) para determinar los correspondientes óptimos aunque empleando, esta vez, el árido natural.

Siguiendo las indicaciones y recomendaciones de la Norma UNE-EN 12697-23 las probetas de 50 mm de altura fueron llevadas a una temperatura de 25°C tras lo cual fueron situadas en el bastidor de ensayo y rotas por medio de una carga diametral con un ratio de deformación constante de 50±2 mm/min. Finalmente, la resistencia a tracción indirecta fue determinada mediante la siguiente expresión:

$$ITS = \frac{2 P}{\pi D H} \quad [Ec. 7-1]$$

Donde *ITS* es la resistencia a tracción indirecta (GPa), *P* es la carga máxima alcanzada en el ensayo (kN), *D* es el diámetro de la probeta (mm) y *H* es la altura de la probeta (mm).

7.1.2 Resultados

Los resultados se recogen en la Tabla 7.1, Figura 7.2 y Figura 7.3. Cumpliendo los requerimientos de la Norma UNE-EN 12697-23, es importante aclarar en primer lugar que la inmensa mayoría de probetas presentaron una línea de rotura limpia por tracción que tiende a situarse a lo largo de la superficie de contacto entre árido y ligante, también fue posible observar la rotura a lo largo de algunas partículas del árido como en el caso de la Figura 7.1.

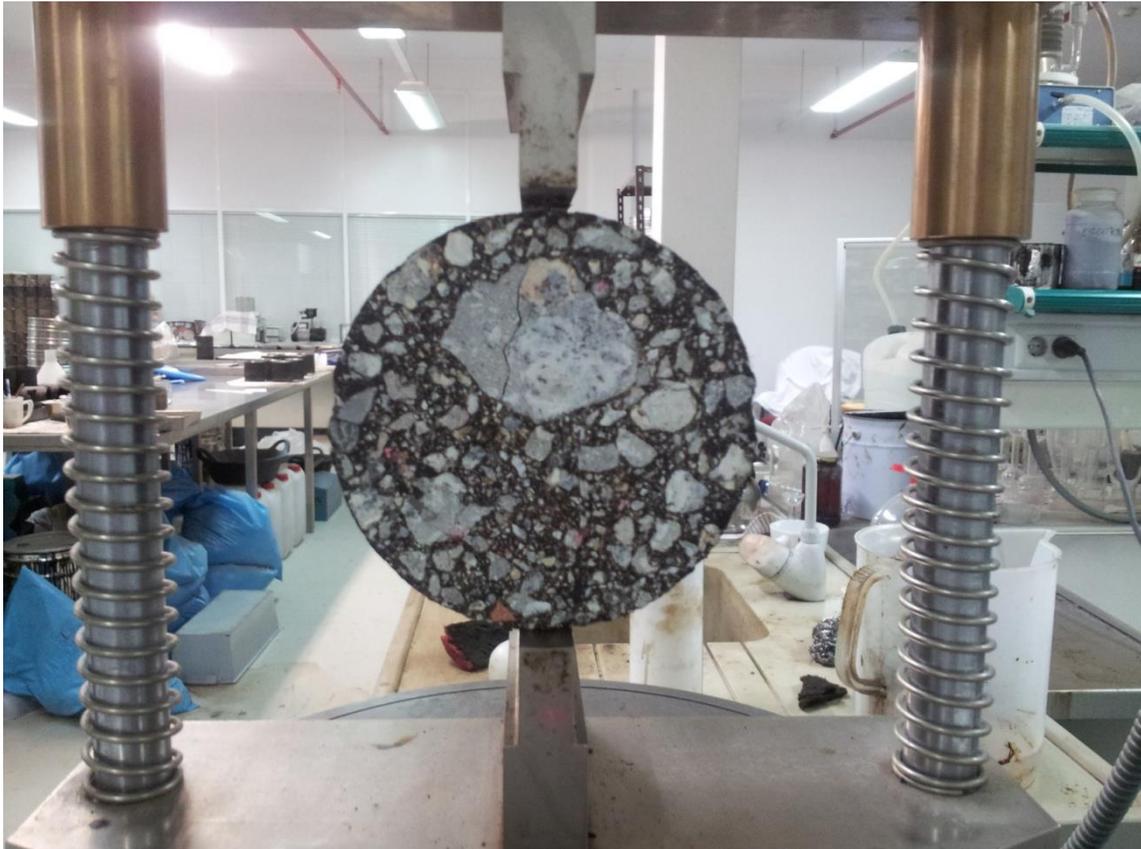


Figura 7.1 Aspecto de la probeta recién finalizado el ensayo de tracción indirecta según Norma UNE-EN 12697-23

Tabla 7.1 Resistencia a tracción indirecta (en kPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado

% de betún	% de agua de amasada según peso de árido seco									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
3%	602	634	646	635	652	671	652	619	587	606
4%	738	740	752	723	748	751	748	670	648	655
5%	847	862	904	914	940	903	880	835	785	784
6%	862	881	892	920	944	952	960	925	885	868
7%	843	841	829	825	860	901	920	935	890	858
8%	821	824	795	747	745	767	777	753	745	713

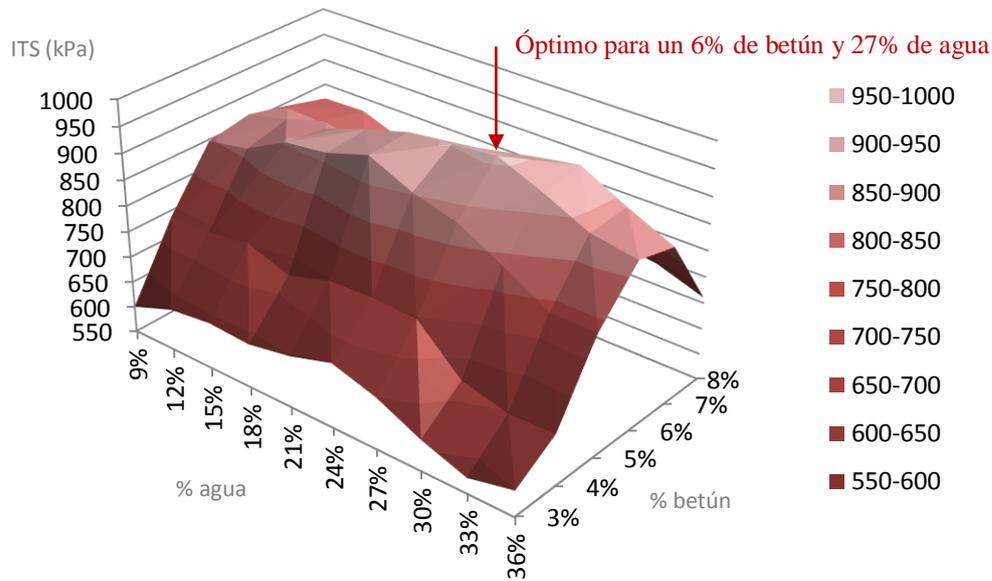


Figura 7.2 Resistencia a tracción indirecta (en kPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado

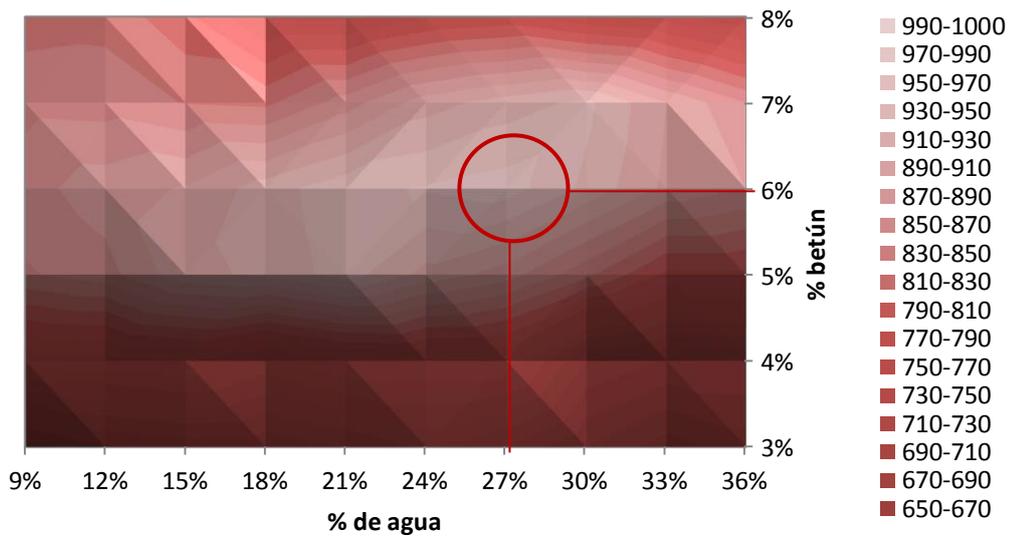


Figura 7.3 Resistencia a tracción indirecta (en kPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado

Como se puede observar en primer lugar, es evidente que la resistencia a tracción indirecta es mucho más dependiente del contenido de betún que del contenido de agua. Por ello, las líneas de igual resistencia (Figura 7.2 y Figura 7.3) tienden a ser paralelas según la variación de agua y parabólicas según la variación de betún. De este modo, se pudo comprobar que el contenido óptimo de betún es de un 6% aunque ha sido necesario llegar a contenidos de agua más elevados para conseguir determinar un

óptimo de agua, el cual es muy superior al óptimo de humedad resultante del ensayo Proctor Modificado (12%).

Esta contradicción con los métodos clásicos de dosificación de mezclas bituminosas en frío, los cuales adoptaban como contenido óptimo de agua el óptimo Proctor, se explica por el hecho de que el árido reciclado, tal y como ya se ha expuesto, podría producir la ruptura de la emulsión creando grumos de betún, ya incluso desde el mezclado inicial en amasadora. Así, sería necesaria una cantidad de agua más elevada que consiguiese mantener el betún emulsificado hasta producirse la correcta envuelta del árido y su compactación. Esto se evidencia también en la ligera ‘torsión’ que las curvas sufren de modo que es para los contenidos más altos de betún donde se necesitan mayores contenidos de agua y al revés (Figura 7.3).

Los valores de resistencia a tracción indirecta, no alcanzan en ningún caso los 1,5 MPa obtenidos por Passetto y Baldo (2011) para mezclas en caliente con escorias siderúrgicas y por Pasandín y Pérez (2014c) con una sustitución de hasta el 30% de árido reciclado de hormigón. Tampoco se alcanzaron los 1,2 MPa obtenidos por Chen et al. (2011) con filler de ladrillo.

No obstante, cuando se comparan los resultados con los de las mezclas de control obtenidos para un 100% de árido natural (Tabla 7.2, Figura 7.4 y Figura 7.5) se extrae que, en primer lugar, las resistencias a tracción indirecta son mayores para el 100% de árido reciclado que para el 100% de árido natural. De este modo, la resistencia máxima con reciclado es del orden de un 13% superior que la resistencia máxima con natural, obteniéndose un efecto beneficioso mediante el uso del reciclado.

Los resultados también son mejores que los obtenidos por autores como Dondi et al. (2014) para reciclados de firmes en frío con emulsión, cuyos valores rondaban los 500 MPa para mezclas con árido natural y 400 MPa y 350 MPa con adiciones de residuos de neumáticos; y que los de Yan et al. (2014), que aún sin la adición de polvo de neumático, resultaron en torno a los 600 kPa para muestras con RAP y con un 1,5% de cemento. También son sensiblemente mayores que los de Kim et al. (2011) para reciclados de firmes con emulsión y con betún (valores en torno a 50-150 kPa), aunque las condiciones de curado en este caso son totalmente diferentes; y los de Iwanski y

Chomicz-Kowalska (2013), que obtuvieron valores con reciclados en frío con espuma de betún superiores a los 900 kPa solamente con mezclas ricas en ligante y adiciones de cemento Portland de un 2,5%. También son mayores que los de Dal Ben y Jenkins (2014), que alcanzaron su máxima resistencia a 25°C con la mezcla de un 50% de RAP y 50% de árido natural, pero quedándose igualmente en unos 500 kPa.

Tabla 7.2 Resistencia a tracción indirecta (en kPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural

% de betún	% de agua según peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
2%	543	475	525	478	482
3%	798	729	724	743	719
4%	851	792	791	755	739
5%	690	485	567	513	635

Por otro lado, las formas de las gráficas son similares, siendo las líneas paralelas con la variación del contenido de agua, por lo que nuevamente el agua aporta una escasa influencia en la resistencia de la mezcla. No obstante, en este caso las resistencias más altas tienden a darse para contenidos muy bajos de agua, habiéndose hallado el óptimo para el contenido mínimo del 3% que permite el propio contenido de agua de la emulsión. Esto podría ser debido a que en este caso la emulsión no rompe prematuramente por culpa del árido (se debe recordar que el árido reciclado, mucho más absorbente que el natural provocaba la rotura de la emulsión a niveles próximos al cemento) y por tanto el agua solamente supondría, en este caso, un elemento nocivo para la mezcla, facilitando el descubrimiento del árido.

Finalmente, si el óptimo del reciclado se situaba en un contenido de betún del 6%, se aprecia como esta vez, para el 100% de árido natural se da sobre el 4%. Este aporte extra de betún/emulsión que se debe realizar cuando se trabaja con árido reciclado concuerda con la amplia mayoría de autores tal y como ya se ha mencionado en capítulos anteriores y lo cual no deja de tener cierta lógica si se tiene en cuenta la elevada absorción del árido reciclado.

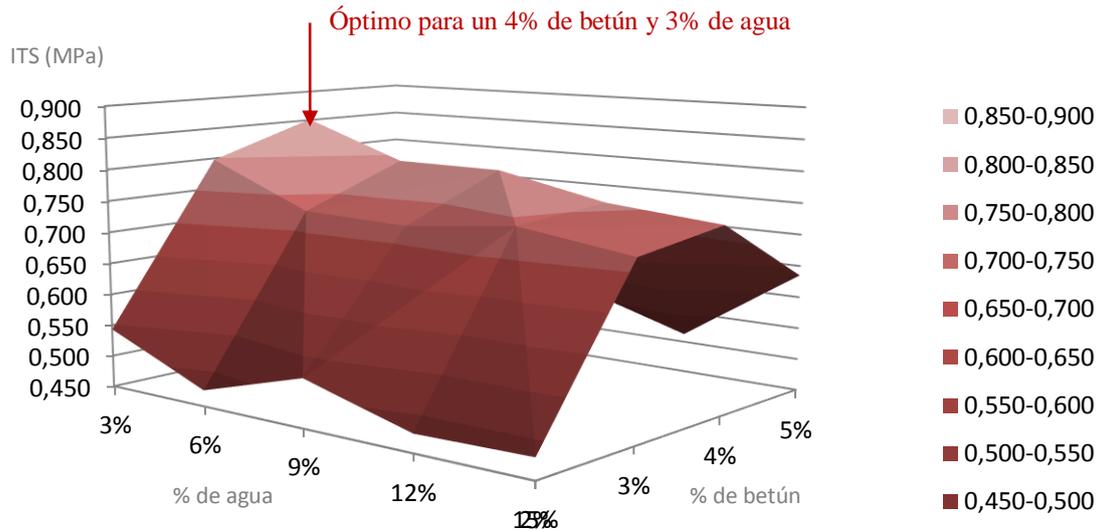


Figura 7.4 Resistencia a tracción indirecta (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural

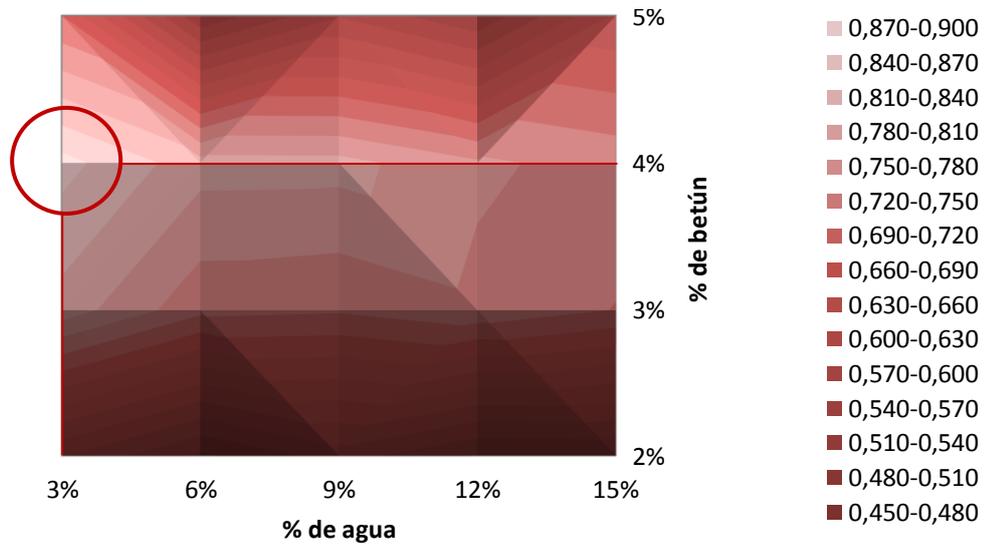


Figura 7.5 Resistencia a tracción indirecta (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural

7.1.3 Tensiones y deformaciones de rotura

Al igual que se hizo en el apartado anterior para el caso de rotura de probetas a compresión simple, se han relacionado las tensiones y deformaciones de rotura en los

ensayos de tracción indirecta. Para simplificar el análisis de los resultados, solamente se mostrarán a continuación las gráficas más destacables, pudiendo verse las correspondientes a todo el abanico de casos analizados en el Anexo I.

En primer lugar, y al igual que en el caso anterior, cuando los puntos se diferencian según el contenido de agua (Figura 7.6), no es posible reconocer ningún tipo de tendencia por lo que nuevamente se puede concluir que el contenido de agua poco o nada afecta a la forma de rotura de las probetas sometidas a tracción indirecta.

Sin embargo, cuando los puntos se clasifican en función del contenido de betún (Figura 7.7), se aprecia nuevamente una clara tendencia de izquierda a derecha a medida que aumenta dicho contenido, de forma que se alcanza una resistencia máxima a partir de la cual la tensión de rotura vuelve a bajar y las deformaciones crecen rápidamente. La misma tendencia es observada cuando las mezclas contienen árido natural en vez de árido reciclado (Figura 7.8).

Puede observarse que en general, las mezclas con árido reciclado no solo mostraron resistencias mayores que las mezclas con árido natural (aspecto ya comentado anteriormente) sino que además, también muestran menores deformaciones de rotura por lo que se prevé que sean menos propensas a las deformaciones permanentes.

Finalmente, por la forma de las curvas, también puede apreciarse como las escaseces a la hora de dosificar el contenido de betún pueden producir importantes pérdidas de resistencia con respecto al contenido óptimo (6% para mezclas con árido reciclado y entre un 3% y 4% para mezclas con árido natural) mientras que los excesos de betún pueden significar, sobre todo, aumentos importantes en la deformación de rotura.

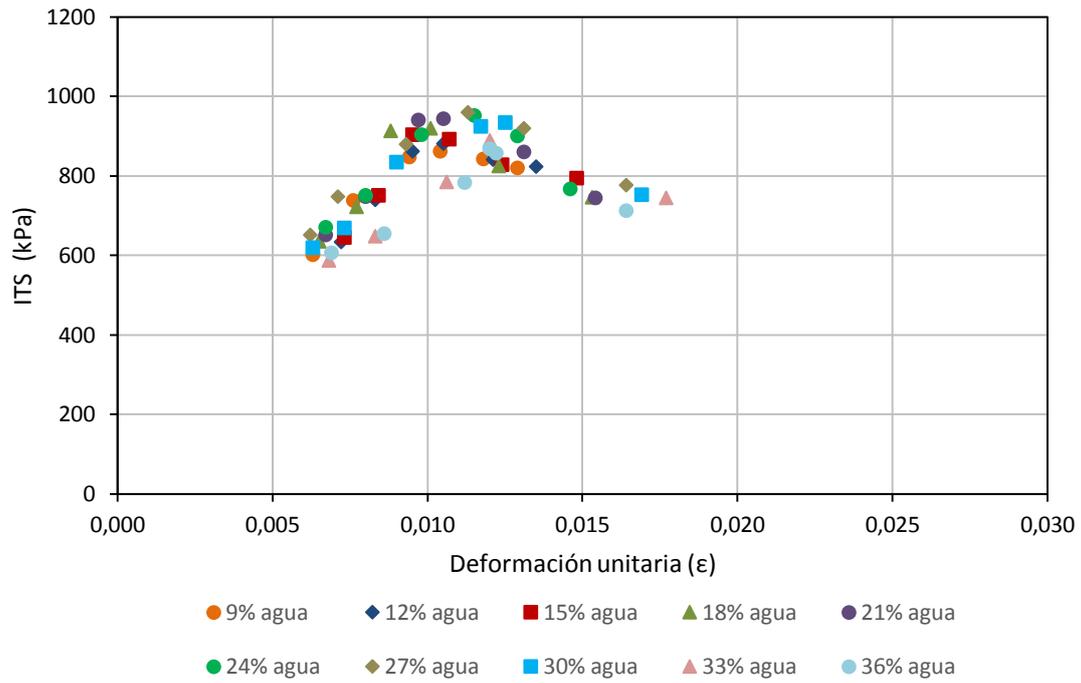


Figura 7.6 Relación entre deformación de rotura y resistencia a tracción indirecta para mezclas con un 100% de árido reciclado según porcentajes de agua

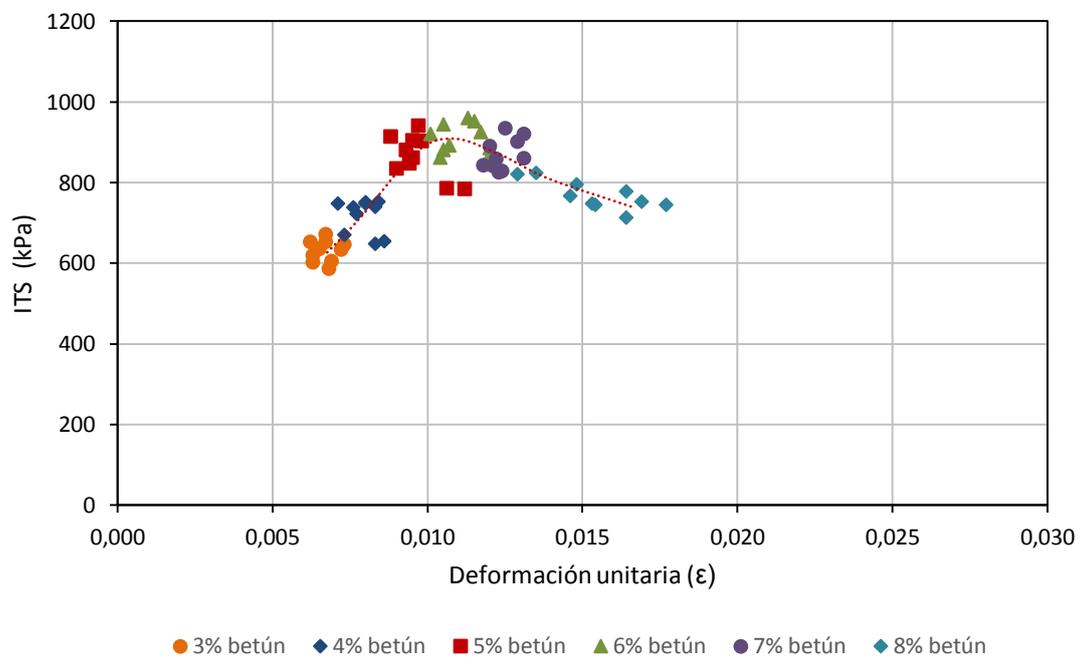


Figura 7.7 Relación entre deformación de rotura y resistencia a tracción indirecta para mezclas con un 100% de árido reciclado según porcentajes de betún

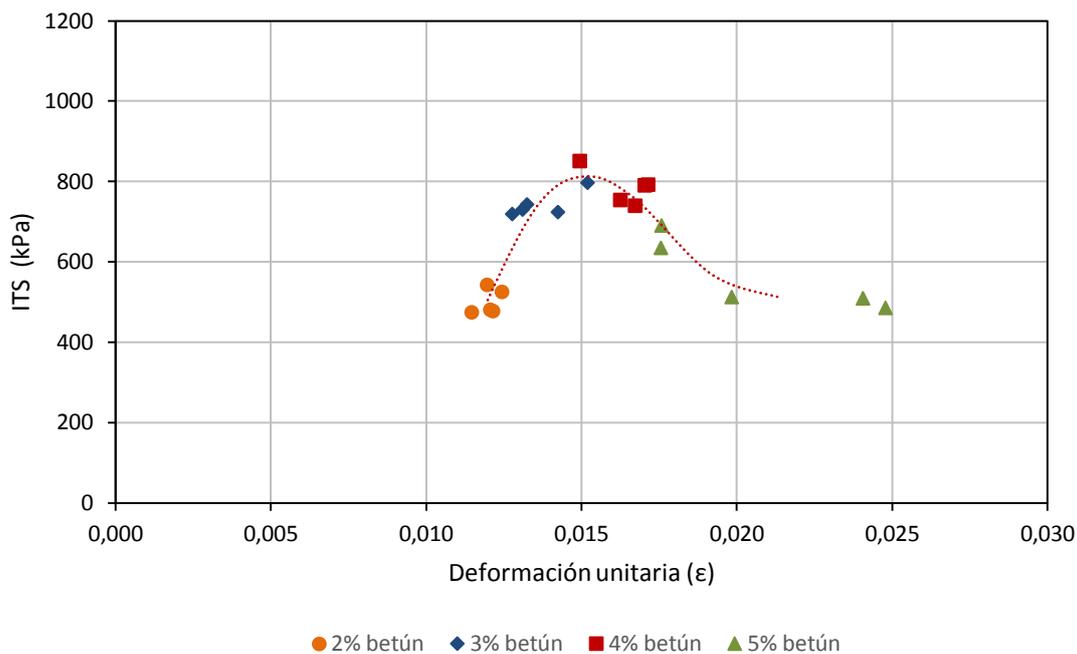


Figura 7.8 Relación entre deformación de rotura y resistencia a tracción indirecta para mezclas con un 100% de árido natural según porcentajes de betún

7.2 Rigidez según el módulo resiliente a tracción indirecta (ITSM)

7.2.1 Descripción de los ensayos realizados

El módulo resiliente se determinó siguiendo la Norma UNE-EN 12697-26 en su modalidad de ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (Anexo C). En este caso, se ensayaron las parejas de las probetas ensayadas a tracción indirecta y cada una de ellas, a 2°C, 10°C y 20°C (según la rutina habitual especificada en la Norma). La temperatura de 2°C fue elegida frente a la alternativa de 0°C para evitar la posible congelación del agua alojada en el interior de las probetas, lo cual produciría un comportamiento sensiblemente diferente al comportamiento visco-elastoplástico que se deseaba estudiar.

Tras 10 pulsos de acondicionamiento, las probetas fueron sometidas a 5 ciclos dinámicos de carga diametral con una duración total de 3 s por ciclo, de los cuales 124 ms se corresponden con el aumento de la carga y el resto con un periodo de

recuperación de deformaciones visco-elásticas. El módulo de rigidez a tracción indirecta (ITSM) para cada pulso de carga, fue calculado según la siguiente expresión:

$$S_m = \frac{F (\vartheta + 0,27)}{z \cdot h} \quad [\text{Ec. 7-2}]$$

Donde S_m es el módulo de rigidez (MPa), F representa el valor máximo de la carga cíclica aplicada (N), z es la amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga (mm), h es el espesor medio de la probeta (mm) y ϑ es el coeficiente de Poisson (asumido como 0,35). El valor final para cada probeta se halló como la media de los 5 pulsos.

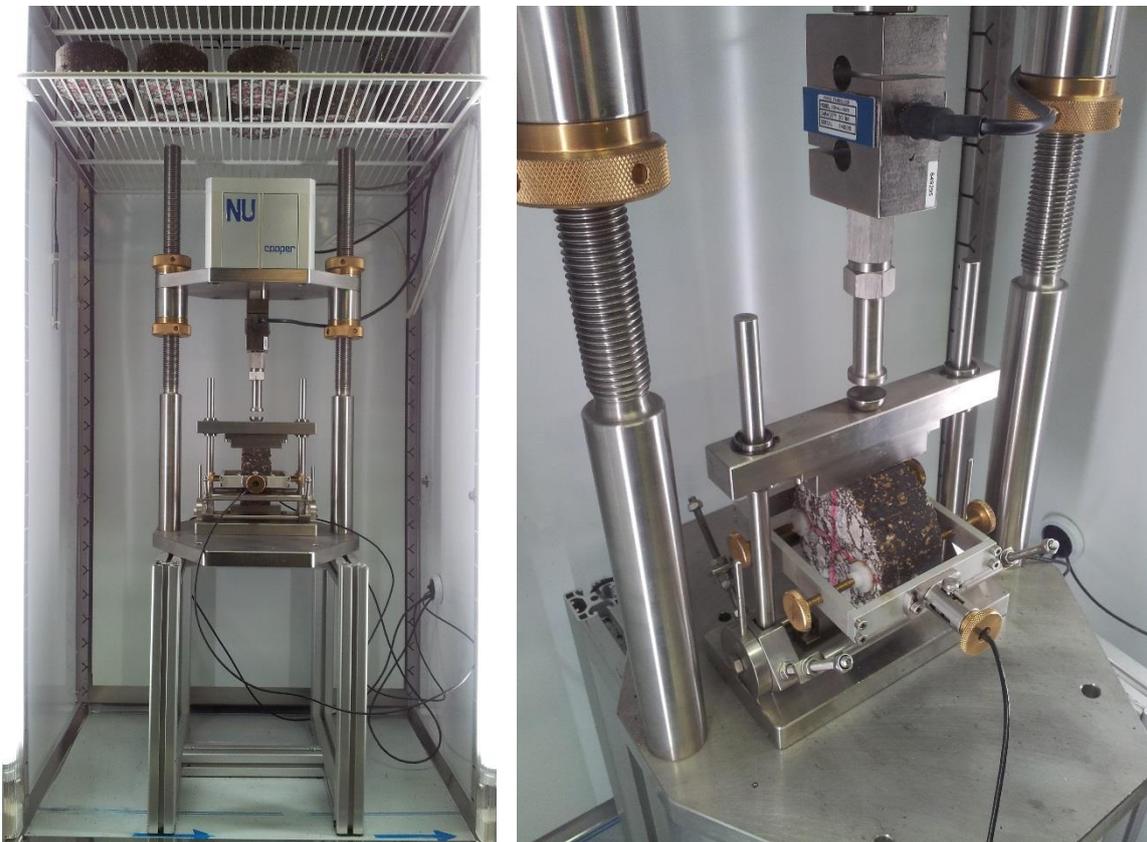


Figura 7.9 Ensayo dinámico de rigidez según Norma UNE-EN 12697-26

Así pues, nuevamente se realizó una amplia serie de ensayos agrupados en grupos de 5 probetas, por contenidos de agua-betún, para el árido reciclado y 3 para el árido natural. El valor definitivo para cada contenido de agua y betún se calculó como la media de los valores obtenidos para cada grupo de probetas. Finalmente, se repitieron

los ensayos a 2°C, 10°C y 20°C, con el fin de determinar la influencia de la temperatura en el comportamiento de las mezclas.

7.2.2 Resultados

Los resultados medios se muestran en la Tabla 7.3, Tabla 7.4, Tabla 7.5 y Figura 7.10. Aunque en general no alcanzan los valores de rigidez obtenidos por otros autores para mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados (Shen y Du, 2005; Paravithana y Mohajerani, 2006; Chen et al., 2011a; Pasandín y Pérez, 2013 y 2004c), el óptimo obtenido para 20°C (4024 MPa) es superior a los valores publicados por Thanaya (2007) en mezclas bituminosas en frío con árido natural (3378 MPa), incluso cuando éste añadía un 1% de cemento de fraguado rápido y aplicaba dos ciclos de compactación fuerte (2x120 revoluciones en compactador giratorio, lo cual según el autor es equivalente a 2x75 golpes de martillo Marshall en cada cara de la probeta) a las probetas. Otros autores como Oruc (2007) y Ozsahin y Oruc (2008) analizaron la rigidez a 25°C de las mezclas en frío con contenidos de betún de 4,2%, 5,2% y 6,2% tras diferentes tiempos de curado. Con un curado de 120 días, solamente superaron los 4024 MPa añadiendo a estas mezclas cantidades de cemento de un 1%, 2% y 3% respectivamente y aún con 360 días de curado fue necesario añadir un 1%, 1% y 3% de cemento respectivamente. Al Nageim et al. (2012) Y Al-Busaltan (2012b) solamente obtuvieron módulos resilientes a 20°C superiores a los 4024 MPa con largos tiempo de curado y con la adición de un 5,50% de cemento Portland convencional o un 4,13% de cenizas volantes. Al-Hdabi et al. (2014a) solamente superó este valor con porcentajes de cemento del 6% o con un 4% de cenizas volantes y curados superiores a 28 días tras curado artificial inicial.

Estos resultados también pueden ser comparados con los obtenidos para otros materiales similares como los reciclados en frío con emulsión bituminosa. Así, Ma et al. (2012) consiguieron un módulo resiliente a 25°C de 1450 MPa tras 90 días de curado y con la aportación de un 6% de cemento a la mezcla. Por su parte, a 20°C, Dondi et al. (2014) obtuvieron módulos en torno a los 5500 MPa con áridos naturales y bajando sobre los 4500 MPa cuando se añadían residuos de neumáticos a las mezclas. Kim et al. (2011) estudiaron la rigidez de los reciclados con emulsión y con espuma de betún,

registrando valores crecientes con el tiempo de curado y siempre mayores para la espuma de betún (entre 1500 kPa y 4200 kPa) que para la emulsión (entre 1000 kPa y 3000 kPa). Por tanto, podría decirse que los resultados son mejores que los de Ma et al. (2012) y Kim et al. (2011) (aunque el curado empleado por estos últimos era muy diferente por lo que los resultados no son directamente comparables) pero sin llegar a los niveles de Dondi et al. (2014), en torno a los 5000 MPa, quizá más propios de mezclas en caliente. Por ello, los resultados son suficientemente altos a la vez que se sigue conservando cierta flexibilidad, muy beneficiosa en caminos de medio/bajo tráfico en los que las explanadas no suelen aportar elevadas capacidades portantes.

Tabla 7.3 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado a 2°C

% de betún	% de agua total en amasada según peso de árido seco									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
3%	3256	4567	4551	4114	4944	6009	5993	5911	5839	5820
4%	4990	6010	6493	5900	6228	6592	6493	6433	6352	6434
5%	6486	7586	7606	7738	7740	7485	7058	6976	6822	6957
6%	7512	7461	7374	7731	7859	7959	8010	7560	7531	7545
7%	7532	7325	7140	7023	6851	7412	8019	8407	7611	7518
8%	7251	7140	6723	6359	6082	6234	7385	7480	7105	6689

Tabla 7.4 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado a 10°C

% de betún	% de agua total en amasada según peso de árido seco									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
3%	3132	4022	4201	3496	3887	4811	5064	4808	4679	4552
4%	3805	4654	4912	4659	4895	5284	5102	5094	5063	4989
5%	4610	5670	5889	5890	5831	5880	5530	5392	5402	5410
6%	4254	5813	5448	5950	6007	5980	6010	5941	5693	5607
7%	5778	5468	5153	5199	5105	5170	5492	6044	5741	5599
8%	5632	5254	4790	4506	4220	4400	4717	5015	4913	4720

Tabla 7.5 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado a 20°C

% de betún	% de agua total en amasada según peso de árido seco									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
3%	2379	2622	2490	2710	3043	3312	3596	3566	3558	3570
4%	2741	3013	3318	3182	3380	3595	3667	3657	3601	3583
5%	3024	3723	4024	3854	3912	4001	3766	3640	3618	3553
6%	3515	3642	3418	3866	3896	3786	4006	3799	3586	3451
7%	3403	3321	2844	2987	3079	2983	3421	3812	3490	3213
8%	3288	2837	2668	2394	2311	2269	2565	2707	2724	2526

Por otro lado, también se pudo observar claramente como la pérdida de rigidez se acentúa a medida que aumenta la cantidad de betún en la mezcla, si bien el agua no parece afectar demasiado (Tabla 7.6). Así, se puede comprobar como para los contenidos óptimos a 2°C del 7% de betún y 30% de agua la rigidez desciende un 54,7% mientras que para otros contenidos menores de betún dicho descenso no es tan pronunciado. De ahí a que el óptimo de betún a 20°C sea del 5% en lugar del anterior 7%.

Tabla 7.6 Pérdida de rigidez al pasar de 2°C a 20°C (en % de rigidez a 2°C)

% de betún	% de agua según peso de árido seco									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
3%	26.9%	42.6%	45.3%	34.1%	38.5%	44.9%	40.0%	39.7%	39.1%	38.7%
4%	45.1%	49.9%	48.9%	46.1%	45.7%	45.5%	43.5%	43.2%	43.3%	44.3%
5%	53.4%	50.9%	47.1%	50.2%	49.5%	46.5%	46.6%	47.8%	47.0%	48.9%
6%	53.2%	51.2%	53.6%	50.0%	50.4%	52.4%	50.0%	49.7%	52.4%	54.3%
7%	54.8%	54.7%	60.2%	57.5%	55.1%	59.8%	57.3%	54.7%	54.1%	57.3%
8%	54.7%	60.3%	60.3%	62.4%	62.0%	63.6%	65.3%	63.8%	61.7%	62.2%

Comparando con los resultados obtenidos para un 100% de árido natural (Tabla 7.7, Tabla 7.8, Tabla 7.9, Tabla 7.10 y Figura 7.11) se aprecia como el contenido óptimo de betún es considerablemente inferior (4% frente al anterior 7%) así como el de agua, que en este caso se da para el mínimo posible que permite el propio contenido de agua de la emulsión (frente al 30% anterior). Además la temperatura afecta mucho más a éste que a las mezclas con un 100% de árido reciclado, siendo el módulo máximo a 20°C, 1487 MPa menor mientras que a 2°C es 2689 MPa mayor. De hecho, tal y como se aprecia en la Tabla 7.10 las pérdidas de rigidez por pasar de 2°C a 20°C llegan a ser superiores al 80% del valor inicial, evidenciándose así una enorme dependencia de la temperatura, no manifestada en las mezclas con el 100% del árido reciclado.

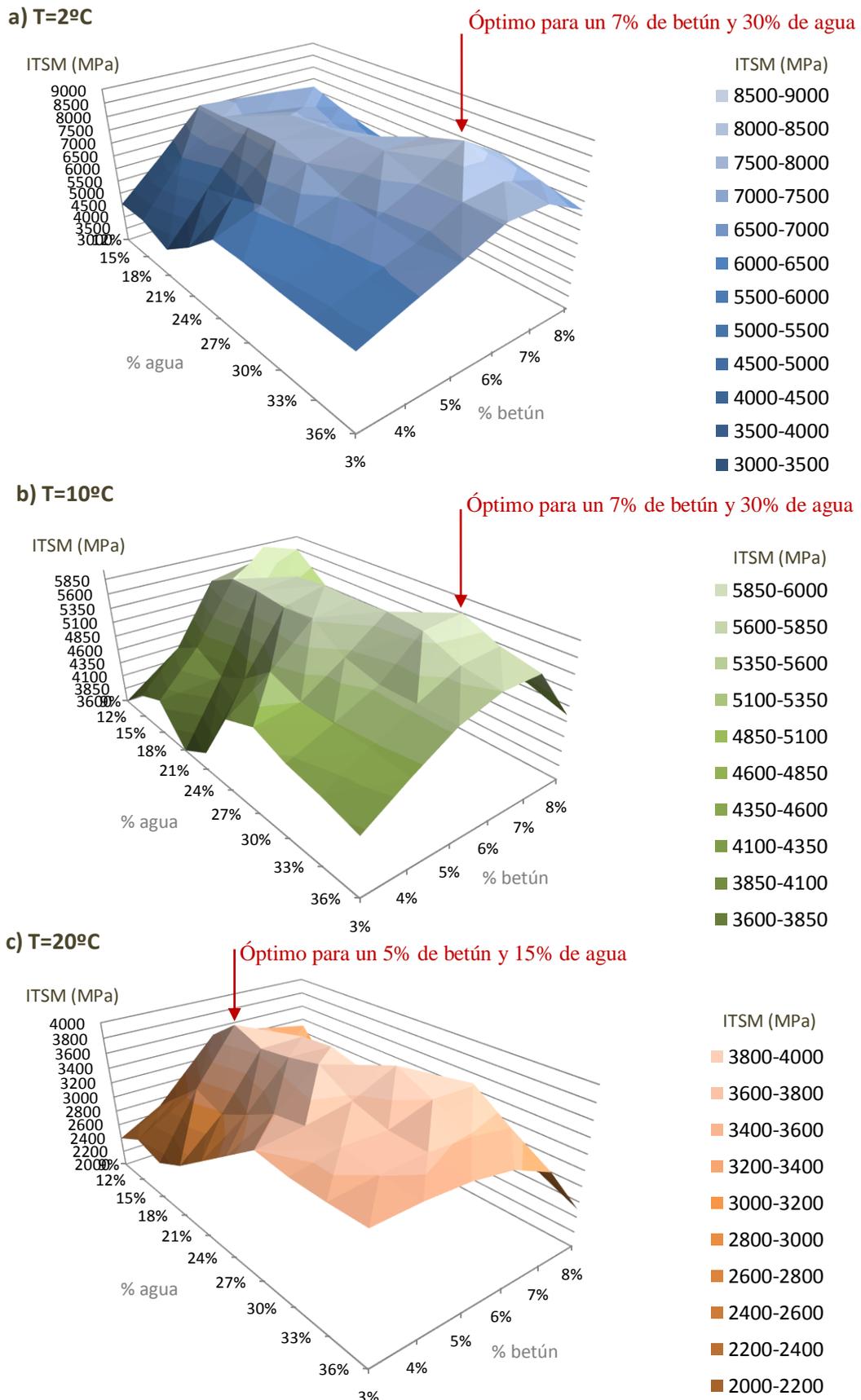
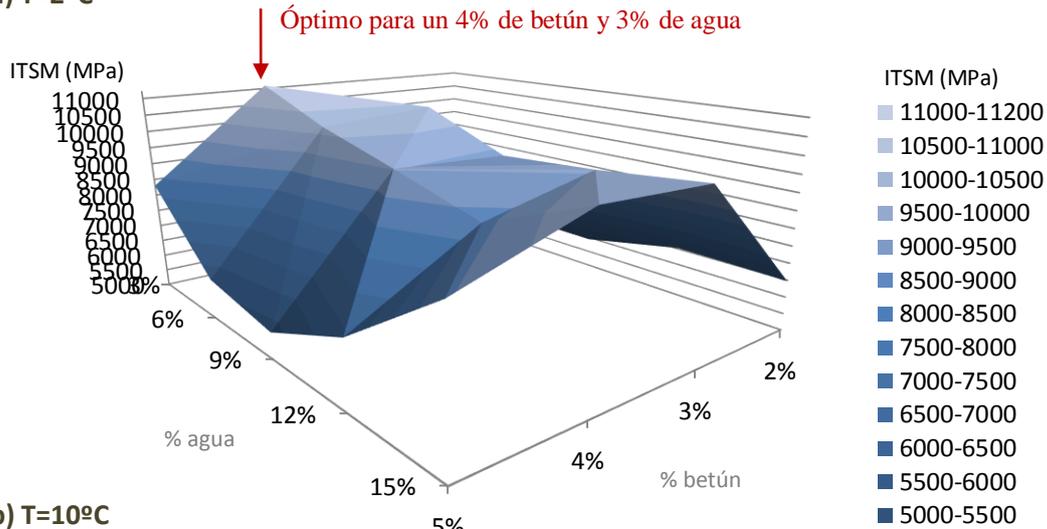
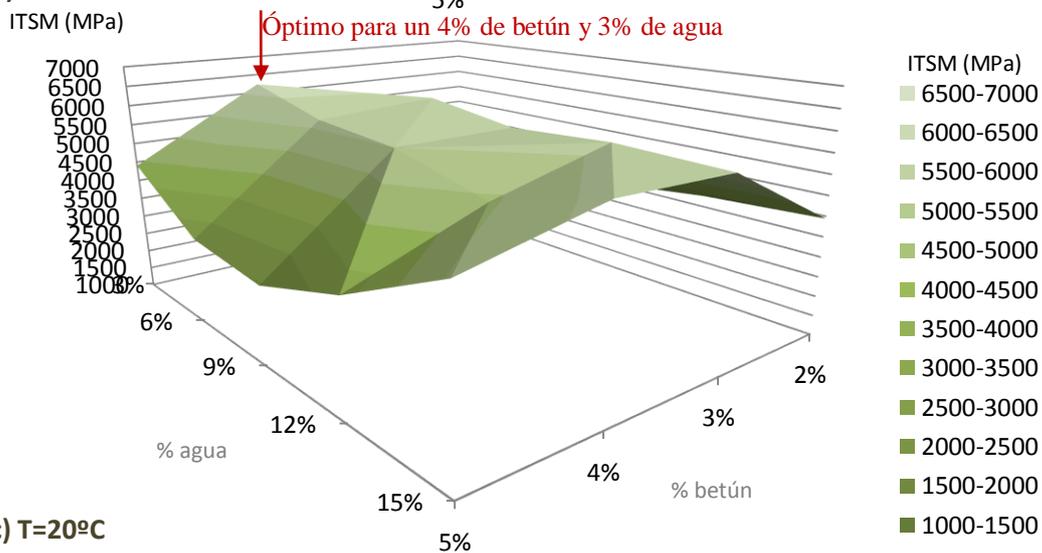


Figura 7.10 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado a 2°C, 10°C y 20°C (de arriba a abajo)

a) T=2°C



b) T=10°C



c) T=20°C

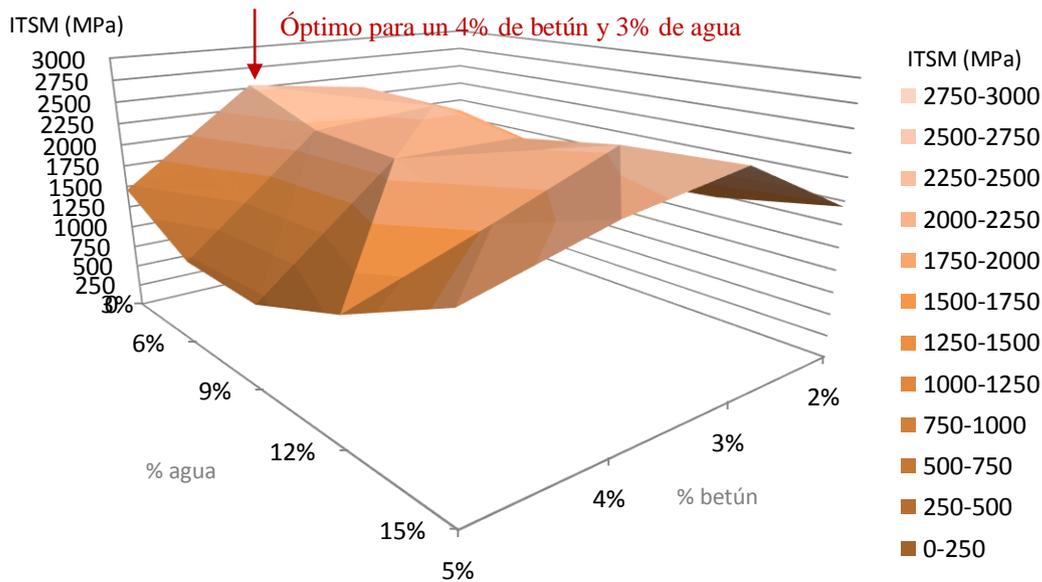


Figura 7.11 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural a 2°C, 10°C y 20°C (de arriba a abajo)

Tabla 7.7 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural a 2°C

% de betún	% de agua según peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
2%	6892	5980	5938	6528	6471
3%	9821	10431	9375	9560	9852
4%	11096	10184	9521	8810	10004
5%	8303	6189	5777	6905	8939

Tabla 7.8 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural a 10°C

% de betún	% de agua según peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
2%	4203	3608	3478	3784	3944
3%	5457	5882	5529	5684	5602
4%	6230	5678	5495	4918	5699
5%	4404	3167	2954	3751	5059

Tabla 7.9 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural a 20°C

% de betún	% de agua según peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
2%	1844	1619	1387	1469	1691
3%	2351	2298	2137	2308	2374
4%	2537	2197	2137	1795	2184
5%	1459	963	931	1310	1850

Tabla 7.10 Pérdida de rigidez al pasar de 2°C a 20°C (en % de rigidez a 2°C)

% de betún	% de agua según peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
2%	73,2%	72,9%	76,6%	77,5%	73,9%
3%	76,1%	78,0%	77,2%	75,9%	75,9%
4%	77,1%	78,4%	77,6%	79,6%	78,2%
5%	82,4%	84,4%	83,9%	81,0%	79,3%

Como en anteriores apartados, un nuevo análisis estadístico de los resultados fue llevado a cabo. En este caso, consistió en un ANOVA de tres factores que permitió evaluar la significancia del contenido de agua (9%, 12%, 15%, 18%, 21%, 24%, 27%, 30%, 33% y 36%), el contenido de betún (3%, 4%, 5%, 6%, 7% y 8%) y la temperatura de ensayo (2°C, 10°C y 20°C) sobre la rigidez de las mezclas bituminosas en frío. Los resultados muestran una alta significancia (superior al 99% de confianza) de todos los factores tanto para las mezclas con árido reciclado ($p_{agua}=0.001$, $p_{betún}<0.001$ y $p_{temperatura}<0.001$) como para las de árido natural ($p_{agua}=0.001$, $p_{betún}<0.001$ y $p_{temperatura}<0.001$) por lo que los óptimos hallados son reales y claramente diferenciados de los demás valores.

En definitiva, el árido reciclado hace que las mezclas sean menos susceptibles a la temperatura, no rigidizándose en exceso a bajas temperaturas ni llegando a ser demasiado blandas a temperatura ambiente. No obstante, las elevadas cantidades de betún en mezcla siguen potenciando este efecto poco deseable y por ello, se debe limitar dicho contenido en la medida de lo posible, sin olvidar que por el simple hecho de incorporar árido reciclado ya será necesario aumentar la dotación de betún sobre un 2% o 3%.

7.2.3 Evolución de la rigidez con el tiempo de curado

Como se ha mencionado con anterioridad, una de las propiedades más condicionantes de las mezclas bituminosas en frío es que debido a la presencia de agua ocluida en el interior de la mezcla, éstas no ofrecen su mayor resistencia y rigidez hasta haber transcurrido un cierto periodo de curado durante el cual se desarrollan los necesarios procesos de evaporación.

Con el fin de evaluar la evolución de las mezclas a lo largo del tiempo de curado, se ha repetido en ensayo de rigidez a 20°C a diferentes tiempos de curado. Debido a que dicho ensayo es no destructivo, las mismas probetas pudieron ser ensayadas repetidas veces consiguiéndose así una correlación de resultados veraz y fiable. Las probetas fueron almacenadas a una temperatura ambiente de laboratorio de 20 ± 2 °C y con una humedad comprendida entre el 30% y el 40% (Figura 6.36).

Cabe recordar que para determinar el módulo resiliente inicial, las probetas habían sido sometidas a un precurado artificial de 3 días en estufa a 50°C. Tras este ensayo, cuyos resultados se analizaron anteriormente, se repitió el ensayo a los 6, 12 y 18 meses sobre las mismas probetas. Los diferentes valores de módulo resiliente obtenidos en dichos ensayos para mezclas con un 100% de árido reciclado tras diferentes tiempos de curado pueden verse en la Tabla 7.11. En la Tabla 7.12 se muestran porcentualmente los crecimientos de la rigidez cada 6 meses y con relación a la rigidez tras el curado artificial. Análogamente, para el árido natural, los resultados se muestran en la Tabla 7.13 y Tabla 7.14. Gráficamente, los resultados para mezclas con ambos tipos de árido se resumen en la Figura 7.13 y Figura 7.14.

En primer lugar, puede verse como con el paso del tiempo, los aumentos en las rigideces de las mezclas no se producen de forma uniforme. Aunque los mayores incrementos suelen darse en los contenidos intermedios de agua (15%-27% para el árido reciclado y 6%-12% para el árido natural), los aumentos de rigidez parecen ser mucho más dependientes del contenido de betún, de modo que cuanto mayor fue el contenido ensayado, mayor fue también el aumento de la rigidez durante los procesos de curado.

Esta tendencia, ocurre para cualquier tiempo de curado. Tras 6 meses, el módulo resiliente de las mezclas con árido reciclado con solamente un 3% de betún experimentó un crecimiento del 14%. Sin embargo, las mismas mezclas pero esta vez con un 8% de betún sufrieron incrementos por encima del 100%, es decir, doblaron la rigidez inicial que tenían tras el curado artificial. Tras los siguientes 6 meses (12 meses en total), aunque los incrementos no fueron tan pronunciados, los módulos de algunas de las mezclas con el 8% de betún crecieron hasta aproximadamente un 150% (crecimiento total acumulado), mientras que las mezclas con el 3% de betún apenas alcanzaron el 20%. Lo mismo ocurre con las mezclas de árido natural. Tras los primeros 6 meses, la rigidez de las mezclas con un 2% de betún creció aproximadamente un 10%, mientras que para las mezclas del 5% de betún, el crecimiento llegó a superar el 100%. En los siguientes 6 meses, continuó la misma tendencia, de modo que algunas mezclas como la de un 6% de contenido de agua y 5% de betún alcanzaron crecimientos totales del 150%.

Tras 18 meses, se observó que la rigidez de las mezclas, tanto con árido reciclado como natural, permaneció prácticamente igual que la registrada a los 12 meses. Solamente las mezclas con el mayor contenido de betún llegaron a seguir creciendo levemente, aunque normalmente por debajo de un 5% de la rigidez inicial tras el curado artificial. Así, los 12 meses fueron considerados como el tiempo total necesario para alcanzar el curado completo de ambos tipos de mezcla. Además, es destacable que tanto las mezclas con árido reciclado como con natural, no solo necesitaron la misma cantidad de tiempo, sino que además experimentaron crecimientos totales acumulados en sus rigideces muy similares (de hasta un 150% para los contenidos mayores de ligante).

Por otro lado, incluso tras estas variaciones, las mezclas con árido reciclado fueron en general más rígidas que las de árido natural para cualquier tiempo de curado. Por ejemplo, los mayores valores de módulo resiliente para mezclas con árido reciclado y natural fueron respectivamente 6169 MPa y 3389 MPa tras 6 meses de curado y 6811 MPa y 3580 MPa tras 12 meses. Si anteriormente se veía que inmediatamente tras el curado artificial el hecho de sustituir árido natural por árido reciclado en las mezclas, permitía que la rigidez llegase a aumentar hasta un 59%, estos resultados indican que, tras 6 y 12 meses, dichas diferencias pueden llegar a ser del 82% y 90% respectivamente, es decir, casi el doble en condiciones de curado completo.

Estos valores de rigidez, llegan a superar, además, los valores obtenidos por otros autores para mezclas bituminosas en caliente con árido reciclado, como Shen y Du (2005), Paranavithana y Mohajerani (2006), Chen et al. (2011a), Pasandín y Pérez (2013 y 2004c), entre otros y por supuesto, los recogidos anteriormente sobre mezclas en frío, como Oruc et al. (2007) y Ozsahin y Oruc (2008).

Autores como Al Nageim et al. (2012); Al-Hdabi et al. (2013, 2014a, 2014b) y Al-Busaltan et al. (2012b) estudiaron también la evolución del curado dejando las probetas durante una larga serie de días a temperatura ambiente y hallando los ITSM cada ciertos periodos de tiempo. En sus investigaciones se pueden observar curvas muy parecidas a las de la Figura 7.15 y cómo adiciones como el cemento o las cenizas volantes hacen que las rigideces crezcan más y durante más tiempo. Aunque en estas publicaciones solo se han encontrado mezclas con altos contenidos de cenizas volantes

(5,5%) que consiguiesen alcanzar los 6000 MPa tras tiempos de curado de 360 días, debido a que los curados artificiales son diferentes a los empleados en la presente investigación, los resultados no pueden ser comparados entre sí.

Otro fenómeno observable es que debido a que las rigideces crecen más cuanto mayor es el contenido de betún, los valores pico de rigidez tienden a darse en contenidos de betún cada vez más elevados. Así, el contenido óptimo que se extrae de los ensayos tras solamente 3 días de curado artificial en la estufa, deja de serlo con el paso del tiempo, siendo los nuevos óptimos, contenidos mayores que el inicial. Este efecto distorsionador no es tenido en cuenta por ninguno de los métodos encontrados hasta la fecha para el diseño de mezclas bituminosas en frío.

Como ejemplo, en la Figura 7.15 se aprecia que tras el curado artificial de 3 días a 50°C (t=0 meses), las mezclas con árido reciclado mostraron un contenido óptimo del 5% (entendido éste como el contenido con el que se alcanza la mayor rigidez). Sin embargo, tras 6, 12 y 18 meses a temperatura ambiente, las mezclas del 7% adelantan a la primera, siendo el nuevo óptimo el 7%. Lo mismo ocurrió con las mezclas con árido natural, aunque en este caso la rigidez inicial de las mezclas con un 5% de betún era tan baja que ni siquiera tras aumentar un 141% llegaron a alcanzar los valores de las del 4%. Así, pudo ser confirmado que dicha tendencia no fue provocada al introducir el árido reciclado en las mezclas en frío sino que es un fenómeno propio de los procesos reológicos de curado.

Las altas rigideces alcanzadas, así como la tendencia a una mayor crecida de las mismas cuanto mayor es el contenido de betún, hacen que, si la rigidez resultase excesiva para una determinada aplicación deseando conservar cierta flexibilidad, baste con reducir los contenidos de betún y agua, ahorrando al mismo tiempo, costes ecológicos y económicos.

Se realizó un análisis estadístico ANOVA de tres variables: contenido de agua (9%, 12%, 15%, 18%, 21%, 24%, 27%, 30%, 33% y 36%), contenido de betún (3%, 4%, 5%, 6%, 7% y 8%) y tiempo de curado (0, 6, 12 y 18 meses tras el curado artificial), para comprobar cómo éstas afectan al módulo resiliente de las mezclas con árido reciclado. Los resultados mostraron que estadísticamente hablando, todos ellas

son significantes a un nivel de confianza del 99% ($p_{agua}<0.001$, $p_{betún}<0.001$ y $p_{tiempo}<0.001$). Los p-valores obtenidos para las intersecciones de las variables de dos en dos también resultaron significativas con la excepción de la intersección agua-tiempo, que no es significativa ni al nivel de confianza del 95% ($p_{agua*betún}<0.001$, $p_{betún*tiempo}<0.001$ y $p_{agua*tiempo}=0.573>0.05$). Se realizó una prueba post hoc de Tuckey para estudiar entre qué pares de valores existen diferencias significativas. La principal conclusión que se pudo extraer es que los módulos resilientes para todos los tiempos de curado resultaron significativamente diferentes, excepto los obtenidos para 12 y 18 meses, ni siquiera al nivel de confianza del 95% ($p=0.606>0.05$). Así, se confirma que el final del curado, desde el punto de vista del final de los crecimientos en las rigideces de las probetas, se produjo a los 12 meses tras curado artificial.



Figura 7.12. Almacenamiento de probetas durante periodo de curado

Para las mezclas con árido natural se encontraron resultados estadísticos muy parecidos. Las variables contenido de agua (3%, 6%, 9%, 12% y 15%), contenido de betún (2%, 3%, 4% y 5%) y tiempo de curado (0, 6, 12 y 18 meses tras el curado artificial), así como sus intersecciones por pares, excepto la intersección agua-tiempo,

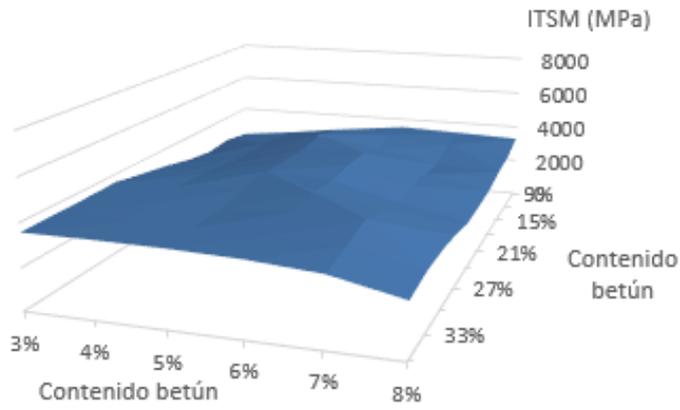
resultaron estadísticamente significativas ($p_{agua}<0.001$, $p_{betún}<0.001$, $p_{tiempo}<0.001$, $p_{agua*betún}<0.001$, $p_{betún*tiempo}<0.001$ y $p_{agua*tiempo}=0.098>0.05$). La prueba post hoc de Tickey volvió a confirmar el final del crecimiento de los módulos resilientes a los 12 meses de curado, puesto que los resultados sales significativamente diferentes para todos los pares de tiempos de curado, con la única excepción de los 12 y 18 meses ($p=0.055>0.05$).

Tabla 7.11. Módulo resiliente medio a 20°C (MPa) de mezclas con 100% de árido reciclado tras diferentes tiempos de curado

Contenido de betún	Contenido de agua durante amasada sobre peso de árido seco									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
<i>Rigidez inicial tras curado artificial (3 días a 50°C)</i>										
3%	2379	2622	2490	2710	3043	3312	3596	3566	3558	3570
4%	2741	3013	3318	3182	3380	3595	3667	3657	3601	3583
5%	3024	3723	4024	3854	3912	4001	3766	3640	3618	3553
6%	3515	3642	3418	3866	3896	3786	4006	3799	3586	3451
7%	3403	3321	2844	2987	3079	2983	3421	3812	3490	3213
8%	3288	2837	2668	2394	2311	2269	2565	2707	2724	2526
<i>Rigidez tras curado artificial + 6 meses a temperatura ambiente</i>										
3%	2571	3021	3328	3215	3354	3727	3921	3994	3912	3913
4%	3498	4011	4239	4120	4400	4517	4259	4121	4153	4343
5%	4489	5017	5368	5478	5412	5529	5007	4770	4772	4889
6%	5010	5303	5458	6004	6010	5988	5816	5524	5430	5487
7%	5512	5576	5497	5491	5499	5666	5844	6169	6012	5991
8%	5374	5461	5274	4772	4759	4934	5339	5524	5607	5584
<i>Rigidez tras curado artificial + 12 meses a temperatura ambiente</i>										
3%	2883	3229	3490	3324	3409	3924	4220	4189	4212	4163
4%	3629	4321	4507	4430	4479	4858	4433	4461	4442	4532
5%	4761	5274	5511	5642	5754	5827	5251	5123	5223	5379
6%	5362	5644	5784	6502	6645	6592	6139	5888	5940	6020
7%	5738	6012	6230	5993	6089	6177	6603	6811	6471	6356
8%	5543	5987	5787	5370	5751	5614	5964	6240	6236	6147
<i>Rigidez tras curado artificial + 18 meses a temperatura ambiente</i>										
3%	2890	3294	3442	3389	3583	4080	3844	3912	3915	4051
4%	3687	4487	4399	4503	4717	4753	4362	4221	4228	4371
5%	4993	5554	5681	5767	5808	5770	5019	4900	4893	5124
6%	5502	5740	6133	6541	6653	6390	6132	5723	5751	5910
7%	5934	6170	6221	6189	6031	6304	6917	7007	6497	6333
8%	6061	6001	5720	5423	5439	5669	6161	6459	6376	6181

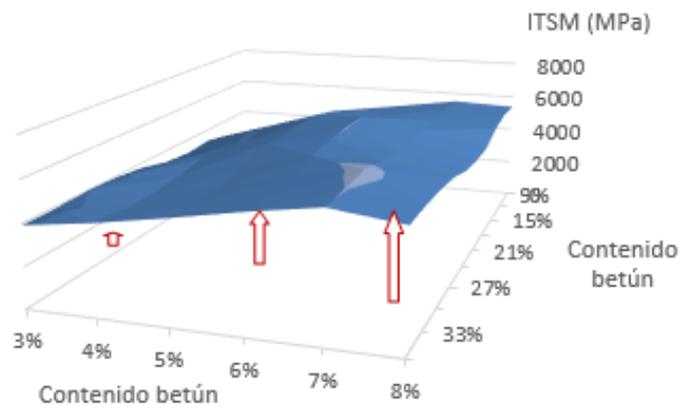
Tabla 7.12 Valores medios de los aumentos porcentuales de la rigidez con respecto a la rigidez tras curado artificial en mezclas con un 100% de árido natural

Contenido de betún	Contenido de agua durante amasada sobre peso de árido seco									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
<i>Aumento de rigidez tras 6 meses a temperatura ambiente</i>										
3%	8,1	15,2	33,7	18,6	10,2	12,5	9,0	12,0	9,9	9,6
4%	27,6	33,1	27,8	29,5	30,2	25,6	16,1	12,7	15,3	21,2
5%	48,4	34,8	33,4	42,1	38,3	38,2	33,0	31,0	31,9	37,6
6%	42,5	45,6	59,7	55,3	54,3	58,2	45,2	45,4	51,4	59,0
7%	62,0	67,9	93,3	83,8	78,6	89,9	70,8	61,8	72,3	86,5
8%	63,4	92,5	97,7	99,3	105,9	117,5	108,1	104,1	105,8	121,1
<i>Aumento de rigidez tras 12 meses a temperatura ambiente</i>										
3%	21,2	23,2	40,2	22,7	12,0	18,5	17,4	17,5	18,4	16,6
4%	32,4	43,4	35,8	39,2	32,5	35,1	20,9	22,0	23,4	26,5
5%	57,4	41,7	37,0	46,4	47,1	45,6	39,4	40,7	44,4	51,4
6%	52,5	55,0	69,2	68,2	75,7	74,1	53,2	55,0	65,6	74,4
7%	68,6	81,0	119,1	100,6	97,8	107,1	93,0	78,7	85,4	97,8
8%	68,6	111,0	116,9	124,3	148,9	147,4	132,5	130,5	128,9	143,3
<i>Aumento de rigidez tras 18 meses a temperatura ambiente</i>										
3%	21,5	25,6	38,2	25,1	17,7	23,2	6,9	9,7	10,0	13,5
4%	34,5	48,9	32,6	41,5	39,6	32,2	19,0	15,4	17,4	22,0
5%	65,1	49,2	41,2	49,6	48,5	44,2	33,3	34,6	35,2	44,2
6%	56,5	57,6	79,4	69,2	70,8	68,8	53,1	50,6	60,4	71,3
7%	74,4	85,8	118,7	107,2	95,9	111,3	102,2	83,8	86,2	97,1
8%	84,3	111,5	114,4	126,5	135,4	149,8	140,2	138,6	134,1	144,7



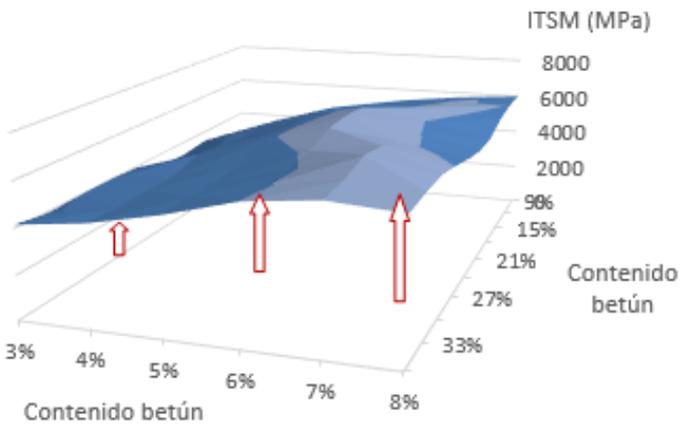
Tiempo de curado tras curado artificial:

0 meses



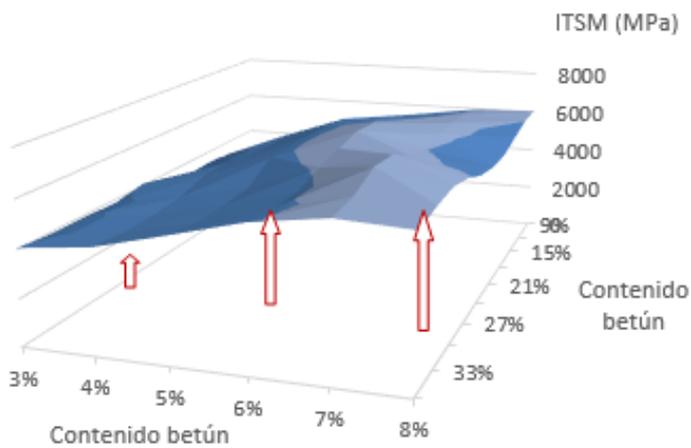
Tiempo de curado tras curado artificial:

6 meses



Tiempo de curado tras curado artificial:

12 meses



Tiempo de curado tras curado artificial:

18 meses

Figura 7.13 Módulo resiliente medio a 20°C (MPa) de mezclas con 100% de árido reciclado tras diferentes tiempos de curado

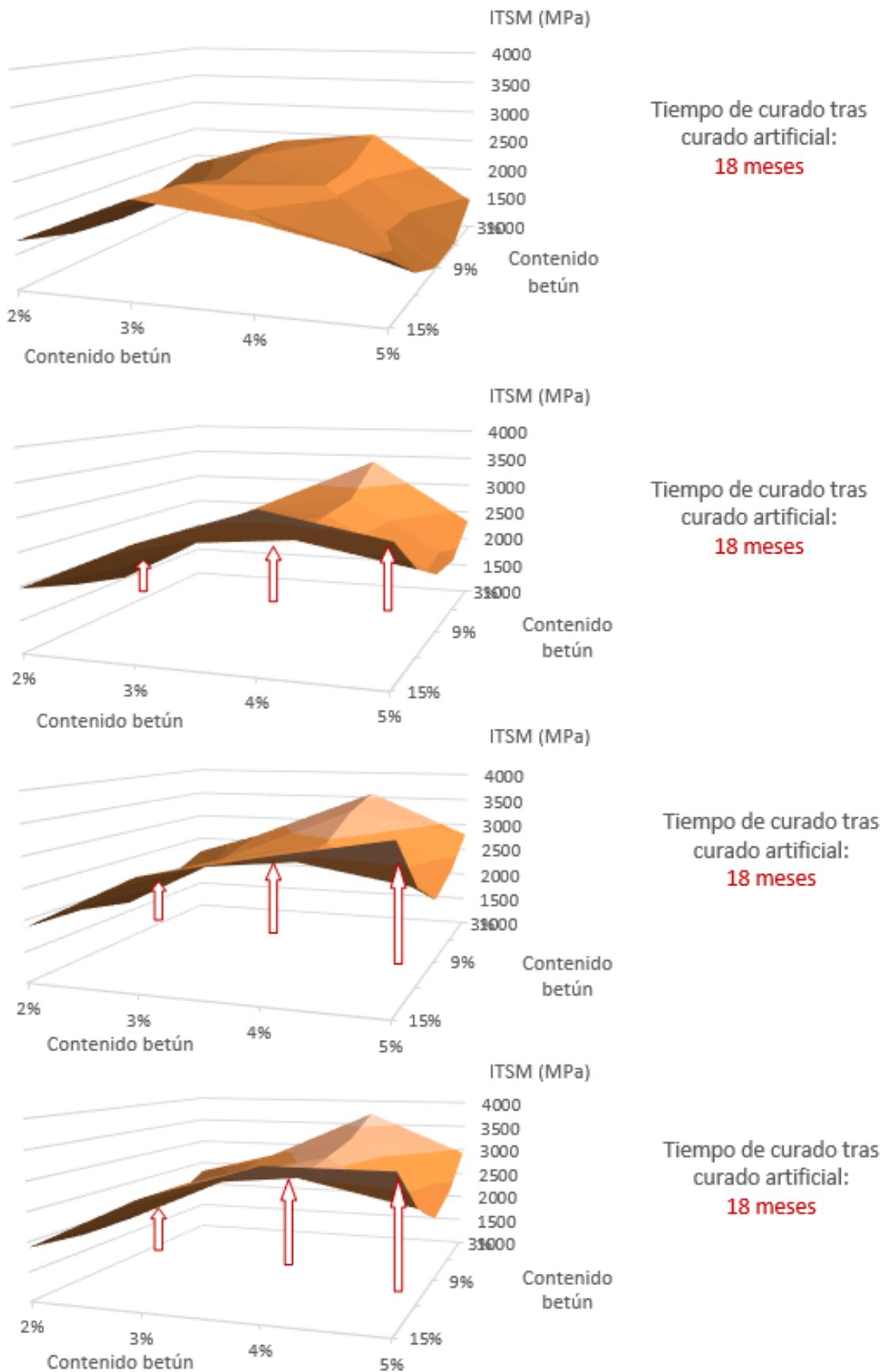


Figura 7.14 Módulo resiliente medio a 20°C (MPa) de mezclas con 100% de árido reciclado tras diferentes tiempos de curado

Tabla 7.13. Módulo resiliente medio (MPa) de mezclas con 100% de árido natural tras diferentes tiempos de curado

Contenido de betún	Contenido de agua durante amasada sobre peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
<i>Rigidez inicial tras curado artificial (3 días a 50°C)</i>					
2%	1844	1619	1387	1469	1691
3%	2351	2298	2137	2308	2374
4%	2537	2197	2137	1795	2184
5%	1459	963	931	1310	1850
<i>Rigidez tras curado artificial + 6 meses a temperatura ambiente</i>					
2%	1871	1653	1518	1714	1971
3%	2532	2610	2432	2476	2716
4%	3389	2862	2780	2621	3277
5%	2326	1872	1923	2299	2949
<i>Rigidez tras curado artificial + 12 meses a temperatura ambiente</i>					
2%	2208	1858	1663	1848	1887
3%	2660	2815	2594	2671	2780
4%	3580	3365	2953	2856	3156
5%	2798	2321	2072	2549	3481
<i>Rigidez tras curado artificial + 18 meses a temperatura ambiente</i>					
2%	2297	1829	1784	1792	1905
3%	2806	2795	2630	2813	2810
4%	3723	3325	3143	2996	3404
5%	2933	2372	2128	2594	3408

Tabla 7.14. Valores medios de los aumentos porcentuales de la rigidez con respecto a la rigidez tras curado artificial en mezclas con un 100% de árido natural

Contenido de betún	Contenido de agua durante amasada sobre peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
<i>Aumento de rigidez tras 6 meses a temperatura ambiente</i>					
2%	1,5	2,1	9,5	16,7	16,6
3%	7,7	13,6	13,8	7,3	14,4
4%	33,6	30,3	30,1	46,0	50,0
5%	59,5	94,4	106,5	75,5	59,4
<i>Aumento de rigidez tras 12 meses a temperatura ambiente</i>					
2%	19,8	14,8	19,9	25,8	11,6
3%	13,2	22,5	21,4	15,7	17,1
4%	41,1	53,2	38,2	59,1	44,5
5%	91,8	141,0	122,4	94,6	88,2
<i>Aumento de rigidez tras 18 meses a temperatura ambiente</i>					
2%	24,6	13,0	28,6	22,0	12,7
3%	19,4	21,6	23,1	21,9	18,4
4%	46,8	51,3	47,1	66,9	55,8
5%	101,1	146,3	128,5	98,0	84,2

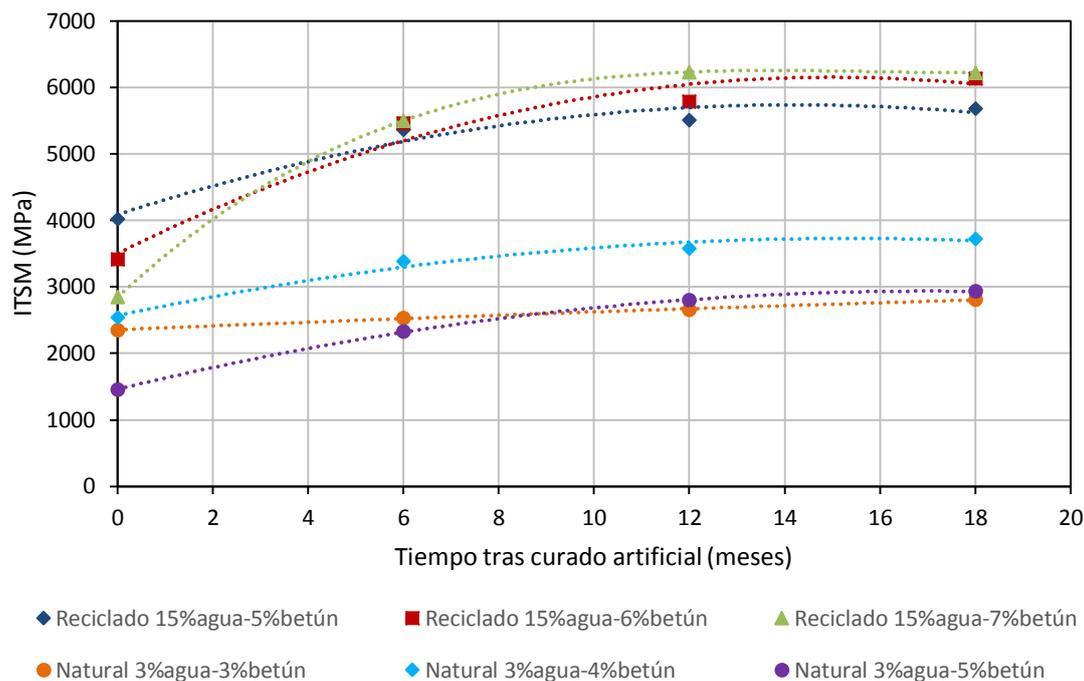


Figura 7.15 Evolución con el tiempo de la rigidez de algunas de las mezclas con árido reciclado y árido natural

Además de los incrementos en la rigidez de las mezclas, con el paso del tiempo de curado pudo ser observado también una clara disminución en el peso de las probetas. Esta pérdida de peso es motivada por la progresiva evaporación del agua intersticial así como de una pequeña porción de compuestos volátiles pertenecientes a la emulsión bituminosa que podrían haber permanecido ocluidas en el interior de las probetas tras la compactación y el curado artificial en estufa. Estas pérdidas de peso se muestran en la Tabla 7.15 y Tabla 7.16 para mezclas con árido reciclado y natural respectivamente.

En primer lugar, se observa como las mezclas con árido reciclado pierden una mayor cantidad de agua que las mezclas con árido natural para cualquier tiempo de curado. Tal y como ya se había comentado, estas mezclas requieren una mayor cantidad de agua durante el amasado, lo que podría explicar esta tendencia. Sin embargo, esto mismo se pudo comprobar para mezclas con idénticos contenidos iniciales en el amasado. Así por ejemplo, las mezclas de árido reciclado con un 9% de agua y 4% y 5% de betún perdieron a los 6 meses 3,4 g y 5,2 g, mientras que las mismas mezclas, pero esta vez con árido natural, solamente perdieron 0,9 g y 5,2 g respectivamente.

Tabla 7.15. Pérdida de peso (en g) tras diferentes tiempos de curado en probetas con 100% de árido reciclado

Contenido de betún	Contenido de agua durante amasada sobre peso de árido seco									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
<i>Pérdida de peso tras 6 meses a temperatura ambiente</i>										
3%	0,7	2,0	2,6	1,6	1,9	2,0	1,7	0,8	0,7	0,8
4%	3,4	5,0	5,2	4,7	5,8	6,5	5,0	3,6	3,1	4,0
5%	7,7	6,9	6,8	10,7	10,1	9,7	9,3	8,2	7,8	8,2
6%	11,1	11,8	13,2	12,0	12,4	13,4	12,4	12,0	12,4	12,1
7%	11,8	13,0	14,6	13,8	14,3	15,4	15,3	14,5	13,0	11,9
8%	12,5	14,1	15,4	15,2	15,2	15,9	17,2	16,9	13,3	11,6
<i>Pérdida de peso tras 12 meses a temperatura ambiente</i>										
3%	1,6	2,1	2,9	2,2	2,3	3,0	3,1	2,7	2,1	2,0
4%	4,1	4,3	4,6	4,1	5,4	6,1	5,6	4,6	3,7	3,4
5%	6,9	6,4	5,2	9,0	9,6	9,9	10,2	9,8	9,5	7,4
6%	10,2	11,0	12,5	11,4	11,8	13,6	13,9	13,4	12,9	12,2
7%	11,5	12,8	14,9	14,2	14,7	16,1	16,9	16,2	14,0	13,6
8%	12,9	14,3	16,3	16,1	16,4	17,3	19,6	20,3	17,6	17,4
<i>Pérdida de peso tras 18 meses a temperatura ambiente</i>										
3%	0,8	0,9	1,0	0,8	0,9	1,0	1,0	0,8	1,1	0,9
4%	2,0	4,0	6,1	3,1	3,1	5,5	4,5	3,8	2,6	1,9
5%	4,2	8,7	11,8	9,2	9,2	8,6	9,0	9,1	7,2	5,4
6%	6,6	11,3	12,2	11,3	11,3	12,4	13,0	12,8	12,0	11,3
7%	9,7	12,6	14,4	12,9	12,9	15,6	16,1	15,8	13,9	12,7
8%	10,9	13,9	15,6	15,6	15,6	17,0	18,4	20,3	17,1	14,8

Tabla 7.16 Pérdida de peso (en g) tras diferentes tiempos de curado en probetas con 100% de árido natural.

Contenido de betún	Contenido de agua durante amasada sobre peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
<i>Pérdida de peso tras 6 meses a temperatura ambiente</i>					
2%	0,5	-0,1	-0,1	0,0	0,3
3%	-0,1	-0,4	-0,1	-0,3	0,3
4%	0,5	0,8	0,9	1,5	1,0
5%	1,9	4,3	5,2	4,5	2,5
<i>Pérdida de peso tras 12 meses a temperatura ambiente</i>					
2%	0,9	0,3	0,4	0,4	0,3
3%	0,0	-0,2	0,3	-0,2	0,3
4%	0,5	1,0	1,3	1,7	1,0
5%	2,3	4,7	5,9	4,4	2,9
<i>Pérdida de peso tras 18 meses a temperatura ambiente</i>					
2%	0,6	0,3	0,6	0,4	0,8
3%	-0,1	-0,2	0,2	0,0	0,8
4%	0,6	0,9	0,9	1,7	1,0
5%	2,3	4,6	5,6	3,9	3,0

Estos resultados son lógicos si se tiene en cuenta que como se había visto anteriormente, las mezclas con árido reciclado conservan, en general, una mayor cantidad de agua tras los procesos de compactación y curado artificial. No obstante, también sirven para demostrar que, si las mezclas con árido reciclado son más rígidas que las de árido natural, no es porque en el primer caso se favorezca la evacuación del agua presente entre la superficie del árido y el betún adherido a temperatura ambiente. De hecho, tras los primeros 6 meses, casi todas las mezclas de árido natural habían parado de perder peso (las medidas variaron con respecto a las anteriores en ± 1 g), mientras que algunas de las mezclas con árido reciclado perdieron en ese mismo periodo más de 15 g y siguieron perdiendo más durante los siguientes 6 meses (por ejemplo, la mezcla con 36% de agua y 8% de betún perdió 5,8 g en este período).

De este modo, se aprecia que aunque la pérdida de agua está directamente asociada al crecimiento de la rigidez (análogo a lo encontrado por Hugener et al., 2014 para la resistencia a compresión de reciclados de firmes en frío), ambos procesos no finalizan necesariamente al mismo tiempo.

Además, también se encontraron otras características comunes para las mezclas con ambos tipos de árido. En primer lugar, la pérdida de agua durante el proceso de curado no depende de la cantidad inicial de agua añadida a la mezcla en el amasado. Este hecho, que puede resultar paradójico se explica de nuevo al tener en cuenta que tras la compactación y el curado artificial, la cantidad remanente de agua apenas depende de la cantidad inicial de amasado.

Por el contrario, las mezclas perdieron más peso cuanto mayor era también su contenido de betún. Así, se muestra una clara relación entre las pérdidas de agua durante el curado y los crecimientos de las rigideces antes explicadas. La película de betún que recubre el árido podría dificultar la salida del agua de los poros, explicándose que las mezclas con mayores contenidos tardasen más en alcanzar su máxima rigidez, y desplazando así el contenido óptimo hacia contenidos cada vez mayores.

7.3 Rigidez según el Módulo dinámico $|E^*|$

7.3.1 Descripción de los ensayos realizados

El módulo dinámico $|E^*|$ se determinó mediante una adaptación de la Norma AASHTO TP 62-07, la cual implica la aplicación de cargas dinámicas axiales sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura a diferentes frecuencias y temperaturas. Para poder correlacionar los resultados con los del módulo ITSM, se aplicaron las cargas y temperaturas descritas en la mencionada Norma, pero en lugar de ser aplicadas axialmente, fueron aplicadas, al igual que en el ensayo del ITSM, diametralmente.

Se realizaron probetas de 75 mm de altura que fueron compactadas mediante el uso del compactador giratorio, con una presión axial de 600 kPa y con un ángulo de giro de $1,25^\circ$. Con el fin de alcanzar valores de densidad y contenido de huecos próximos a los obtenidos con la compactación estática, y basándose en publicaciones de otros autores como Thanaya et al. (2009) en donde compactaban las probetas con hasta 240 revoluciones del compactador, en este caso fue necesario llegar hasta las 250 revoluciones. Aunque los valores de densidad seguían siendo ligeramente inferiores y los de contenido de huecos ligeramente superiores (Tabla 7.17), se prefirió no seguir aumentando el número de ciclos para no alterar la granulometría, sobre todo, en las muestras con un 100% de árido reciclado. A la vista de los resultados, se hizo evidente que las muestras con mucho contenido de agua durante la amasada todavía presentaban una gran cantidad de la misma tras la compactación, cosa que no sucedía con la compactación estática (mucho más energética). Sin embargo, tras el curado de 3 días en estufa ventilada a 50°C se comprobó que el contenido final de agua en el seno de la probeta se reducía drásticamente volviendo a situarse en torno a los valores registrados con la compactación estática.

Las probetas fueron sometidas a una primera secuencia de acondicionamiento para luego seguir con las demás secuencias recogidas en la Tabla 7.18. Dado que el ensayo es no destructivo, las mismas secuencias fueron repetidas sobre las mismas probetas a las temperaturas de 2°C , 20°C y 40°C . Se procedió siempre de frecuencias

mayores a menores y de temperaturas menores a mayores con el fin de mantener las probetas en el mejor estado posible durante todo el ensayo.

Tabla 7.17 Propiedades volumétricas de las probetas compactadas con compactador giratorio

% betún	% agua	Densidad seca (t/m³)	Huecos (%)	% agua tras compactación	% agua tras curado
<i>Mezclas con 100% de árido reciclado</i>					
5%	9%	1,897	19,7	8,4	0,7
6%	9%	1,932	17,2	8,6	1,5
7%	9%	1,946	16,3	8,2	2,0
8%	9%	1,866	17,9	8,8	1,9
7%	21%	1,893	17,8	9,2	1,8
7%	33%	1,932	18,1	9,3	2,1
<i>Mezclas con 100% de árido natural</i>					
2%	3%	2,219	16,86	3,19	0,31
3%	3%	2,291	15,33	2,93	0,08
4%	3%	2,314	14,20	2,76	0,08
5%	3%	2,317	11,66	2,78	0,38
4%	9%	2,231	13,99	7,52	0,23
4%	15%	2,229	12,28	13,96	0,31

Tabla 7.18 Secuencias de cargas dinámicas en el ensayo de Módulo Dinámico según la Norma americana AASHTO TP 62-07

Secuencia	Número de ciclos	Frecuencia
Acond.	200	25 Hz
1	200	25 Hz
2	200	10 Hz
3	100	5 Hz
4	20	1 Hz
5	15	0,5 Hz
6	15	0,1 Hz

La carga aplicada consistió en una onda sinusoidal con una amplitud tal que permitiese mantener las deformaciones entre 50 $\mu\epsilon$ y 150 $\mu\epsilon$. Así, para las temperaturas de 2°C y 20°C, la onda sinusoidal de carga tuvo una amplitud de 0,7 kN (unos 60 kPa) con un valor mínimo de contacto de 0,1 kN mientras que para la temperatura de 40°C se redujo todavía más a 0,3 kN (unos 25 kPa) de amplitud y 0,07 kN de carga mínima de

contacto. Al módulo dinámico obtenido experimentalmente según esta nueva configuración de ensayo se lo denominó *|ITE*|* de las siglas en Inglés *Indirect Tensile E**.

Con ello, las ondas de tensión y deformación pudieron ser expresadas matemáticamente como:

$$\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t} = \sigma_0 \sin \omega t = \sigma_0 \sin \beta_t \quad [\text{Ec. 7-3}]$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)} = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi) = \sigma_0 \sin \beta_\varepsilon \quad [\text{Ec. 7-4}]$$

Donde σ_0 y ε_0 son la amplitud de los ciclos de tensión y deformación diametral respectivamente, es decir, diferencia entre los valores máximo y mínimo de un determinado ciclo. β_t y β_ε son los ángulos de fase de las cargas cíclicas de tensión y deformación, retrasados uno con respecto al otro un ángulo ϕ debido al carácter visco-elástico de las mezclas estudiadas.

Finalmente, el Módulo Dinámico *|ITE*|* se calculó mediante la expresión:

$$|\text{ITE}^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0 \cdot \cos \beta_t}{\varepsilon_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0 \cdot \sin \beta_\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad [\text{Ec. 7-5}]$$

El módulo dinámico depende fundamentalmente de la frecuencia con la que se aplica la carga dinámica y de la temperatura a la que se realiza el ensayo. Para modelar esta doble dependencia se construyen las curvas maestras a partir del principio de superposición tiempo-temperatura. Así, los módulos a cualquier temperatura son transformados con respecto al tiempo hasta que las diferentes curvas se unen en una única función continua. De este modo, las curvas maestras describen la dependencia del material con respecto del tiempo, mientras que el grado de transformación de los resultados a diferentes temperaturas hasta unir todo en una única curva determina la dependencia con respecto a la temperatura (Figura 7.16). En general, estas curvas maestras pueden ser expresadas matemáticamente del siguiente modo (Witczak y Bari, 2004):

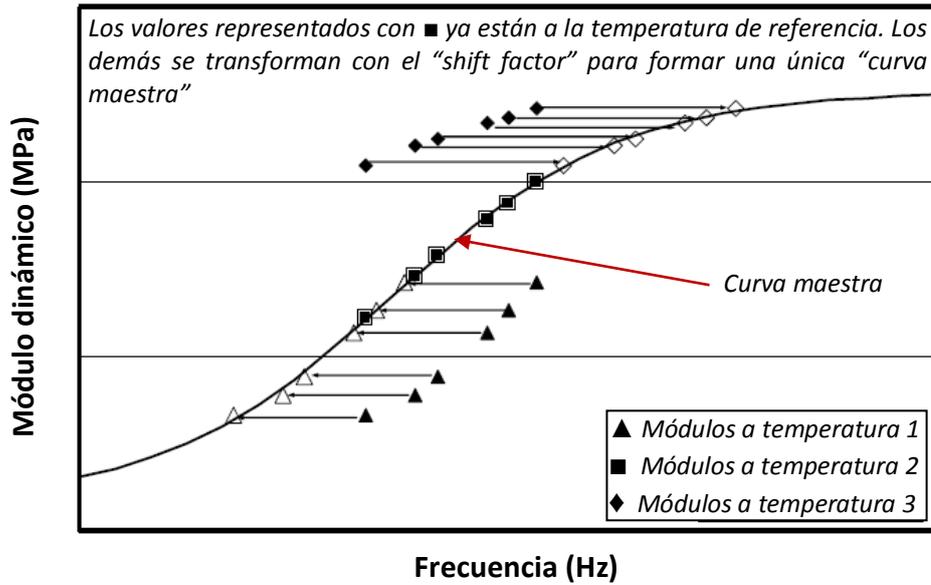


Figura 7.16 Esquema gráfico de la transformación mediante el shift factor de los módulos obtenidos para conseguir una única curva maestra (a partir de Lee et al., 2009)

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} \quad [\text{Ec. 7-6}]$$

Donde t_r es el tiempo de carga reducido a la temperatura de referencia; δ es el valor mínimo de E^* ; $\delta + \alpha$ es el valor máximo de E^* y β y γ son parámetros que describen la forma de la función. El factor de transformación de las frecuencias, ampliamente conocido como *shift factor* puede ser expresado con la siguiente forma:

$$a(T) = \frac{t}{t_r} \quad [\text{Ec. 7-7}]$$

Siendo t el tiempo de carga a la temperatura deseada y T la temperatura de interés. Para una mayor precisión, se usa una relación polinómica de segundo orden entre el logaritmo del *shift factor* y la temperatura de la siguiente forma:

$$\log a(T_i) = a T_i^2 + b T_i + c \quad [\text{Ec. 7-8}]$$

Donde $a(T_i)$ es el *shift factor* como función de la temperatura; T_i es la temperatura de interés; y a , b y c son los coeficientes del polinomio de segundo orden.

En el presente estudio, los módulos se transformaron mediante una optimización no lineal, resolviendo simultáneamente los 7 parámetros de la curva maestra y del *shift factor* ($\alpha, \beta, \delta, \gamma, a, b, c$) mediante el uso de la función de optimización Solver de Excel hasta minimizar la suma de los cuadrados de los errores entre los puntos hallados experimentalmente y el modelo descrito.

7.3.2 Resultados

Los resultados obtenidos a tracción indirecta dinámica se recogen en la Tabla 7.19 y Figura 7.17 para mezclas con árido reciclado y en la Tabla 7.20 y Figura 7.18 para mezclas con árido natural. En la Figura 7.19 se representan las curvas maestras obtenidas para mezclas con un 100% de árido reciclado, manteniendo constante el contenido de agua y variando únicamente el contenido de betún. Por el contrario, en la Figura 7.20, se representan las curvas maestras resultantes de mantener un contenido fijo de betún y variar únicamente el contenido de agua, también para mezclas con un 100% de árido reciclado. Por su parte, la Figura 7.21 y la Figura 7.22 representan lo mismo pero para las mezclas de control realizadas con árido natural.

A la vista de los resultados obtenidos para probetas con un 100% de árido reciclado, se aprecian en primer lugar claras diferencias cuando lo que varía es el contenido de betún pero diferencias muy suaves cuando lo que varía es el contenido de agua, lo cual coincide con lo que ya se había concluido en el apartado dedicado al estudio del ITSM. Además, a bajas temperaturas (parte derecha de las curvas maestras), se aprecia un contenido óptimo de betún del 7% mientras que para temperaturas altas (parte izquierda) el contenido óptimo es del 5% bajando a medida que aumenta dicho contenido (coincide nuevamente con lo observado en el ensayo del ITSM).

Tabla 7.19 Módulos dinámicos a tracción indirecta en probetas con 100% de árido reciclado

%	%	Frecuencias					
		25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
<i>Temperatura de ensayo: 2°C</i>							
5%	9%	7169,9	6902,9	6463,8	5493,0	5005,8	3992,5
6%	9%	10164,6	9796,9	9086,1	7491,3	6822,1	5411,2
7%	9%	9936,1	9502,4	9029,9	7502,8	6755,7	5308,2
8%	9%	8218,4	7688,9	7169,2	5709,6	5137,4	3834,2
7%	21%	10310,1	10188,0	9508,1	7870,5	7039,9	5375,6
7%	33%	9533,9	8787,0	8393,3	6975,3	6355,0	4958,8
<i>Temperatura de ensayo: 20°C</i>							
5%	9%	4953,3	4039,5	3474,7	2365,9	1977,4	1300,5
6%	9%	6552,3	5207,3	4386,3	2869,0	2354,8	1457,7
7%	9%	5625,6	4506,0	3851,1	2640,5	2185,5	1328,0
8%	9%	4268,4	3225,0	2690,3	1695,9	1353,4	770,8
7%	21%	5251,6	4294,8	3686,4	2520,1	2093,4	1265,5
7%	33%	7963,8	5702,6	4482,9	2804,9	2219,4	1334,1
<i>Temperatura de ensayo: 40°C</i>							
5%	9%	1756,6	1259,0	1075,1	558,3	422,1	278,6
6%	9%	1511,3	1068,1	896,4	487,5	358,0	198,7
7%	9%	1437,7	962,7	787,9	419,4	300,2	160,6
8%	9%	1092,7	654,4	523,1	255,7	181,1	97,7
7%	21%	1523,8	1026,2	843,9	552,3	312,7	166,3
7%	33%	1328,1	894,7	736,0	381,6	271,2	141,6

Tabla 7.20 Módulos dinámicos a tracción indirecta en probetas con 100% de árido natural

%	%	Frecuencias					
		25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
<i>Temperatura de ensayo: 2°C</i>							
2%	3%	11412,2	10746,4	9540,8	7043,8	5996,1	5378,5
3%	3%	12709,2	12433,6	11731,1	8889,3	7659,9	5279,4
4%	3%	14685,7	14496,0	13994,7	10561,7	9003,0	6096,3
5%	3%	14134,2	13819,6	12876,5	9855,3	8556,7	5524,1
4%	9%	14375,5	13890,6	13154,3	10227,8	9032,7	6176,4
4%	15%	13206,4	12473,4	11489,1	8968,2	7850,7	5440,0
<i>Temperatura de ensayo: 20°C</i>							
2%	3%	3982,7	2809,9	2214,1	1237,2	895,4	375,5
3%	3%	5356,4	3844,1	3148,3	1834,7	1364,0	741,2
4%	3%	5881,1	4444,1	3682,9	2191,9	1693,2	903,4
5%	3%	6020,9	4405,3	3696,4	2174,0	1652,6	860,9
4%	9%	5830,4	4391,9	3708,8	2214,1	1678,5	859,3
4%	15%	5145,5	3847,5	3201,2	1919,4	1475,7	758,2
<i>Temperatura de ensayo: 40°C</i>							
2%	3%	402,6	210,8	160,8	78,6	55,5	36,3
3%	3%	693,4	405,9	306,7	133,1	88,1	61,3
4%	3%	957,1	594,9	482,7	279,1	177,5	114,2
5%	3%	870,2	541,1	445,7	211,0	146,2	68,7
4%	9%	924,7	540,9	410,7	193,4	118,5	60,9
4%	15%	826,5	467,3	360,1	140,5	87,7	46,5

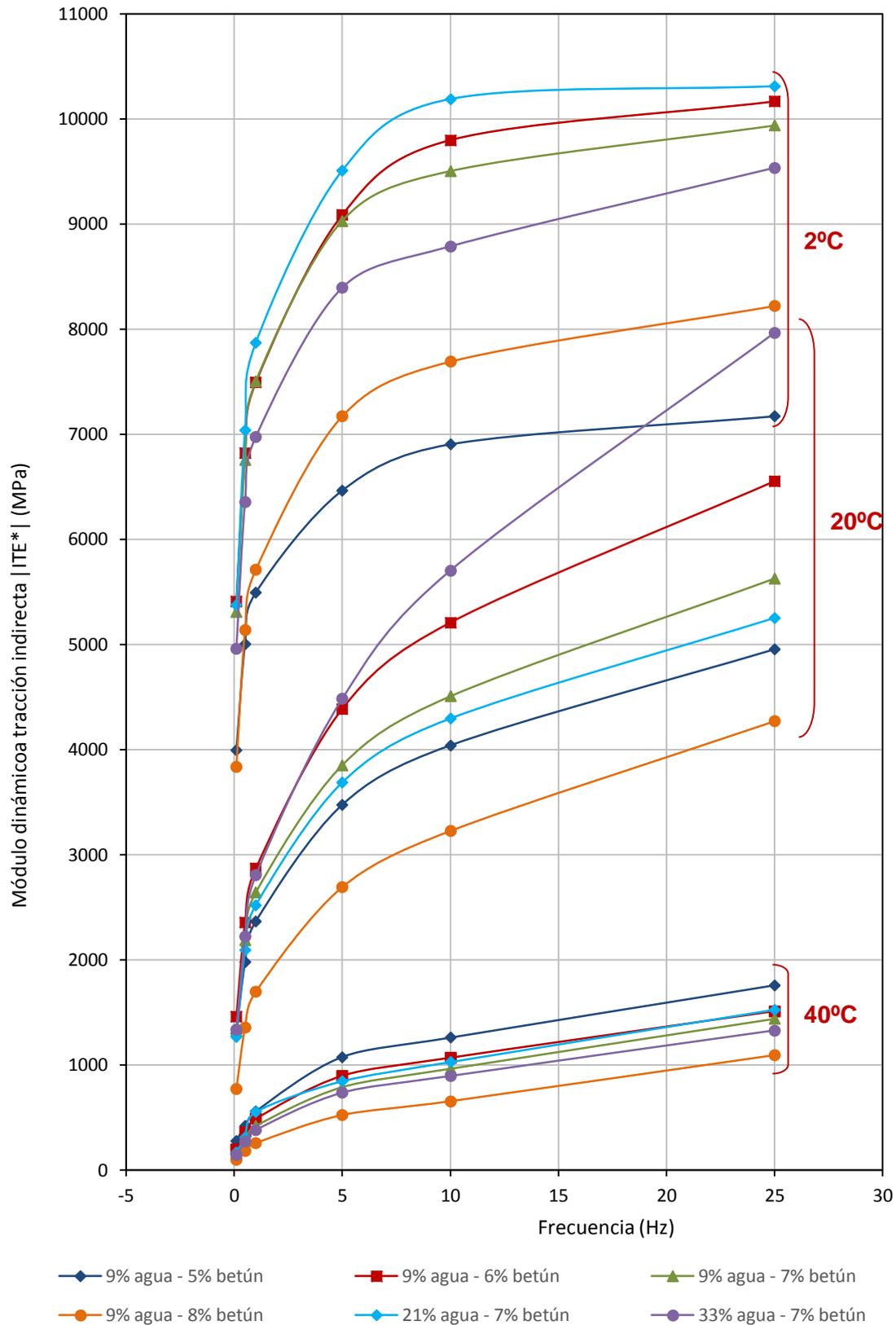


Figura 7.17 Módulos dinámicos a tracción indirecta obtenidos a 3 temperaturas diferentes (2°C, 20°C y 40°C) para las distintas mezclas con 100% de árido reciclado

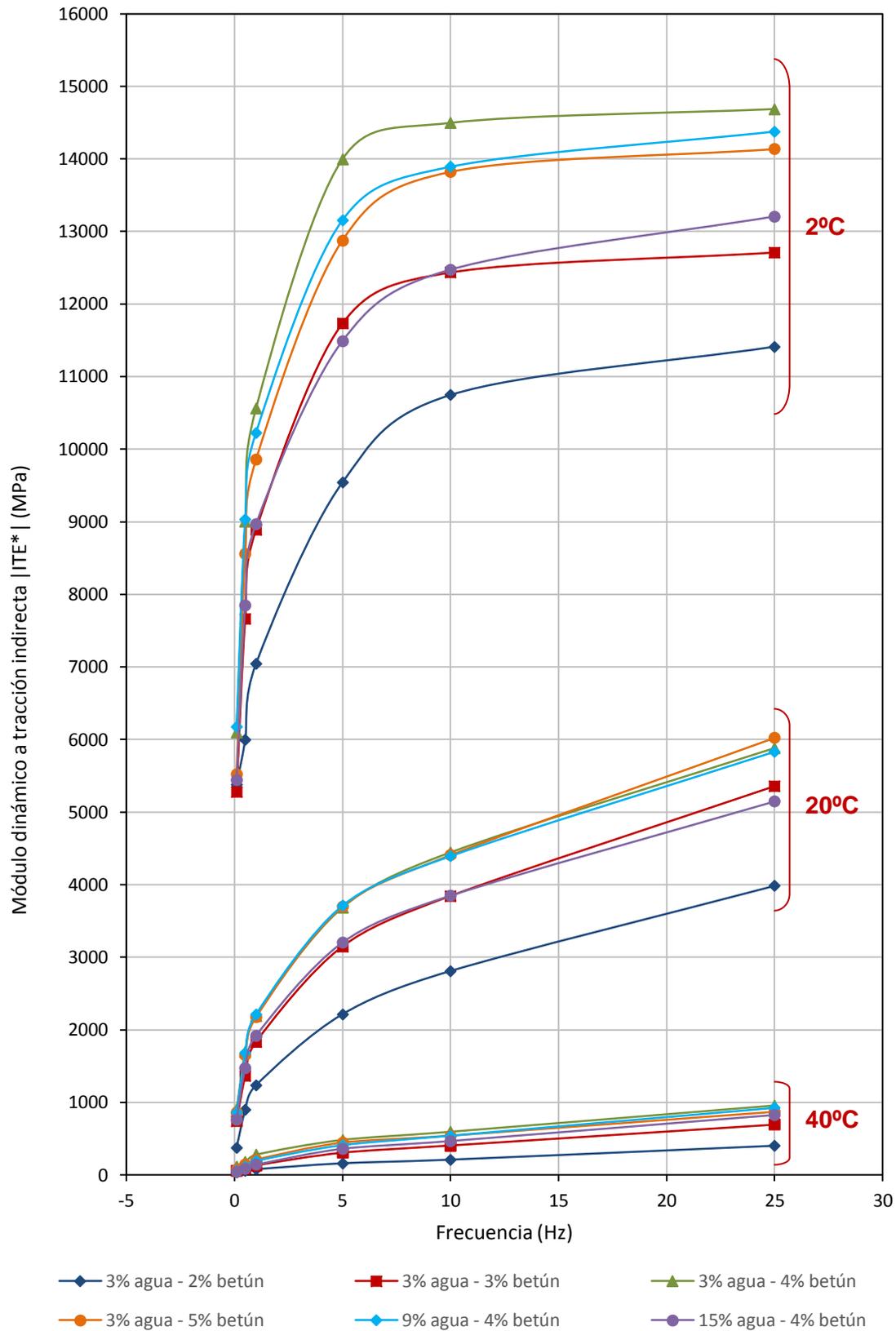


Figura 7.18 Módulos dinámicos a tracción indirecta obtenidos a 3 temperaturas diferentes (2°C, 20°C y 40°C) para las distintas mezclas con 100% de árido natural

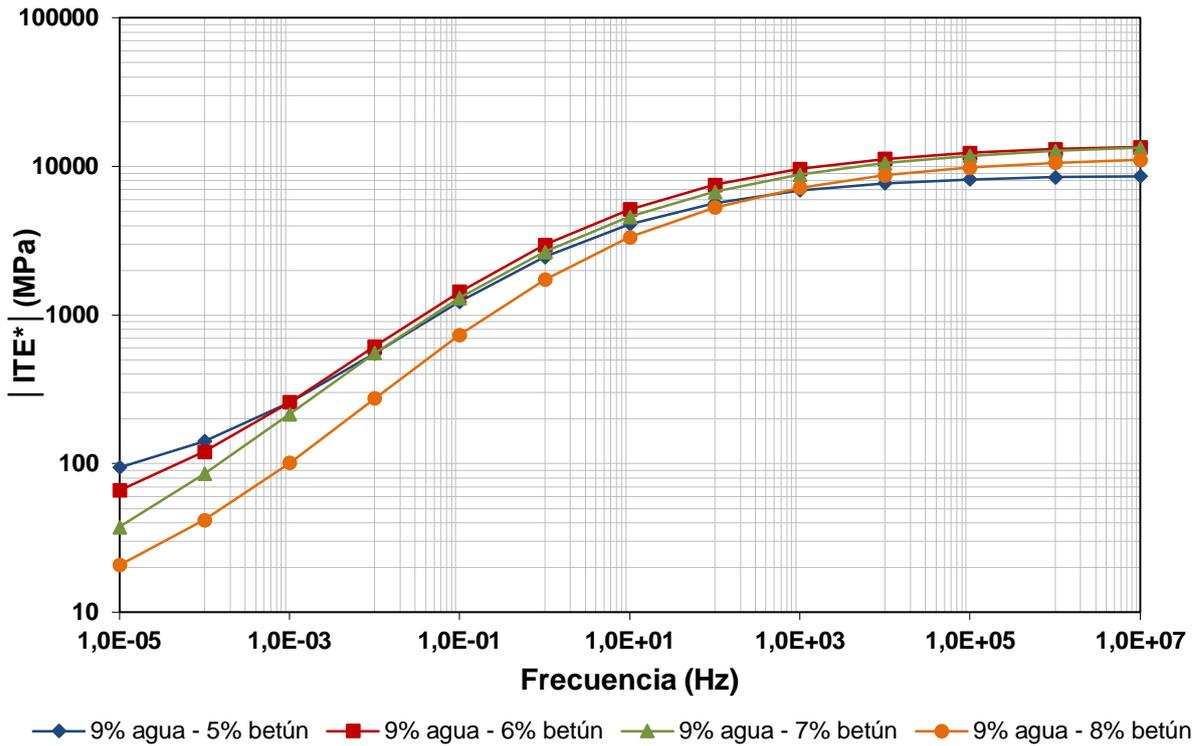


Figura 7.19 Curvas maestras obtenidas a tracción indirecta dinámica para probetas con 100% de árido reciclado, 9% de agua y diferentes contenidos de betún

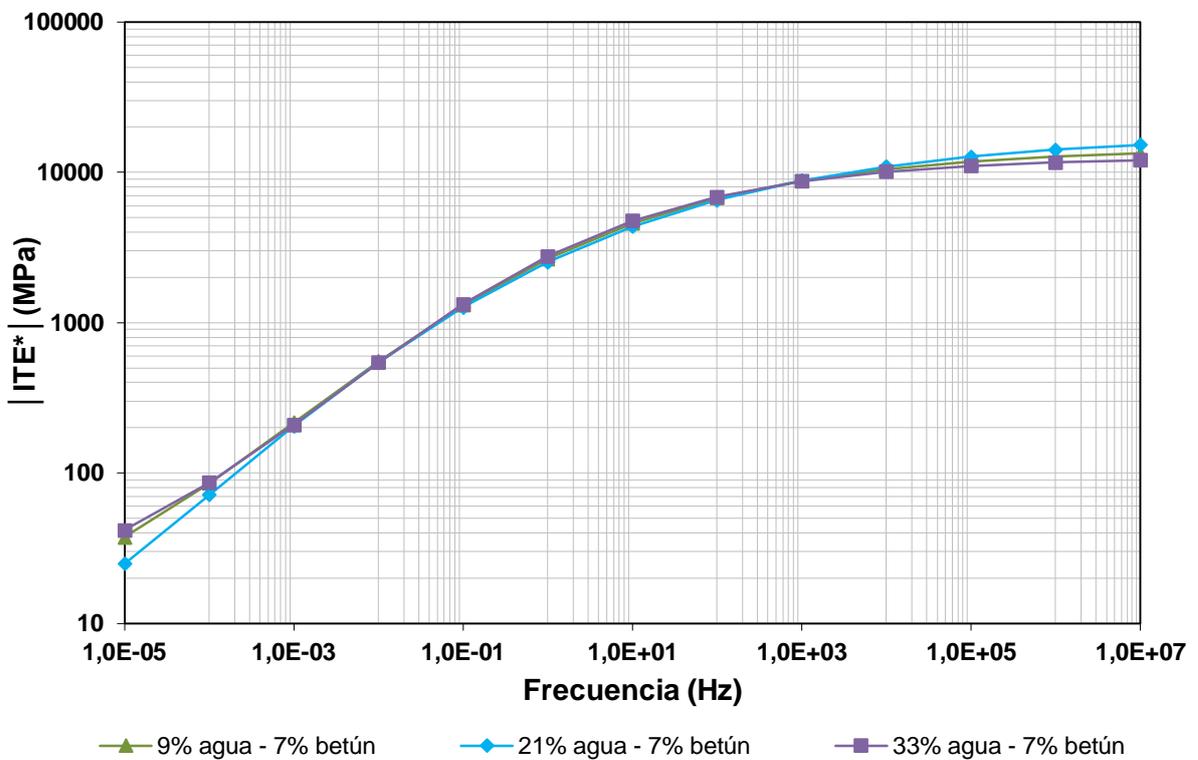


Figura 7.20 Curvas maestras obtenidas a tracción indirecta dinámica para probetas con 100% de árido natural, 7% de betún y diferentes contenidos de agua

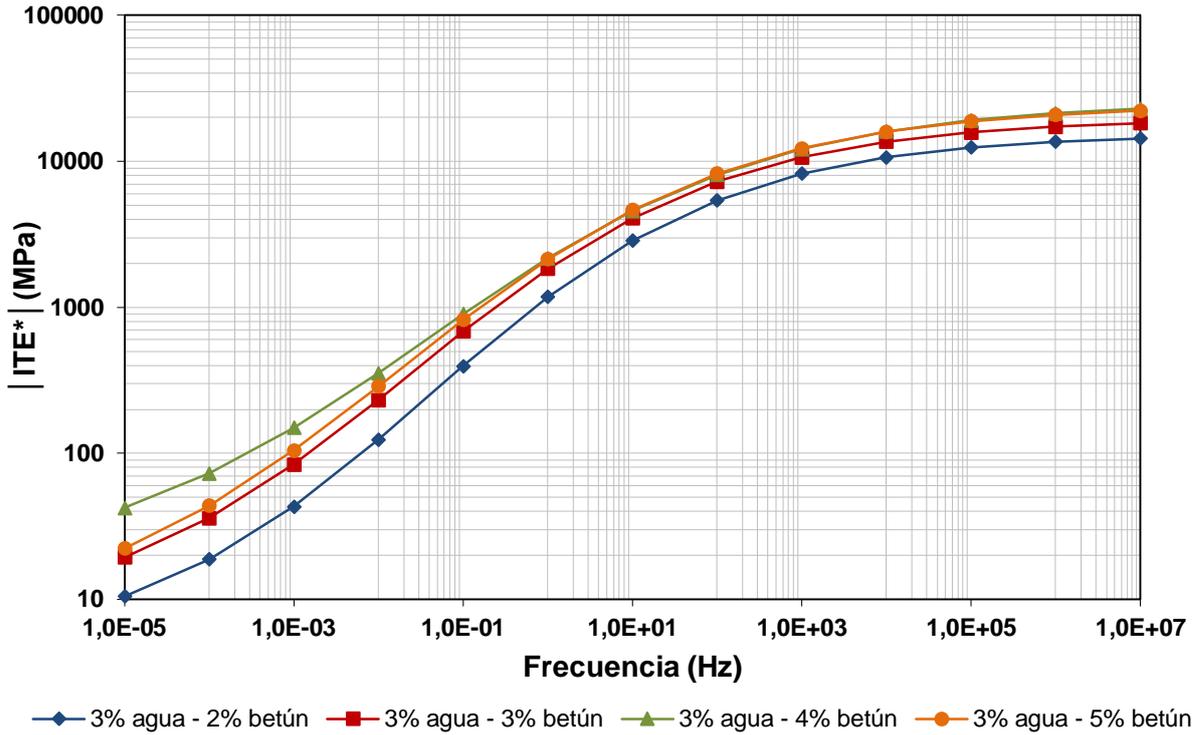


Figura 7.21 Curvas maestras obtenidas a tracción indirecta dinámica para probetas con 100% de árido natural, 3% de agua y diferentes contenidos de betún

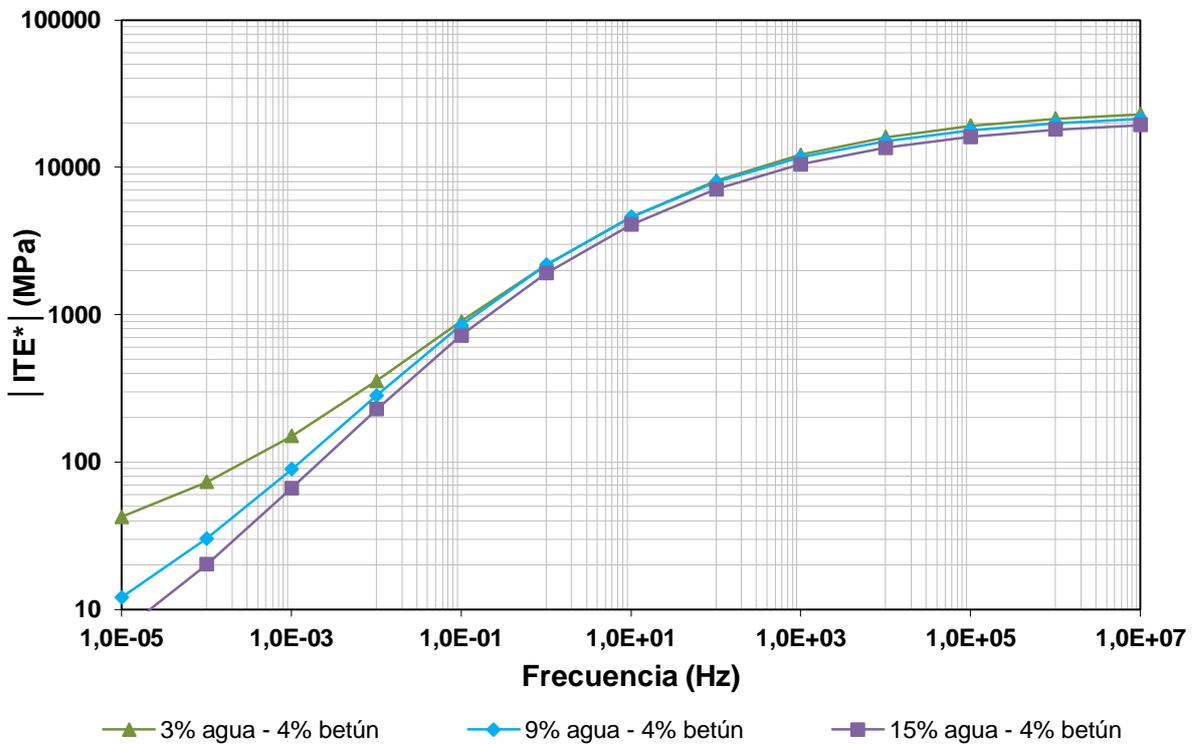


Figura 7.22 Curvas maestras obtenidas a tracción indirecta dinámica para probetas con 100% de árido natural, 4% de betún y diferentes contenidos de agua

Tabla 7.21 Parámetros de las curvas maestras ajustadas a los resultados obtenidos para las diferentes mezclas ensayadas

% betún	% agua	α	β	δ	γ
<i>Probetas con árido reciclado</i>					
5	9	2,21	-1,10	4,73	-0,64
6	9	2,83	-1,15	4,32	-0,54
7	9	3,54	-1,34	3,62	-0,47
8	9	3,35	-1,11	3,72	-0,53
7	21	4,87	-1,56	2,38	-0,38
7	33	3,13	-1,32	3,97	-0,53
<i>Probetas con árido natural</i>					
2	3	3,57	-0,79	3,61	-0,57
3	3	3,48	-0,87	3,81	-0,54
4	3	3,25	-0,71	4,16	-0,50
5	3	3,63	-0,88	3,76	-0,51
4	9	4,30	-1,14	3,08	-0,47
4	15	4,70	-1,23	2,64	-0,46

Para el caso de las mezclas con árido natural se aprecia como las diferencias entre curvas son mayores al variar sobre todo el contenido de agua. Además, se aprecia un claro contenido óptimo de betún del 4% para todo el rango de frecuencias y temperaturas ensayado, de modo que contenidos mayores y menores dan resultados de rigidez inferiores. En el caso del agua, también se aprecia como el contenido mínimo ensayado (3%) es el óptimo y el hecho de añadir cada vez más agua a la mezcla produce que cada vez la rigidez sea menor. Todos estos aspectos concuerdan nuevamente con lo obtenido para el ITSM.

Las curvas maestras halladas en la presente investigación con árido reciclado muestran rigideces similares a las de otros autores cuyas investigaciones tenían como objeto de estudio las mezclas bituminosas en caliente, tales como Ping y Xiao (2008) y Mills-Beale y You, 2010. Además, salen parecidas a las de Yan et al. (2015) para reciclados de firmes con emulsión bituminosa y cemento Portland y a las de Kim et al. (2009) que también usaba espuma de betún, y son superiores a las obtenidas por Kim y Lee (2012) y Lee et al. (2009), tanto para reciclados con emulsión, como con espuma de betún. Stimilli et al. (2013) estudiaron también los reciclados en frío con emulsión bituminosa y con un 2% de cemento Portland. Los parámetros del modelo (α , β , δ , γ) salen realmente parecidos a los obtenidos en esta investigación, con la excepción de δ , que sale considerablemente inferior en la investigación de Stimilli et al. (2013). Esto hace que aunque la forma de las curvas sea parecida, las aquí obtenidas están a un nivel

superior de rigidez, más bien comparable al que obtuvieron con testigos de capas de base de hormigón bituminoso en caliente.

No obstante, comparando los resultados con los de las mezclas de control con árido natural, se pueden obtener más conclusiones que refuerzan las ya obtenidas para el ITSM. Así, por ejemplo, comparadas con las mezclas con árido reciclado, las mezclas con árido natural son más rígidas a bajas temperaturas y más blandas a altas temperaturas por lo que son más sensibles a la fractura frágil a bajas temperaturas a la vez que a la aparición de deformaciones permanentes a altas temperaturas. Esta mayor dependencia de las mezclas con árido natural a la temperatura puede verse también reflejada en un mayor valor absoluto de los shift factors (Figura 7.23) y coincide con la tendencia observada en investigaciones como Kim y Lee (2012). Además, las mezclas con árido natural son más sensibles a cambios en la dosificación, por lo que las mezclas con árido reciclado serían más estables para una producción de planta a gran escala.

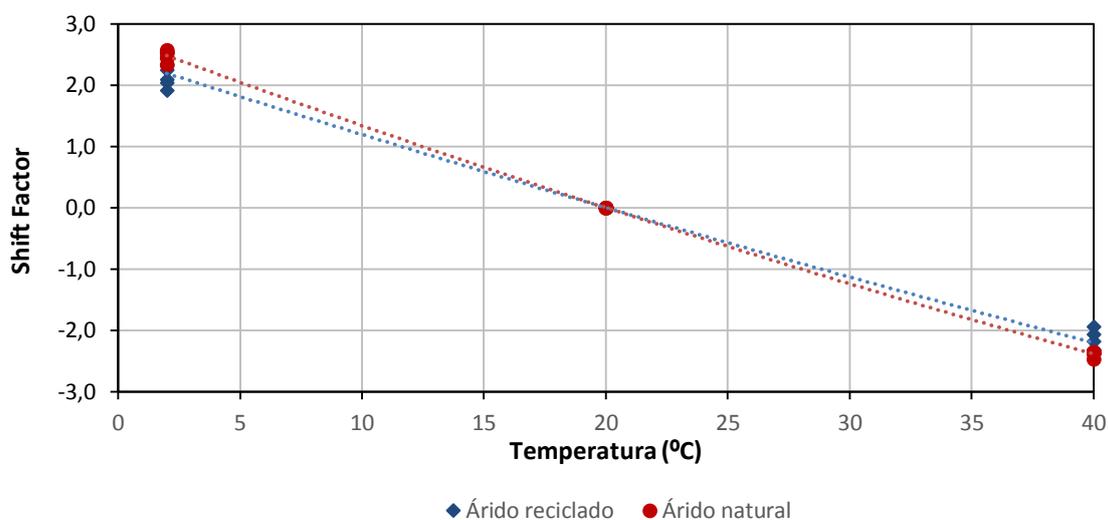


Figura 7.23 Shift factor en función de la temperatura obtenido para las distintas mezclas con árido reciclado

7.3.3 Relación entre módulo dinámico y módulo resiliente a tracción indirecta

Por último, se realizó sobre las mismas probetas un ensayo corriente de ITSM según la Norma UNE-EN 12697-26:2006 (Anexo C) con el fin de ver la correlación entre éste y el $|ITE^*|$. Los ITSM hallados se recopilan en la Tabla 7.22 y como se puede apreciar, en general son menores a los hallados en apartados anteriores debido a que, tal

y como se ha explicado, el nivel de compactación alcanzado con el compactador giratorio no llega a igualar al de la prensa estática aun habiendo aplicado 250 revoluciones. No obstante, tanto estos resultados como los del |ITE*| provienen de ensayar no destructivamente las mismas probetas por lo que la correlación entre ambos parámetros sigue manteniéndose.

Tabla 7.22 ITSM a 2°C, 20°C y 40°C para probetas con 100% de árido reciclado y 100% de árido natural

% betún	% agua	ITSM a 2°C	ITSM a 20°C	ITSM a 40°C
<i>Probetas con árido reciclado</i>				
5	9	5103,1	2072,8	550,5
6	9	6682,3	2675,5	661,1
7	9	6727,5	2482,0	566,1
8	9	5470,3	1564,2	450,7
7	21	7839,5	2970,6	743,7
7	33	6049,4	2364,0	605,4
<i>Probetas con árido natural</i>				
2	3	4650,8	1153,8	228,5
3	3	9447,0	2124,0	306,5
4	3	9137,5	1909,0	261,5
5	3	9129,4	1687,9	220,8
6	3	7412,3	1509,0	191,0
4	9	9853,8	2019,0	324,8
4	15	6296,3	1225,1	243,6

En la Figura 7.24 se han representado los pares de valores de módulo resiliente (ITSM) y módulo dinámico |ITE*| obtenidos para cada una de las probetas con 100% de árido reciclado ensayadas según ambos procedimientos. Los puntos se han clasificado según la frecuencia de carga a la que fue obtenido el módulo dinámico a tracción indirecta con el fin de obtener la frecuencia que produce valores de |ITE*| más similares a los de ITSM. Tal y como se puede observar, la recta de correlación 1:1 se sitúa entre las obtenidas para las frecuencias de 0,5 Hz y 1 Hz. Lo mismo ocurre al repetir el análisis con probetas con un 100% de árido natural (Figura 7.25). Lo que indican estos resultados es que el ITSM tiende a ser similar al módulo dinámico obtenido para una frecuencia entre los 0,5 Hz y 1 Hz. Dicha tendencia, contrasta con la encontrada en otras publicaciones, como Ping y Xiao (2008) en donde proponían como frecuencia de mayor correlación, la de 5 Hz para el caso de mezclas bituminosas densas en caliente y en donde el módulo dinámico |E*| solamente se ensayó con cargas axiales. No se han encontrado estudios análogos con mezclas bituminosas en frío.

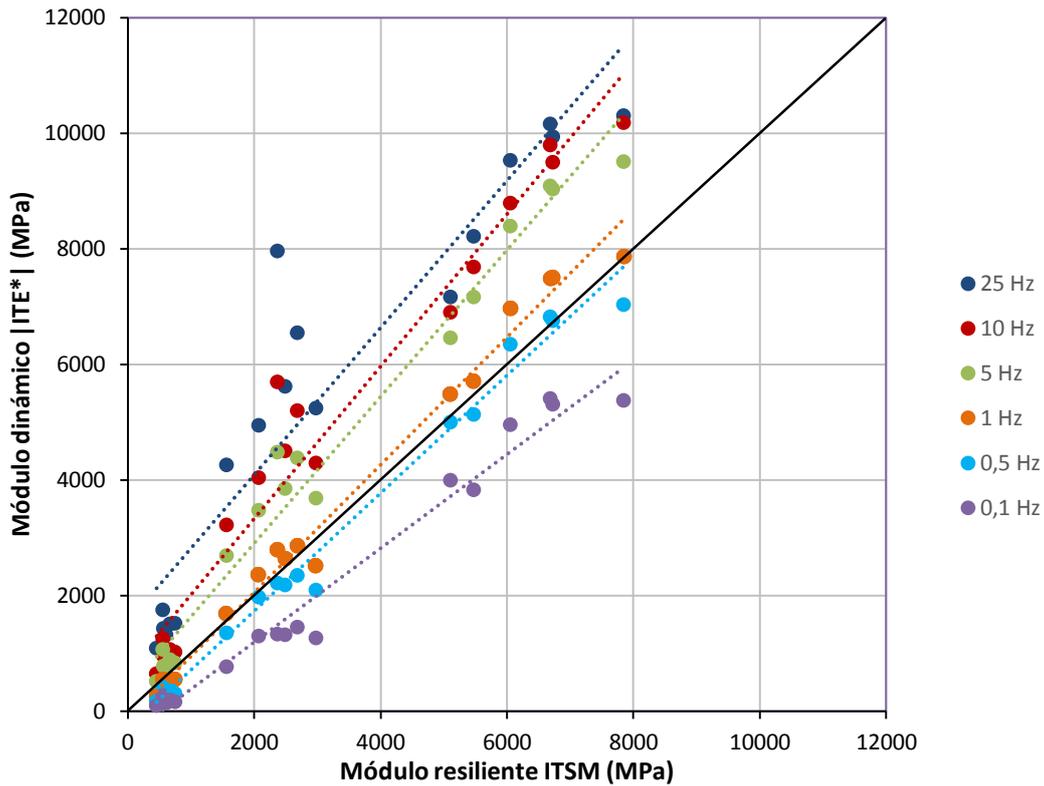


Figura 7.24 Correlación entre el módulo resiliente (ITSM) y el módulo dinámico $|ITE^*|$ a diferentes frecuencias de carga para probetas con un 100% de árido reciclado

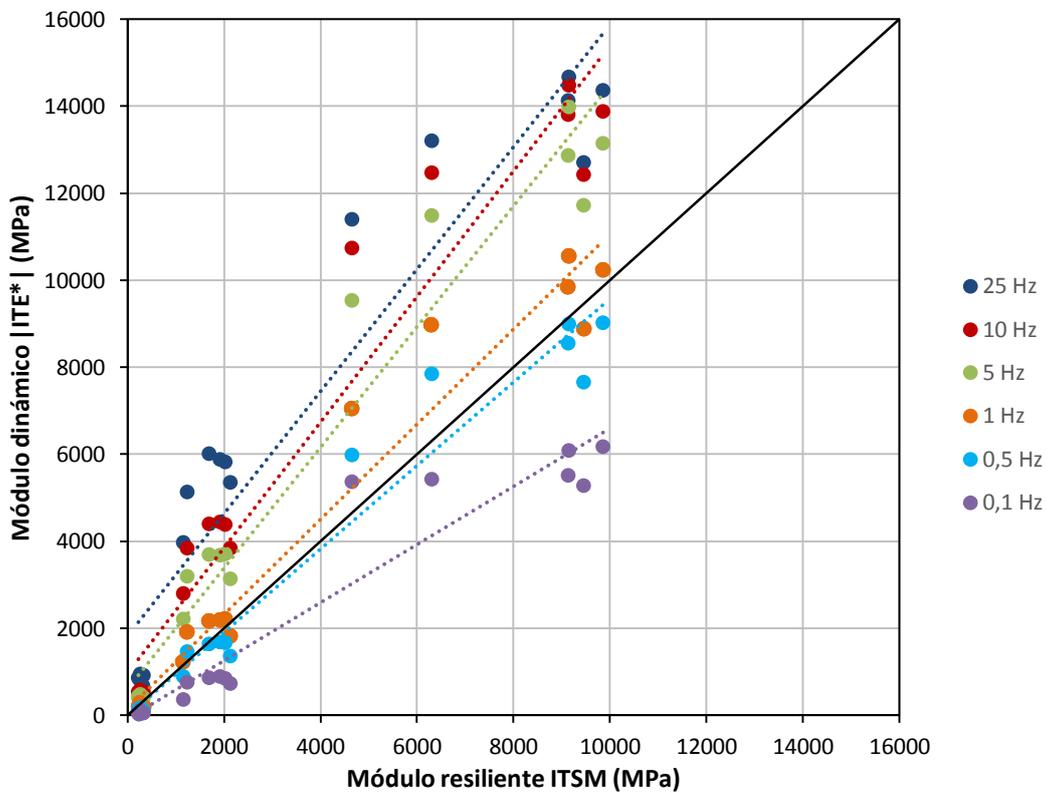


Figura 7.25 Correlación entre el módulo resiliente (ITSM) y el módulo dinámico $|ITE^*|$ a diferentes frecuencias de carga para probetas con un 100% de árido natural

En definitiva, y tras todo lo analizado relativo a la rigidez, tanto desde el punto de vista del módulo resiliente (ITSM) como de los módulos complejos $|E^*|$ y $|ITE^*|$, se confirma que el hecho de incorporar árido reciclado no supone un detrimento para las mezclas sino que en muchos aspectos las hace incluso mejores que las realizadas únicamente con árido natural.

7.4 Ensayo uniaxial de resistencia a la deformación permanente

7.4.1 Descripción de los ensayos realizados

En apartados anteriores se había estudiado la evolución de la rigidez de las mezclas tras diferentes tiempos de curado. Las mismas probetas se ensayaron cada 6 meses hasta alcanzar los 18 meses desde su fabricación, tiempo tras el cual los módulos ITSM dejaron de experimentar crecimientos significativos. Aprovechando que estos ensayos son no destructivos, las mismas probetas fueron sometidas al ensayo de compresión axial bajo carga repetida, RLAT (*Repeated Load Axial Test*) para evaluar su resistencia a la deformación permanente una vez las mezclas han alcanzado una maduración completa.

Con la aplicación de los ciclos de carga, la curva típica de deformación permanente suele presentar tres etapas diferenciadas (Figura 7.26). Tal y como se verá, los parámetros que se analizaron con la realización del ensayo fueron definidos con el fin de parametrizar este comportamiento de un modo cuantitativo:

- Etapa primaria: la pendiente de la curva decrece con el aumento del número de ciclos de carga. Durante esta etapa y la siguiente, la probeta experimenta un decremento del contenido de huecos y por consiguiente, también de su volumen. A este mecanismo se lo denomina densificación y es de naturaleza distinta al de flujo plástico, típico de la etapa terciaria.
- Etapa secundaria: la pendiente de la curva permanece casi constante de modo que la curva se aproxima a una recta en escala logarítmica donde a es el punto de corte de la recta con eje de las deformaciones y b es la

pendiente de la misma. Cuanto mayor es cada uno de estos parámetros, mayor es la tendencia de la mezcla a sufrir deformaciones permanentes (lo que en nomenclatura anglosajona suele ser definido como *rutting potential*). En esta etapa también se presenta un punto de inflexión a partir del cual, la pendiente de la curva de deformación vuelve a aumentar con el número de ciclos. Al número de ciclos en el que se presenta esta inflexión se lo denomina en la literatura anglosajona como *Flow Number (FN)* y puede ser hallado como el punto en el que la curva de deformación alcanza la pendiente mínima (Gul, 2008). Convencionalmente, también es habitual considerarlo como el punto crítico que, de alcanzarse, produciría el fallo de la mezcla (Santagata et al., 2007).

- Etapa terciaria: aparece el flujo plástico en el que áridos y ligante se mueven sin que se produzca un cambio de volumen. Esto se refleja en una pendiente de la curva de deformación que aumenta con el número de ciclos de carga hasta que la probeta pierde toda su consistencia.

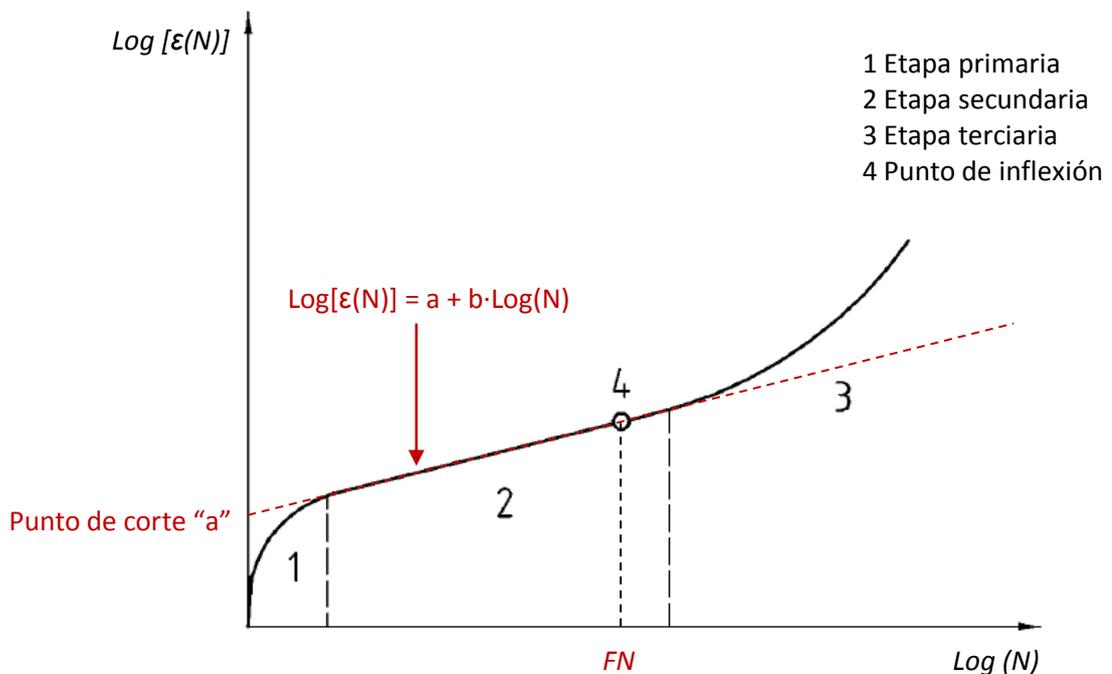


Figura 7.26 Curva típica de deformación axial permanente en función del número de ciclos de carga (a partir de Norma UNE-EN 12697-25)



Figura 7.27 Disposición del ensayo de deformación permanente según Norma BSi DD 226

Estos ensayos, pueden ser realizados mediante la aplicación de una carga estática o mediante una serie de cargas dinámicas cíclicas. A pesar de que la primera opción es menos costosa y más sencilla de realizar, no representa de una manera tan fiel las condiciones reales a las que se verá sometida la mezcla (Brown et al., 2001) por lo que se eligió el método dinámico.

Debido a que la correspondiente Norma Europea UNE-EN 12697-25 está indicada para probetas de 150 mm de diámetro, se eligió la análoga Norma Británica BSi DD 226:1996 (BSi, 1996) que permite el empleo de probetas de 100 mm de diámetro.

Previamente al ensayo, las caras de las probetas fueron lubricadas mediante la aplicación de una capa de grasa de silicona junto con otra de polvo de grafito para así reducir la fricción entre éstas y los platos de carga. Los especímenes fueron llevados a la temperatura de ensayo de 30°C y sometidos a una precarga de acondicionamiento de 10 kPa durante $600 \text{ s} \pm 6 \text{ s}$.

A continuación, el ensayo se realizó a temperatura constante en cámara climática, mediante la aplicación de una carga dinámica de $100 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$, consistiendo cada ciclo en 1 s de carga seguido de 1 s de reposo con carga nula. Aunque la Norma indica la realización de 1800 ciclos, en los ensayos realizados se dejaron hasta 5000 ciclos con el fin de obtener unos valores de deformación permanente más representativos.

En el presente estudio fue imposible obtener ni una sola curva en la que existiesen evidencias de una etapa terciaria, por lo que el *Flow Number* no pudo ser hallado para ninguna de las mezclas estudiadas. Se realizaron previamente algunas pruebas con mezclas críticas (aquellas de mayores y menores contenidos de agua y betún) aumentando el número de ciclos hasta 10.000, valor máximo que el equipo permitía introducir. Aun así, no se llegó a alcanzar la etapa terciaria en ningún caso, por lo que los ensayos se prosiguieron con los mencionados 5000 ciclos.

Tras el ensayo, los parámetros analizados fueron los que se indican en la Tabla 7.23. Obsérvese que todos los parámetros cumplen que cuanto mayor es su valor, mayor será también la tendencia de la mezcla a sufrir deformaciones permanentes.

Tabla 7.23 Parámetros analizados en el ensayo de deformación permanente

Parámetro	Definición
ϵ_0	Deformación permanente tras acondicionamiento
ϵ_{5000}	Deformación permanente final (tras 5000 ciclos)
b	Pendiente de la recta de etapa secundaria
a	Punto de corte de la recta de etapa secundaria

7.4.2 Deformación permanente inicial (tras acondicionamiento)

Los resultados de deformación permanente tras el acondicionamiento (ϵ_0), obtenidos para mezclas con árido reciclado y árido natural, pueden ser vistos respectivamente en la Tabla 7.24 y Tabla 7.25.

Tal y como se puede observar, y debido a la gran cantidad y variabilidad de datos, resulta más sencillo analizar los valores promedio de cada contenido de agua y

betún (de cada fila y columna) a la hora de vislumbrar las tendencias que puedan ocurrir. Así, estos resultados promedio se resumen gráficamente en la Figura 7.28.

Puede verse cómo la deformación permanente tras el acondicionamiento tiende a marcar un valor mínimo para los contenidos óptimos de betún del 5% para las mezclas con árido reciclado y 4% para las mezclas con árido natural. No obstante, con la variación del contenido de agua, la deformación permanente inicial parece variar en forma de onda con valores pico y valle que se suceden. Aun así, parece evidente es que existe un valor mínimo para los contenidos de agua del 21% en mezclas con árido reciclado y 9% en mezclas con árido natural.

Es importante destacar que en términos generales, las deformaciones son mayores para mezclas con árido natural, aún para iguales contenidos de agua y betún, lo que indica que la incorporación de árido reciclado a las mezclas aporta un efecto beneficioso en su resistencia a deformaciones permanentes.

Tabla 7.24 Deformación permanente inicial tras acondicionamiento, ϵ_0 (%) de mezclas con 100% de árido reciclado

Contenido betún	Contenido inicial de agua en amasada										Promedio
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%	
3%	0,192	0,186	0,190	0,174	0,184	0,257	0,348	0,341	0,255	0,189	0,232
4%	0,174	0,188	0,182	0,166	0,151	0,159	0,301	0,308	0,200	0,151	0,198
5%	0,152	0,171	0,187	0,188	0,159	0,125	0,170	0,189	0,178	0,175	0,169
6%	0,147	0,199	0,213	0,184	0,167	0,152	0,167	0,186	0,188	0,182	0,179
7%	0,268	0,357	0,237	0,212	0,180	0,184	0,231	0,242	0,224	0,228	0,236
8%	0,420	0,450	0,399	0,275	0,209	0,229	0,308	0,344	0,267	0,226	0,313
Promedio	0,226	0,259	0,235	0,200	0,175	0,184	0,254	0,268	0,219	0,192	-

Tabla 7.25 Deformación permanente inicial tras acondicionamiento, ϵ_0 (%) de mezclas con 100% de árido natural

Contenido betún	Contenido inicial de agua en amasada					Promedio
	3%	6%	9%	12%	15%	
2%	0,465	0,157	0,265	0,346	0,183	0,267
3%	0,204	0,387	0,279	0,326	0,358	0,307
4%	0,203	0,289	0,224	0,241	0,240	0,239
5%	0,387	0,477	0,296	0,244	0,470	0,407
Promedio	0,315	0,327	0,266	0,313	0,313	-

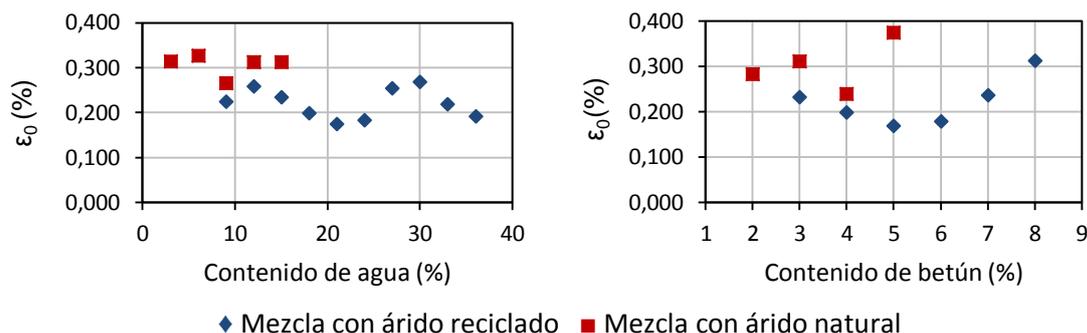


Figura 7.28 Deformación permanente tras el acondicionamiento (ϵ_0) según el contenido de agua y betún para mezclas con 100% de árido reciclado y natural

7.4.3 Deformación permanente final (tras 5000 ciclos)

En este caso, los resultados de ϵ_{5000} se muestran en la Tabla 7.26 y Tabla 7.27, así como en la Figura 7.29. Al contrario que en los parámetros anteriores, las tendencias para mezclas con ambos tipos de árido parecen ser ligeramente diferentes. Así, las deformaciones permanentes al final del ensayo con mezclas con árido reciclado tienden a decrecer cuanto mayor es el contenido de agua, así como también el contenido de betún. Las mezclas con árido natural, también lo hacen con el contenido de agua pero muestran un marcado valor mínimo para el contenido de betún del 4%. Esto podría indicar que si se dispusiese de mezclas con árido reciclado con mayores contenidos de betún, quizá podría ser observada una tendencia similar, pero con las muestras disponibles solo fue observable la rama decreciente.

Tabla 7.26 Deformación permanente final tras 5000 ciclos, ϵ_{5000} (%) de mezclas con 100% de árido reciclado

Contenido betún	Contenido inicial de agua en amasada										Promedio
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%	
3%	0,987	0,942	0,880	0,960	1,019	1,013	1,003	1,005	0,993	0,981	0,978
4%	0,974	0,927	0,821	0,932	0,945	0,905	0,911	0,905	0,889	0,876	0,909
5%	0,987	0,824	0,760	0,837	0,721	0,750	0,732	0,764	0,808	0,806	0,799
6%	0,952	0,744	0,931	0,940	0,883	0,709	0,688	0,740	0,741	0,712	0,804
7%	0,924	0,913	0,955	0,901	0,830	0,711	0,762	0,706	0,562	0,583	0,785
8%	0,933	0,941	0,901	0,778	0,694	0,657	0,634	0,540	0,526	0,633	0,724
Promedio	0,960	0,882	0,875	0,891	0,849	0,791	0,788	0,777	0,753	0,765	-

En términos generales, las deformaciones en el ciclo 5000 tienden a igualarse con ambos tipos de árido, y cuando los contenidos de agua y betún son suficientemente

elevados, las mezclas con árido reciclado pueden llegar a ser incluso mejores. Por ello, la incorporación de árido reciclado no supone, tampoco en este caso, ningún tipo de perjuicio.

Tabla 7.27 Deformación permanente final tras 5000 ciclos, ϵ_{5000} (%) de mezclas con 100% de árido natural

Contenido betún	Contenido inicial de agua en amasada					Promedio
	3%	6%	9%	12%	15%	
2%	0,988	0,776	0,874	0,846	0,882	0,880
3%	0,656	0,956	0,723	0,826	0,948	0,821
4%	0,737	0,836	0,690	0,747	0,750	0,753
5%	1,279	1,490	1,428	0,935	1,002	1,300
Promedio	0,915	1,014	0,929	0,839	0,895	-

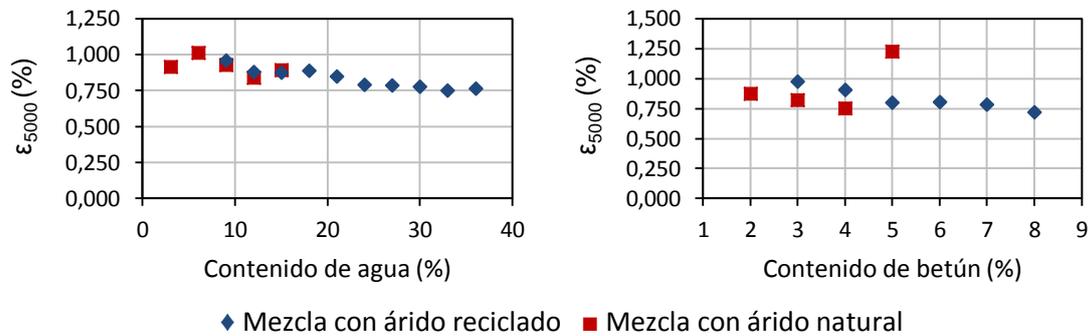


Figura 7.29 Deformación permanente tras 5000 ciclos (ϵ_{5000}) según el contenido de agua y betún para mezclas con 100% de árido reciclado y natural

7.4.4 Pendiente de la recta tangente en etapa secundaria

Los resultados de la pendiente tangente a las curvas de deformación en la etapa secundaria pueden verse en la Tabla 7.28 y Tabla 7.29. Además, los valores promedio se han representado gráficamente en la Figura 7.30. En general, el contenido de agua no parece influir de una forma clara y notoria en las pendientes, si bien se intuyen pequeños valores máximos en torno al contenido del 24% en mezclas con árido reciclado y 6% en mezclas con árido natural. Sin embargo, con el contenido de betún la tendencia es siempre creciente aproximándose a una curva de tipo exponencial. Así, en este caso sería aconsejable dosificar con valores bajos tanto de agua como de betún.

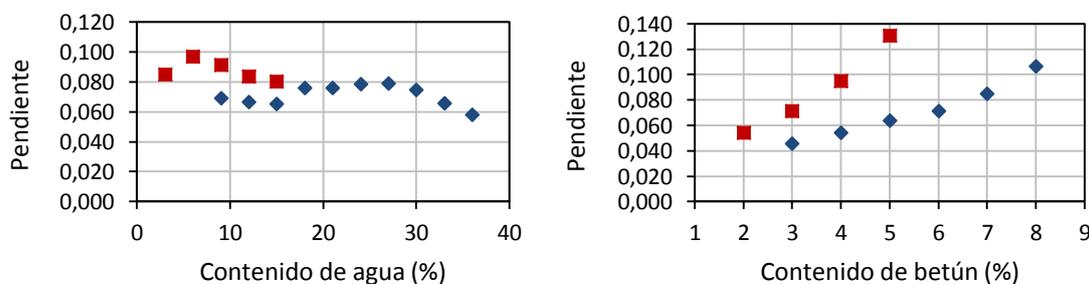
Al margen de lo anterior, es importante destacar que en general, las pendientes obtenidas con mezclas con árido reciclado son menores que las obtenidas con árido natural para cualquier contenido de agua y betún, lo que puede entenderse como un efecto beneficioso.

Tabla 7.28 Pendiente de recta tangente en etapa secundaria de mezclas con 100% de árido reciclado

Contenido betún	Contenido inicial de agua en amasada										Promedio
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%	
3%	0,050	0,042	0,04	0,058	0,054	0,050	0,046	0,041	0,038	0,038	0,046
4%	0,059	0,054	0,055	0,070	0,063	0,057	0,052	0,047	0,043	0,04	0,054
5%	0,069	0,068	0,065	0,060	0,072	0,080	0,064	0,059	0,052	0,048	0,064
6%	0,070	0,069	0,064	0,070	0,078	0,085	0,086	0,069	0,064	0,057	0,071
7%	0,081	0,077	0,080	0,079	0,086	0,092	0,101	0,103	0,076	0,071	0,085
8%	0,087	0,089	0,088	0,120	0,102	0,107	0,124	0,130	0,121	0,095	0,106
Promedio	0,069	0,067	0,065	0,076	0,076	0,079	0,079	0,075	0,066	0,058	-

Tabla 7.29 Pendiente de recta tangente en etapa secundaria de mezclas con 100% de árido natural

Contenido betún	Contenido inicial de agua en amasada					Promedio
	3%	6%	9%	12%	15%	
2%	0,045	0,059	0,058	0,054	0,054	0,054
3%	0,072	0,077	0,074	0,070	0,061	0,071
4%	0,090	0,104	0,096	0,105	0,079	0,095
5%	0,132	0,148	0,138	0,107	0,126	0,130
Promedio	0,085	0,097	0,091	0,084	0,080	-



◆ Mezcla con árido reciclado ■ Mezcla con árido natural

Figura 7.30 Pendiente de recta tangente en etapa secundaria según el contenido de agua y betún para mezclas con 100% de árido reciclado y natural

7.4.5 Punto de corte “a” de la recta tangente en etapa secundaria

Los resultados para mezclas con árido reciclado y árido natural se muestran en la Tabla 7.30 y Tabla 7.31 respectivamente. Los valores promedio se recogen gráficamente también en la Figura 7.31.

Para el caso de ambas mezclas se aprecia claramente como el valor “a” disminuye a medida que aumenta el contenido de agua hasta alcanzar un valor mínimo, a partir del cual, los resultados crecen nuevamente. Los contenidos óptimos para los que se obtiene el mínimo valor “a” son el 30% y el 9% para el árido reciclado y natural respectivamente. Nuevamente, el contenido óptimo de agua en la amasada resulta mucho mayor para el caso de las mezclas de árido reciclado debido a la gran absorción del mismo.

Debe de tenerse en cuenta que las tendencias de la pendiente estudiada anteriormente y el parámetro “a” son prácticamente inversas. Esto es lógico si se tiene en cuenta que pendientes elevadas provocan que el punto de corte con el eje vertical sea inferior, sobre todo si la recta con mayor pendiente no está a su vez más elevada que la otra. Como se observó anteriormente, las deformaciones registradas en el ciclo 5000 (perteneciente a la etapa secundaria) son similares para ambos tipos de mezcla (misma elevación de las rectas tangentes) por lo que en este caso el parámetro “a” se vuelve claramente dependiente de la pendiente. Como muestra de ello, apréciase que las tendencias con la variación de betún son inversas (a mayor pendiente menor “a”) con excepción del 5% de betún en mezclas con árido natural. En este caso, la deformación en la etapa secundaria es tan elevada (ver Figura 7.29) que aun teniendo una mayor pendiente corta el eje en un punto más elevado (mayor “a”).

En definitiva, la variación en los contenidos de betún evidencia una marcada tendencia decreciente. Mientras que para el árido natural parece haber un mínimo en el contenido del 4% de betún, por falta de muestras no se ha podido determinar si para el árido reciclado, con contenidos todavía mayores los resultados crecerían nuevamente.

Al margen de esto, puede apreciarse como en general el parámetro “a” tiende a ser mayor para el caso de las mezclas con árido reciclado para contenidos bajos de agua

y betún mientras que con contenidos suficientemente altos, llega a ser considerablemente menor. Como ocurría con otras propiedades estudiadas, para mantener el mismo nivel de deformación con árido reciclado es necesario aumentar ambos contenidos.

Tabla 7.30 Punto de corte “a” [Log($\mu\epsilon$)] de mezclas con 100% de árido reciclado

Contenido betún	Contenido inicial de agua en amasada										Promedio
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%	
3%	3,811	3,790	3,770	3,742	3,73	3,737	3,780	3,738	3,817	3,837	3,775
4%	3,776	3,741	3,720	3,720	3,723	3,750	3,770	3,760	3,781	3,792	3,753
5%	3,729	3,660	3,642	3,715	3,685	3,605	3,659	3,695	3,705	3,730	3,683
6%	3,585	3,650	3,739	3,721	3,659	3,560	3,544	3,607	3,603	3,619	3,629
7%	3,554	3,654	3,670	3,682	3,543	3,511	3,490	3,420	3,410	3,440	3,537
8%	3,569	3,617	3,569	3,370	3,380	3,413	3,330	3,231	3,313	3,323	3,412
Promedio	3,671	3,685	3,685	3,658	3,620	3,596	3,596	3,575	3,605	3,624	-

Tabla 7.31 Punto de corte “a” [Log($\mu\epsilon$)] de mezclas con 100% de árido natural

Contenido betún	Contenido inicial de agua en amasada					Promedio
	3%	6%	9%	12%	15%	
2%	3,829	3,673	3,729	3,730	3,747	3,742
3%	3,550	3,697	3,585	3,661	3,752	3,649
4%	3,535	3,541	3,487	3,486	3,583	3,526
5%	3,619	3,628	3,644	3,579	3,537	3,601
Promedio	3,633	3,635	3,611	3,614	3,654	-

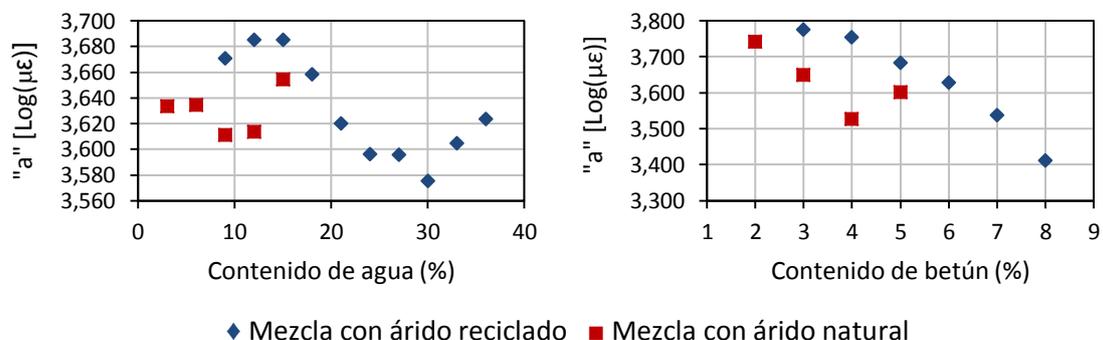


Figura 7.31 Punto de corte “a” según el contenido de agua y betún para mezclas con 100% de árido reciclado y natural

7.4.6 Resumen de resultados

Tras el estudio de los cuatro parámetros analizados (ε_0 , ε_{5000} , a , b) puede concluirse que la incorporación de árido reciclado a las mezclas bituminosas en frío, y tras haber alcanzado su completa maduración:

- Mejora la resistencia a la deformación permanente en los primeros ciclos de carga.
- No afecta negativamente a las deformaciones al final del ensayo, obteniéndose valores similares a los de las mezclas con árido natural para iguales contenidos de agua y betún. Además, aumentando dichos contenidos se puede llegar a conseguir un comportamiento mejor que con mezclas de árido natural.
- Produce etapas secundarias con menores pendientes, lo cual supone un efecto beneficioso, al desarrollarse las deformaciones permanentes de un modo más lento con el paso de los ciclos de carga.
- Dado que las deformaciones de la etapa secundaria son similares para ambos tipos de mezcla, se ha observado que la pendiente de la etapa secundaria influye claramente en el punto de corte de la recta tangente con el eje vertical (parámetro “a”). De este modo, el hecho de que en algunos casos las mezclas con árido reciclado muestren un mayor “a”, no indica que sean peores, sino lo contrario, puesto que para igual nivel de deformación (elevación de la recta tangente) tienen menor pendiente.
- Aunque muchos autores han estudiado la resistencia a la deformación permanente, la gran variedad de modalidades de ensayo hace que sus resultados sean difícilmente comparables entre ellos, así como con los obtenidos en la presente investigación. Como excepción, se ha encontrado que Pasandín (2013) y Pasandín y Pérez (2013) recurrieron exactamente al mismo ensayo aunque aplicando solamente 1800 ciclos y sobre mezclas bituminosa en caliente con hasta un 30% de árido reciclado de hormigón.

Las deformaciones aquí obtenidas en el ciclo 1800 oscilan, en general, entre el 0,6% y el 0,8%, siendo ligeramente superiores a las de los citados autores, las cuales se encontraron normalmente entre el 40% y 60%. Las pendientes medias, tal y como se definen estos autores, también resultaron ser mayores, en torno a los $5 \cdot 10^{-5}$ [%/ciclos] frente a sus aproximadamente $3 \cdot 10^{-5}$ [%/ciclos].

En definitiva, aunque no se consigue alcanzar el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente, en comparación con el árido natural el árido reciclado produce una mejora de la resistencia a la deformación permanente en mezclas en frío que han alcanzado su completa maduración.

7.5 Relación entre las diferentes propiedades estudiadas

7.5.1 Relación entre resistencia a tracción indirecta y rigidez

Como se ha explicado anteriormente, las probetas ensayadas a tracción indirecta y rigidez eran parejas de unos 50 mm de alto, procedentes del corte de una misma probeta ‘madre’ de 101,6 mm de altura. Por ello, si existe algún tipo de correlación entre los resultados de ambos ensayos, en ningún caso podría ser achacado a variaciones en el proceso de fabricación, curado, etc. En la Figura 7.32 se representa gráficamente la relación entre ambas propiedades para probetas con un 100% de árido reciclado. En un principio parece que la línea de tendencia que más se ajusta a la distribución de puntos es una simple recta. Lo mismo ocurre aunque se distingan los puntos según el contenido de agua (Figura 7.33). Sin embargo, si se diferencian los puntos según el contenido de betún (Figura 7.34) se puede apreciar un crecimiento y posterior decrecimiento de ambas propiedades según aumenta el contenido de betún en la mezcla. Por ello, en un principio el aumento de betún mejora la mezcla dotándola de mayor rigidez y resistencia a la tracción indirecta pero una vez alcanzado el óptimo de betún (ente el 5% y 6%) ambas propiedades vuelven a caer, y siendo la rigidez la que lo hace de forma más acentuada. Por ejemplo, se diferencia como los contenidos del 4% y 8% de betún tienen resistencias a tracción indirecta similares pero rigideces considerablemente diferentes.

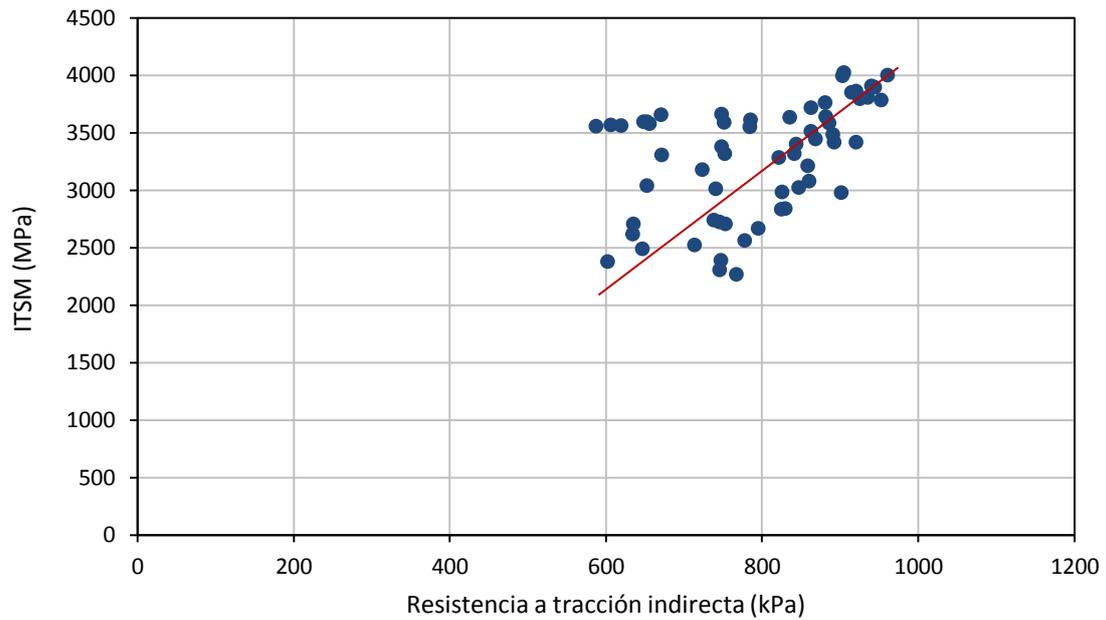


Figura 7.32 Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado

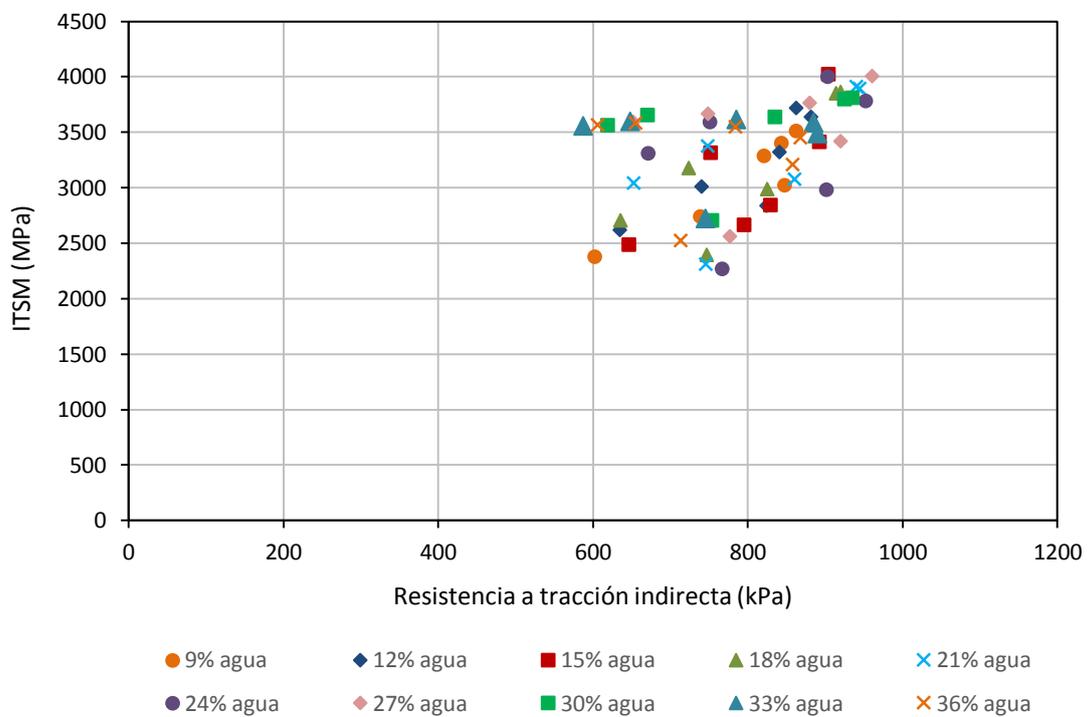


Figura 7.33 Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de agua

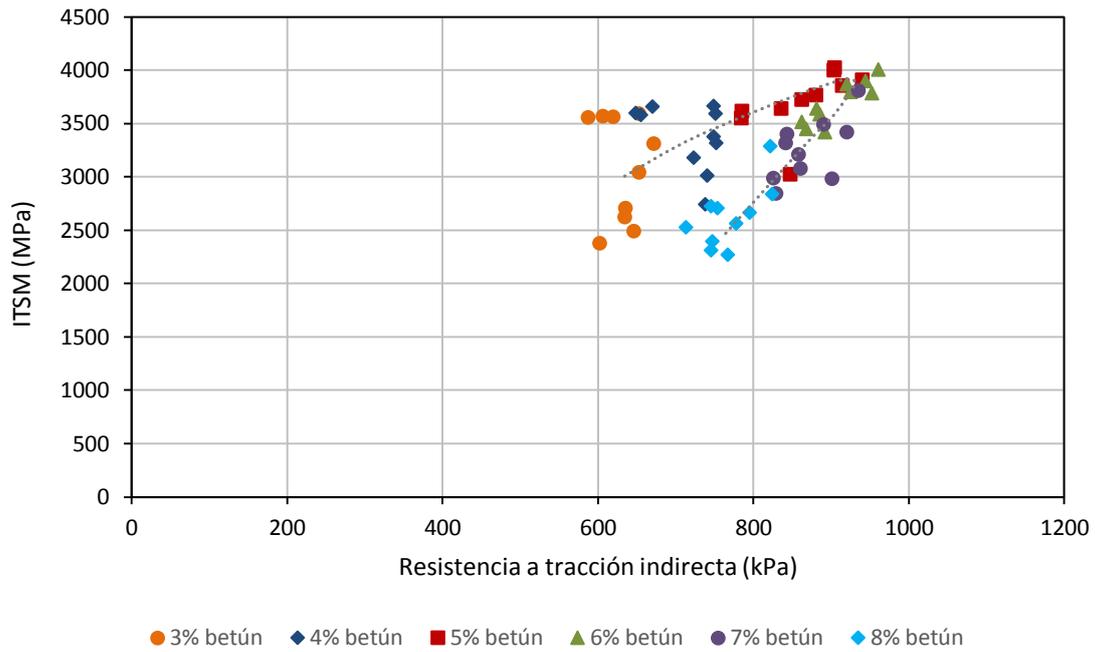


Figura 7.34 Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

En las Figura 7.35, Figura 7.36 y Figura 7.37 se representa la misma relación pero para un 100% de árido natural. Se observan menores resistencias a tracción indirecta, menores rigideces y menores contenidos óptimos de betún, lo que concuerda con lo explicado en apartados anteriores, pero se siguen observando los comportamientos que se acaban de describir.

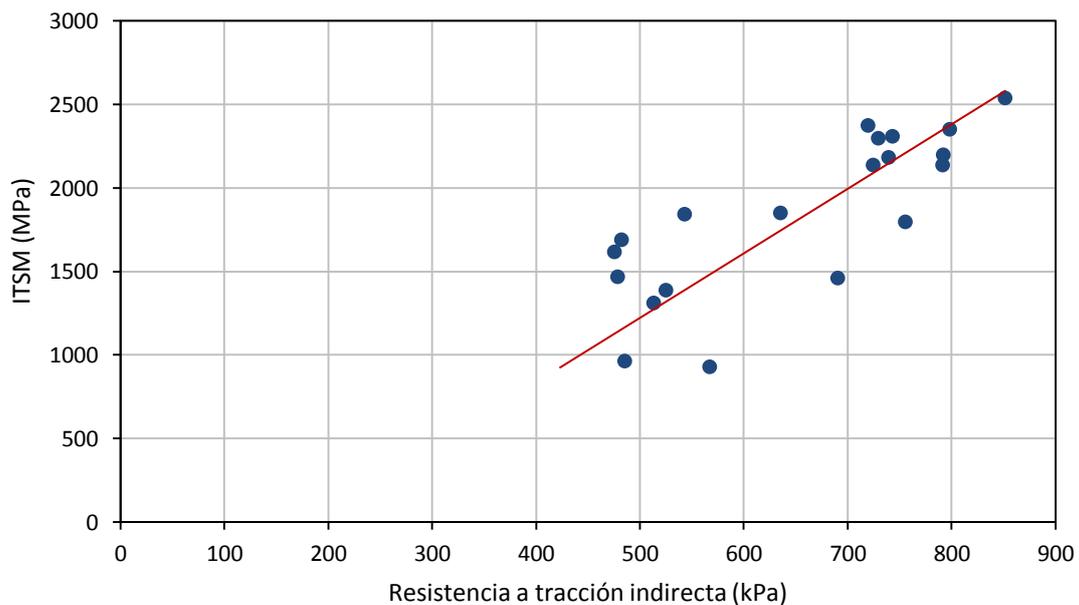


Figura 7.35 Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido natural

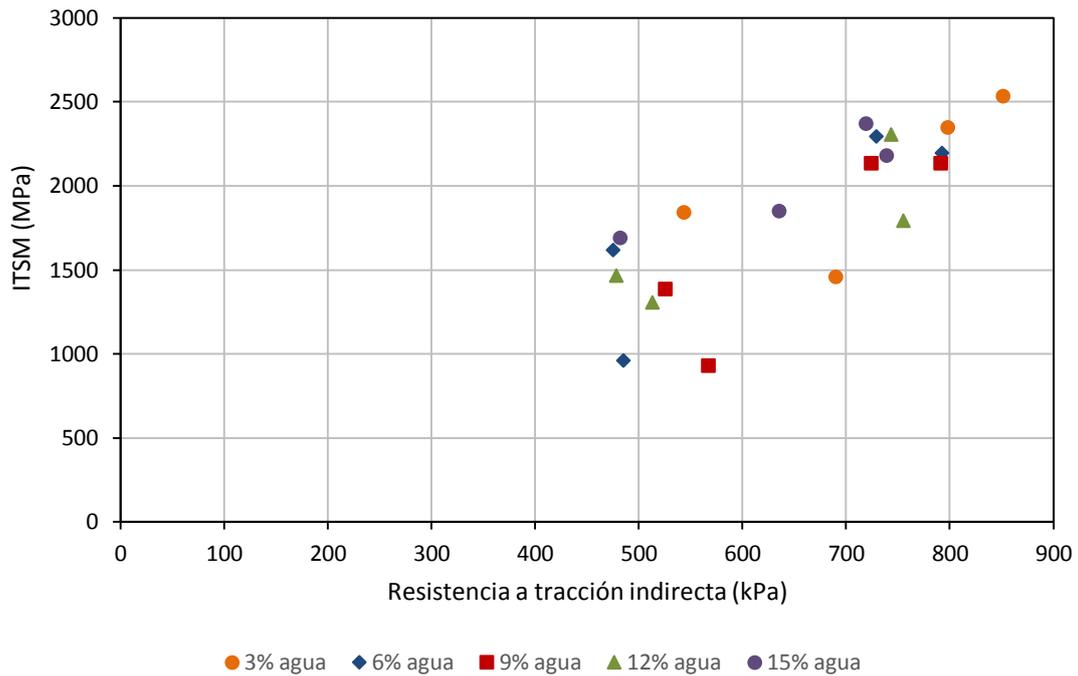


Figura 7.36 Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido natural y distinguiendo según contenidos de agua

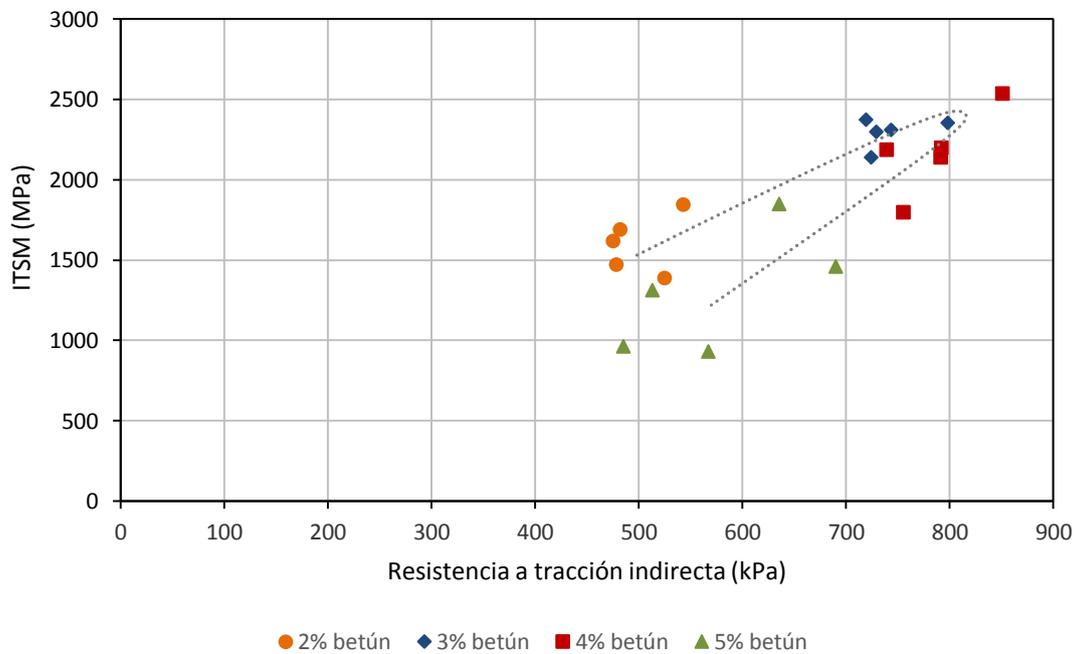


Figura 7.37 Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido natural y distinguiendo según contenidos de betún

Así, aunque la tendencia puede parecer una simple recta, y aunque nuevamente el hecho de diferenciar los puntos según su correspondiente contenido de betún no ayuda a esclarecer la tendencia real, al diferenciar los puntos según su contenido de betún, sí es posible identificar una tendencia igual que la del caso anterior, en la que ambas propiedades suben con el aumento del contenido de betún hasta alcanzar un valor óptimo en torno al 4%, a partir del cual ambas propiedades disminuyen siendo la rigidez la que lo hace de forma más pronunciada.

7.5.2 Relación entre resistencia a compresión y resistencia a tracción indirecta

En este caso, de forma similar al anterior, la tendencia que a priori relaciona ambas propiedades para un 100% de árido reciclado, no está clara (Figura 7.38). Sin embargo, cuando los puntos se diferencian según el correspondiente contenido de betún, una nueva y más evidente tendencia sale a la luz (Figura 7.39). Si tratadas de forma individual se observaba que el contenido óptimo de betún era del 3% para la resistencia a compresión y del 5% para la rigidez, tratadas de forma conjunta se podría deducir que el contenido óptimo se sitúa entre un 4% y 5%.

Además, en este caso, cuando los puntos se diferencian según el contenido de agua (Figura 7.40), se aprecia la misma tendencia para cada contenido aunque a diferentes niveles, evidenciándose claramente que el contenido óptimo de agua del 15%.

Paralelamente al caso anterior, ahora es la resistencia a compresión la propiedad que cae más rápido que la resistencia a tracción. De hecho, se intuye que excesos a la hora de dosificar el betún podría suponer serios detrimentos de la resistencia a compresión.

Esta tendencia, también es observada también en las probetas con un 100% de árido natural (Figura 7.41). En este caso, se aprecian menores resistencias así como un menor contenido óptimo de betún entre un 3% y 4%.

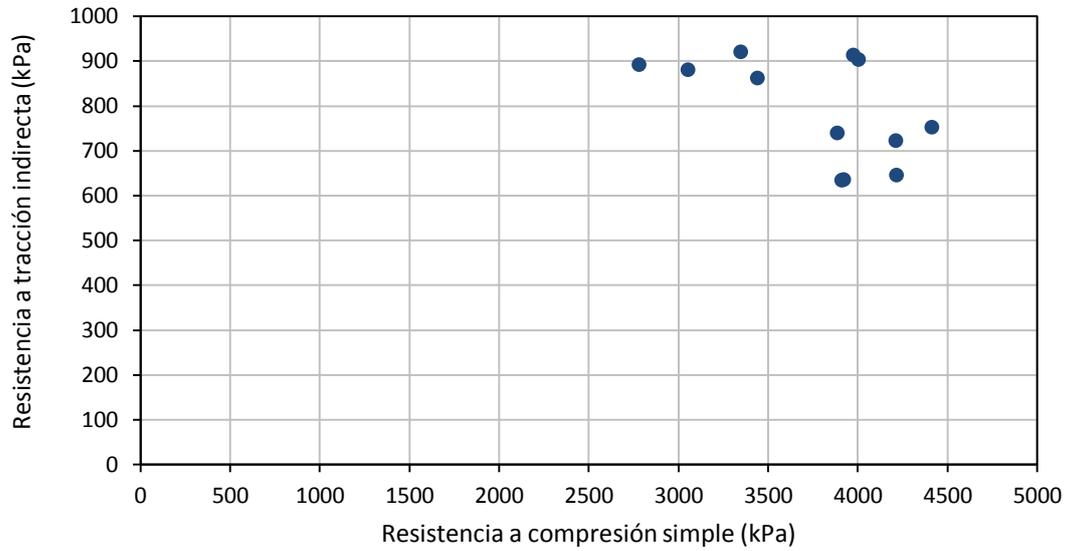


Figura 7.38 Relación entre resistencia a compresión simple y a tracción indirecta para un 100% de árido reciclado

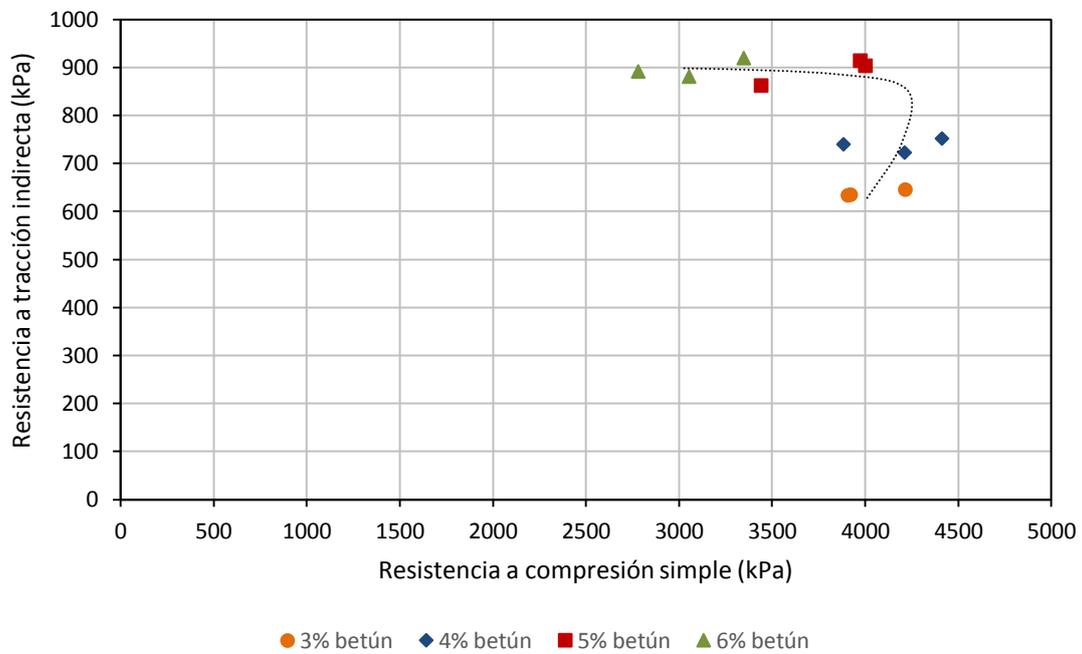


Figura 7.39 Relación entre resistencia a compresión simple y a tracción indirecta para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

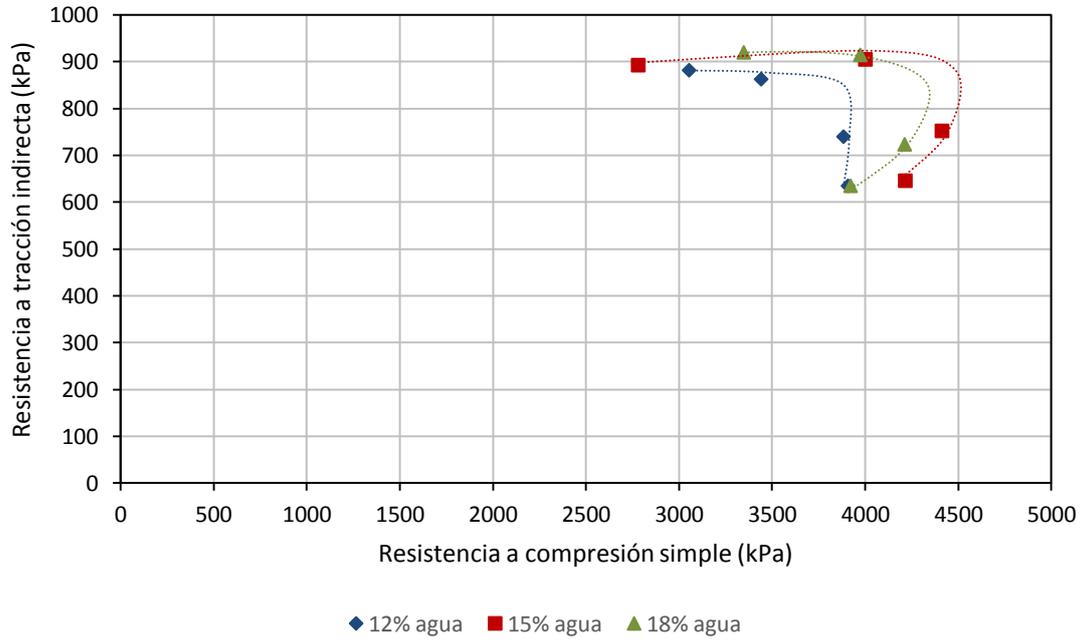


Figura 7.40 Relación entre resistencia a compresión simple y a tracción indirecta para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de agua

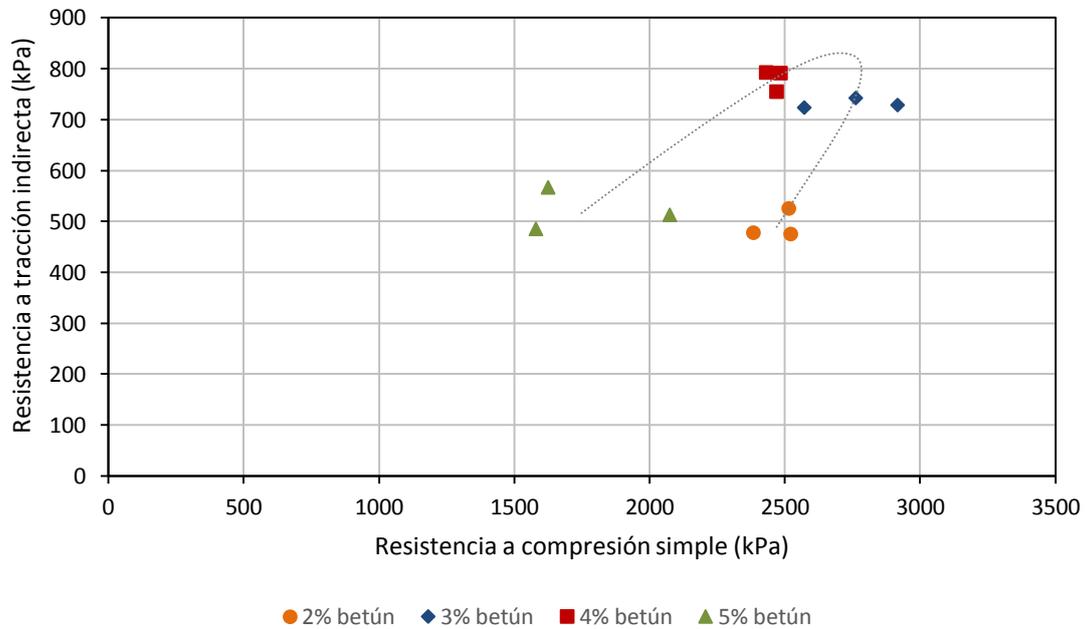


Figura 7.41 Relación entre resistencia a compresión simple y a tracción indirecta para un 100% de árido natural y distinguiendo según contenidos de betún

No obstante, la tendencia contrasta con la observada en otros materiales más rígidos, como la piedra caliza, donde la relación es prácticamente lineal (Nazir et al., 2013). Normalmente, las mezclas bituminosas fallan bajo cargas de compresión por medio de un complejo sistema de microfisuras internas que conduce al colapso microestructural. Estas fisuras pueden ser fundamentalmente provocadas por las tensiones de tracción o por una combinación de tracción y cortante y a medida que se acerca el colapso final de la probeta, suelen desencadenarse grandes grietas sobre todo en la matriz bituminosa. Así, los factores que afectan a la resistencia a tracción son similares a los que afectan también a la resistencia a compresión. Por tanto, el comportamiento observado puede ser explicado debido al importante rol de los áridos y a su microestructura mineral en la resistencia a compresión.

7.5.3 Relación entre resistencia a compresión y módulo ITSM

La relación en este caso vuelve a ser evidente para el 100% de árido reciclado cuando se diferencian los puntos según el contenido de betún (Figura 7.42), alcanzándose el óptimo entre los contenidos del 4% y 5%, siendo la resistencia a compresión la propiedad que más rápidamente descende con los excesos de betún. Al diferenciar los puntos según el correspondiente contenido de agua (Figura 7.43) se aprecia la misma tendencia a diferentes niveles, evidenciándose que el contenido óptimo de agua es, nuevamente el 15%.

En el caso de las mezclas con el 100% de árido natural, la relación se aproxima mucho más a la línea recta, aunque una vez se diferencian los puntos según el contenido de betún (Figura 7.44) se aprecia como efectivamente vuelve a ser la resistencia a compresión la que descende más acentuadamente que la rigidez una vez superado el contenido óptimo de betún del 3%.

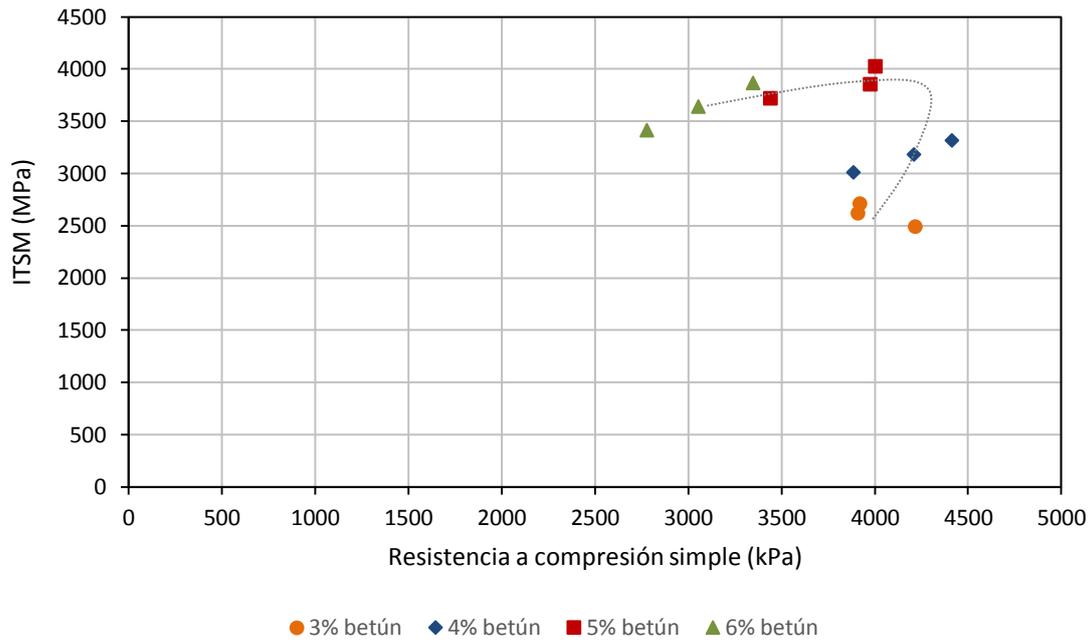


Figura 7.42 Relación entre resistencia a compresión simple y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

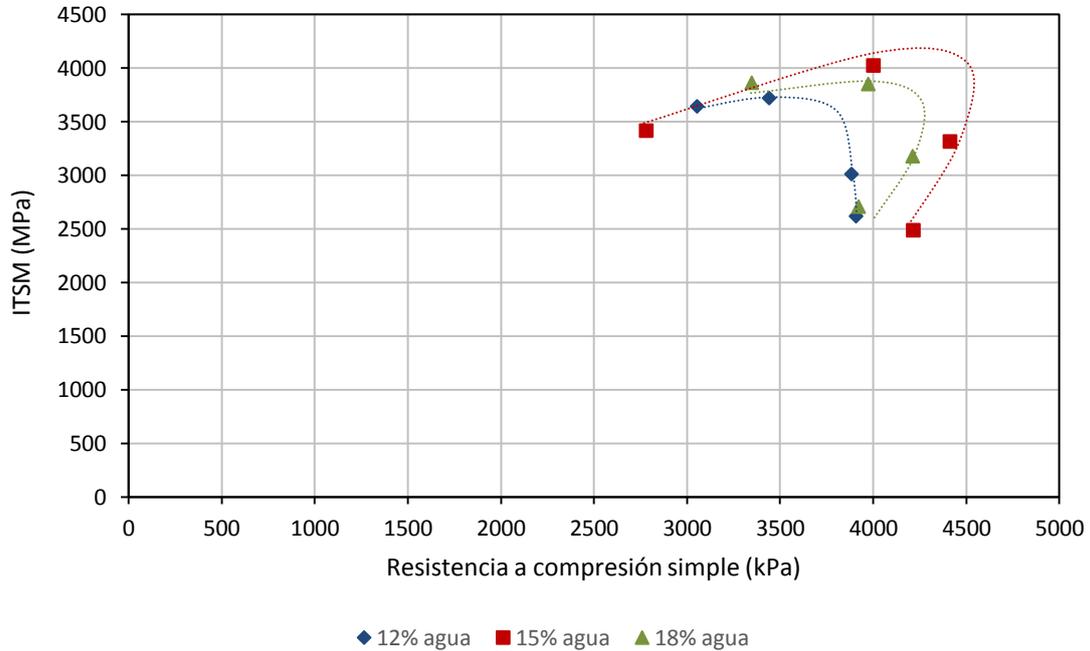


Figura 7.43 Relación entre resistencia a compresión simple y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de agua

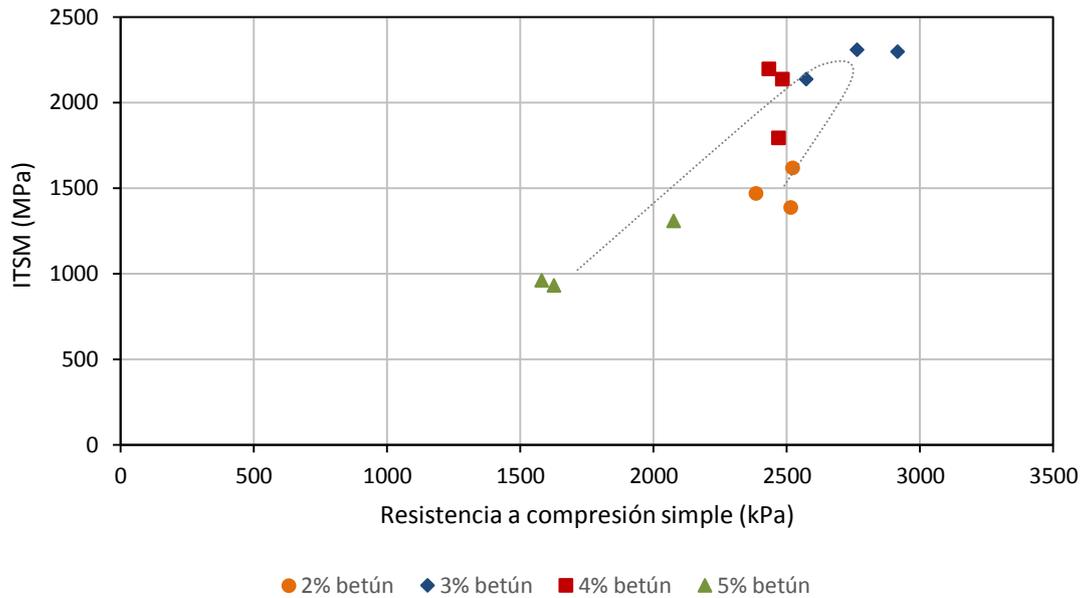


Figura 7.44 *Relación entre resistencia a compresión simple y rigidez (ITSM) para un 100% de árido natural y distinguiendo según contenidos de betún*

7.5.4 Relación entre deformación permanente inicial y módulo ITSM

Tal y como se explicó, una vez que las probetas que se habían dejado a curar al aire hasta alcanzar su completa maduración (18 meses) y se realizó el último ensayo de rigidez a tracción indirecta (ITSM), se sometieron las mismas probetas al ensayo de deformación permanente pudiendo correlacionar los parámetros de este último con la rigidez final de una forma totalmente fidedigna.

En primer lugar se muestra la relación entre la deformación permanente inicial (tras el acondicionamiento) con el módulo ITSM, en mezclas con árido reciclado y con árido natural. Fue imposible obtener ningún tipo de correlación diferenciando los puntos según contenidos de agua, pero si se diferencian según el contenido de betún, sí es posible ver una clara tendencia (Figura 7.45 y Figura 7.46). En mezclas con árido reciclado se aprecia como a medida que aumenta el contenido de betún, aumenta la rigidez y disminuye la deformación permanente hasta alcanzar una deformación mínima con contenidos entre el 5% y 6%. No obstante, la rigidez sigue aumentando hasta contenidos entre 6% y 7% por lo que más rígido no necesariamente significa menor deformación inicial.

En mezclas con árido natural la relación es más confusa aunque parece que con el contenido del 4% se dan a la vez la máxima rigidez y la mínima deformación.

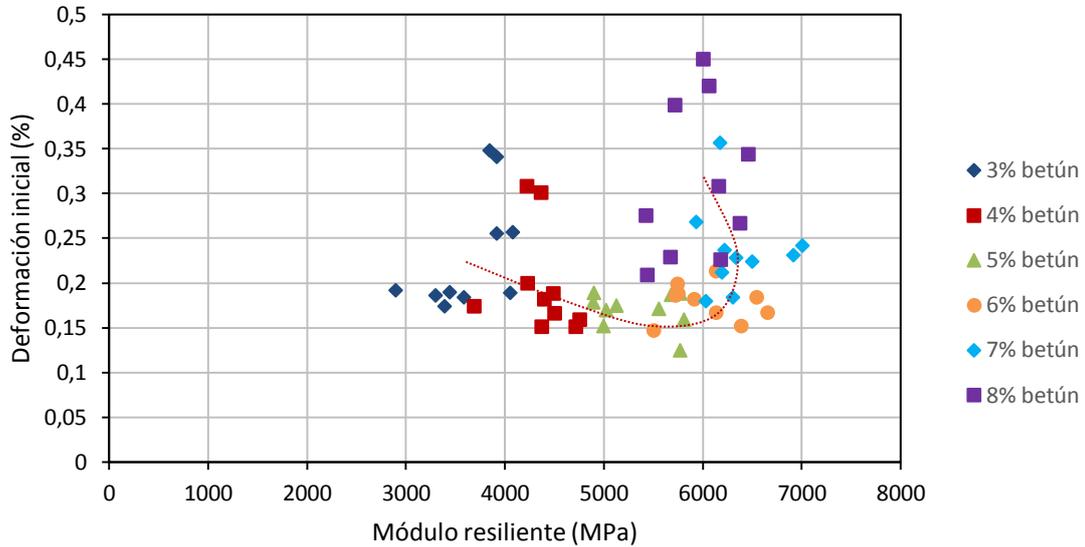


Figura 7.45 Relación entre deformación permanente inicial (tras acondicionamiento) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

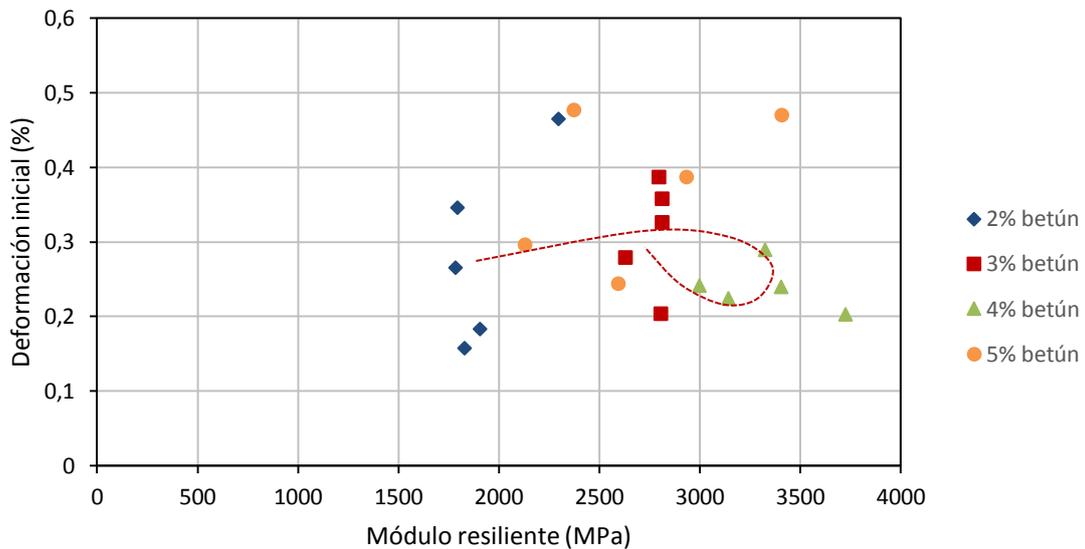


Figura 7.46 Relación entre deformación permanente inicial (tras acondicionamiento) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido natural y distinguiendo según contenidos de betún

7.5.5 Relación entre deformación permanente final y rigidez

Cuando se analiza la relación entre la deformación permanente al final del ensayo (tras 5000 ciclos) y la rigidez ocurre, al igual que en el caso anterior, que solamente se pueden extraer tendencias cuando se distinguen los puntos según su contenido de betún (Figura 7.47 y Figura 7.48). Al hacerlo así, aparecen marcadas relaciones aunque opuestas según las mezclas estén hechas con árido reciclado o natural.

Las mezclas con árido reciclado muestran una tendencia a medida que aumenta el contenido de betún, consistente en que aumenta la rigidez y disminuye la deformación permanente. Sin embargo, mientras que la rigidez alcanza su máximo para el contenido del 7%, la deformación permanente final no vuelve a subir ni con el contenido más alto (8%).

Por su parte, las mezclas con árido natural muestran una tendencia más lógica, ya que la deformación permanente crece notablemente (y la rigidez baja) al superar el contenido óptimo del 4%.

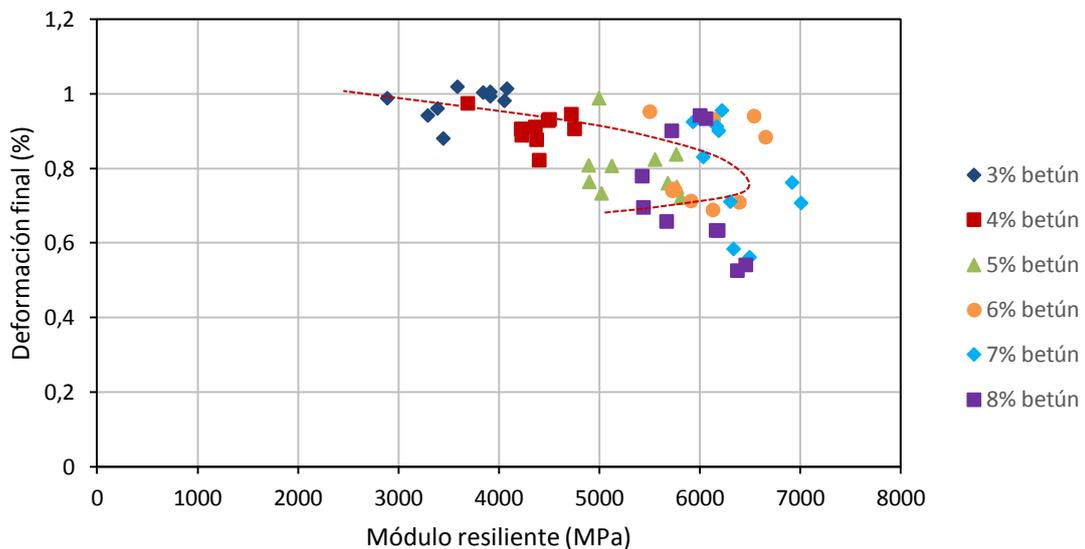


Figura 7.47 Relación entre deformación permanente final (tras 5000 ciclos) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

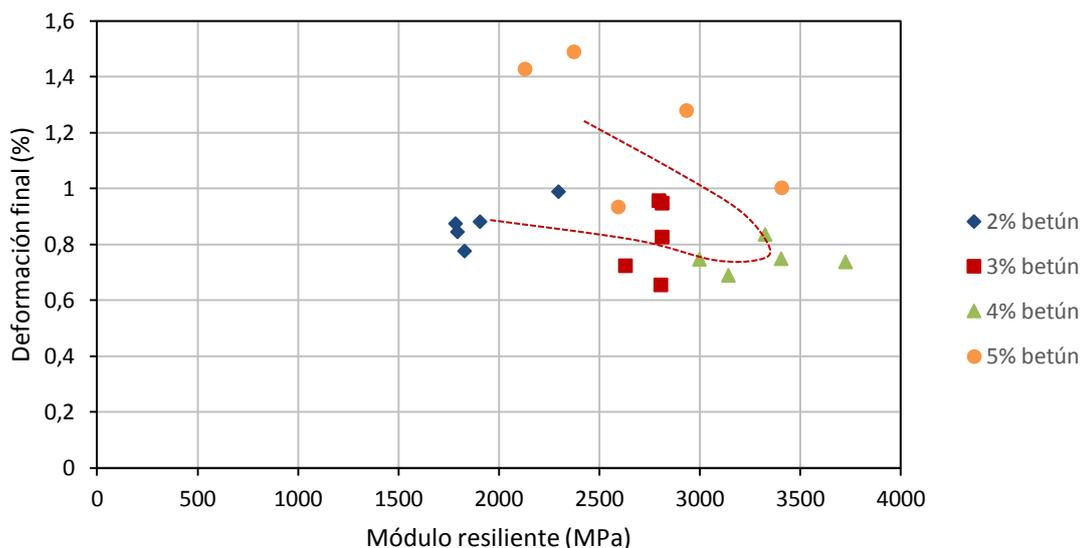


Figura 7.48 Relación entre deformación permanente final (tras 5000 ciclos) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido natural y distinguiendo según contenidos de betún

Por tanto, las mezclas con áridos reciclados son menos peligrosas en caso de dosificar con exceso de betún, no produciéndose grandes detrimentos en la deformación permanente mientras que con árido natural, al sobrepasar el óptimo en un 1% se produce un fuerte descenso de la rigidez y un fuerte crecimiento de las deformaciones permanentes (del entorno del 0,8% al 1,2%, o lo que es lo mismo, un 50% mayores).

7.5.6 Relación entre pendiente de la etapa secundaria de deformación y rigidez

La pendiente de la recta tangente a la curva de deformación en la etapa secundaria es un parámetro importante a la hora de prever las deformaciones a largo plazo. En este caso, ambas mezclas, con árido reciclado y natural, muestran relaciones análogas con la rigidez.

Aunque diferenciando según el contenido de agua no se apreció relación alguna, sí se ve que en ambos casos, con el aumento del contenido de betún, la rigidez aumenta hasta alcanzar un máximo (7% con árido reciclado y 4% con árido natural) a partir del cual vuelven a bajar (Figura 7.49 y Figura 7.50). Sin embargo las pendientes siempre aumentan hasta con los contenidos más altos.

Por ello, no es necesario alcanzar grandes rigideces para mantener pendientes bajas, siendo recomendable en este caso quedarse en contenidos bajos de betún.

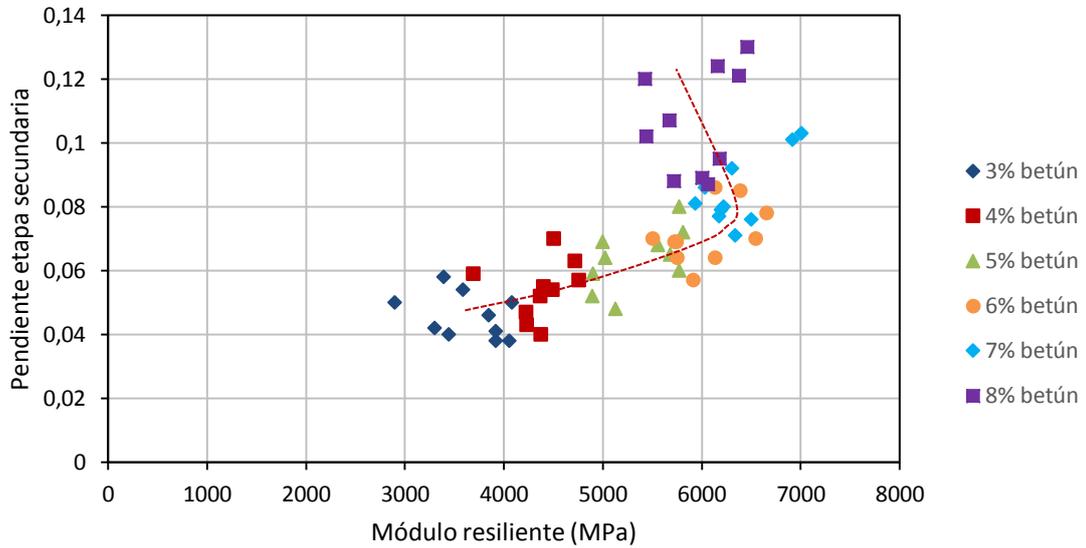


Figura 7.49 Relación entre pendiente de etapa secundaria y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

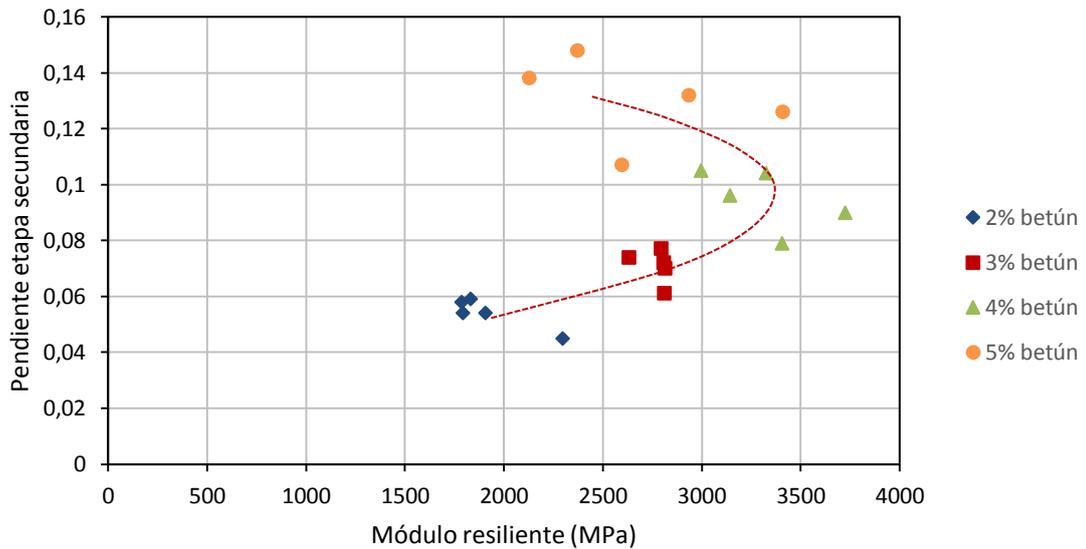


Figura 7.50 Relación entre pendiente de etapa secundaria y rigidez (ITSM) para un 100% de árido natural y distinguiendo según contenidos de betún

7.5.7 Relación entre punto de corte “a” y rigidez

Como se puede ver en la Figura 7.51, en mezclas con árido reciclado, el punto de corte “a” de la recta tangente a la curva de deformación en la etapa secundaria con el eje vertical desciende con el aumento del contenido de betún, aún incluso una vez sobrepasado el valor máximo de rigidez. Sin embargo esto no ocurre con mezclas con árido natural (Figura 7.52), en las que conviene no sobrepasar dicho punto (4% de betún) para que el valor de “a” no vuelva a incrementarse.

Así, al igual que pasaba con la deformación permanente inicial, las mezclas con árido reciclado son menos sensibles a posibles sobredosificaciones de betún.

En definitiva, se ha visto que el comportamiento a deformación permanente no va necesariamente ligado a la rigidez de las mezclas, aunque sobre todo en el caso de las mezclas con árido natural sí suele ser conveniente dosificar sobre ese valor. En mezclas con árido reciclado, el hecho de quedarse ligeramente por debajo del pico de rigidez ayudaría a reducir la pendiente de la etapa secundaria y las deformaciones iniciales sin perjudicar sensiblemente las deformaciones finales. Al mismo tiempo, las mezclas no serían tan rígidas evitando la rotura frágil a bajas temperaturas.

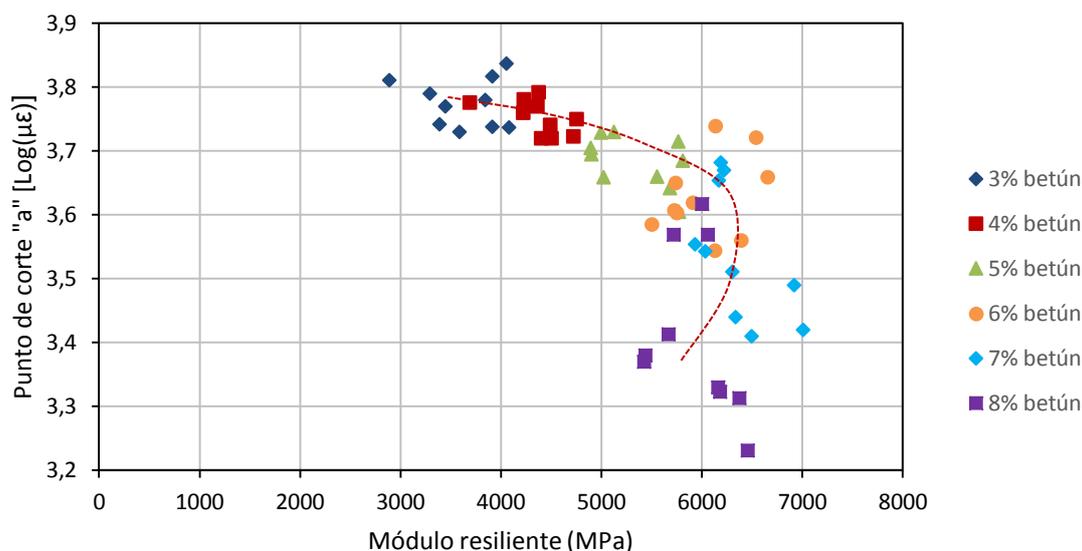


Figura 7.51 Relación entre punto de corte “a” y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

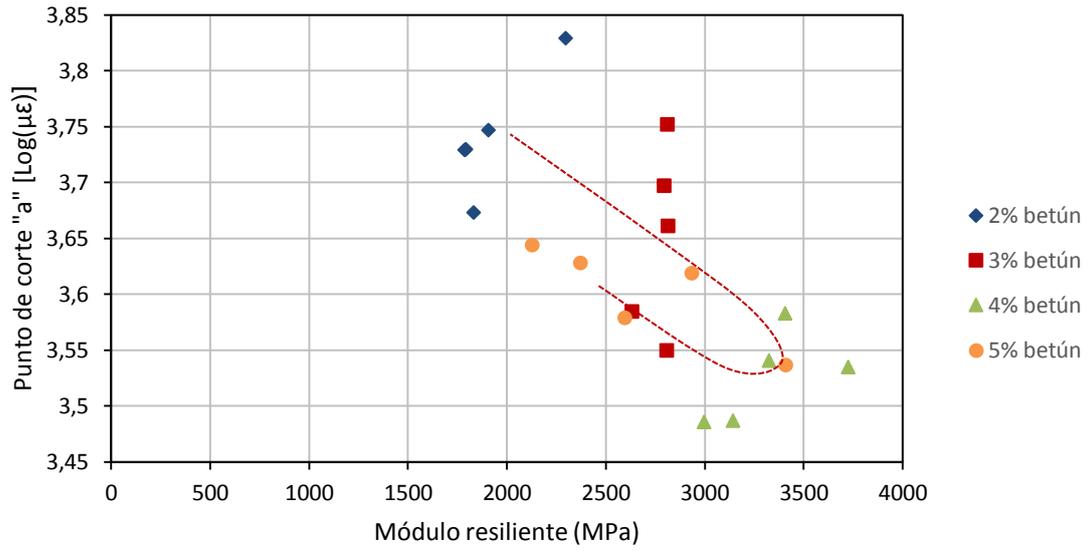


Figura 7.52 Relación entre punto de corte “a” y rigidez (ITSM) para un 100% de árido natural y distinguiendo según contenidos de betún

CAPÍTULO 8

**COMPORTAMIENTO ELÁSTICO NO
LINEAL DE LAS MEZCLAS EN FRÍO
CON RCD**

8.1 Módulo resiliente según ensayo triaxial dinámico de rigidez

8.1.1 Descripción de los ensayos realizados

Siguiendo las hipótesis de Jenkins et al. (2007) y Ebels (2008), cuando las mezclas en frío se encuentran en etapas tempranas de curado, la rigidez es todavía baja y por consiguiente, en la etapa posterior a la puesta en obra, se acentúa su comportamiento elástico no lineal, llegando a ser más parecido al de un material granular que al de una mezcla bituminosa en caliente.

Para estudiar esto en profundidad, la rigidez de las mezclas bituminosas con áridos reciclados fue estudiada también mediante ensayos dinámicos con confinamiento triaxial, siguiendo para ello la Norma UNE-EN 13286-7, propia de mezclas de árido sin ligante (Figura 8.1). En total se ensayaron 6 combinaciones diferentes de contenidos de agua y betún para las mezclas con árido reciclado y otras 6 para mezclas de control hechas con árido natural. Las combinaciones elegidas permitieron obtener la influencia de ambos parámetros en los resultados, al variar solamente uno de los dos manteniendo el otro fijo (Tabla 8.1).

Tabla 8.1 *Combinaciones de contenidos de agua y betún ensayadas en el ensayo dinámico de rigidez con confinamiento para la obtención del módulo resiliente*

Árido reciclado		Árido natural	
% betún	% agua	% betún	% agua
5%	9%	2%	3%
6%	9%	3%	3%
7%	9%	4%	3%
8%	9%	5%	3%
7%	21%	4%	9%
7%	33%	4%	15%

Para el ensayo, las probetas se introdujeron en una membrana sellada a los platos superior e inferior mediante la colocación de pares de juntas tóricas, con el fin de asegurar la estanqueidad y evitar la entrada del aire a presión hacia el interior de la probeta. Las deformaciones axiales se registraron mediante 2 LVDTs fijados al actuador vertical (Figura 8.1).



Figura 8.1 Ensayo dinámico de rigidez con confinamiento triaxial según Norma UNE-EN 13286-7

Según la mencionada Norma, las probetas deben cumplir que el diámetro sea mayor que 5 veces el tamaño máximo del material, y la altura ha de ser dos veces el diámetro ($\pm 2\%$). Con el fin de conseguir probetas con idénticas propiedades que las ensayadas de otros modos, se procedió al apilamiento de 2 probetas de 101,6 mm de diámetro por 101,6 mm de altura fabricadas según lo indicado en la Norma NLT-161 y compactadas mediante prensa estática, del mismo modo que para el resto de la presente tesis. Otros autores como Ebels (2008) o Kim y Labuz (2007) realizaron este apilamiento de probetas durante sus investigaciones con ensayos en los que solamente se producen compresiones sobre el eje axial, acreditando que el comportamiento es análogo al de probetas realizadas de una sola pieza. Durante la realización de la presente tesis, esto también pudo ser comprobado, sobre todo de una manera mucho más clara en el ensayo triaxial destructivos (apartados siguientes), en los que las probetas llegaron al fallo mostrando el característico plano de rotura a 45° .

Se ensayaron probetas recién fabricadas, sin ningún tipo de curado artificial, así como probetas idénticas tras haberlas sometido a un curado acelerado de 3 días en

estufa a 50°C, con el fin de comparar cómo influye este tipo de curado, aplicado en los demás capítulos de la presente tesis.

El ensayo se realizó según lo establecido en el Artículo 7.3 de la mencionada Norma seleccionando el nivel de esfuerzo “alto”, que tal y como se describe, se corresponde con el que normalmente se produce en la parte superior de las capas de base, bajo una capa de rodadura bituminosa fina (inferior a 80 mm). Además de por ser el caso más desfavorables, este nivel de esfuerzo fue elegido porque, aunque las mezclas tipo grava-emulsión pueden ser empleadas en capas inferiores (caso que se correspondería con el nivel de esfuerzo “bajo”), lo más habitual es encontrarlas en capas de base.

Para la realización del ensayo, se procedió en primer lugar a un acondicionamiento con un esfuerzo de confinamiento, σ_3 , de 70 kPa y una onda cíclica de carga axial desviadora $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$, cuyo valor máximo es de 340 kPa y valor mínimo de 5 kPa (seleccionado en lugar de 0 kPa para mantener el contacto entre probeta y actuador en todo momento). El acondicionamiento se interrumpe si el régimen de deformación axial permanente comienza a ser menor de 10^{-7} por ciclo y si el régimen de variación del coeficiente de elasticidad comienza a ser menor de 5 kPa por ciclo. De no ser así, el acondicionamiento se extenderá hasta los 20.000 ciclos.

Una vez concluye el acondicionamiento y que por tanto se puede considerar que la probeta ha entrado en un régimen de deformación resiliente, se procede al ensayo con la sucesión de un total de 29 secuencias con diferentes combinaciones de esfuerzos desviadores (σ_d) y de confinamiento (σ_3). En cada secuencia, se aplican 100 ciclos de carga axial manteniendo estable la presión de confinamiento al nivel fijado en la correspondiente secuencia y se hace la media de los resultados registrados en los últimos 10 ciclos para posteriormente pasar a la siguiente secuencia con una nueva combinación de esfuerzos. En la Tabla 8.2 y Figura 8.2 se muestra la trayectoria de tensiones (σ_d y σ_3) a aplicar en cada una de las secuencias junto con la suma de tensiones principales en el instante del ciclo de mayor esfuerzo desviador θ :

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_3 \quad [\text{Ec. 8-1}]$$

Tabla 8.2 Niveles de esfuerzo (en kPa) a aplicar en cada una de las secuencias de ensayo según Norma UNE-EN 13286-7

Secuencia	σ_3	σ_d	θ
1	20	30	90
2	20	50	110
3	20	80	140
4	20	115	175
5	35	50	155
6	35	80	185
7	35	115	220
8	35	150	255
9	35	200	305
10	50	80	230
11	50	115	265
12	50	150	300
13	50	200	350
14	50	280	430
15	70	115	325
16	70	150	360
17	70	200	410
18	70	280	490
19	70	340	550
20	100	150	450
21	100	200	500
22	100	280	580
23	100	340	640
24	100	400	700
25	150	200	650
26	150	280	730
27	150	340	790
28	150	400	850
29	150	475	925

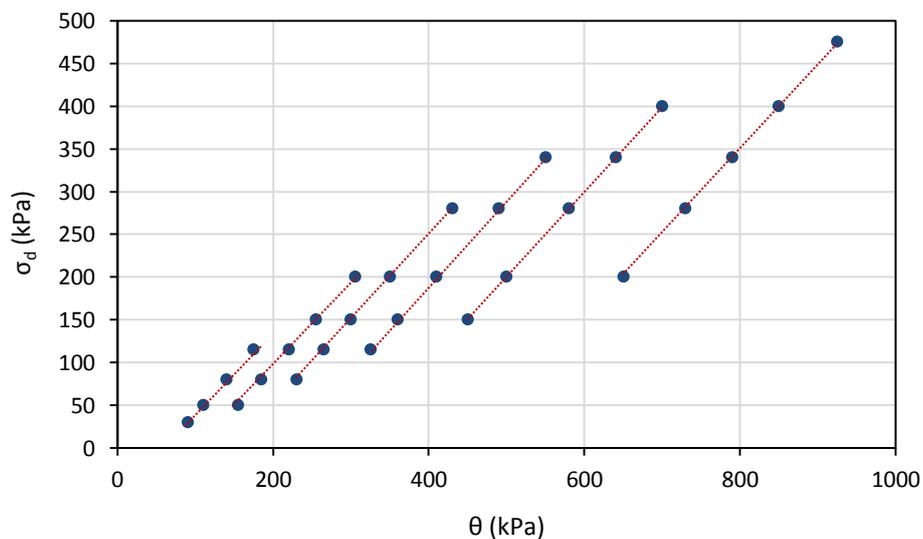


Figura 8.2 Trayectorias de tensiones empleadas según la Norma UNE-EN 13286-7

Finalmente, siendo σ_3 constante para cada secuencia, el módulo resiliente (o coeficiente de elasticidad según la Norma) es calculado mediante la expresión:

$$E_r = \frac{\sigma_1^r}{\varepsilon_1^r} \quad [Ec. 8-2]$$

Siendo σ_1^r y ε_1^r las amplitudes de las ondas de esfuerzo y deformación axial registradas en un determinado ciclo. Como se ha mencionado anteriormente, el valor asignado a cada secuencia será calculado como la media de los hallados en los últimos 10 ciclos de la misma.

Una vez obtenidos los resultados experimentales, se pueden ajustar diferentes modelos con el fin de reproducir matemáticamente la relación entre esfuerzos y deformaciones de estos materiales de naturaleza elástico no lineal.

A lo largo de las últimas décadas, numerosos autores han intentado establecer leyes constitutivas que modelicen dicha relación. No obstante, la complejidad del problema hace difícil encontrar un equilibrio entre los principios teóricos y la simplicidad necesaria para los análisis rutinarios (Lekarp et al., 2000). De este modo, fueron surgiendo diversos modelos en torno a fundamentalmente dos planteamientos: los basados en el módulo resiliente y coeficiente de Poisson y los basados en la deformación volumétrica y tangencial. Dado que el ensayo se realizó con nivel de confinamiento constante, se descartó el empleo de los segundos, recurriendo a los primeros, que están basados en la teoría de elasticidad tradicional. Estos modelos mantienen el coeficiente de Poisson pero sustituyen el módulo de elasticidad E por el módulo resiliente M_r , con el fin de incorporar la dependencia del nivel de esfuerzos en el comportamiento de los materiales granulares (comportamiento elástico no lineal).

Uno de los primeros modelos que siguieron este planteamiento fue el modelo de Hicks (1970), también conocido como modelo $K-\theta$, que establece una simple relación entre la suma de tensiones principales θ y el módulo resiliente, del tipo:

$$M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad [Ec. 8-3]$$

Donde k_1 y k_2 son constantes propias del material. Su simplicidad hace que aún hoy en día se encuentre en numerosos estudios e investigaciones, haciéndolo muy útil a la hora de comparar, de un vistazo, el comportamiento de diferentes mezclas.

En los años siguientes a 1970, se encontró que el modelo de Hicks simplificaba excesivamente la dependencia del nivel de esfuerzo, puesto que el módulo resiliente resultó ser función, no solo de la suma de tensiones principales sino que también de la magnitud de la deformación tangencial. Así, Uzan et al. (1992) incorporaría al modelo de Hicks, un término relativo al esfuerzo desviador:

$$M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad [\text{Ec. 8-4}]$$

Donde k_1 , k_2 y k_3 son parámetros propios del material y σ_d es la tensión desviadora. Este modelo solventa, además, ciertos problemas cuando θ adquiere valores negativos (tracciones), por lo que se hace más adecuado para el caso de las mezclas bituminosas en frío, en el que a diferencia de los materiales granulares, aún en sus etapas tempranas de curado, existen ciertas fuerzas de cohesión entre partículas propiciadas por la presencia del ligante.

Desde el modelo de Uzan hasta la actualidad han ido surgiendo numerosos modelos que consideraban distintos aspectos, como la variación del coeficiente de Poisson con el nivel de esfuerzo o el efecto de la densidad del material. Para la presente investigación, se ha incluido un modelo más complejo que el de Uzan, propuesto en 2004 por el Proyecto NCHRP 1-37A del *National Cooperative Highway Research Program*, para su uso en la *Mechanistic-Empirical (M-E) Pavement Design Guide* (NCHRP, 2004):

$$\frac{M_r}{P_a} = k_1 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad [\text{Ec. 8-5}]$$

Donde k_1 , k_2 y k_3 son parámetros propios del material, P_a una presión de referencia (en este caso la atmosférica, $P_a = 101,35$ kPa) y τ_{oct} es el esfuerzo cortante octaédrico, definido como:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d \quad [\text{Ec. 8-6}]$$

8.1.2 Resultados

Los parámetros de los modelos una vez ajustados se muestran la Tabla 8.3, Tabla 8.4 y Tabla 8.5. En la Figura 8.3 se muestra un ejemplo de ajuste de los modelos de Hicks, Uzan y NCHRP a los datos experimentales de módulo resiliente, para una mezcla con árido reciclado, 9% de agua y 6% de betún y sin ser sometida a ningún tipo de curado.

Tabla 8.3 Parámetros del modelo de Hicks ajustados para diferentes mezclas con árido reciclado y árido natural y tras ser sometidas a 0 y 3 días de curado en estufa

Árido	% agua - %betún	0 días de curado			3 días de curado		
		k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	R^2
Árido Reciclado	9%-5%	12,829	0,606	0,842	21,266	0,591	0,972
	9%-6%	9,755	0,636	0,945	9,489	0,720	0,944
	9%-7%	21,364	0,535	0,903	62,680	0,441	0,946
	9%-8%	4,878	0,741	0,950	41,070	0,504	0,907
	21%-7%	8,637	0,655	0,946	45,276	0,473	0,870
	33%-7%	8,180	0,663	0,945	20,593	0,575	0,959
Árido Natural	3%-2%	6,574	0,695	0,947	38,846	0,522	0,938
	3%-3%	7,957	0,695	0,938	86,492	0,413	0,966
	3%-4%	16,132	0,596	0,915	157,678	0,341	0,888
	3%-5%	13,460	0,626	0,904	110,052	0,381	0,880
	9%-4%	9,337	0,673	0,939	40,865	0,533	0,955
	15%-4%	9,410	0,689	0,900	25,561	0,590	0,955

Tabla 8.4 Parámetros del modelo de Uzan ajustados para diferentes mezclas con árido reciclado y árido natural y tras ser sometidas a 0 y 3 días de curado en estufa

Árido	% agua - %betún	0 días de curado				3 días de curado			
		k_1	k_2	k_3	R^2	k_1	k_2	k_3	R^2
Árido Reciclado	9%-5%	7,530	1,248	-0,636	0,995	18,512	0,768	-0,188	0,995
	9%-6%	7,469	0,990	-0,355	0,993	6,998	1,113	-0,393	0,988
	9%-7%	15,474	0,958	-0,423	0,992	50,812	0,694	-0,250	0,991
	9%-8%	3,520	1,160	-0,419	0,999	29,330	0,906	-0,396	0,991
	21%-7%	6,441	1,036	-0,381	0,996	31,546	0,920	-0,444	0,988
	33%-7%	6,133	1,047	-0,385	0,996	16,625	0,846	-0,270	0,992
Árido Natural	3%-2%	4,906	1,090	-0,397	0,998	29,950	0,843	-0,319	0,993
	3%-3%	5,808	1,122	-0,430	0,998	74,484	0,604	-0,191	0,997
	3%-4%	11,583	1,033	-0,438	0,995	119,112	0,651	-0,302	0,991
	3%-5%	9,026	1,129	-0,501	0,995	82,352	0,734	-0,350	0,993
	9%-4%	6,752	1,092	-0,419	0,998	33,070	0,796	-0,262	0,991
	15%-4%	6,003	1,253	-0,562	0,998	20,162	0,902	-0,314	0,998

Tabla 8.5 Parámetros del modelo NCHRP ajustados para diferentes mezclas con árido reciclado y árido natural y tras ser sometidas a 0 y 3 días de curado en estufa

Árido	% agua - %betún	0 días de curado				3 días de curado			
		k_1	k_2	k_3	R^2	k_1	k_2	k_3	R^2
Árido Reciclado	9%-5%	2,142	1,104	-1,080	0,961	3,315	0,720	-0,398	0,988
	9%-6%	1,856	0,925	-0,633	0,986	2,664	1,087	-0,796	0,994
	9%-7%	2,590	0,861	-0,726	0,972	4,862	0,640	-0,447	0,983
	9%-8%	1,491	1,089	-0,738	0,993	4,336	0,847	-0,767	0,989
	21%-7%	1,799	0,984	-0,717	0,995	4,149	0,820	-0,783	0,963
	33%-7%	1,772	1,000	-0,736	0,996	2,943	0,789	-0,470	0,985
Árido Natural	3%-2%	1,639	1,012	-0,687	0,989	4,380	0,769	-0,549	0,980
	3%-3%	1,996	1,056	-0,787	0,993	5,882	0,561	-0,339	0,990
	3%-4%	2,563	0,925	-0,721	0,974	7,765	0,550	-0,477	0,950
	3%-5%	2,469	1,044	-0,911	0,986	6,582	0,653	-0,627	0,968
	9%-4%	2,103	1,018	-0,748	0,991	4,807	0,724	-0,422	0,980
	15%-4%	2,284	1,150	-0,991	0,984	3,924	0,834	-0,539	0,989

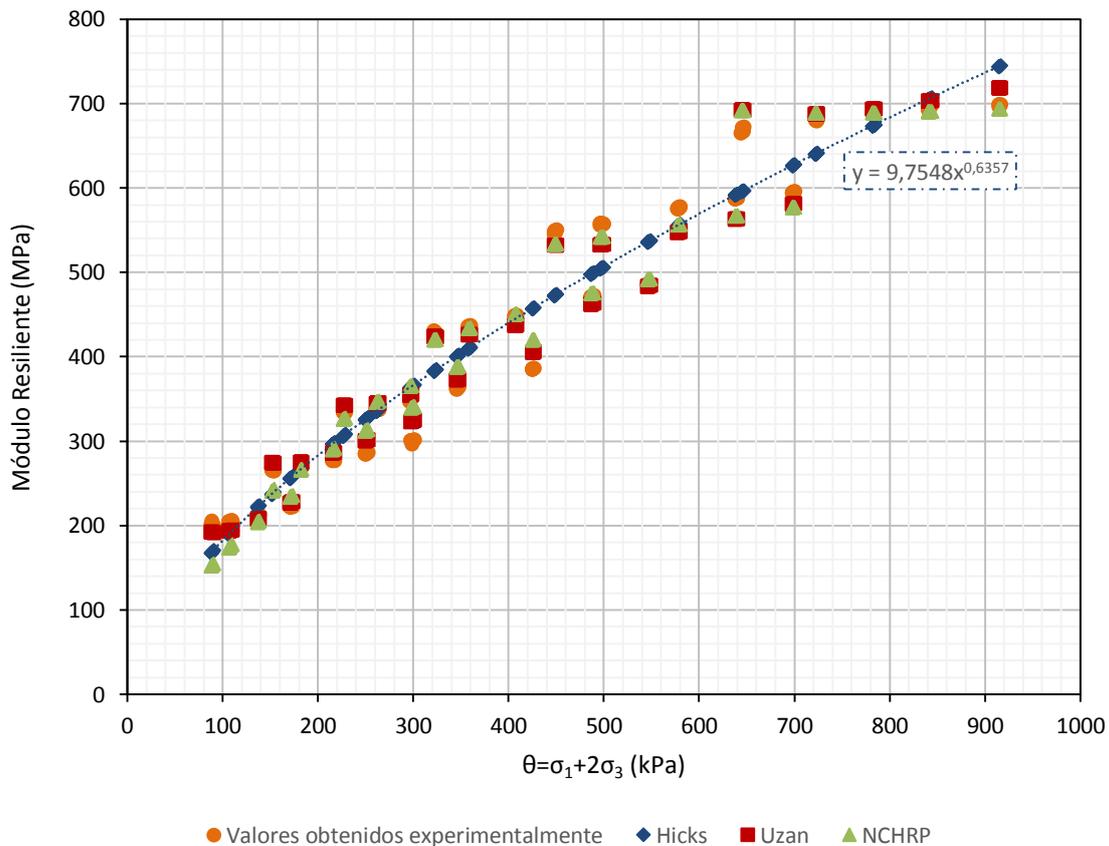


Figura 8.3 Ejemplo de ajuste de los modelos de Hicks, Uzan y NCHRP a los datos reales obtenidos (mezcla con árido reciclado, 9% de agua, 6% de betún y sin curado)

A simple vista, puede verse como el modelo de Hicks simplemente muestra una tendencia de crecimiento del módulo según aumentan también las tensiones. No obstante, los modelos de Uzan y NCHRP resultan ser mucho más precisos, amoldándose mejor a cada uno de los escalones que dibujan los datos reales (cada escalón se corresponde con una presión de confinamiento σ_3 diferente).

Para cuantificar numéricamente este ajuste, se pueden observar los valores de R^2 obtenidos en este caso, para los tres modelos: $R^2_{\text{Hicks}}=0,9450$; $R^2_{\text{Uzan}}=0,9926$; $R^2_{\text{NCHRP}}=0,9857$. Como se aprecia, el modelo de Hicks es muy sencillo pero a cambio también es el que peor aproximación ofrece. El modelo de Uzan mejora este aspecto considerablemente, logrando el mejor ajuste de todos, por encima incluso del modelo NCHRP.

En términos medios, contemplando todas las mezclas analizadas, no existe un mejor ajuste para probetas curadas o sin curar ni para mezclas con árido reciclado o natural. Sin embargo sí que se cumple que el de Uzan es el modelo que mejor se ajusta en modo general (R^2 medio de 0,996 en muestras sin curado y 0,992 con curado). El modelo NCHRP consigue valores medios de R^2 de 0,985 y 0,980. Finalmente, el modelo de Hicks solamente consigue ajustes con R^2 medios de 0,923 y 0,931.

Del mismo modo que observaron otros autores en sus investigaciones con materiales similares, como Santagata et al. (2010) con reciclados de firmes in situ, cuando se añade en el modelo la componente específica del esfuerzo desviador (modelo de Uzan con respecto al modelo de Hicks), k_1 se ve incrementado, mientras que k_2 decrece. El parámetro k_3 es siempre negativo, lo que indica la superposición de un pequeño efecto de pérdida de rigidez controlado por los esfuerzos cortantes sobre el efecto macroscópico de rigidización con el aumento de las cargas. Estos autores también encontraron que tras el curado de las probetas, los valores de k_3 eran pequeños y en la mayoría de casos, positivos. Esta inconsistencia sugirió que el modelo de Uzan podría no ser adecuado para representar el comportamiento de mezclas curadas. No obstante, en la presente investigación, esto no ocurre, siendo consistente para para ambos tipos de árido.

Las gráficas de resultados forman siempre 6 escalones correspondientes a las 6 diferentes tensiones de confinamiento (σ_3) utilizadas para estos ensayos. Dentro de cada escalón, los módulos también varían a medida que aumenta la carga desviadora (σ_d) aunque de una manera más leve. Este comportamiento dependiente de los esfuerzos aplicados σ_d y σ_3 evidencia el comportamiento elástico no lineal del material, de forma similar a como lo hacen los materiales granulares.

De entre los modelos estudiados, el modelo de Hicks es el único que no consigue amoldarse a estos escalones, sino que simplemente traza una línea de tendencia de tipo potencial por un punto intermedio de los mismos. Aunque esta aproximación es mucho más tosca, facilita en gran medida la representación de varias curvas obtenidas para las diferentes mezclas en un mismo gráfico, pudiendo ser comparadas y estudiadas a simple vista (Figura 8.4 y Figura 8.5).

Tal y como se puede apreciar, en este caso son las mezclas elaboradas con árido natural tienden a mostrar rigideces más elevadas que las hechas con árido reciclado. Por ejemplo, cuando no se aplica ningún tipo de curado a las probetas, los módulos de las mezclas con árido reciclado van desde aproximadamente los 200 MPa (con cargas bajas) hasta los 800 MPa (con cargas altas). Sin embargo, la rigidez de las mezclas con árido natural, aunque también empieza sobre los 200 MPa con cargas bajas, llegan en torno a los 1000 MPa con cargas altas. Análogamente, la rigidez de las mezclas con árido natural sometidas a un curado de 3 días en estufa es unos 200-300 MPa mayor que las de árido reciclado para cualquier nivel tensional.

En ambas gráficas se puede apreciar también como, con el tiempo de curado, las curvas tienden a dispersarse. Así, las obtenidas con probetas sin curar están más juntas, no existiendo prácticamente diferencias entre mezclas con diferentes contenidos de agua y betún aunque como se ha mencionado, sí entre las realizadas con uno u otro tipo de árido. Esto indica que cuando las probetas aún están frescas, la influencia del betún y el agua es prácticamente nula en el comportamiento mecánico y la resistencia de las cargas aplicadas se produce casi únicamente por la fricción interna del árido. Como el árido natural es de mayor calidad mecánica que el reciclado, las probetas también alcanzan rigideces mayores.

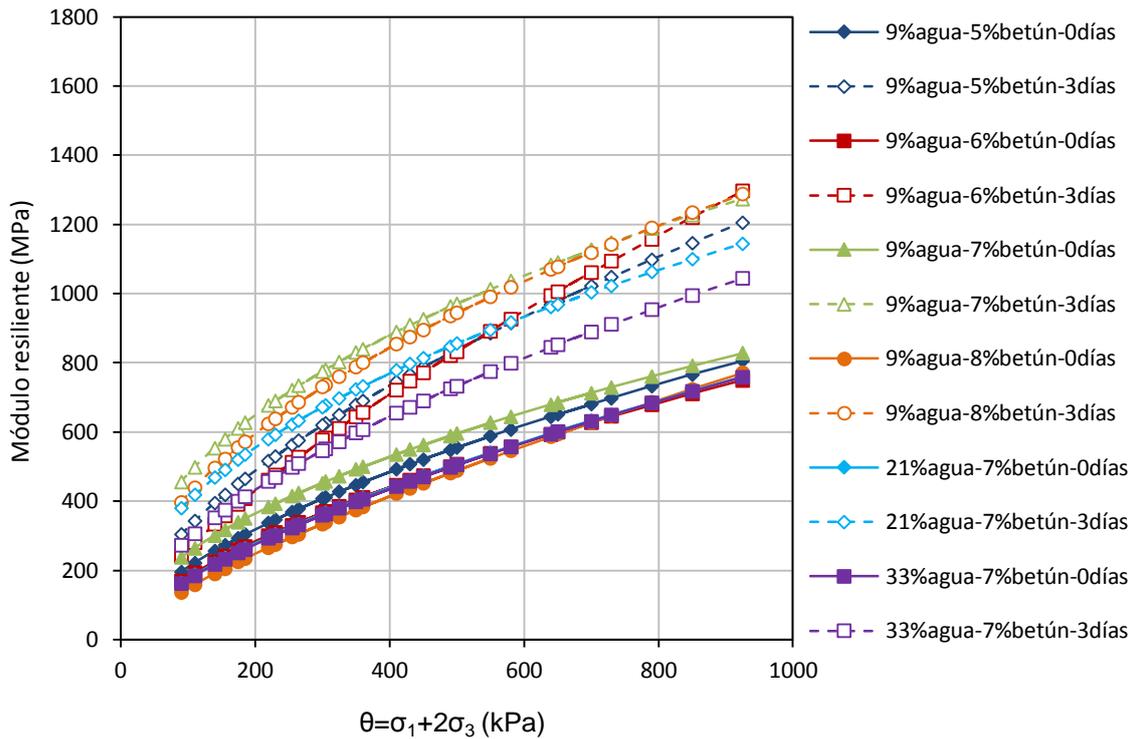


Figura 8.4 Representación del modelo K-θ de Hicks para mezclas con árido reciclado y diferentes contenidos de agua, betún y tiempos de curado

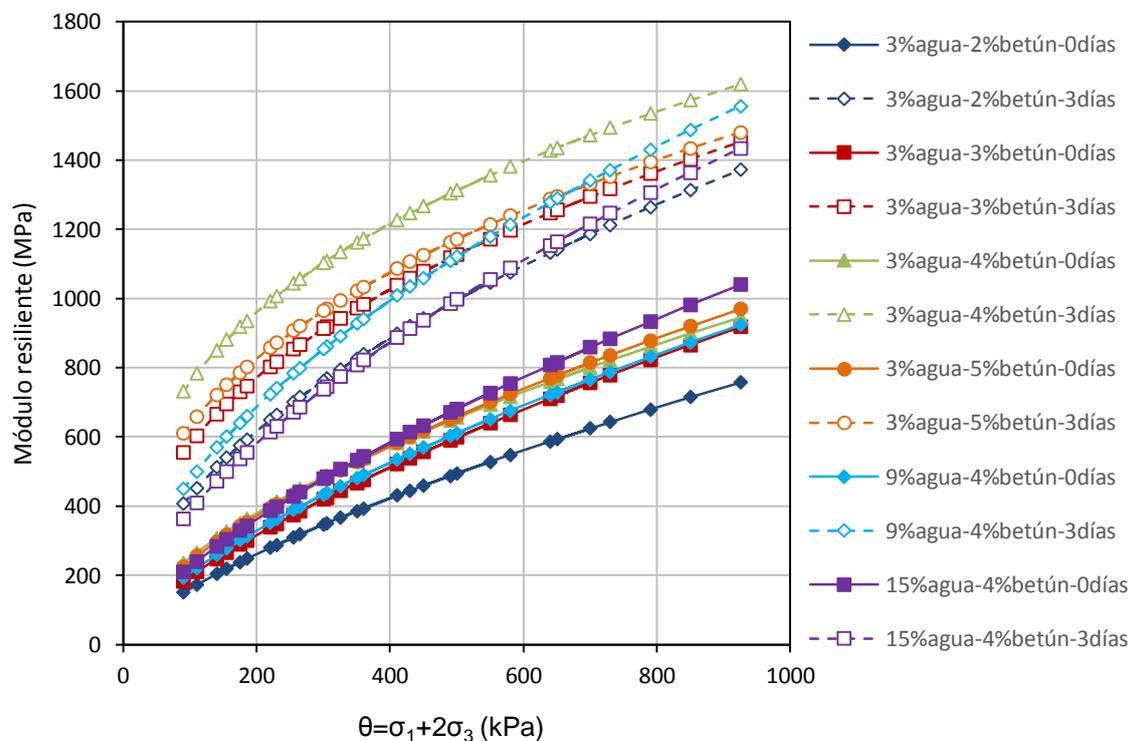


Figura 8.5 Representación del modelo K-θ de Hicks para mezclas con árido natural y diferentes contenidos de agua, betún y tiempos de curado

Tras aplicar el tiempo de curado, las curvas se dispersan haciendo posible diferenciar qué contenidos son más o menos favorables. Para las mezclas con árido reciclado, la mezcla con un 9% de agua y 7% de betún alcanza las mayores rigideces (aunque de modo muy similar a la de 9% de agua y 8% de betún). La mezcla con 9% de agua y 6% de betún es menos rígida con cargas bajas aunque llega a ser la más rígida con cargas altas. Este comportamiento podría ser interesante en calzadas de medio y bajo tráfico con explanadas de baja calidad, amoldándose a grandes deformaciones cuando las cargas son bajas (cargas usuales en este tipo de carreteras) pero aportando una buena capacidad portante en esporádicas cargas altas que podrían dañar el firme. Con la variación del contenido de agua, se aprecia como la rigidez tiende a bajar a medida que aumenta el contenido de agua, lo cual es totalmente lógico en etapas tempranas de curado.

Por su lado, en las mezclas con árido natural, llama especialmente la atención la mezcla con un 3% de agua y 4% de betún. Esta mezcla ya era la que mayores módulos producía en los anteriores ensayos de rigidez (ITSM y módulo dinámico) y nuevamente vuelve a reafirmarse como la mezcla con mayor módulo resiliente. Con la variación del contenido de agua, también se aprecia como a medida que éste aumenta, el módulo resiliente disminuye.

La Norma UNE indica en su Anexo C, que para materiales granulares, un valor característico del módulo resiliente, es aquel determinado para valores de esfuerzo $\sigma_1 = 583,3$ kPa y $\sigma_3 = 83,3$ kPa ($\theta = 750$ kPa). Introduciendo estos valores en los modelos ajustados para cada mezcla se obtienen los módulos de la Tabla 8.6 y Tabla 8.7.

Como se puede ver, los modelos de Uzan y NCHRP arrojan resultados muy similares aunque los de Uzan tienden a ser ligeramente superiores (en torno a un 3%). Sin embargo, los módulos de Hicks son siempre mayores y en este caso, las diferencias sí son más significativas (próximas al 20%). Debe tenerse en cuenta que en esto influye el criterio de tensiones tomado por la Norma para elegir los valores característicos (Figura 8.6). Como se ha mencionado, la Norma establece como dichas tensiones $\sigma_1 = 583,3$ kPa y $\sigma_3 = 83,3$ kPa ($\theta = 750$ kPa) (Punto A). En este punto, los modelos de Uzan y NCHRP se ajustan a un escalón de resultados que se obtendría con $\sigma_3 = 83,3$ kPa (entre los obtenidos experimentalmente para $\sigma_3 = 70$ kPa y $\sigma_3 = 100$ kPa. Sin embargo,

el modelo de Hicks simplemente traza una línea de tendencia potencial que cruza los escalones por un punto intermedio. Así, como el punto A se encuentra en la parte derecha del escalón, la aproximación de Hicks queda por encima pero si quedase en la parte izquierda (hipotético Punto B obtenido para $\sigma_1 = 200$ kPa, $\sigma_3 = 83,3$ kPa) se concluiría que el modelo de Hicks subestima las rigideces con respecto a los demás modelos. Se ha encontrado que, manteniendo $\sigma_3 = 83,3$ kPa, el esfuerzo axial que consigue aproximar igualmente los 3 modelos para todas las mezclas se encuentra en torno a $\sigma_1 = 300$ kPa ($\theta = 465$ kPa). Para estos niveles tensionales, los módulos que resultan se muestran en la Tabla 8.8 y Tabla 8.9. Ahora sí los resultados son mucho más homogéneos.

Tal y como se puede apreciar en estas tablas, y en concordancia con lo ya explicado, los módulos tienden a mostrar un valor máximo resiliente para el contenido de betún del 7% en mezclas con árido reciclado y 4% en mezclas con árido natural. En general, los aumentos del contenido de agua también tienden a producir detrimentos en la rigidez de las mezclas.

Tabla 8.6 Módulos característicos (en MPa) obtenidos con diferentes modelos para mezclas con árido reciclado tras ser sometidas o no a curado en estufa ($\sigma_1 = 583,3$ kPa; $\sigma_3 = 83,3$ kPa)

Mezcla	Hicks	Uzan	NCHRP
<i>Probetas sin curado</i>			
9% agua-5% betún	709,9	560,7	540,3
9% agua-6% betún	656,1	575,4	559,4
9% agua-7% betún	739,7	632,9	614,9
9% agua-8% betún	659,8	565,6	550,1
21% agua-7% betún	661,6	575,2	552,8
33% agua-7% betún	660,5	572,9	548,8
<i>Tras 3 días de curado en estufa a 50°C</i>			
9% agua-5% betún	1064,9	930,5	880,9
9% agua-6% betún	1115,3	965,1	913,7
9% agua-7% betún	1161,5	1061,9	1036,6
9% agua-8% betún	1158,6	1003,8	952,7
21% agua-7% betún	1036,3	879,9	846,5
33% agua-7% betún	925,7	838,9	823,1

Tabla 8.7 Módulos característicos (en MPa) obtenidos con diferentes modelos para mezclas con árido natural tras ser sometidas o no a curado en estufa ($\sigma_1 = 583,3 \text{ kPa}$; $\sigma_3 = 83,3 \text{ kPa}$)

Mezcla	Hicks	Uzan	NCHRP
<i>Probetas sin curado</i>			
9% agua-5% betún	654,9	565,6	551,9
9% agua-6% betún	793,2	676,1	650,3
9% agua-7% betún	834,6	710,0	696,2
9% agua-8% betún	850,0	706,7	675,8
21% agua-7% betún	802,1	687,6	665,7
33% agua-7% betún	900,2	731,3	702,8
<i>Tras 3 días de curado en estufa a 50°C</i>			
9% agua-5% betún	1229,8	1094,5	1070,0
9% agua-6% betún	1331,6	1242,8	1219,8
9% agua-7% betún	1507,4	1353,4	1332,1
9% agua-8% betún	1366,6	1203,4	1160,0
21% agua-7% betún	1390,8	1264,1	1250,4
33% agua-7% betún	1266,7	1128,0	1104,9

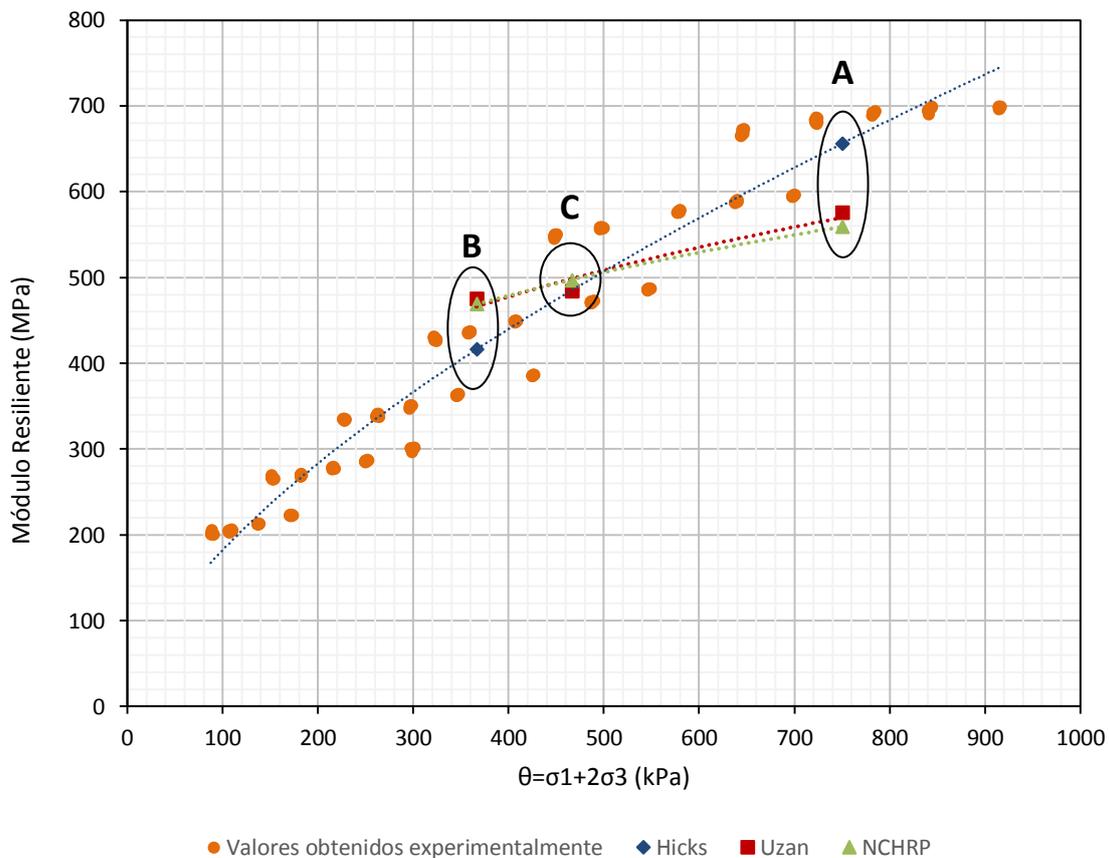


Figura 8.6 Distorsión de los módulos característicos según el criterio de tensiones elegido

Tabla 8.8 Módulos característicos (en MPa) obtenidos con diferentes modelos para mezclas con árido reciclado tras ser sometidas o no a curado en estufa ($p = 155$ kPa, $q = 215$ kPa)

Mezcla	Hicks	Uzan	NCHRP
<i>Probetas sin curado</i>			
9% agua-5% betún	532,4	527,9	552,0
9% agua-6% betún	485,2	484,2	496,5
9% agua-7% betún	573,7	572,3	589,4
9% agua-8% betún	464,2	462,9	476,3
21% agua-7% betún	484,8	483,8	497,5
33% agua-7% betún	482,1	481,1	495,0
<i>Tras 3 días de curado en estufa a 50°C</i>			
9% agua-5% betún	804,5	756,2	764,9
9% agua-6% betún	792,6	790,7	815,2
9% agua-7% betún	942,2	941,6	958,7
9% agua-8% betún	912,0	909,8	938,6
21% agua-7% betún	828,0	824,7	851,7
33% agua-7% betún	704,7	703,9	717,4

Tabla 8.9 Módulos característicos (en MPa) obtenidos con diferentes modelos para mezclas con árido natural tras ser sometidas o no a curado en estufa ($p = 155$ kPa, $q = 215$ kPa)

Mezcla	Hicks	Uzan	NCHRP
<i>Probetas sin curado</i>			
9% agua-5% betún	471,0	470,1	482,8
9% agua-6% betún	570,4	568,7	586,2
9% agua-7% betún	629,0	627,3	645,7
9% agua-8% betún	631,5	628,9	652,3
21% agua-7% betún	583,0	581,6	599,0
33% agua-7% betún	649,2	645,6	671,5
<i>Tras 3 días de curado en estufa a 50°C</i>			
9% agua-5% betún	960,0	958,1	980,0
9% agua-6% betún	1094,7	1094,3	1109,1
9% agua-7% betún	1282,2	1279,6	1305,9
9% agua-8% betún	1140,8	1138,5	1167,7
21% agua-7% betún	1080,1	1078,5	1097,2
33% agua-7% betún	957,6	955,6	976,4

8.2 Obtención de la línea de fallo de Mohr-Coulomb

8.2.1 Descripción de los ensayos realizados

Aunque de la realización de este ensayo se pueden obtener diversas conclusiones relativas al comportamiento elástico no lineal de las mezclas, el fin último es determinar la tensión desviadora a la que colapsan las probetas ($\sigma_{d,f}$) bajo diferentes tensiones de confinamiento (σ_3) para poder realizar, a continuación, el ensayo de deformación permanente con diferentes valores de Stress Ratio (SR):

$$SR = \frac{\sigma_{d,a}}{\sigma_{d,f}} \quad [Ec. 8-7]$$

Donde, $\sigma_{d,a}$ es el esfuerzo desviador aplicado para un determinado ensayo y $\sigma_{d,f}$ es el esfuerzo desviador de fallo para la presión de confinamiento a la que se realice el ensayo.

Debido a la gran duración de los ensayos dinámicos de deformación permanente, solamente se han seleccionado para su estudio los contenidos óptimos de agua y betún para cada tipo de árido, esto es el 9% de agua y 6% de betún para mezclas con árido reciclado y 3% de agua y 4% de betún para mezclas con árido natural. Si bien los contenidos óptimos en el caso de las mezclas con árido natural son claros, los de las mezclas con árido reciclado se eligieron como solución de compromiso ya que no existe un contenido único de agua y betún que arrojarase mejores resultados en todos los ensayos. Los contenidos de agua óptimos solían ser muy altos lo que los hace inmanejables en un caso práctico de construcción de una carretera real. Sin embargo, se vio que la cantidad de agua remanente tras la compactación, así como los resultados de las propiedades mecánicas estudiadas, apenas dependen de la cantidad de agua inicial, añadida durante el mezclado. Por todo ello, se decidió escoger el valor mínimo estudiado, es decir, el 9%. En cuanto al betún, sí se encontraron diferencias destacables aunque los valores óptimos solían oscilar entre el 6% y el 7% por lo que se escogió la opción menor (6%), más económica y ecológica.

La mezcla propuesta para el árido reciclado tiene un contenido del 6%, considerablemente mayor al 4% propuesto para el árido natural. Así, podría parecer que para la construcción de un determinado tramo de carreta es necesario un 50% más de betún si para ello se empleasen los áridos reciclados. No obstante, debe de tenerse en cuenta que su empleo también provoca que las mezclas sean más ligeras. En concreto, la densidad de las mezclas con reciclado es de 1958 kg/m^3 , mientras que la de las mezclas con natural es de 2397 kg/m^3 . Es decir, que la densidad de las primeras es solamente el 81,7% de la de las segundas, o lo que es lo mismo, si un determinado tramo se construye con áridos reciclados, hará falta un 81,7% de la mezcla bituminosa necesaria si se utilizasen áridos naturales. Haciendo los cálculos pertinentes para obtener la correlación en términos de cantidad de betún, se obtiene que en el caso de elegir los áridos reciclados, solamente sería necesario añadir un 20,2% más.

Los ensayos se realizaron además sobre probetas recién fabricadas, sin ningún tipo de curado artificial, así como con probetas idénticas tras haberlas sometido a un curado acelerado de 3 días en estufa a 50°C , con el fin de comparar cómo influye este tipo de curado, aplicado en los demás capítulos de la presente tesis.



Figura 8.7 Ejemplos de probetas rotas tras ensayo triaxial de deformación permanente

Para este ensayo, y con el fin de mantener durante toda la tesis las mismas propiedades intrínsecas de las probetas, nuevamente se apilaron dos probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro por 101,6 mm de altura fabricadas según lo establecido en la Norma NLT-161. Como se había comentado anteriormente, otros autores como Ebels (2008) o Kim y Labuz (2007) ya habían acreditado que el comportamiento de la probeta conjunta era análogo al de una probeta fabricada de una sola pieza. No obstante, tras la rotura de algunas probetas se ha podido comprobar que efectivamente así es. En la Figura 8.7, puede apreciarse como tras el ensayo, ambas probetas adquieren conjuntamente la típica forma de barril (como una sola) y el ángulo del plano cortante se sitúa entre los 65° y 70° atravesando la superficie de contacto entre ambas probetas. Además, ambas probetas resultaron difíciles de separar y se comprobó cómo la superficie de contacto adquiere una gran rugosidad al clavarse las partículas más grandes de cada cara en la cara opuesta.

Para cada contenido de agua/betún y tipo de árido estudiado se fabricó una serie de probetas iguales, sometiendo cada una de ellas a una presión de confinamiento (σ_3) diferente (25 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa). Tras ser alcanzado el nivel de confinamiento deseado, se aplicó una rampa de carga con control de deformación constante al 2,6% por minuto (es decir 5,3 mm/min para el tamaño de probeta en cuestión) hasta alcanzar el fallo de cada una de ellas. A diferencia del ensayo de rigidez, como en este caso las probetas son sometidas a grandes deformaciones y en algunos casos incluso llegan a su colapso, no se introdujo ningún tipo de dispositivo de medición de las deformaciones radiales o perimétrales.

Las tensiones máxima principal y máxima desviadora que resiste la probeta en el momento de colapso son precisamente $\sigma_{1,f}$ y $\sigma_{d,f}$ (siendo $\sigma_{1,f} = \sigma_{d,f} + \sigma_3$). Tal y como se aprecia en el ejemplo de la Figura 8.8 obtenido para probetas con 100% de árido reciclado sin haber sido sometidas a ningún curado artificial, ambas tensiones de fallo dependen linealmente de la presión de confinamiento σ_3 . Por tanto, la relación entre la tensión máxima principal $\sigma_{1,f}$ y la presión de confinamiento σ_3 puede ser descrita como (Ebels, 2008):

$$\sigma_{1,f} = A \cdot \sigma_3 + B \quad [Ec. 8-8]$$

Donde:

$$A = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [Ec. 8-9]$$

$$B = \frac{2C \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [Ec. 8-10]$$

Siendo la cohesión (C) y el ángulo de rozamiento interno (φ) los parámetros de comportamiento a cortante propios del material. El criterio de fallo a cortante de Coulomb es definido como sigue (Lambe y Whitman, 1991):

$$\tau_{ff} = \tan \varphi \cdot \sigma_{ff} + C \quad [Ec. 8-11]$$

Donde τ_{ff} y σ_{ff} son las tensiones tangencial y normal respectivamente sobre el plano de falla en el momento en el que se produce la rotura del material.

8.2.2 Resultados

Los parámetros C y φ fueron fácilmente obtenidos por medio de una regresión lineal como la realizada en el ejemplo de la Figura 8.8.

El diagrama de Mohr representa una recta envolvente de todos los círculos de Mohr, tal y como se muestra en la Figura 8.9 para el mismo ejemplo de mezclas con árido reciclado y sin curado. Como se puede apreciar, cada círculo se corresponde con una probeta ensayada con una presión de confinamiento σ_3 de modo que ésta y la tensión principal máxima son los puntos de corte con el eje horizontal. Además, la cohesión (C) es el punto de corte de la envolvente con el eje vertical y φ es el ángulo entre la misma y el eje horizontal.

Aplicando el mismo principio para todas las muestras ensayadas se obtienen los resultados de la Tabla 8.10 y las envolventes de la Figura 8.10. Pueden verse el resto de gráficas en el Anexo II.

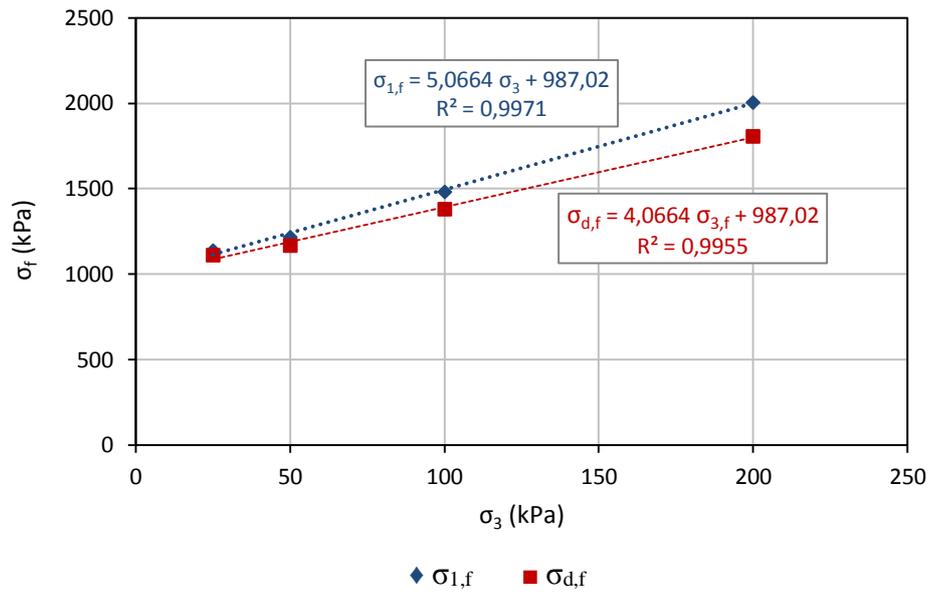


Figura 8.8 Relación de tensiones de fallo ($\sigma_{1,f}$ y $\sigma_{d,f}$) obtenidas para diferentes presiones de confinamiento (σ_3) en probetas con árido reciclado y 0 días de curado

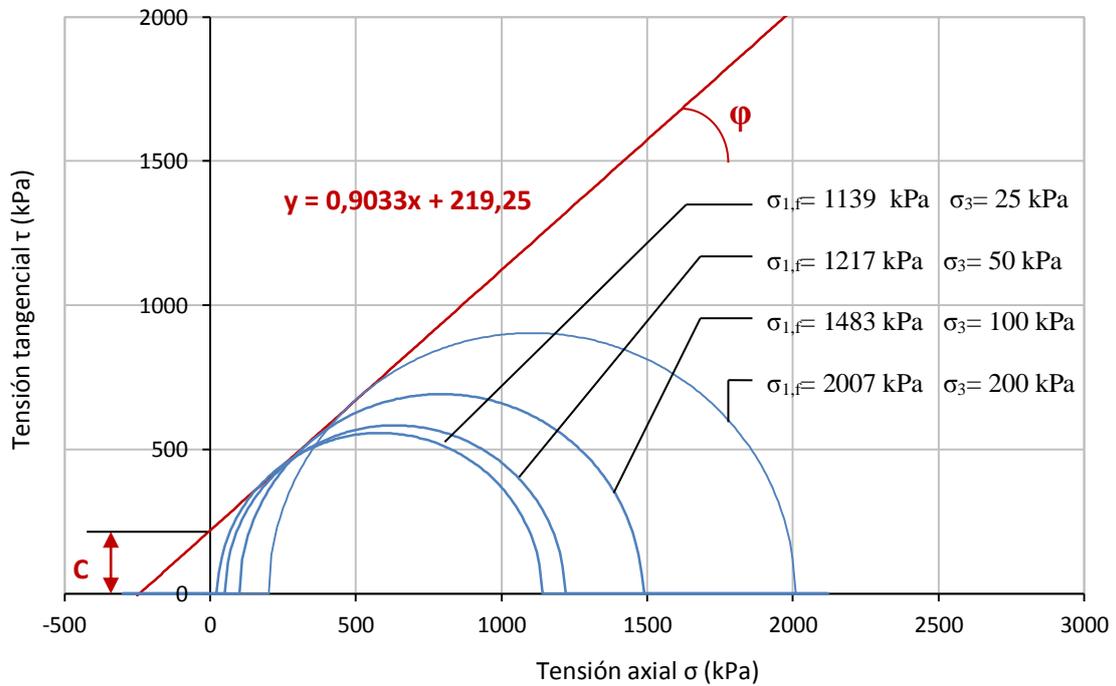


Figura 8.9 Diagrama de Mohr obtenido para probetas de árido reciclado sin curado y tras ser ensayadas con 4 σ_3 diferentes

Tabla 8.10 Parámetros del comportamiento a cortante de las mezclas estudiadas

Árido	Contenido (agua - betún)	Curado	C (kPa)	ϕ (°)	R ²
Reciclado	9% - 6%	No	219,25	42,1	0,997
		3 días a 50°C	388,71	43,5	0,939
Natural	3% - 4%	No	257,67	43,6	0,973
		3 días a 50°C	370,68	45,1	0,981

Como se puede apreciar, las probetas con árido reciclado tienen una menor cohesión que las probetas de árido natural justo después de su fabricación. Sin embargo, tras el curado en estufa, su cohesión sufre un fuerte crecimiento que las sitúa por encima de las de árido natural.

En cuanto al ángulo de rozamiento interno, se evidencia como es mayor en probetas con árido natural antes y después de haber aplicado el curado artificial. No obstante, todos los valores se sitúan en torno a 40° - 45°. La teoría de suelos establece que el plano de falla en el momento de rotura adquiere un ángulo con el plano sobre el que actúa el esfuerzo principal mayor de $\theta=45^\circ+\phi/2$. Esto situaría los planos de falla entre los 66° y 68°, lo que concuerda con lo que se había visto anteriormente (Figura 8.7).

Ebels (2008) realizó este mismo ensayo sobre probetas de mezclas en frío con RAP. Así, los valores aquí obtenidos para la mezcla con árido reciclado y sin curado, tiene una cohesión similar a la obtenida por Ebels para mezclas con un 75% de RAP y tras haber sido sometidas a un curado de 3 días. Por otro lado, la mezcla con árido reciclado curada da valores superiores a los obtenidos por Ebels incluso para mezclas curadas con solo un 25% de RAP y con la adición de un 1% de cemento. Finalmente, los ángulos de rozamiento interno son en general, más altos que los de Ebels, cuyos valores suelen quedarse en torno a los 35°. Por su parte Dal Ben y Jenkins (2014) estudiaron también estos parámetros para reciclados de firmes con espuma de betún, un 1% de cemento y diferentes contenidos de RAP. Sus resultados muestran que cuanto mayor es el contenido de RAP, menor es el ángulo de rozamiento interno, pasando de 8,16° con un 100% de RAP a 45,48° con un 0% de RAP. Los valores de cohesión, en cambio, oscilan sobre un valor cercano a 400 kPa, mayor que los obtenidos en la presente investigación.

Dado que los ensayos triaxiales dinámicos de deformación permanente se realizarán para una presión de confinamiento constante de 50 kPa y con una tensión desviadora dependiente del stress ratio seleccionado, es decir, un porcentaje de la tensión desviadora de fallo, se resumen en la Tabla 8.11 dichas tensiones. Como se podía aventurar en base a lo ya explicado, las tensiones de fallo para mezclas con árido natural son casi un 20% mayores que con árido reciclado justo después de la fabricación de las probetas. Precisamente por ello, llama especialmente la atención que tras idénticos procesos de curado, ambas alcancen resistencias realmente similares.

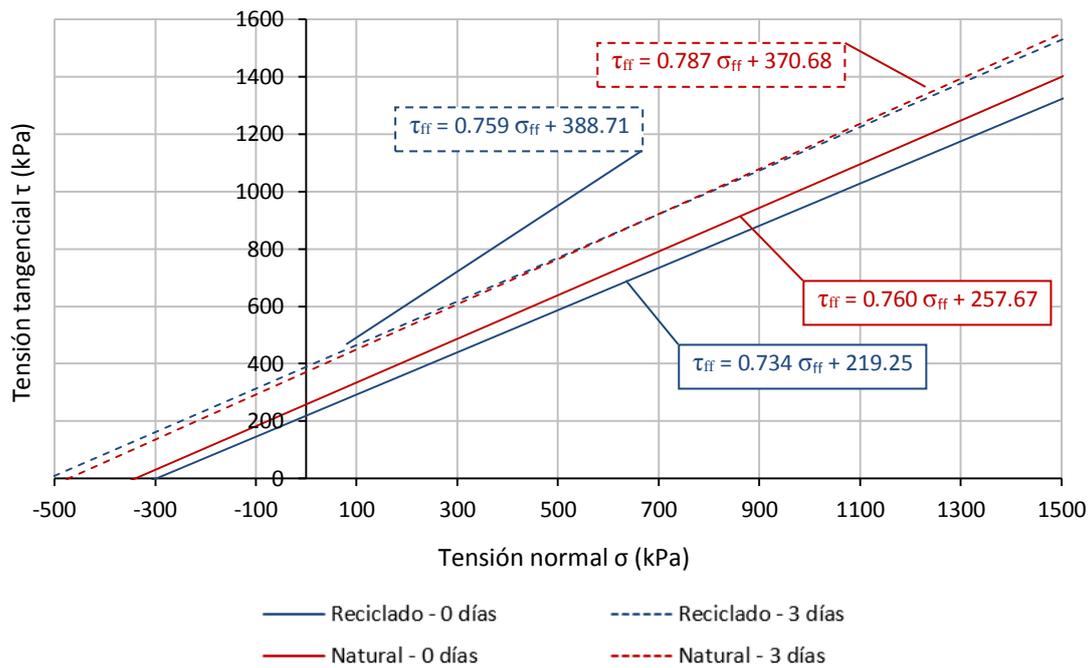


Figura 8.10 Envolventes de los círculos de Mohr de las mezclas estudiadas

Tabla 8.11 Tensiones principales de rotura para una presión de confinamiento $\sigma_3 = 50$ kPa

Mezcla	$\sigma_{1,f}$ (kPa)	$\sigma_{d,f}$ (kPa)	σ_3 (kPa)
Reciclado - 0 días de curado	1240	1190	50
Reciclado - 3 días de curado	2081	2031	50
Natural - 0 días de curado	1473	1423	50
Natural - 3 días de curado	2086	2036	50

8.3 Ensayo triaxial de resistencia a la deformación permanente

8.3.1 Descripción de los ensayos realizados

Al igual que para el caso del módulo resiliente, la resistencia a la deformación permanente fue estudiada, esta vez, por medio de ensayos de tipo triaxial con cargas

repetidas, con el fin de determinar el comportamiento elástico no lineal de las mezclas en frío (más acentuado en las etapas tempranas de maduración) y bajo la premisa de que su comportamiento es más asimilable al de un material granular que al de las mezclas bituminosas en caliente (Ebels, 2008).

Desde los años 50, se ha trabajado en el desarrollo de modelos de comportamiento de la deformación permanente en bases de materiales sueltos, de modo que en los 60 surge una de las primeras referencias al respecto en las que ya se indicaba el uso de ensayos triaxiales para tal fin (Haynes y Yoder, 1962). Con el paso de los años, se produjeron varios avances, con trabajos como los de Barksdale (1972) o Francken (1977), hasta que en 1997, Huurman aplicó el modelo de Francken a arenas sin ligante y materiales sueltos para capas de base, modificándolo ligeramente para hacerlo dependiente del número de cargas aplicadas (N):

$$\varepsilon_p = A \cdot \left(\frac{N}{1000} \right)^B + C \cdot \left(e^{D \cdot \frac{N}{1000}} - 1 \right) \quad [\text{Ec. 8-12}]$$

Huurman (1997) estableció una relación entre los parámetros del modelo A , B , C y D y los esfuerzos principales mayores σ_1 y $\sigma_{1,f}$ siendo este último el esfuerzo principal mayor que produce el fallo del material. No obstante, esta línea de investigación sería continuada por Van Niekerk (2002) para materiales en capas de base y sub-base, quien modificó nuevamente el modelo de Huurman (1997) para hacerlo dependiente de la tensión desviadora ($\sigma_d/\sigma_{d,f}$) en lugar de la tensión principal ($\sigma_1/\sigma_{1,f}$), con lo que el stress ratio dejaría de depender de la tensión de confinamiento (σ_3). Según este modelo, los parámetros A , B , C y D pueden ser determinados del siguiente modo:

$$\begin{aligned} A &= a_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} \right)^{a_2} & B &= b_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} \right)^{b_2} \\ C &= c_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} \right)^{c_2} & D &= d_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} \right)^{d_2} \end{aligned} \quad [\text{Ec. 8-13}]$$

Siendo σ_d el esfuerzo desviador mayor, $\sigma_{d,f}$ el esfuerzo desviador mayor de fallo y a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 , d_1 , d_2 los parámetros del modelo.

Finalmente, otros investigadores aplicarían el modelo de Hurrman (1997) y Van Niekerk (2002) al estudio de otros materiales con ligante, como el reciclado en frío con emulsión y espuma de betún (Jenkins, 2000; Ebels, 2008), mostrando que los parámetros de Hurrman pueden ser igualmente obtenidos para este tipo de materiales. Siguiendo esta línea, en la presente tesis, se hizo el mismo ajuste para el caso particular de las mezclas en frío tipo grava-emulsión con RCD.

Si bien existe una amplia variabilidad a la hora de realizar los ensayos triaxiales por diferentes autores (nivel de esfuerzo axial, confinamiento, frecuencia de las cargas, número de ciclos de carga, etc.), para el presente estudio se optó por ajustarse a lo establecido en la Norma UNE-EN 13286-7, Artículo 8, propia de mezclas de árido sin ligante.

Según el Artículo 8 de la Norma UNE-EN 13286-7, los ensayos se comenzaron aplicando los esfuerzos iniciales $\sigma_3 = 20$ kPa y $\sigma_d = 5$ kPa (esta última para asegurar un valor mínimo de contacto entre actuador y probeta). A continuación se aplicaron 80.000 ciclos registrando las lecturas de 10 ciclos consecutivos una vez alcanzados los 1 a 20, 50, 100, 200, 400, 1000, 2500, 5000, 7500, 10000, 12500, 15000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000 y 80000 ciclos.

El confinamiento se mantuvo constante en 50 kPa mientras que se realizaron ensayos con diferentes esfuerzos desviadores, en función del stress ratio que se desease conseguir. Las tensiones de fallo ($\sigma_{d,f}$) fueron determinadas para cada mezcla por medio del ensayo estático de compresión triaxial descrito en el apartado anterior y cuyos valores, para el caso de $\sigma_3 = 50$ kPa se resumían en la Tabla 8.11.

Tal y como se había explicado ya con anterioridad, debido a la larga duración de estos ensayos, solamente fueron estudiadas las mezclas óptimas, cuyos contenidos de agua y betún fueron propuestos en base a los resultados de todos los demás ensayos realizados a lo largo de la presente tesis. Así, en este capítulo no se buscarán tendencias de comportamiento con las variaciones de los contenidos de agua y betún sino que simplemente se valorará, cuál de las dos mezclas óptimas obtenidas correspondientemente para mezclas con árido reciclado (9% de agua y 6% de betún) y natural (4% de agua y 3% de betún), resiste mejor la aparición de deformaciones

permanentes. Eso sí, los ensayos fueron realizados sobre las mismas mezclas antes y después de haber sido sometidas al habitual curado artificial de 3 días en estufa a 50°C con el fin de estudiar cómo el tiempo de maduración puede influir en ellas.

Para cada uno de los 4 tipos de mezcla estudiados, se realizó una serie de probetas iguales, ensayando cada una de ellas con un stress ratio diferente, en intervalos del 10%. El objetivo fue conseguir un grupo de 5 curvas de deformación permanente, obtenidas con 5 stress ratios diferentes de modo que en al menos 2 de ellas la curva sea estable, no alcanzándose la etapa terciaria y en al menos otras dos sí se alcanzase dicha etapa, llegando a romper la probeta. Para cada ciclo de carga, también fue posible determinar el módulo resiliente (definido del mismo modo que en el ensayo triaxial dinámico de rigidez) registrando así de forma continua la evolución del mismo conforme transcurría el ensayo.

8.3.2 Resultados

Todos estos resultados pueden verse en las Figura 8.11 a Figura 8.18. En ellas puede apreciarse, en primer lugar, que el Stress Ratio crítico, también conocido en la bibliografía como *Shakedown limit* (Werkmeister, 2003), valor que supone la frontera entre las cargas que producen y no producen el fallo antes de los 80.000 ciclos que dura el ensayo, es diferente para cada una de las mezclas. Dicha barrera se sitúa en torno a los valores obtenidos por Ebels (2008): el 50% en el caso de mezclas con árido reciclado sin curado pero baja al 40% cuando se aplica curado. Dal Ben y Jenkins (2014) obtuvieron lo mismo para un Stress Ratio crítico de 42,5% en reciclados de firme en frío con espuma de betún y tras un curado de 3 días a temperaturas de 30°C y 40°C. Para las mezclas con árido natural, sin curado llegan a alcanzar un 40% pero para ese mismo Stress Ratio se produce el fallo cuando las mezclas fueron curadas (quedando la barrera en el 30%). Aun así, debe de tenerse en cuenta que aunque en términos porcentuales (el Stress Ratio es el porcentaje de carga con respecto a la carga máxima de fallo determinada según el ensayo triaxial estático de compresión) las mezclas tienden a resistir menos, cuando se aplica un proceso de curado, aguantan más carga en términos absolutos (Tabla 8.12). Así, las mezclas con árido reciclado con curado resistieron hasta 812 kPa mientras que sin curado no pasaron de 595 kPa. Por su

parte, las mezclas con árido natural resistieron respectivamente 611 kPa y 569 kPa. Aunque estos resultados ya tienen más lógica, es importante destacar que en ambos casos, las mezclas con árido reciclado resistieron más que las de natural, no solo desde el punto de vista porcentual del Stress Ratio sino que también en términos absolutos de carga.

En cuanto al módulo resiliente registrado, se puede apreciar como excepto para el caso de las mezclas con árido reciclado y sin curado (Figura 8.12) en el que además los resultados salen más dispersos, en general cuanto mayor es la carga o el Stress Ratio, también mayor es la rigidez, lo cual concuerda con la teoría de comportamiento elástico no lineal de los materiales granulares.

Las rigideces experimentan un fuerte crecimiento durante los primeros ciclos debido a la densificación de la mezcla, pero tras un número de ciclos suficientemente elevado (por ejemplo mayor que $N=1000$) las rigideces tienden a estabilizarse sobre un valor determinado, que en términos medios es de unos 600 MPa para mezclas con árido reciclado sin curado y 1000 MPa con curado, mientras que para mezclas con árido natural dichos valores se quedan en unos 450 MPa y 600 MPa respectivamente. Finalmente, se aprecia también cómo las probetas que alcanzaron la fase terciaria sufren una pérdida de rigidez, cada vez más notable, a medida que el ensayo se acerca a los ciclos en los que las probetas fallaron.

Una vez representadas las deformaciones permanentes, se procedió al ajuste del modelo de deformación permanente anteriormente explicado y dependiente del *Stress Ratio* y de los parámetros A , B , C y D , mediante el empleo de la herramienta Solver del programa Excel (Tabla 8.13). Dado que C y D son los parámetros propios de la etapa terciaria, estos solamente tienen sentido cuando se produce dicha etapa. En caso de no producirse, los parámetros tienden a cero, anulando así todo el segundo término del modelo.

En general, salvo algunas excepciones, todos los parámetros tienden a crecer con el *Stress Ratio* empleado, lo cual se aprecia claramente en las Figura 8.19 a Figura 8.22.

Tabla 8.12 Tensiones principales a partir de las cuales se produjo la aparición de la etapa terciaria y el colapso de las probetas antes de 80.000 ciclos de carga

Mezcla	$\sigma_{d,f}$ (kPa)	$\sigma_{d,a}$ (kPa)	SR	σ_3 (kPa)
Reciclado - 0 días de curado	1190	595	50%	50
Reciclado - 3 días de curado	2031	812	40%	50
Natural - 0 días de curado	1423	569	40%	50
Natural - 3 días de curado	2036	611	30%	50

Tabla 8.13 Parámetros del modelo de deformación permanente para las diferentes mezclas estudiadas en función del Stress Ratio

Stress Ratio	A	B	C	D	R ²
Árido reciclado – mezcla sin curado					
30%	9,925	0,026	0	0	0,962
40%	9,670	0,026	0	0	0,962
50%	14,053	0,045	0	0	0,971
60%	17,123	0,179	0,0071	0,045263	0,982
70%	19,573	0,205	0,000202	4,236339	0,998
Árido reciclado – tras curado de 3 días a 50°C					
20%	8,466	0,039	0	0	0,964
30%	10,122	0,040	0	0	0,947
40%	15,349	0,073	0,008	0,066	0,998
50%	14,599	0,166	0,008275	0,530835	0,996
60%	19,781	0,388	0,009073	1,693143	1,000
Árido natural – mezcla sin curado					
20%	8,529	0,025	0	0	0,999
30%	9,318	0,034	0	0	0,994
40%	13,493	0,046	0	0	0,965
50%	16,599	0,292	0,008461	0,381770	0,997
60%	23,978	0,274	0,248373	3,942603	1,000
Árido natural – tras curado de 3 días a 50°C					
20%	9,988	0,033	0	0	0,956
30%	14,490	0,059	0	0	0,983
40%	16,208	0,143	0,007356	0,137838	0,999
50%	18,613	0,287	0,005236	1,698305	1,000
60%	22,420	0,224	0,007291	5,940463	1,000

En las Figuras se muestran las curvas de los modelos ajustados, con sus correspondientes parámetros recogidos también en la Tabla 8.14. Dado que los parámetros *A* y *B* son distintos de cero para todos los casos, se contó para cada mezcla con 5 puntos diferentes, lo que permite aproximar las curvas potenciales de una manera bastante fiable. Sin embargo, en el caso de los parámetros *C* y *D* fue necesario aproximar las curvas basándose únicamente en 2 o 3 puntos distintos de cero. De este modo, los resultados son más caóticos y menos fiables, siendo aconsejable realizar más ensayos en los que se alcance la etapa terciaria.

En términos generales, las curvas potenciales obtenidas para mezclas con árido reciclado suelen situarse por debajo de las de árido natural y a su vez, las obtenidas sin curado por debajo de las obtenidas con curado. Por tanto, nuevamente se concluye que no solo el curado ayuda a reducir las deformaciones permanentes sino que también lo hace el hecho de incorporar el árido reciclado a las mezclas, lo que indudablemente constituye una ventaja más.

Tabla 8.14 Parámetros del modelo de relación de A, B, C y D con el Stress Ratio

	a₁	a₂	b₁	b₂	c₁	c₂	d₁	d₂
Reciclado 0 días	0,4261	0,8936	0,000001	2,7873	$1 \cdot 10^{-21}$	9,7506	$9 \cdot 10^{-46}$	24,703
Reciclado 3 días	0,8552	0,7533	0,00005	2,0674	$5 \cdot 10^{-19}$	9,4728	$2 \cdot 10^{-19}$	10,784
Natural 0 días	0,4606	0,9308	0,00001	2,4538	$1 \cdot 10^{-35}$	19,303	$1 \cdot 10^{-36}$	20,649
Natural 3 días	1,2902	0,692	0,00007	2,0299	$7 \cdot 10^{-13}$	5,7974	$1 \cdot 10^{-27}$	15,854

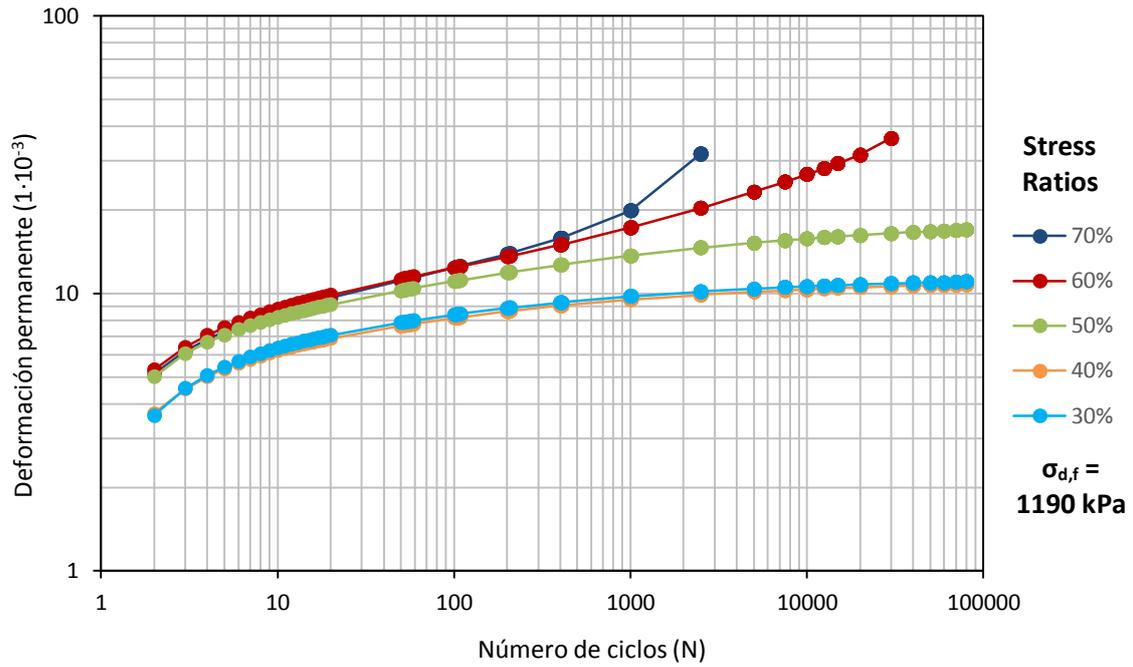


Figura 8.11 Curvas de deformación permanente para mezclas de árido reciclado (9% de agua y 6% de betún) sin ser sometidas a curado

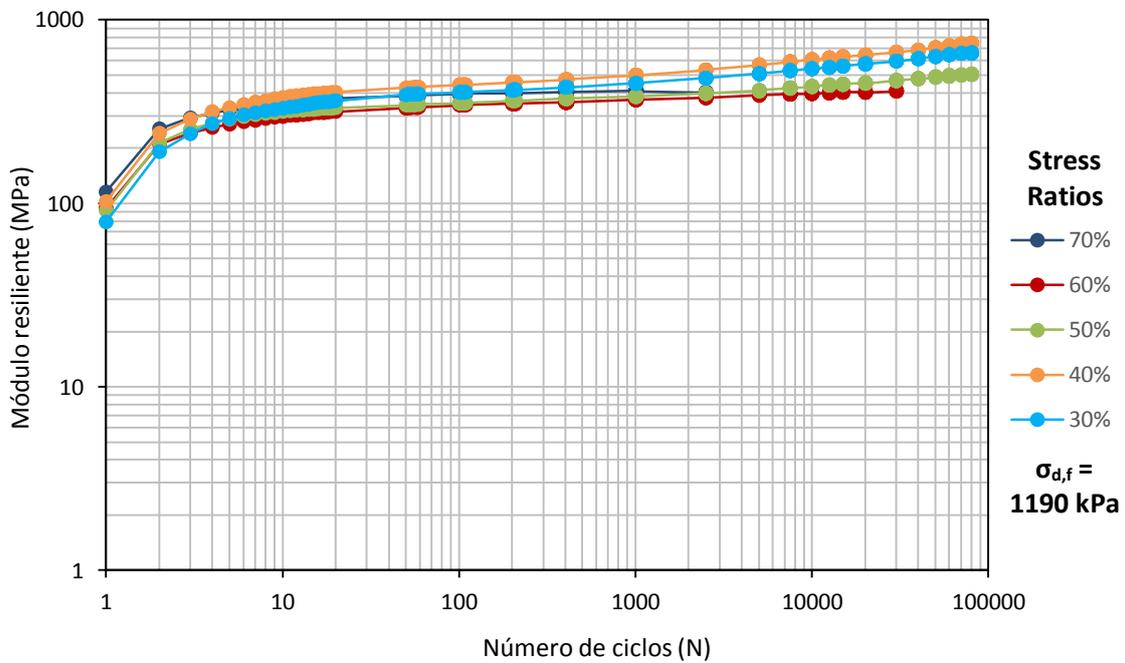


Figura 8.12 Evolución de la rigidez con el número de ciclos de carga para mezclas de árido reciclado (9% de agua y 6% de betún) sin ser sometidas a curado

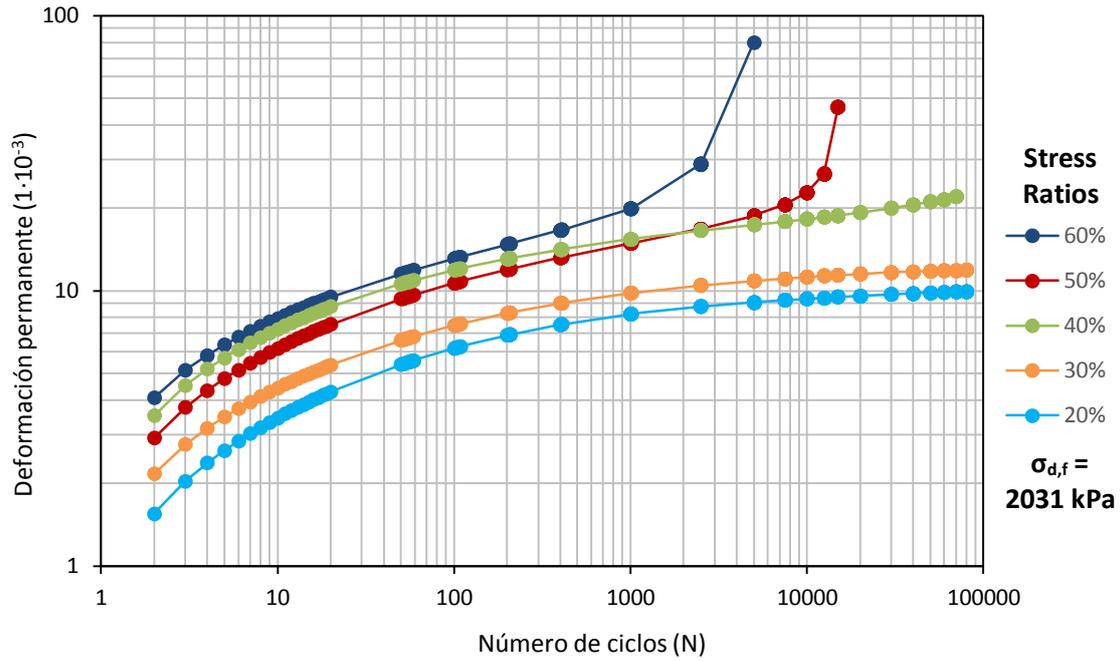


Figura 8.13 Curvas de deformación permanente para mezclas de árido reciclado (9% de agua y 6% de betún) tras 3 días de curado a 50°C

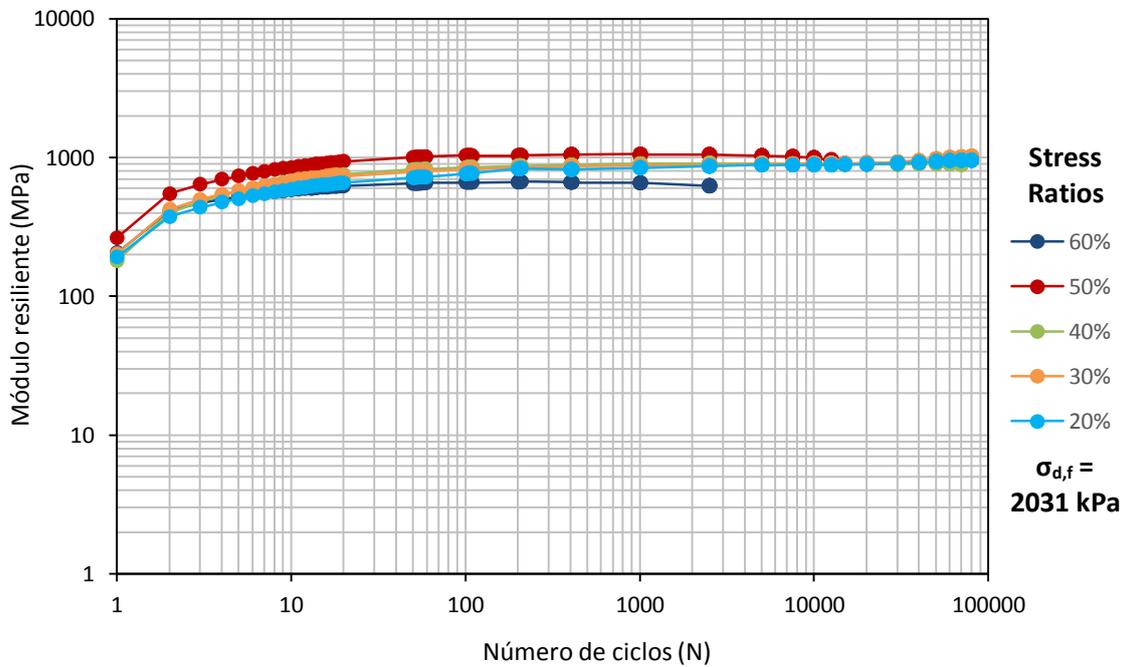


Figura 8.14 Evolución de la rigidez con el número de ciclos de carga para mezclas de árido reciclado (9% de agua y 6% de betún) tras 3 días de curado a 50°C

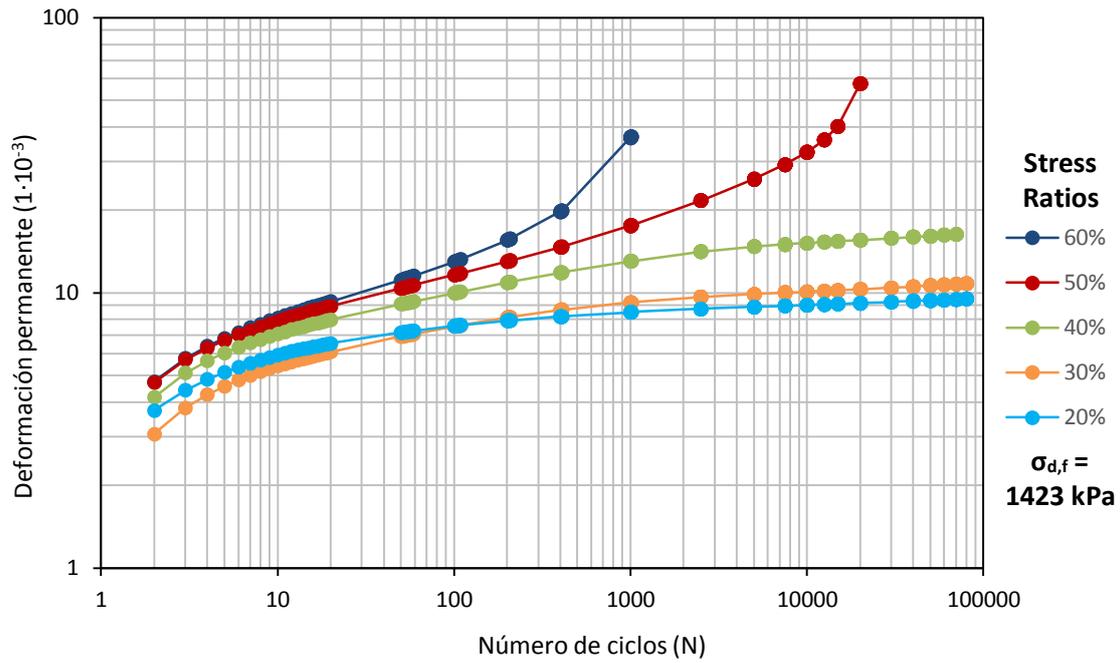


Figura 8.15 Curvas de deformación permanente para mezclas de árido natural (3% de agua y 4% de betún) sin ser sometidas a curado

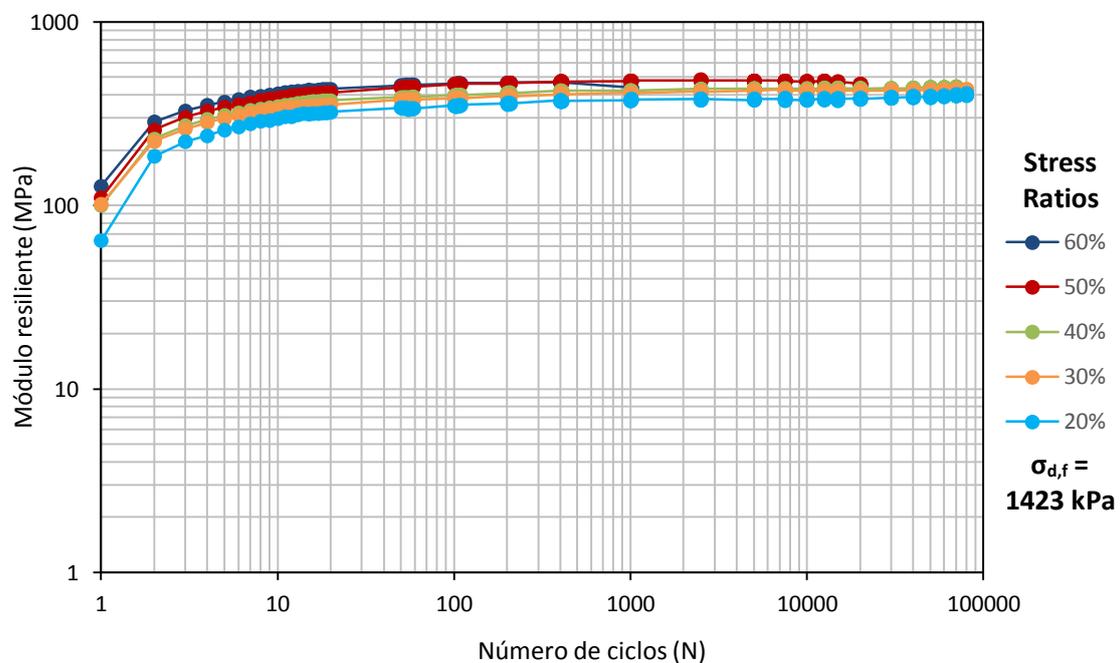


Figura 8.16 Evolución de la rigidez con el número de ciclos de carga para mezclas de árido natural (3% de agua y 4% de betún) sin ser sometidas a curado

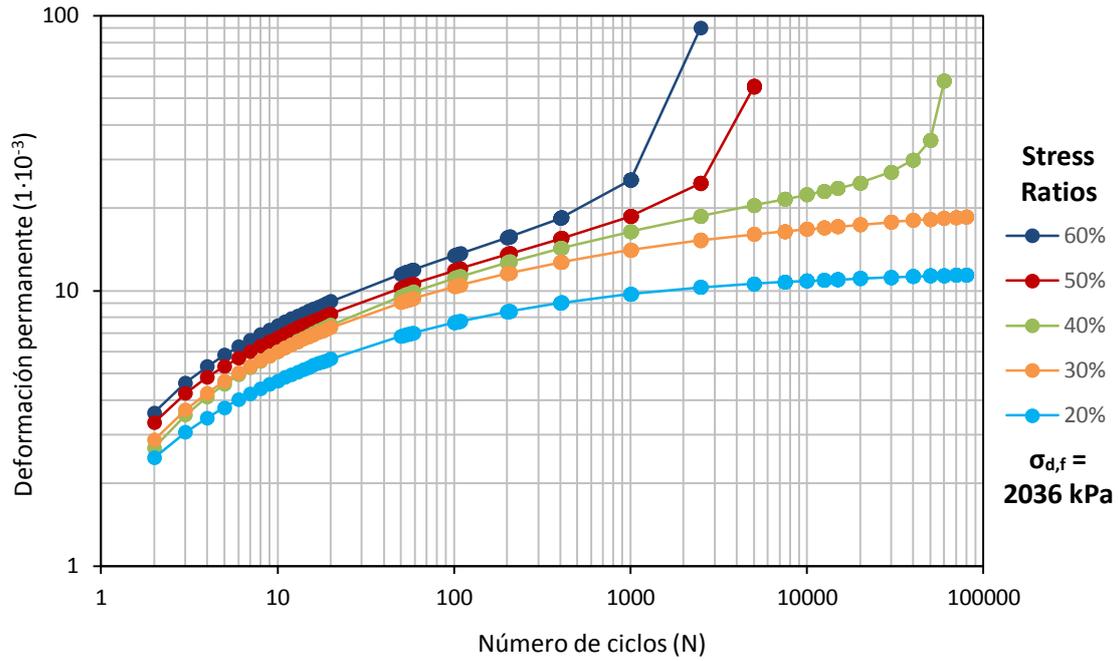


Figura 8.17 Curvas de deformación permanente para mezclas de árido natural (3% de agua y 4% de betún) tras 3 días de curado a 50°C

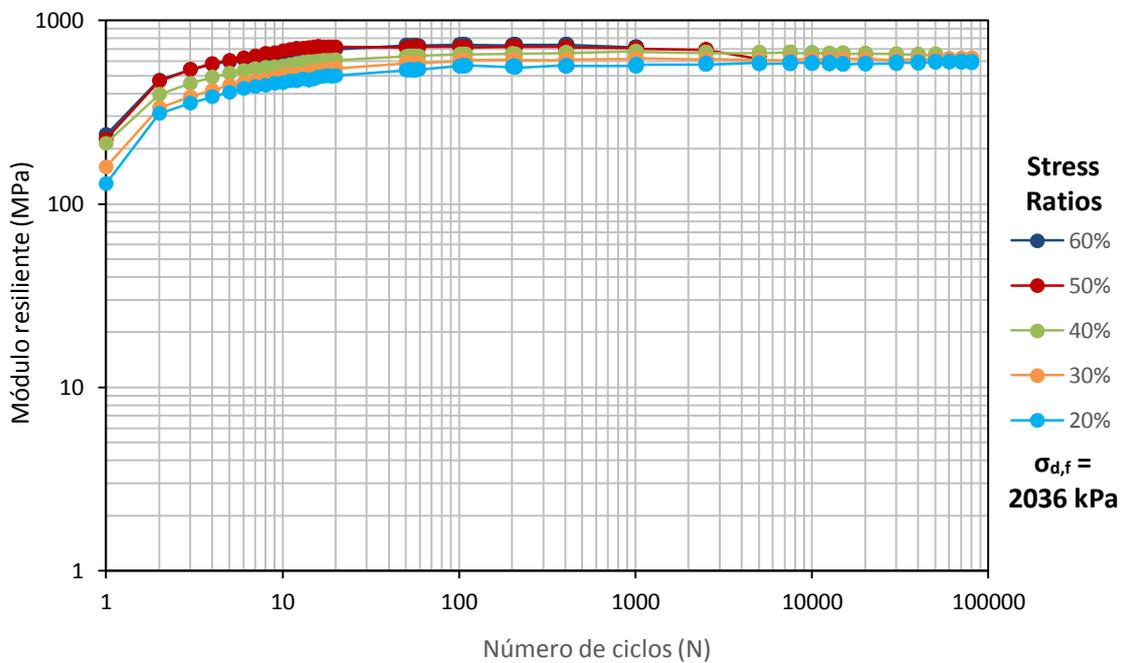


Figura 8.18 Evolución de la rigidez con el número de ciclos de carga para mezclas de árido natural (3% de agua y 4% de betún) tras 3 días de curado a 50°C

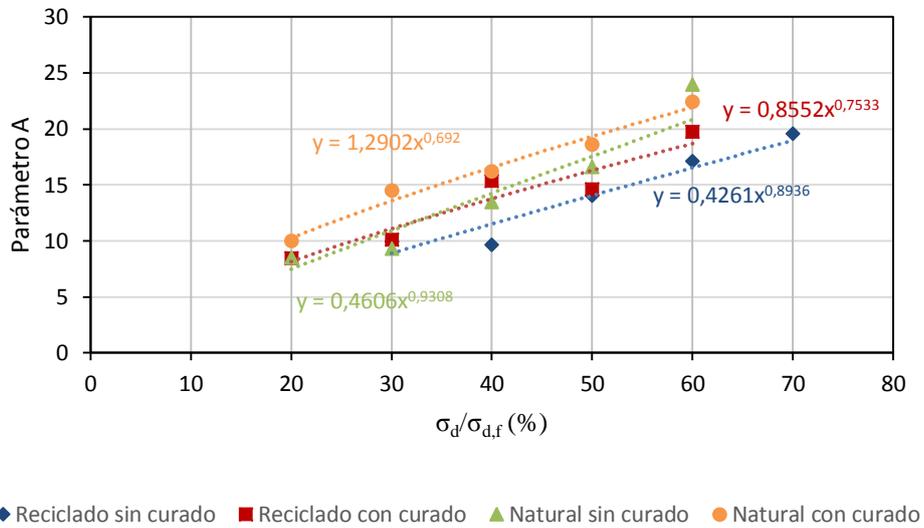


Figura 8.19 Relación entre el Parámetro A y el Stress Ratio

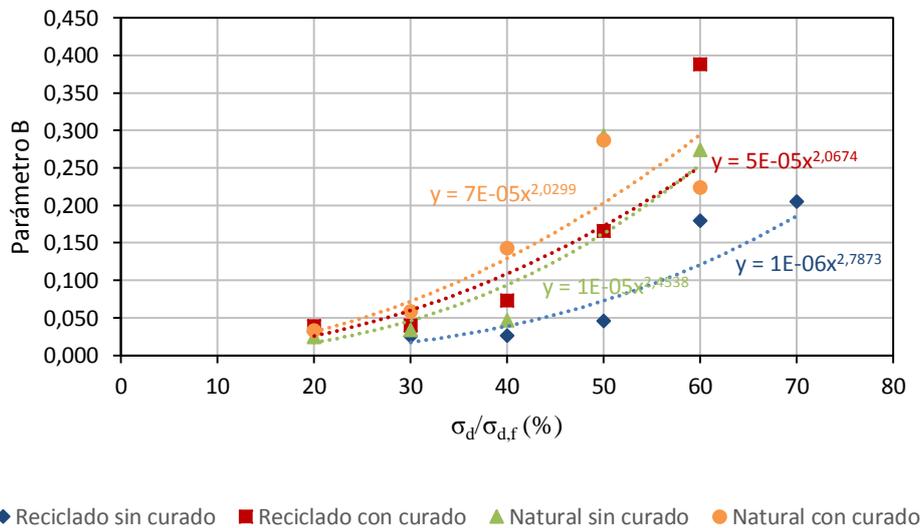


Figura 8.20 Relación entre el Parámetro B y el Stress Ratio

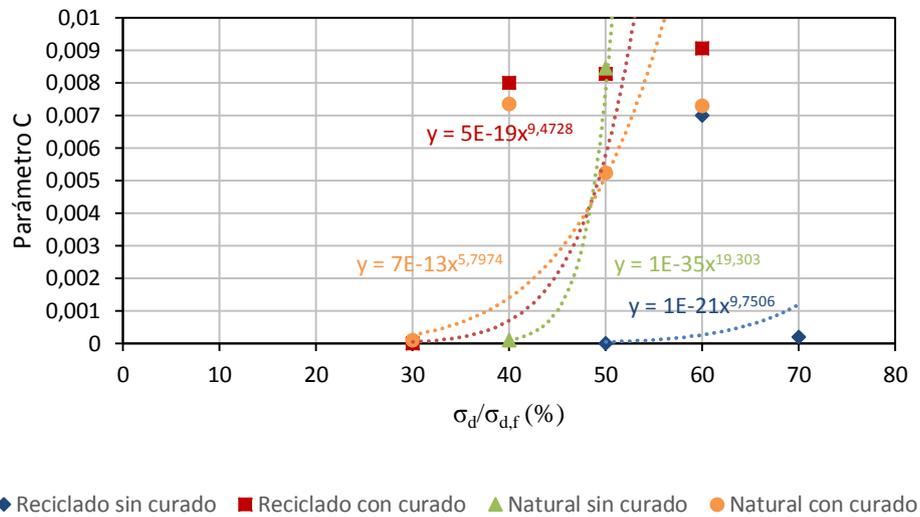


Figura 8.21 Relación entre el Parámetro C y el Stress Ratio

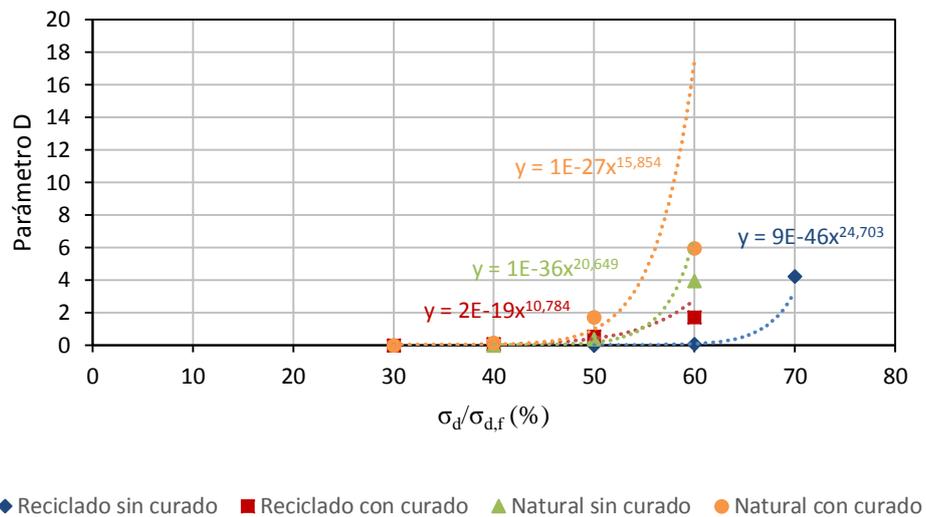


Figura 8.22 Relación entre el Parámetro D y el Stress Ratio

CAPÍTULO 9

**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES
(CONCLUSIONS AND
RECOMMENDATIONS)**

9.1 Introducción

En la presente tesis, las mezclas bituminosas en frío, tipo grava-emulsión, con el 100% de árido reciclado y las de control, con el 100% de árido natural, fueron ensayadas para obtener sus propiedades volumétricas, afinidad árido-ligante y sensibilidad al agua, además de los parámetros propios de su comportamiento visco-elasto-plástico (resistencia a tracción indirecta, módulo resiliente a tracción indirecta, módulo dinámico, resistencia a la deformación permanente) y elástico no lineal (por medio de ensayos triaxiales, como el de módulo resiliente y resistencia a la deformación permanente).

En el presente Capítulo se resumen las principales conclusiones extraídas del estudio. Finalmente, también se incluyen recomendaciones y posibles líneas de investigación que en un futuro continúen y profundicen las aquí seguidas.

9.2 Conclusiones relativas a los materiales empleados

El árido reciclado de RCD mostró en su análisis de composición, que aproximadamente un 95% eran materiales pétreos y hormigón o mortero, con un 5% de pequeñas impurezas (algunas de ellas solamente identificables mediante difractograma de Rayos-X) como yeso, plástico, papel, vidrio o cristal y fundamentalmente materiales cerámicos procedentes de tabiquería de ladrillo, azulejos y baldosas.

Este árido se caracterizó, sobre todo, por la enorme absorción que le proporciona el mortero adherido (hasta 15 veces superior a la del árido natural) y su baja densidad (hasta un 23% menor).

Esta elevada absorción tiende a producir una prematura rotura de la emulsión durante las fases de mezclado y compactación, por lo que fue necesario el uso de emulsiones de rotura lenta y mayores aportaciones de agua a la mezcla.

Aunque el árido reciclado tiende a presentar peores propiedades que el natural, ambos cumplieron en general los requisitos impuestos para carreteras de medio y bajo tráfico (categorías de tráfico T2, T3 y T4) por el PG-3 en sus Artículos de mezclas

bituminosas en caliente, así como en sus antiguos Artículos de grava-emulsiones y mezclas en frío (ya derogados). También se cumplen los requisitos incluidos en los Pliegos Técnicos de la ATEB (ATEB, ref. b), en cuanto a índice de lajas, caras de fractura, equivalente de arena y azul de metileno.

El excelente grado de limpieza de los finos (equivalente de arena y azul de metileno), así como un bajísimo índice de lajas, son aspectos positivos que los RCD muestran como áridos. No obstante, también presentan aspectos negativos, como un coeficiente de Los Angeles muy superior al del árido natural, no cumpliendo casi ninguna de las exigencias de resistencia a la fragmentación establecidas en la anteriormente citada Normativa, y pudiendo ser aplicable solamente en carreteras de bajo tráfico.

Mediante extracciones de betún en probetas compactadas, pudo comprobarse que este hecho también provoca que la cantidad de finos aumente excesivamente tras los procesos de mezclado y compactación. Por ello, las fracciones finas debieron ajustarse al huso límite inferior establecido por la ATEB (ATEB, ref. b).

Además, los ensayos de botella giratoria y Boiling Water Test, mostraron que:

- Los RCD tienen en general una menor afinidad con el ligante pudiendo reducir la resistencia al descubrimiento del árido.
- Esta afinidad mejora cuando la mezcla con RCD se enriquece en contenido de ligante pero aun así sin llegar nunca a los valores observados con el árido natural.
- Con mayores contenidos de agua no se consiguió mejorar los recubrimientos de las partículas (afinidad pasiva) pero sí se redujeron los tiempos de mezclado necesarios para conseguir la envuelta total (afinidad activa).

9.3 Conclusiones relativas a la fabricación de las probetas

Tras diferentes alternativas, se comprobó que no era posible fabricar probetas cilíndricas de diferentes alturas (50, 100 y 200 mm) sin afectar a propiedades como contenidos de huecos, densidades, contenido remanente de agua tras compactación, degradación de la granulometría, etc.

En consecuencia, se estableció un método para la fabricación de todas ellas, siguiendo el procedimiento de compactación descrito en la Norma NLT-162, con lo que se obtuvieron probetas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de altura. Las probetas de 50 mm se obtuvieron por medio de un corte transversal a media altura y las de 200 mm mediante el apilamiento de dos.

Los análisis estadísticos demostraron que el método propuesto es consistente y aplicable a diferentes tipos de mezcla, fácilmente reproducible y no afecta a los resultados. De este modo, fue posible obtener una veraz correlación entre diferentes propiedades. Cualquier posible tendencia encontrada no estaría nunca motivada por una diferencia en las propiedades de las probetas o en los procesos de fabricación de las mismas.

Mediante la aplicación del método propuesto, también se pudo comprobar que las mitades superiores e inferiores de las probetas fabricadas con RCD eran más parecidas entre sí que las fabricadas con árido natural. De este modo, los RCD contribuyeron a mejorar la homogeneidad, evitando problemas de segregación durante la fabricación de las probetas.

9.4 Conclusiones relativas a las propiedades volumétricas y sensibilidad al agua de las mezclas en frío con RCD

9.4.1 Contenido de agua de las probetas

Durante la compactación y curado de las mezclas, la mayor parte del contenido de agua inicial es drenado y evaporado. De este modo, el contenido de agua remanente, tras cada uno de estos procesos, apenas dependió del contenido de agua inicial.

Aun así, debido a que los RCD son muy absorbentes y tienden a producir la prematura rotura de la emulsión, fue necesario aportar mayores contenidos de agua inicial con el fin de mantener la mezcla fresca hasta el momento de la compactación.

La cantidad remanente de agua sí dependió directamente del contenido de betún residual (cuanto más betún residual, más agua residual) y también, en gran medida, del tipo de árido empleado, resultando ser tres veces mayor cuando éste se trataba de RCD.

9.4.2 Propiedades volumétricas

Debido a la alta porosidad del árido reciclado los valores de huecos VMA, V_{aw} y V_a obtenidos para grava-emulsiones con árido reciclado resultaron ser sensiblemente mayores que con árido natural.

El contenido de huecos de aire en grava-emulsiones con RCD llegó a alcanzar valores superiores al 20% (valor más propio de materiales granulares y mezclas abiertas). Aunque dicho parámetro disminuyó al aumentar el contenido de ligante nunca llegó a ser menor del 10%.

La densidad de las grava-emulsiones con RCD es menor que la de las grava-emulsiones con árido natural, debido evidentemente, a que están fabricadas con un árido menos denso.

9.4.3 Sensibilidad al agua de las mezclas

La sensibilidad al agua se estudió mediante el ensayo de inmersión-compresión (NLT 162), consistiendo el acondicionamiento del grupo húmedo en su inmersión en baño de agua a 49°C durante 4 días. Las principales conclusiones que se extraen son:

- Todos los valores hallados para grava-emulsiones, tanto con RCD como con árido natural, superaron los límites mínimos de resistencia seca, resistencia húmeda y resistencia conservada establecidos en los pliegos

de la ATEB (ATEB, ref. b) para tráfico T3 y T4, así como los requerimientos establecidos en el antiguo PG-3 para todo tipo de tráfico.

- El empleo de RCD mejora tanto la resistencia seca como húmeda. Sin embargo, debido a que la primera aumenta más que la segunda, el porcentaje de resistencia conservada desciende, creando la falsa apariencia de que las mezclas con RCD se comportan peor.
- Los contenidos óptimos de agua y betún, con los que se consiguen las resistencias más elevadas, son mayores al emplear RCD pero la mejora que se obtiene es muy significativa, llegando a ser la resistencia húmeda de las grava-emulsiones con RCD mayor que la resistencia seca de las mismas con árido natural.
- Finalmente, también se ha hallado que las mezclas con RCD presentan menores deformaciones en el momento de la rotura a compresión simple.

9.5 Conclusiones relativas al comportamiento visco-elásto-plástico de las mezclas en frío con RCD

9.5.1 Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta se midió según el ensayo UNE-EN 12697-23 sobre grava-emulsiones con ambos tipos de árido. Las principales conclusiones halladas son:

- Las mezclas con RCD muestran peores resistencias con contenidos de betún residual inferiores al 4%, pero mejores con contenidos mayores.
- La máxima resistencia encontrada para mezclas con RCD fue mayor que la máxima encontrada con áridos naturales. Sin embargo, los contenidos óptimos de agua (aportada en el momento del mezclado) y betún con los que

éstas se hallaron fueron también mayores (27% de agua y 6% de betún frente a un 3% de agua y 4% de betún).

- Aunque con RCD el contenido óptimo de agua (de mezclado) resultó ser del 27% (valor totalmente inviable en una aplicación práctica de obra), manteniendo el contenido de betún por encima del 4% y reduciendo el contenido de agua hasta el 9%, todavía es posible obtener una resistencia superior a las mezclas con árido natural.
- Finalmente, las mezclas con árido reciclado mostraron nuevamente menores deformaciones en el momento de la rotura.

9.5.2 Rigidez según el módulo resiliente a tracción indirecta (ITSM)

La rigidez se analizó, en primer lugar, según el módulo resiliente a tracción indirecta (ITSM) (UNE-EN 12697-26, Anexo C) a las temperaturas de 2°C, 10°C y 20°C, con el fin de determinar la influencia de la temperatura en el comportamiento visco-elástico de las grava-emulsiones. Los resultados indican que:

- A bajas temperaturas (2°C y 10°C) las mezclas con RCD son más rígidas que las de árido natural, solamente si el contenido de betún residual es superior al 4%. A altas temperaturas (20°C) son más rígidas para cualquier contenido.
- Con contenidos óptimos (entendidos en este caso como los que consiguen resultados más elevados, no siendo necesariamente lo mejor), las mezclas con RCD alcanzaron elevadas rigideces a 20°C (de hasta 4000 MPa), sensiblemente superiores a las obtenidas con árido natural (hasta 2500 MPa) aunque sin llegar a valores propios de mezclas en caliente (5000-7000 MPa). En cambio, a 2°C, son las mezclas con árido natural las que mostraron mayores módulos (superiores a 11000 MPa) mientras que las mezclas con RCD no llegaron a superar en ningún caso los 8500 MPa. Así pues, el árido reciclado hace que las mezclas sean más rígidas a altas

temperaturas (lo que ayudaría a controlar las deformaciones permanentes) y más flexibles a bajas temperaturas (importante para evitar la rotura frágil).

- Además, las rigideces máximas obtenidas con RCD resultaron ser, en general, superiores a las de los datos publicados por otros autores sobre mezclas en frío con áridos naturales, salvo cuando estos añadían importantes cantidades de cemento en la dosificación o aplicaban largos tiempos de curado.
- Con el paso del tiempo de maduración, también se observó cómo los módulos ITSM crecían de forma proporcional al contenido de betún de las probetas. Este fenómeno hace que con el tiempo, los contenidos óptimos de betún tiendan a desplazarse hacia valores mayores, aspecto a tener en cuenta en diseños de firmes a medio y largo plazo.
- Las rigideces de las mezclas con ambos tipos de árido dejaron de crecer transcurrido el mismo tiempo de maduración, y registrándose además incrementos similares en el ITSM. Así pues, el tipo de árido no afectó a estos procesos, aunque bien es cierto que en todo momento, las rigideces registradas para el árido reciclado fueron mayores que para el árido natural.
- Finalmente, se debe tener en cuenta que con mezclas en frío, la excesiva rigidez puede ser un problema, sobre todo en aplicaciones como carreteras de medio/bajo tráfico con explanadas de baja calidad. Por ello, la elevada rigidez máxima que las mezclas con RCD alcanzaron (superior a 4000 MPa a 20°C) debe ser entendida como un valor potencial, mayor al que cualquier mezcla con árido natural pueda ofrecer, y que solamente en el caso de así requerirlo se puede alcanzar para unos determinados contenidos de agua y betún. Si este valor resultase excesivo, bastaría simplemente con reducir ambos contenidos, consiguiendo de paso un ahorro ecológico y económico.

9.5.3 Rigidez según el módulo dinámico $|E^*|$

La rigidez y el comportamiento visco-elástico también se estudió mediante la obtención de curvas maestras a partir del ensayo dinámico de cargas repetidas a diferentes temperaturas y frecuencias (AASHTO TP 62-07), con la modificación de haber aplicado las cargas diametralmente sobre las probetas, en lugar de axialmente.

- Además de corroborar todas y cada una de las conclusiones extraídas del ensayo de rigidez según el ITSM, los resultados obtenidos con este ensayo, evidenciaron el comportamiento visco-elástico característico de este tipo de mezcla, con una clara influencia de la temperatura de ensayo y la frecuencia de aplicación de las cargas.
- Las grava-emulsiones con RCD, volvieron a resultar también más rígidas que las de árido natural a altas temperaturas y más flexibles a bajas temperaturas (curvas maestras más tendidas) lo que hace que sean menos susceptibles a los cambios térmicos. Esto también hace prever un comportamiento visco-elasto-plástico menos acusado, así como una mayor resistencia a las deformaciones permanentes a altas temperaturas y a la rotura frágil a bajas temperaturas.
- Sin embargo, nuevamente estas ventajas fueron obtenidas en base a aumentar los contenidos de betún y agua.

9.5.4 Resistencia a la deformación permanente. Ensayo uniaxial

Se estudió la resistencia a la deformación permanente y el comportamiento visco-elasto-plástico por medio del ensayo de compresión axial bajo carga repetida (RLAT), según la Norma BSi DD 226:1996, sobre las mismas probetas utilizadas para la obtención del ITSM, una vez alcanzaron su completa maduración. Las principales conclusiones obtenidas son:

- Las grava-emulsiones con RCD mostraron menores deformaciones permanentes durante la densificación producida en los primeros ciclos de carga
- La deformación al final del ensayo (tras 5000 ciclos) fue similar para mezclas con ambos tipos de árido
- La pendiente de la recta tangente a la curva de deformación acumulada en la etapa secundaria es menor en mezclas con RCD, lo que indica una evolución de las deformaciones más lenta
- El punto de corte de la recta tangente con el eje vertical (punto “a”) es mayor para mezclas con RCD. Aunque esto podría indicar un peor comportamiento, lo cierto es que simplemente es fruto de tener una deformación final parecida a la de las mezclas con árido natural y una menor pendiente de la recta tangente.
- Con los contenidos óptimos de agua y betún todos los parámetros anteriormente citados son mejores para grava-emulsiones con RCD. Sin embargo, dichos contenidos fueron nuevamente mayores para este tipo de mezcla (entre el 5%-8% de betún residual para RCD y sobre el 4% para árido natural).

9.6 Conclusiones relativas al comportamiento elástico no lineal de las mezclas en frío con RCD

Siguiendo las hipótesis de Jenkins et al. (2007) y Ebels (2008), el comportamiento elástico no lineal de las mezclas en frío se acentúa en las etapas iniciales de maduración, pareciéndose más a un material granular que a una mezcla bituminosa en caliente. Para estudiar este efecto con profundidad, se recurrió a ensayos de tipo triaxial y además se repitieron con probetas a las que no se les aplicó ningún tipo de curado en estufa.

9.6.1 Módulo resiliente

En primer lugar, los módulos obtenidos en los ensayos triaxiales dinámicos (Norma UNE-EN 13286-7) muestran una clara dependencia con respecto al nivel de tensiones aplicado, lo cual evidencia la naturaleza elástico no lineal de este tipo de mezclas. Este comportamiento, junto con el visco-elasto-plástico observado en los ensayos anteriores (dependencia de la temperatura y frecuencia de las cargas) concuerda con las hipótesis de Jenkins et al. (2007), obteniéndose un material que comparte, a la vez, propiedades de las mezclas bituminosas en caliente y de los materiales granulares.

Sobre los resultados obtenidos experimentalmente, se ajustaron tres modelos de predicción de comportamiento (Hicks, Uzan y NCHRP). El modelo de Uzan y el NCHRP obtuvieron resultados muy similares y con mejores ajustes que el modelo de Hicks.

Las grava-emulsiones con RCD proporcionan módulos resilientes menores que con áridos naturales. Así, aunque en ambos casos dependen del nivel tensional aplicado, las curvas de los modelos de las primeras están situadas, en general, en niveles más bajos que las curvas de las segundas.

Se ha comprobado la escasa influencia del ligante en el comportamiento resiliente de las grava-emulsiones todavía frescas (sin haber sido sometidas a ningún tipo de curado). En ese punto, las mezclas se comportan prácticamente igual, independientemente de sus contenidos de agua y betún. Aun así, las grava-emulsiones con áridos naturales mostraron mayores rigideces, probablemente debido a un esqueleto mineral más resistente.

Los contenidos de agua (de mezclado) y ligante para los que se alcanzaron los máximos módulos, fueron mayores al emplear RCD (7% de betún y 9% de agua frente a un 4% de betún y 3% de agua). No obstante, tal y como se había explicado anteriormente, las mezclas en frío no necesariamente son mejores cuanto más rígidas, pudiendo recurrir a contenidos menores.

9.6.2 Obtención de las líneas de fallo de Mohr-Coulomb

Las líneas de fallo se obtuvieron a partir de la realización de ensayos triaxiales con rampa de carga creciente hasta el fallo de las probetas, en diferentes condiciones de confinamiento. A partir de éstas, no solo se obtuvieron las cargas de fallo de cada mezcla, sino que también otros parámetros como la cohesión o el ángulo de rozamiento interno. Las principales conclusiones son:

- Las grava-emulsiones con RCD, tienen una menor cohesión que las de árido natural justo después de su fabricación pero una vez se ha producido un cierto proceso de curado, dicha cohesión aumenta fuertemente hasta situarse incluso por encima de las de árido natural.
- El ángulo de rozamiento interno es mayor en probetas con árido natural tanto antes como después del curado, situándose todos ellos entre los 40°-45°.
- Las tensiones de rotura alcanzadas con mezclas con RCD, justo después de su fabricación, son un 20% menores que con árido natural pero se igualan en gran medida tras pasar los procesos de curado.

Por todo ello, aunque tras los procesos de curado, las características de ambas grava-emulsiones se igualan, el empleo de RCD supone un detrimento de las mismas en etapas tempranas de maduración.

9.6.3 Resistencia a la deformación permanente. Ensayo triaxial

En este caso, la resistencia a la deformación permanente fue analizada mediante ensayos triaxiales de carga axial repetida y confinamiento constante, según lo establecido en la Norma UNE-EN 13286-7, propia de mezclas sin ligante. Los ensayos fueron repetidos con diferentes niveles de carga axial. Además de la deformación acumulada, los módulos resilientes fueron también registrados para cada ciclo de carga, observándose una evolución en los mismos. Finalmente, el modelo de Hurrman fue ajustado a los resultados obtenidos. Las principales conclusiones obtenidas son:

- Las grava-emulsiones con RCD necesitaron cargas mayores que las mismas con árido natural, para alcanzar la etapa terciaria de deformación permanente. Este hecho se repitió tanto para mezclas curadas como sin curar.
- El Stress Ratio crítico también resultó ser mayor para el caso de las grava-emulsiones con RCD, tanto antes como después de ser sometidas a los procesos de curado (50% y 40% para mezclas con RCD y 40% y 30% para mezclas con árido natural).
- A la vista de las curvas del modelo de Hurrman, se aprecia que las deformaciones acumuladas con el transcurso de los ciclos de carga son menores en mezclas con RCD. Por tanto, este tipo de árido mejora la resistencia a la deformación permanente.
- El módulo resiliente crece fuertemente durante la densificación producida en los primeros ciclos de carga. Tras un determinado número de ciclos, los valores se estabilizan y permanecen prácticamente constantes hasta el final del ensayo. Si las grava-emulsiones alcanzan la etapa terciaria de deformación, se aprecia una nueva caída en los módulos de rigidez.
- En general, estos módulos son mayores cuanto mayor es también el Stress Ratio empleado durante el ensayo, evidenciándose de nuevo, el comportamiento elástico no lineal de este tipo de mezclas.

9.7 Conclusiones relativas al diseño de las mezclas

El diseño de las grava-emulsiones con RCD es más complejo que con árido natural. Mientras que las segundas se comportaron de una forma muy homogénea en la mayoría de ensayos (prácticamente siempre, la mezcla que mejor se comporta es la de 3% de agua inicial y 4% de betún), las mezclas con árido reciclado muestran diferentes contenidos óptimos en función de la propiedad considerada.

En principio, y teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores desde un punto de vista global, se puede decir que las grava-emulsiones con RCD tienden a comportarse mejor que las de árido natural para contenidos de betún residual superiores al 4%. La mezcla óptima que se propondría es la del 9% de agua inicial (durante mezclado) y un contenido de betún en torno al 6% o 7%. Los resultados obtenidos con estas mezclas, son mejores que los obtenidos con árido natural en lo referente a propiedades como la resistencia a compresión simple, tracción indirecta, rigidez (más rígida a altas temperaturas y más flexible a bajas temperaturas) y resistencia a la deformación permanente.

No obstante se ha visto también que en grava-emulsiones con RCD, el hecho de quedarse ligeramente por debajo del pico de rigidez ayudaría a reducir las deformaciones permanentes. Al mismo tiempo, las mezclas no serían tan rígidas evitando la rotura frágil a bajas temperaturas. Bajando el contenido de betún a un 5%, tienden a salir mejor los ensayos uniaxiales aunque peor los triaxiales y mejoran también propiedades como la resistencia a la acción del agua y rigidez a 20°C. Por ello, podría ser una buena solución en climas húmedos y templados (como es el caso de Galicia) siempre y cuando se le deje alcanzar un mínimo nivel de maduración.

El hecho de necesitar un mayor contenido de betún supone para las mezclas con RCD una desventaja ecológica y económica. Sin embargo, como se ha explicado, también son menos densas, por lo que para una misma longitud unitaria de carretera se necesita una menor cantidad (en masa) de mezcla. Realizando los cálculos pertinentes, se llega a la conclusión de que con grava-emulsiones con RCD y un contenido de betún del 6% se necesita un 20,2% más de cantidad de betún, mientras que para grava-emulsiones con un contenido del 5%, el aporte extra de ligante se reduce a un 1,1%.

Por otro lado, se ha visto que según transcurren los procesos de maduración, los contenidos con los que se dan las mayores rigideces tienden a desplazarse hacia valores mayores por lo que en principio sería recomendable dosificar para valores bajos, ahorrando costes ecológicos y económicos y obteniendo buenas prestaciones tras un cierto tiempo de maduración. Por tanto, se recomienda que siempre que sea posible, se recurra a la mezcla del 5%.

Los contenidos de agua no afectan en gran medida a los resultados. Aunque desde un punto de vista puramente investigativo, fue necesario utilizar contenidos muy altos (cercaos al 30%) para que las mezclas desarrollasen todo su potencial, con un contenido del 9% (mucho más práctico) las propiedades siguen siendo más que satisfactorias. Menores contenidos no son aconsejables con árido reciclado, puesto que podrían derivar en la prematura rotura de la emulsión durante el mezclado impidiendo la correcta envuelta de los áridos.

Finalmente, se debe mencionar que los contenidos de agua óptimos no se corresponden con los obtenidos en el ensayo Proctor Modificado, que arrojaba valores del 6% para árido natural y 12% para árido reciclado. Además, debe tenerse en cuenta que estos son valores de humedad residual, por lo que cabría esperar contenidos óptimos de agua inicial (en mezclado) incluso ligeramente superiores. Por ello, se concluye que en este caso, los métodos tradicionales de diseño no serían adecuados.

9.8 Recomendaciones

Se proponen las siguientes recomendaciones para el uso de RCD como árido reciclado en mezclas bituminosas en frío, tipo grava-emulsión:

- Realizar una exhaustiva caracterización de los áridos reciclados puesto que según su procedencia pueden tener características muy heterogéneas.
- Emplear granulometrías con bajas cantidades de finos, puesto que tras las operaciones de mezclado y compactación, estas fracciones tienden a aumentar considerablemente.
- Emplear emulsiones bituminosas catiónicas de rotura lenta, lo que propiciará mejores afinidades árido-ligante y evitará la prematura rotura de la emulsión.

- Tener presentes las conclusiones extraídas sobre el diseño de las mezclas para conseguir materiales lo más ecológicos y económicos posible con adecuadas características mecánicas para el proyecto a realizar.
- Emplear grava-emulsiones con RCD en carreteras de medio/bajo tráfico con explanadas de mala calidad.
- Emplear grava-emulsiones en capas de base en las que una alta resistencia al pulimento de los áridos no es necesaria pero sí su comportamiento estructural.
- Aplicar una compactación enérgica que permita drenar la mayor cantidad de agua posible, puesto que para evitar la prematura rotura de la emulsión es necesario aportar mayores cantidades de agua que con una mezcla en frío convencional.
- Dejar, en la medida de lo posible, desarrollar los procesos de maduración antes de la puesta en servicio y apertura al tráfico rodado.
- En ensayos de laboratorio y debido a la gran heterogeneidad de los resultados obtenidos, emplear un mínimo de 5 probetas por ensayo para mezclas con árido reciclado. Con árido natural, 3 probetas por ensayo fueron en general más que suficiente.
- En ensayos de laboratorio, utilizar para los diferentes ensayos probetas con idénticas propiedades intrínsecas, siguiendo para ello protocolos como el propuesto durante la realización de la presente tesis.
- Desarrollar una normativa técnica que regule la utilización de árido reciclado en mezclas bituminosas en frío con criterios mínimos de seguridad y funcionalidad.

9.9 Líneas de investigación futuras

Como posibles líneas de investigación a realizar en el futuro, se proponen las siguientes:

- Ampliar los ensayos realizados en laboratorio. Sobre todo se podría ampliar los contenidos de agua y betún estudiados con ensayos triaxiales, en donde solo ha sido posible analizar el comportamiento de mezclas representativas.
- Estudiar otras propiedades de las mezclas bituminosas en frío no incluidas en la presente investigación, como la resistencia a fatiga, tenacidad, resistencia a la deformación permanente con el ensayo de pista o rigidez mediante el ensayo de viga a flexión en cuatro puntos.
- Estudiar la aplicación de áridos reciclados en otros tipos de mezclas en frío distintos a la grava-emulsión, como por ejemplo, las mezclas abiertas.
- Estudiar la aplicabilidad de los áridos reciclados procedentes de RCD en plantas de producción de mezclas bituminosas en frío, analizando todas las dificultades que podrían surgir en los procesos de fabricación, transporte, obtención de materias primas y recicladas, etc.
- Realizar análisis pormenorizados de las mejoras ecológicas y económicas resultantes del empleo de RCD en mezclas bituminosas en frío, con herramientas tales como el Análisis de Ciclo de Vida (LCA).
- Realizar modelos numéricos para determinar el estado tenso-deformacional de un firme realizado con los materiales estudiados, así como los espesores mínimos necesarios de cada una de sus capas. Para ello, se podrán introducir los parámetros obtenidos a lo largo de la investigación.
- Realizar tramos de prueba con las dosificaciones propuestas y con los espesores provenientes de los análisis numéricos observando *in situ* el comportamiento de las mezclas en condiciones reales de campo.

CONCLUSIONS (*ENGLISH TRANSLATION*)

9.10 Introduction

In this thesis, cold asphalt mixtures, grave-emulsion type, with 100% of recycled aggregates from Construction and Demolition Waste (CDW) and control mixes, with 100% of natural aggregates, were tested in order to obtain their volumetric properties, aggregate-binder affinity and resistance to water damage, as well as the parameters of their visco-elasto-plastic behavior (indirect tensile strength, indirect tensile stiffness modulus, dynamic modulus and resistance to permanent deformation) and non-linear elastic response (by means of triaxial tests, such as resilient modulus and resistance to permanent deformation).

In this Chapter, the main conclusions of the study are summarized. Finally, recommendations and possible research lines, which might continue and deepen this one are included.

9.11 Conclusions regarding the materials used

CDW showed in a composition analysis, that approximately 95% of it is concrete and natural stone, as well as concrete and attached mortar, with 5% of small impurities (some of them only identifiable by using X-Ray diffractogram), such as gypsum, plastics, paper, glass and ceramic materials from bricks and tiles.

This aggregate was characterized mainly for the high absorption provided by the attached mortar (up to 15 times higher than natural aggregates absorption) and low density (up to 23% lower).

This high absorption tends to produce the premature setting of the asphalt emulsion during the mixing and compaction processes, being necessary the use of slow setting emulsions and larger water contents in the mix.

Although CDW tends to show poorer properties than natural aggregates, both met, in general, the requirements for medium/low traffic roads (T2, T3 and T4

categories) given by the PG-3 in its Articles on hot mix asphalt, as well as on grave-emulsions and cold asphalt mixtures (these latter already repealed). They also met the requirements established by the Spanish Technical Association of Bituminous Emulsions (ATEB) (ATEB, ref. b), regarding the flakiness index, crushed particles, sand equivalent and methylene blue value.

The excellent cleanness level of fine particles (sand equivalent and blue methylene value), as well as a very low flakiness index are positive aspects that CDW show as aggregates. However, they also show negative aspects, such as Los Angeles coefficient much higher than the one obtained with natural aggregates. Thus, they did not meet the requirements given by the mentioned regulation, being suitable only for low traffic roads.

Through bitumen extractions in compacted specimens, it could be checked that this characteristic also causes an excessive increase of the amount of fine particles after mixing and compaction processes. For this reason, fine fractions of the gradation were adjusted to the lower limit established by the ATEB (ATEB, ref. b).

Furthermore, rolling bottle test and boiling water test showed that:

- CDW have, in general, lower aggregate-binder affinity, what might cause early stripping phenomena
- This affinity of CDW mixes can be improved by increasing the binder content but, even so, it never reached the observed values for natural aggregates mixtures
- By increasing the water content in the mix, it was not possible to improve the coating of the aggregates (passive affinity) but it was reduced the mixing time needed for the complete coating (active affinity).

9.12 Conclusions regarding the specimens production

After considering different alternatives, it was observed that it was not possible to produce cylindrical samples with different heights (50, 100 and 200 mm) without affecting properties, such as voids content, density, remaining water content after compaction, gradation deterioration, etc.

Consequently, a new protocol for the production of all the samples were established, based on the compaction method included in Standard NLT-162. Thus, 101.6 mm high and 101.6 mm diameter were obtained. 50 mm high samples were obtained by splitting these with a radial saw blade, while 200 mm high samples were obtained by stacking them.

Statistical analysis demonstrated this method is consistent and applicable to different sorts of mixture, easily reproducible and does not affect the results. Therefore, it was possible to obtain a trustful relationship between different properties, since in case of finding a trend, it would not be caused by differences in the samples production.

By the application of the proposed method, it could also be observed that the upper and lower halves of the samples were more similar to each other when the mix had been made with CDW. Therefore, CDW contributed to improve the homogeneity of the mixtures, avoiding segregations between aggregates and binder during the samples production.

9.13 Conclusions regarding the volumetric properties and resistance to water damage of mixtures with CDW

9.13.1 Water contents of the specimens

During compaction and curing processes, the main part of the initial water content (mixing content) is drained and evaporated. Hence, the remaining content, after each of these processes, barely depended on the initial content.

Still, due to the high absorption of CDW and the premature setting of the asphalt emulsion they tend to produce, it was necessary to add higher mixing contents in order to keep the mix fresh until compaction.

The remaining water content did depend directly on the binder content (the more binder, the more remaining water) and also on the aggregate source, being three times higher when using CDW.

9.13.2 Volumetric properties

Due to the high porosity of CDW, the voids contents (VMA, V_{aw} and V_a) obtained for grave-emulsions with CDW resulted to be noticeably higher than with natural aggregates.

The air voids content in grave-emulsions with CDW reached in some cases values higher than 20% (values more usual in unbound granular materials and open graded mixes). Although this parameter got reduced by enlarging the binder content, it never was lower than 10%.

The density of grave-emulsions with CDW is lower than the one of grave-emulsions with natural aggregates, due to the fact, indeed, they are made with lower-density aggregate.

9.13.3 Resistance to water damage

The resistance to water damage was studied by means of the immersion-compression test (NLT 162), involving the conditioning of the wet samples group their immersion in water at 49°C for 4 days. The main conclusions that could be obtained were:

- All the results obtained for grave-emulsions with both, CDW and natural aggregates, met the minimum requirements for dry, wet and retained compression strength established in the ATEB technical specifications

(ATEB, ref. b) for T3 and T4 traffic levels, as well as the PG-3 requirements for any traffic level.

- The use of CDW improves both dry and wet compression strengths. However, because the first increased more than the latter, the percentage of retained strength decreased, creating the fake appearance of being worst the mixes with CDW.
- Optimum water and bitumen contents, which produced the highest strengths, are higher when CDW are used but the obtained improvement is very significant. Thus, the wet strength of CDW mixes reached higher values than the dry strength of mixes with natural aggregates.
- Finally, it was also found that mixes with CDW show lower total strains at the axial compression collapse moment.

9.14 Conclusions according to the visco-elasto-plastic behavior of cold asphalt mixtures with CDW

9.14.1 Indirect tensile strength

Indirect tensile strength was studied, according to Standard UNE-EN 12697-23, for grave-emulsions with both sorts of aggregates. The main conclusions are:

- Mixtures with CDW show poorer strengths when the bitumen content is lower than 4% but better strengths for higher bitumen contents.
- The peak strength found for mixes with CDW was higher than the peak strength found with natural aggregates. However, the optimal initial contents (added during the mixing) were higher, as well (27% water and 6% bitumen against 3% water and 4% bitumen).

- Although with CDW the optimal (mixing) water content was 27% (value totally unfeasible in practical applications), keeping the bitumen content above 4% and reducing the water content up to 9%, it is still possible to obtain strengths with CDW higher than with natural aggregates.
- Finally, CDW mixes showed again lower total strains at the collapse moment.

9.14.2 Indirect tensile stiffness modulus (ITSM)

The stiffness was studied first according to the indirect tensile stiffness modulus (ITSM) (UNE-EN 12697-26, Annex C) at 2°C, 10°C and 20°C, in order to determine the influence of the temperature in the visco-elastic behavior of grave-emulsions. The results showed the following conclusions:

- At low temperatures (2°C and 10°C), mixes with CDW are stiffer than mixes with natural aggregates, only when the bitumen content is lower than 4%. At high temperatures (20°C) they are stiffer for every content.
- With optimum contents (understood in this case as those which obtained the highest results, despite not being necessarily the best), mixes with CDW reached great stiffness at 20°C (up to 4000 MPa), noticeably higher than those obtained with natural aggregates (up to 2500 MPa) but without reaching the stiffness of hot mix asphalt (5000-7000 MPa). Nevertheless, at 2°C, mixes with natural aggregates are stiffer (obtained values above 11000 MPa) than mixes with CDW (up to 8500 MPa). Therefore, CDW made grave-emulsions stiffer at high temperatures (what would help to control the permanent deformation) and more flexible at low temperatures (important to avoid fragile cracking).
- Moreover, the peak stiffness obtained with CDW resulted to be, in general, higher than those obtained by other authors, for cold asphalt mixes with

natural aggregates, except when those authors added important cement contents to the mix or applied long curing times.

- Over the curing time, it was observed how the ITSM increased proportionally to the bitumen content. This effect makes that, over the time, the optimal bitumen contents tend to get displaced towards higher values. Thus, this aspect should be taken into account for medium and long term designs.
- The ITSM of mixtures with both kinds of aggregates stop growing after the same curing time and the registered increases were very similar. Therefore, the source of aggregate did not affect these processes, although it must be said that at every moment, the stiffness of mixes with CDW were higher than those with natural aggregates.
- Finally, it must be taken into account that working with cold asphalt mixes, excessive stiffness can be a problem, especially for application like medium/low traffic roads with poor-quality subgrades. Because of it, the high peak ITSM reached by CDW mixes (4000 MPa at 20°C) must be understood as a potential value, higher than any value that natural aggregates mixtures could give, and obtainable in case it is necessary for particular water and bitumen contents. In case this value resulted too high, it could be reduced by shortening both contents, saving at the same time, ecological and economic costs.

9.14.3 Dynamic modulus $|E^*|$

The stiffness and the visco-elastic behavior were also studied by obtaining the master curves from the dynamic cyclic test AASHTO TP 62-07 at different temperatures and frequencies, with the modification of having applied the loads diametrically, instead of axially.

- Apart from confirm all of the obtained conclusions from the ITSM tests, the results obtained with this highlighted the visco-elastic behavior characteristic of this kind of mixture, with a noticeable influence of temperature and loads frequency.
- The grave-emulsions with CDW, resulted again stiffer than those made with natural aggregates at high temperatures and more flexible at low temperatures (flatter master curves), what makes them less temperature-sensitive. This also suggests a less marked elasto-plastic behavior, as well as a greater resistance to permanent deformations at high temperatures and fragile cracking at low temperatures.
- However, these advantages were obtained again at the expense of rising both water and bitumen contents.

9.14.4 Resistance to permanent deformation. Uniaxial test

The resistance to permanent deformation and the visco-elasto-plastic behavior were studied by means of the repeated load axial test (RLAT), according to the Standard BSi DD 226:1996, using the same samples tested for the obtainment of ITSM, once they reached full curing condition. The main conclusions are:

- Grave-emulsions with CDW showed lower permanent axial strain during the densification produced over the first load cycles.
- The final strain (after 5000 load cycles) was similar for mixes with both sorts of aggregate.
- The slope of the line tangent to the creep curve in the secondary stage is lower for mixes with CDW, what indicates a slower development of strain.
- The intersection point of the tangent line and the vertical axis (“a” point) is higher for mixes with CDW. Despite this might indicate a poorer behavior,

it is actually due to having a final strain similar to mixtures with natural aggregates and a lower slope of the tangent line.

- With optimum water and bitumen contents, all the parameters before mentioned, were better for grave-emulsions with CDW. However, these optimum contents were higher again for this kind of mixture (residual bitumen between 5%-8% for CDW and 4% for natural aggregate).

9.15 Conclusions according to the non-linear elastic behavior of cold asphalt mixtures with CDW

According to the hypothesis of Jenkins et al. (2007) and Ebels (2008), the non-linear elastic behavior of cold asphalt mixtures gets more marked during the earlier curing stages, being more similar to an unbound granular material than to hot mix asphalt. In order to analyze this effect, triaxial dynamic tests were carried out. Furthermore, these tests were repeated with non-cured samples.

9.15.1 Resilient modulus

First of all, the results of resilient modulus obtained with the triaxial dynamic test (UNE-EN 13286-7), show clear dependency on the applied stress level, what highlights the non-linear elastic response of these mixes. This behavior, together with the visco-elasto-plastic observed in previous tests (dependency on the temperature and load frequency) is consistence with the hypothesis of Jenkins et al. (2007), obtaining a material which shares, at the same time, properties of hot mix asphalt and unbound granular materials.

Three predicting models were fitted to the experimental data (Hicks, Uzan and NCHRP). Uzan's model and NCHRP model obtained very similar results and better fitting than Hicks' model.

Grave-emulsions with CDW provide resilient modulus lower than mixes with natural aggregates. Hence, and although both depended on the applied stress level, the model curves of the first are placed, in general, lower than those of the latter.

It was checked the little influence of binder content on the behavior of still fresh grave-emulsions (without having been subjected to any kind of curing). At this point, mixes behaved practically the same, independently on water and bitumen contents. Even so, grave-emulsions with natural aggregates showed greater stiffness, probably due to their stronger mineral skeleton.

Mixing water and bitumen contents with which the highest modulus were founded, were greater when CDW were used (7% bitumen and 9% water against 4% bitumen and 3% water). Nevertheless, and as it was previously explained, cold asphalt mixtures are not necessary better when they are stiffer, so lower contents might be used.

9.15.2 Mohr-Coulomb failure envelope

Mohr-Coulomb failure envelopes were obtained by means of triaxial tests with increasing loading ramp until reached the failure of the samples, under different confining conditions. From these, they were obtained, not only the different failure stress for each mix, but also other parameters, such as the cohesion and the internal friction angle. The main conclusions are:

- Right after their manufacture, grave-emulsions with CDW have lower cohesion than those with natural aggregates, but once a certain curing process occurs, the cohesion strongly increases even getting over mixes with natural aggregates.
- The angle of internal friction is greater in samples with natural aggregate, both before and after curing, being always between 40° and 45°.

- The failure stress reached for mixes with CDW, right after their manufacture, are 20% lower than with natural aggregate, but they get noticeably similar after curing processes.

Because all these points, and although after the curing processes the characteristics of mixes with both sorts of aggregates are similar, the use of CDW is detrimental during the earlier curing stages.

9.15.3 Resistance to permanent deformation. Triaxial test

In this case, the resistance to permanent deformation was analyzed through dynamic triaxial tests and constant confining conditions, according to the unbound materials Standard UNE-EN 13286-7. All the tests were repeated with different axial stress levels. Besides the cumulative strain, the resilient modulus was also registered for each load cycle. Finally, Huerfano's model was fitted to the obtained data. The main conclusions are:

- Grave-emulsions with CDW need greater stresses to reach the tertiary creep stage. This fact was observed for both cured and non-cured mixes.
- The critical Stress Ratio was also greater for grave-emulsions with CDW, both before and after curing processes (50% and 40% for mixes with CDW and 40% and 30% for mixes with natural aggregate).
- Huerfano's curves showed that cumulative permanent strain over loading cycles are lower for mixes with CDW. Therefore, this kind of aggregate also improves the resistance to permanent deformation.
- The resilient modulus strongly increases during the densification produced over the first loading cycles. After a certain number of cycles, the values get stabilized and remain practically constant until the end of the test. In case the grave-emulsions reach the tertiary creep stage, it is observable that resilient modulus falls again.

- In general, these moduli increase with the selected Stress Ratio during the test, highlighting again, the non-linear elastic behavior of this kind of mixtures.

9.16 Conclusions according to the mix design

The design of grave-emulsions with CDW is more difficult than with natural aggregates. While the latter behaved in a very homogenous way regarding most of the tests carried out (practically always the best mix was the one with 3% mixing water and 4% residual bitumen), mixtures with CDW showed different optimal contents depending on the regarded property.

In principle, and taking into account the previous considerations from a global point of view, it could be said that grave-emulsions with CDW behave better than mixes with natural aggregates, when the residual bitumen content is greater than 4%. The proposed mix could be the one with 9% water content and around 6%-7% residual bitumen. The results obtained with this mix are better than those obtained with natural aggregates, regarding properties, such as uniaxial compression strength, indirect tensile strength, stiffness (stiffer at high temperatures and more flexible at low temperatures) and resistance to permanent deformation.

However, for grave-emulsions with CDW, it was seen that choosing a mix with stiffness lower than the maximum stiffness, would help to reduce permanent deformation. At the same time, these mixes would not be so stiff, avoiding fragile cracking at low temperatures. Reducing the bitumen content to 5%, uniaxial tests tend to give better results but the results of triaxial tests tend to be worse. Other properties, such as resistance to water damage and stiffness at 20°C also get better. Because of all this, it might be a good solution for wet and mild weather (for example in Galicia, Spain) but being necessary to let the mix reach a minimum curing level.

The fact of needing higher bitumen contents, presents for grave-emulsions with CDW, an ecological and economic disadvantage. However, as it was explained, they are also less dense. Therefore, for the construction of the same unitary length of road, it is

needed a smallest quantity (in weight) of mixture. Making the corresponding calculations, it was found that using a grave-emulsion with CDW and 6% bitumen content, it would be needed 20.2% more bitumen, while using a grave-emulsion with 5% bitumen content, this extra amount of residual binder would be reduced to 1.1%.

Besides, it was seen that over curing processes, the bitumen contents with peak stiffness can be found, tend to increase. Thus, it would be advisable to design the mix with low contents, saving, at the same time, ecological and economic costs and obtaining good long-term properties. Therefore, it is recommended, as long as it is possible, to use the mix with 5% residual bitumen content.

The water content did not affect the results in a significant way. Although from a point of view purely investigative, it was necessary to reach very high mixing water contents (close to 30%) to allow the mixes develop all their potential, with 9% content (much more practical) properties are still more than satisfactory. Lower contents are not advisable when using CDW, since they could produce the premature setting of the emulsion, creating clots during the mixing and resulting in an incomplete coating of the aggregates.

Finally, it must be highlighted that the optimum water contents did not much those deducted from the Modified Proctor test (6% for natural aggregate and 12% for CDW). Moreover, it must be taken into account that these are values of residual water. Thus, the initial mixing water should be even greater. Due to this, it is concluded in this case, that traditional methods would not be suitable to design this kind of mixtures.

9.17 Recommendations

The following recommendations are proposed for the use of CDW as aggregates in cold asphalt mixtures, grave-emulsion type:

- Carry out an exhaustive characterization of the recycled aggregates, since their source can drastically affect their properties.

- Select aggregate gradations with low quantities of fine particles, since after mixing and compaction operation, these fractions tend to considerably increase.
- Use cationic slow-setting asphalt emulsions, what will enhance the aggregate-binder affinity and will avoid the premature setting of the emulsion.
- Take into account the presented conclusions about the mix design, in order to obtain materials as ecological and economical as possible, while keeping suitable properties for the project to be done.
- Use grave-emulsions with CDW in low/medium traffic roads with poor-quality subgrade.
- Use grave-emulsions in base layers, where the high resistance to polishing of aggregates is not necessary but it is their structural behavior.
- Apply heavy compaction which allows the drainage of the most part of mixing water, since to avoid the premature setting of the asphalt emulsion, it is necessary to add greater amounts of mixing water.
- Let the mixture develop, as long as possible, the curing processes before the opening to road traffic.
- For laboratory tests, due to the high heterogeneity of the results, use at least 5 samples for mixes with CDW. 3 samples for mixes with natural aggregates were in general enough.
- For laboratory tests, use for different tests samples with identical intrinsic properties, following protocols like the one proposed in this investigation.

- Elaborate technical documents to regulate the utilization of recycled aggregates in cold asphalt mixtures with minimum criteria for safety and functionality.

9.18 Future lines of research

Possible future lines of research are proposed as follows:

- Extend the laboratory tests carried out. Especially, more water and bitumen contents could be tested under triaxial conditions, since for the present research, only representative mixtures could be analyzed.
- Study other properties of cold asphalt mixtures not included in this investigation, such as resistance to fatigue, toughness, resistance to permanent deformation according to the wheel tracking test or stiffness in terms of the 4-point bending test.
- Study the applicability of CDW in other types of cold asphalt mixtures, such as open-graded mixtures.
- Study the applicability of CDW in cold asphalt mixtures manufacturing plants, analyzing all the difficulties which could arise from the processes of production, transport, supply chain of recycled aggregates, etc.
- Carry out deeper analysis of the ecological and economical improvements obtained from the use of CDW in cold asphalt mixtures, by means of tools, such as Life Cycle Assessment (LCA).
- Make numerical models in order to determine the stress-strain state of a pavement made with the materials here studied, as well as the minimum thickness necessary for each of the layers. For that, the parameters obtained through the present investigation can be used.

- Construct trial stretches with the proposed designs and with the layer thickness calculated with numerical models, in order to observe in situ the behavior of these mixes under real field conditions.

CAPÍTULO 10

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10.1 Referencias bibliográficas

- [1] AASHTO TP 62-07. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures. STANDARD by American Association of State and Highway Transportation Officials, 08/01/2007
- [2] ACHE - Comision 2. Grupo de Trabajo 2/5 (2006). *Monografía M-11 Utilizacion de arido reciclado para la fabricacion de hormigon estructural*. ACHE. Madrid, España
- [3] Airey GD, Collop AC, Thom NH (2004). *Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates*. Proceedings of the Eighth Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. South Africa: Sun City
- [4] Airey GD, Rahman M, Collop A (2003). *Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method*. International Journal of Pavement Engineering 4, 105-119
- [5] Airey GD, Singleton TM, Collop AC (2002). *Properties of polymer modified bitumen after rubber-bitumen interaction*. Journal of Materials in Civil Engineering 14, 244-354
- [6] Akbulut H, Güreş C (2007). *Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements*. Building and Environment 42, 1921-1939
- [7] Al Nageim H, Al-Busaltan AF, Atherton W, Sharples G (2012). *A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials*. Construction and Building Materials 36, 743-748
- [8] Alaejos Gutiérrez P, Calvo Calzada B (2010). *Construcción sostenible. Primeras experiencias en España*. Publicación Cátedra Mariano López Navarro-Universidad de Zaragoza. ISBN 978-84-936583-6-6

- [9] ALT-MAT European Project (2000). *Report No. WP6.TRL.001*. Transport Research Laboratory (TRL), Crowthorne, UK
- [10] Al-Busaltan S, Al Naheim H, Atherton W, Sharples G (2012). *Green bituminous asphalt relevant for highway and airfield pavement*. Construction and Building Materials 31, 243-250
- [11] Al-Busaltan S, Al Naheim H, Atherton W, Sharples G (2012). *Mechanical properties of an upgrading cold-mix asphalt using waste materials*. Journal of Materials in Civil Engineering 24, 1484-1491
- [12] Al-Hdabi A, Al Nageim H, Ruddock F, Seton L (2013). *A novel Cold Rolled Asphalt mixtures for heavy trafficked surface course*. Construction and Building Materials 49, 598-603
- [13] Al-Hdabi A, Al Nageim H, Ruddock F, Seton L (2014). *Laboratory studies to investigate the properties of novel cold-rolled asphalt containing cement and waste bottom ash*. Road Materials and Pavement Design 15(1), 78-89
- [14] Al-Hdabi A, Al Nageim H, Seton L (2014). *Performance of gap graded cold asphalt containing cement treated filler*. Construction and Building Materials 69, 362-369
- [15] Apotheker S (1990). *Construction and demolition debris - The invisible waste stream*. Resource Recycling 9, 66-74
- [16] Arm M (2001). *Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests*. Waste management 21, 235-239
- [17] Arulrajah A, Ali MMY, Disfani MM, Horpibulsuk S (2014). *Recycled-glass blends in pavement base/subbase applications: laboratory and field evaluation*. Journal of Materials in Civil Engineering 26, 1-12
- [18] Arulrajah A, Disfani MM, Horpibulsuk S, Suksiripattanapong C, Prongmanee N (2014). *Physical properties and shear strength responses of recycled*

- construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications*. Construction and Building Materials 58, 245-257
- [19] Arulrajah A, Piratheepan J, Disfani MM, Bo MW (2013). *Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase Applications*. Journal of Materials in Civil Engineering 25, 1077-1088
- [20] AS 2891.12.1-1995. *Methods of sampling and testing asphalt - Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt - Dynamic creep test*. STANDARD by Standards Australia, 01/01/1995
- [21] Asphalt Academy (2009). *Bitumen stabilised materials: A guideline for the design and construction of bitumen and foamed bitumen stabilised materials*. Second edition. Asphalt Academy. Pretoria (Sudáfrica)
- [22] Asphalt Institute (1997). *Asphalt Cold Mix Manual. Manual Series No. 14 (MS.14)*. Third edition. USA
- [23] Asphalt Institute (2003). *Performance Graded Asphalt. Binder Specification and Testing. Superpave Series No. 1 (SP-1)*. Third edition. USA
- [24] Asphalt Institute (1995). *Superpave level 1 mix design. Superpave series no. 2 (SP-2)*, USA
- [25] Asphalt Institute (1996). *Superpave Mix Design. Superpave Series No. 2 (SP-2)*. USA
- [26] Asphalt Institute (2007). *The Asphalt Handbook. MS-4*. 7th Edition, Second Printing. USA
- [27] ASTM D3625/D3625M-12. *Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water*. STANDARD by ASTM International, 06/01/2012.
- [28] ASTM D4123-82(1995). *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures (Withdrawn 2003)*. STANDARD by ASTM International, 01/01/1995.

- [29] ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas) (a). *Grava-emulsión*. Monografía
- [30] ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas) (b). *Grava-emulsión*. Pliego Técnico
- [31] ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas) (c). *Las emulsiones de betún, su química-física*. Pliego Técnico
- [32] ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas) (d). *Mezclas abiertas en frío*. Pliego Técnico
- [33] ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas) (e). *Reciclado en frío con emulsión*. Pliego Técnico
- [34] Azizian MF, Nelson PO, Thayumanavan P, Williamson KJ (2003). *Environmental impacts of highway construction and repair materials on surface and ground waters: case study: crumb rubber asphalt concrete*. Waste Manage 23, 719–728
- [35] Bagampadde U, Wahhab HIA-A, Aiban SA (1999). *Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arab*. Journal of Materials in Civil Engineering, 11(1), 30–35
- [36] Barksdale RD (1972). *Laboratory evaluation of rutting in base course materials*. 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. London, England
- [37] Barksdale RD (1991). *The Aggregate Handbook*. National Stone Association. Washington DC, USA
- [38] Behera M, Bhattacharyya SK, Minocha AK, Deoliya R, Maiti S (2014). *Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review*. Construction and Building Materials 68, 501-516
- [39] Bell N (1998). *Waste minimization and resource recovery. The environmental design guide, Gen 21, vol. 2*. Royal Australian Institute of Architects. Canberra

- [40] Bennert T, Papp Jr WJ, Mather A, Gucunski N (2000). *Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading base and subbase applications*. Transportation Research Record 1714, 33-39
- [41] Bertollo SM, Bernucci LB, Fernandes JL (2004). *Mechanical properties of asphalt mixtures using recycled tire rubber produced in Brazil—a laboratory evaluation*. Proceedings of the TRB Annual Meeting. Washington DC, USA
- [42] Bhusal S, Wen H (2013). *Evaluating recycled concrete aggregate as hot mix asphalt aggregate*. Advances in Civil Engineering Materials 2(1), 262-265
- [43] Bossink BAG, Brouwers HJH (1996). *Construction waste: quantification and source evaluation*. Journal of Construction Engineering and Management 122(1), 55-60
- [44] Boyce HR (1980). *A non-linear model for the elastic behavior of granular materials under repeated loading*. International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, 280-294. Swansea, UK
- [45] Brecolotti M, Materazzi AL (2010). *Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete*. Engineering Structures 32, 3704-3712
- [46] Brodersen J, Juul J, Jacobsen H (2002). *Review of selected waste streams: Sewage sludge, construction and demolition waste, waste oils, waste from coal-fired power plants and biodegradable municipal waste*. European Topic Centre on Waste, Project manager: Dimitros Tsotsos. European Environment Agency
- [47] Brown SF, Hyde AFL (1975). *Significance of cyclic confining stress in repeated-load triaxial testing of granular material*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 537, 49-58. Washington DC, USA
- [48] Brown ER, Kandhal PS, Zhang J (2001). *Performance testing for hot mix asphalt*. NCAT Report, 01-05

- [49] BSi. Draft for Development DD 226:1996. *Method for determining resistance to permanent deformations of bituminous mixtures subject to unconfined dynamic loading*. STANDARD by British Standards Institution. 1996
- [50] Calvo N, Varela-Candamio L, Novo-Corti I (2014). *A dynamic model for construction and demolition (C&D) waste management in Spain: driving policies based on economic incentives and tax penalties*. Sustainability 6, 416-435
- [51] CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) (2010). *Catálogo de residuos. Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*. Disponible en la web: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx>. Última visita Febrero 2015.
- [52] CTRE (Center for Transportation Research and Education) (2005). *Evaluation of hot mix asphalt moisture sensitivity using the Nottingham asphalt test equipment. Final Report*. Iowa State University. Ames, Iowa (USA)
- [53] Chávez-Valencia LE, Alonso E, Manzano A, Pérez J, Contreras ME, Signoret C (2007). *Improving the compressive strengths of cold-mix asphalt using asphalt emulsion modified by polyvinyl acetate*. Construction and Building Materials 21 583-589
- [54] Chen MZ, Lin JT, Wu SP. (2011). *Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture*. Construction and Building Materials 25, 3909-3914
- [55] Chen MZ, Lin JT, Wu SP, Liu CH (2011). *Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture*. Construction and Building Materials 25, 1532-1536
- [56] Cochran KM, Townsend TG (2010). *Estimating construction and demolition debris generation using a materials flow analysis approach*. Waste Management 30, 2247-2254

- [57] Comunidad Autónoma de Madrid (2009). *Orden 2726/2009, de 16 de julio, por la que se regula la gestión de los residuos de construcción y demolición en la Comunidad de Madrid*. BOCM, No 186, 4–12, 7 de Agosto (2009)
- [58] Cross SA, Abou-Zeid MN, Wojerkowski JB, Fager GA (1996). *Long-term performance of recycled Portland cement concrete pavement*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1525, 115-123
- [59] CWC (1996). *Best practice in glass recycling-recycled glass in asphalt*. Clean Washington Centre. USA
- [60] Dal Ben M, Jenkins KJ (2014). *Performance of cold recycling materials with foamed bitumen and increasing percentage of reclaimed asphalt pavement*. Road Materials and Pavement Design 15(2), 348-371
- [61] Decreto 54/2008, de 17 de julio, por el que se aprueba el Plan Regional de Ámbito Sectorial de Residuos de la Construcción y Demolición de Castilla y León. BOCYL, suplemento al no 141, 1-128, 23 de julio (2008).
- [62] Del Rio M, Izquierdo P, Salto I, Cruz JS (2010). *La regulación jurídica de los residuos de construcción demolición (RCD) en España. El caso de la Comunidad de Madrid*. Informes de la Construcción 62(517), 81-86
- [63] DETR (Department of the Environment, Transport and the Regions) (2000). *Building a Better Quality of Life – A Strategy for More Sustainable Construction*. DETR. London, UK
- [64] Ding T, Xiao J (2014). *Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai*. Waste Management 34, 2327-2334
- [65] Disfani MM, Arulrajah A, Bo MW, Hankour R (2011). *Recycled crushed glass in road work applications*. Waste Management. 31, 2341-2351
- [66] Dondi G, Tataranni P, Pettinari M, Sangiorgi C, Simone A, Vignali V (2014). *Crumb Rubber in cold recycled bituminous mixes: Comparison between traditional crumb rubber and cryogenic crumb rubber*. Construction and Building Materials 68, 370-375

- [67] Dong SS, Tong KW, Wu YP (2001). *Municipal solid waste management in China: using commercial management to solve a growing problem*. Utilities Policy 10, 7-11
- [68] Doyle TA, McNally C, Gibney A, Tabakovic A (2013). *Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials*. Construction and Building Materials 38, 524-529
- [69] Duran X, Lenihan H, O'Regan B (2006). *A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling – the case of Ireland*. Resources, Conservation and Recycling 46(3), 302–320
- [70] Ebels LJ (2008). *Characterisation of material properties and behavior of cold bituminous mixtures for road pavements*. Doctoral Dissertation. Stellenbosh University. South Africa
- [71] EHE-08 (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. BOE, No. 203, Suplemento (2008), 1-304. Ministerio de Fomento. Madrid, España
- [72] Ellis C, Zhao B, Barnes J, Jones N (2004). *Properties of GGBS-Bitumen Emulsion Systems with Recycled Aggregates*. Road Materials and Pavement Design 5, 373-383
- [73] EPA (1999). *EPA annual report on disposal of solid and liquid wastes*. Taiwan
- [74] Ergun M, Iyınam S, Iyınam AF (2005). *Flexural behavior of waste plastic added asphalt concrete mixture*. Proceedings of the International Symposium on Pavement Recycling. Sao Paulo, Brazil
- [75] Esin T, Cosgun N, (2007). *A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey*. Building and Environment 42(4), 1667–1674
- [76] Etxeberria M, Mari AR, Vazquez E (2007). *Recycled aggregate concrete as structural material*. Materials and Structures 40, 529-541
- [77] FCEIA (Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura) (2006). *Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas*. Reporte Técnico RT-ID-06/02. Rosario, Argentina

- [78] Fang X, García A, Winnefeld F, Partl MN, Lura P (2015). *Impact of rapid-hardening cements on mechanical properties of cement bitumen emulsion asphalt*. Materials and Structures
- [79] Fernández del Campo JA (1983). *Pavimentos Bituminosos en Frío*. Editores Técnicos Asociados, S.A. Madrid, España
- [80] Ferrotti G, Pasquini E, Canestrari F (2014). *Experimental characterization of high-performance fiber-reinforced cold mix asphalt mixtures*. Construction and Building Materials 57, 117-125
- [81] FHWA (Federal Highway Administration) (1997). *User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction*. USA
- [82] FHWA (Federal Highway Administration) (2004). *Transportation applications of recycled concrete aggregate*. USA
- [83] Francken L (1977). *Permanent deformation law of bituminous road mixes in repeated triaxial compression*. 4th International Conference on the Structural Design of asphalt Pavements. Ann Arbor, Michigan, USA
- [84] GERD (Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición) (2010). *Control de los Residuos de Construcción y Demolición, RCD, en los Ayuntamientos*. GERD. Madrid, España
- [85] Geiger BJ (2010). *The effects of using alkali-silica reaction affected recycled concrete aggregate in hot mix asphalt*. Doctoral Dissertation, A&M University, Texas, USA
- [86] Gokce A, Nagataki S, Saeki T, Hisada M (2011). *Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete*. Construction and Building Materials 25, 2426-2431
- [87] Gómez-Soberón JMV (2002). *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study*. Cement and Concrete Research 32, 1301-1311

- [88] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F (2008). *Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties.* Building Environment 43, 429-437
- [89] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F (2007). *Shear strength of recycled concrete beams.* Construction and Building Materials 21, 887-893
- [90] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F, Martínez-Lage I, Eiras-López J (2009). *Structural shear behaviour of recycled concrete with silica fume.* Construction and Building Materials 23, 3406-3410
- [91] Gul WA. (2008). *Effect of recycled cement concrete content on rutting behavior of asphalt concrete.* Doctoral Dissertation. Middle East Technical University. Ankara (Turkey)
- [92] Guo M, Tan Y, Zhou S (2014). *Multiscale test research on interfacial adhesion property of cold mix asphalt.* Construction and Building Materials 68, 769-776
- [93] Hansen TC (1992). *Recycling of demolished concrete and masonry.* Report of Technical Committee 37-Drc Demolition and Reuse of Concrete (RILEM Report No 6), Spoon E&FN, UK
- [94] Hao JL, Hills MJ, Shen LY (2008). *Managing construction waste on-site through system dynamics modelling: the case of Hong Kong.* Engineering, Construction and Architectural Management 15(2), 103–113
- [95] Haynes JH Yoder EJ (1962). *Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials.* Highway Research Record: Journal of the Highway Research Board 39. Washington, USA
- [96] Hicks RG (1970). *Factors influencing the resilient response of granular materials.* Doctoral Dissertation. University of California. Berkeley (USA)
- [97] Hicks RG (2002). *Asphalt rubber design and construction guidelines – volume 1 – design guidelines.* Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRATC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA

- [98] Hong Kong EPD (Environment Protection Department) (2007). *Monitoring of Solid Waste in Hong Kong*. Disponible en la web: <https://www.wastereduction.gov.hk/en/index.htm>. Última visita Febrero 2015
- [99] Hossain M, Swartz S, Hoque E (1999). *Fracture and tensile characteristics of asphalt-rubber concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering 11, 287–294
- [100] Huang WL, Lin DH, Chang NB, Lin KS (2002). *Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process*. Resources, Conservation & Recycling 37, 23-37
- [101] Huang YH, Bird RN, Heidrich O (2007). *A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements*. Resources, Conservation & Recycling 52, 58-73
- [102] Hugener M, Partl MN, Morant M (2014). *Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators*. Road Materials and Pavement Design 15(2), 239-258
- [103] Huurman H (1997). *Permanent deformation in concrete block pavements*. Doctoral Dissertation. Delft University of Technology. The Netherlands
- [104] IIPNRCD (II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición), 2007–2015. Anexo 6 del Borrador del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR). Ministerio de medio Ambiente.
- [105] ITeC (Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña) (2000). Situación actual y perspectivas de futuro de los residuos de la construcción, 41 p. ITeC, Cataluna (España)
- [106] Ishai I, Nesichi S (1988). *Laboratory evaluation of moisture damage to bituminous paving mixtures by long-term hot immersion*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1171. Washington DC, USA

- [107] Issa R, Zaman MM, Miller GA, Senkowski LJ (2001). *Characteristics of cold processed asphalt millings and cement emulsion mix*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1767. Washington DC, USA
- [108] Iwanski M, Chomicz-Kowalska A (2013). *Laboratory study on mechanical parameters of foamed bitumen mixtures in the cold recycling technology*. Procedia Engineering 57, 433-442
- [109] Jaillon L, Poon CS, Chiang YH (2009). *Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong*. Waste Management 29(1), 309–320
- [110] Jayakody S, Gallage C, Kumar A (2014). *Assessment of recycled concrete aggregates as a pavement material*. Geomechanics and Engineering 6(3), 235-248
- [111] Jenkins KH (2000). *Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen*. Doctoral Dissertation. University of Stellenbosh, South Africa
- [112] Jenkins KH, Long FM, Ebels LJ (2007). *Foamed bitumen mixes= shear performance?* International Journal of Pavement Engineering 8(2), 85–98
- [113] Jenkins KH, Yu M (2009). *Cold-recycling techniques using bitumen stabilization: Where is this technology going?* ASCE Geotechnical Special Publication. p. 191–200
- [114] Jiménez JR, Agrela F, Ayuso J, López M (2011). *A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base*. Materiales de Construcción 61, 289-302
- [115] Jouve P, Elhannani M (1994). *Application des modèles non-linéaires au calcul des chaussées souples*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 190. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris

- [116] Justo CEG, Veeraragavan A (2002). *Utilisation of waste plastic bags in bituminous mix for improved performance of roads*. India: Centre for Transportation Engineering, Bangalore University
- [117] Kartam N, Al-Mutairi N, Al-Ghusain I, Al-Humoud J (2004). *Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait*. Waste Management 24(10), 1049–1059
- [118] Kawano H (2003). *The state of using by-products in concrete in Japan and outline of JIS/TR on recycled concrete using recycled aggregate*. Proceedings of the 1st FIB congress, pp. 245–253. Osaka, Japan
- [119] Kekwick SV (2005). *Best practice. Bitumen emulsion and foamed bitumen materials laboratory processing*. Proceedings of the 24th Southern African transport conference, SATC. South Africa
- [120] Kennedy TW, Roberts FL, Lee KW (1982). *Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Using the Texas Freeze-Thaw Pedestal Test*. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists 53
- [121] Khalid HA, Artamendi I (2006). *Post-consumer tyre rubber as a performance-enhancing additive in asphalt*. Asphalt Professional 16, 11-16
- [122] Khalid HA, Monney OK (2009). *Moisture damage potential of cold asphalt*. International Journal of Pavement Engineering 10(5), 311-318
- [123] Khan MI, Wahhab HIA-A (1998). *Improving slurry seal performance in eastern Saudi Arabia using steel slag*. Construction and Building Materials 12, 195–201
- [124] Khandal PS, Chakraborty S (1996). *Evaluation of voids in the mineral aggregate for HMA paving mixtures*. NCAT Report 96-104
- [125] Kuhn EA, Papagiannakis AT, Loge FJ (2005). *Preliminary analysis of the impact of cold mix asphalt concretes on air and water quality*. Environmental Contamination and Toxicology 74, 501-508

- [126] Kiggundu BM y Roberts FL (1988). *Stripping in HMA mixtures: state-of-the-art and critical review of test methods*. NCAT Report 88-02
- [127] Kim Y, Im S, Lee HD (2011). *Impacts of curing time and moisture content on engineering properties of cold in-place recycling mixtures using foamed or emulsified asphalt*. Journal of Materials in Civil Engineering 23(5), 542-553
- [128] Kim W, Labuz JF (2007). *Resilient modulus and strength of base course with recycled bituminous material*. Technical report. University of Minnesota
- [129] Kim Y, Lee HD, Heitzman M (2009). *Dynamic modulus and repeated load tests of cold in-place recycling mixtures using foamed asphalt*. Journal of Materials in Civil Engineering 21(6), 279-285
- [130] Kim Y, Lee HD (2012). *Performance evaluation of cold in-place recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus, flow number, flow time, and raveling loss*. KSCE Journal of Civil Engineering 16(4), 586-593
- [131] Kim O-K, Bell CA, Hicks RG (1985). *The effect of moisture on the performance of asphalt mixtures*. American Society for Testing and Materials 899, 51-72
- [132] Kofoworola OF, Gheewala SH (2009). *Estimation of construction waste generation and management in Thailand*. Waste Management 29(2), 731-738
- [133] Kong D, Hu H, Ni T, Liu C (2010). *Effect of heating & mixing on properties of recycled aggregate and asphalt mixtures prepared with*. 2nd International Conference on Waste Engineering and Management – ICWEM, 173-180
- [134] Kraemer C, Pardillo JM, Rocci S, Romana MG, Blanco VS, del Val MA (2004). *Ingeniería de Carreteras*. Volumen II. McGraw Hill
- [135] Kuhn EA, Papagiannakis AT, Loge FJ (2005). *Preliminary of the impact of cold mix asphalt concretes on air and water quality*. Environmental Contamination and Toxicology 74, 501-508

- [136] Lambe TW, Whitman RV (1991). *Mecánica de suelos*. Editorial Limusa. México. 582 pp.
- [137] Lee DY (1973). *Asphalt Durability Correlation in Iowa*. HRB, Highway Research Record 468, 43-60
- [138] Lee H, Kim Y, Han B (2009). *Laboratory performance evaluation of CIR-emulsion and its comparison against CIR-foam test results from phase II. Final report TR-578 Phase III*. University of Iowa
- [139] Leite Brasileiro L, Cavalcanti da Silva Filho E, Ramos da Costa Filho JA, de Abreu Vieira P, Elias de Matos J (2014). *Analysis of the properties of asphaltic concrete using recycled aggregates of CDW*. Materials Science Forum 613, 775-776
- [140] Lekarp F, Isacsson U, Dawson A (2000). *State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates*. Journal of Transportation Engineering 126(1), 66-75
- [141] Li J (2004). *Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete*. Master thesis. Tongji University, Shanghai, China
- [142] Li X (2008). *Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material Behaviour of recycled aggregate concrete*. Resources, Conservation and Recycling 53, 36-44
- [143] Limbachiya M, Meddah MS, Ouchagour Y (2012). *Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete*. Construction and Building Materials 27, 439-449
- [144] Ling YY, Leo KC (2000). *Reusing timber formwork: importance of workmen's efficiency and attitude*. Building and Environment 35(2), 135-143
- [145] Ling C, Moraes R, Swiertz D, Bahia H (2003). *Measuring the influence of aggregate coating on the workability and moisture susceptibility of cold mix asphalt*. Proceedings of the TRB Annual Meeting. Washington DC, USA
- [146] Lingard H, Graham P, Smithers G (2000). *Employee perceptions of the solid waste management system operation in a large Australia contracting*

- organization: implications for company policy implementation. Construction Management and Economics* 18(4), 383–393
- [147] Lisi RD, Park JK, Stier JC (2004). *Mitigating nutrient leaching with a sub-surface drainage layer of granulated tires. Waste Manage* 24, 831–839
- [148] Loizos V, Papavasiliou V (2006). *Evaluation of foamed asphalt cold in-place pavement recycling using non-destructive techniques. Journal of Transportation Engineering-ASCE* 132, 970–988
- [149] Lotman RP (1982). *Laboratory test method for predicting moisture-induced damage to asphalt concrete, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 843
- [150] Lund HF (1996). *The McGraw-Hill recycling handbook. McGraw-Hill Inc. New York, USA*
- [151] Ma SB, Wang LJ and Zhang GQ (2012). *Laboratory study on cold-mixtures for asphalt pavement. Applied Mechanics and Materials* 178-181, 1361-1364
- [152] Maccarrone S (1994). *Cold asphalt systems as an alternative to hot mix. Proceedings of the 9th AAPA international Asphalt conference. Australia*
- [153] Mahmoud AFF, Bahia H (2004). *Using the gyratory compactor to measure the mechanical stability of asphalt mixtures. Wisconsin Highway Research Program. 95 pp. University of Wisconsin, USA*
- [154] Majidzadeh K, Brovold FN (1968). *Effect of Water on Bitumen – Aggregate Mixtures – State of the Art. Special HRB Report, No. 98. Highway Research Board. Washington DC, USA*
- [155] Mallick RB, El-Korchi T (2009). *Pavement Engineering, Principles and Practice. CRC Press. Taylor & Francis Group. 694 pp. Boca Raton, Florida, USA*
- [156] Martínez-Echevarría MJ, Miró R, Rubio MC, Menéndez A (2012). *In-laboratory compaction procedure for cold recycled mixes with bituminous emulsions. Construction and Building Materials* 36, 918-924

- [157] Martínez Lage I, Martínez Abella F, Vázquez C, Pérez JL (2010). *Estimation of the annual production and composition of C&D debris in Galicia (Spain)*. Waste Management 30, 636-645
- [158] Maupin GW (1997). *Final report – glasphalt test sections in Virginia*. Virginia Transportation Research Council. USA
- [159] Maupin GW (1998). *Effect of glass concentration on stripping of glasphalt*. Virginia Transportation research Council. USA
- [160] Maupin GW, Payne CW (1997). Evaluation of asphalt rubber stress-absorbing membrane. Virginia Transportation Research Council. USA
- [161] McGrath C, Anderson M, (2000). *Waste minimizing on a construction site*. Digest 447. Building Research Establishment. UK
- [162] McKeen RG (1999). *Relation of field cracking to layer stiffness of cold in situ recycled materials*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1684, 210-214
- [163] MDOT (Michigan Department of Transportation) (2011). Using recycled concrete in MDOT's transportation infrastructure-manual of practice. Final Report
- [164] Melbouci B (2009). *Compaction and shearing behavior study of recycled aggregates*. Construction and Building Materials 23, 2723-2730
- [165] Mills-Beale J, Fini E, Goh SW, Colbert B, Wang H, You Z (2010). *State of the art in sustainable asphalt pavement materials*. International Workshop on Energy and Environment in the Development of Sustainable Asphalt Pavements Proceedings 109-113
- [166] Mills-Beale J, You Z (2010). *The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates*. Construction and Building Materials 24, 230-235
- [167] Ministerio de Medio Ambiente (2002). *Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de*

- residuos y la lista europea de residuos*. BOE, No 43, 6494–6515, 19 de febrero (2002)
- [168] Ministerio de la Presidencia (2008). *Real Decreto RD 105/2008 de 1 de febrero por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición*. BOE, No 38 (2008), 7724-7730. Madrid, España
- [169] Miranda L (2008). *Comportamiento de las mezclas templadas en obra comparativa frente a una mezcla convencional*. VIII Congreso Nacional de Firmes. Asociación Española de la Carretera (AEC). Valladolid, España
- [170] Miró R, Pérez FE, Castillo S (2000). *Mixed recycling with emulsion and cement of asphalt pavements. Design procedure and improvements achieved*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 33, 324-330
- [171] Mroueh UM, Eskola P, Laine-Ylijoki J (2001). *Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction*. Waste Management 21, 271-277
- [172] Mulder E, de Jong TPR, Feenstra L (2007). *Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste*. Waste Management 27, 1408-1415
- [173] Murali Krishnan J, Rajagopal KR (2004). Thermodynamic framework for the constitutive modeling of asphalt concrete: Theory and applications. Journal of Materials in Civil Engineering 16(2), 155-166
- [174] NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Part 2, Design Inputs*. Final Report NCHRP 1-37A
- [175] Nazir R, Momeni E, Armaghni DJ, Amin MFM (2013). *Correlation between unconfined compressive strength and indirect tensile strength of limestone rock samples*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 18, 1737-1746

- [176] Needham D (1996). *Development in bitumen emulsion mixtures for roads*. Doctoral Dissertation, the University of Nottingham, UK
- [177] NLA (National Lime Association) (2006). Hydrated lime – A solution for high performance hot mix asphalt. Disponible en la web: <http://lime.org/publications/free-downloads/>. Última visita Febrero 2015
- [178] NLT (2002). *Normas NLT (2002). Ensayos de carreteras*. Dirección General de Carreteras. Segunda Edición. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid, España
- [179] ONU (Organización de las Naciones Unidas) – Comisión Brundtland (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro Futuro Común*. Disponible en la web: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>. Última visita Febrero 2015.
- [180] ONU (Organización de las Naciones Unidas) (1992). Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Disponible en la web: http://www.un.org/esa/dsd/agenda21_spanish/res_riodecl.shtml. Última visita Febrero 2015.
- [181] ONU (Organización de las Naciones Unidas) (2005). Documento Final de la Cumbre Mundial 2005. Disponible en la web: http://www.un.org/spanish/summit2005/fact_sheet.html. Última visita Febrero 2015.
- [182] Oregon DOT (2000). *Steel slag in hot mix asphalt concrete*. Final report. Oregon Department of Transportation. Salem, Oregon, USA
- [183] Oruc S, Celik F, Akpınar MV. (2007). *Effect of cement on emulsified asphalt mixtures*. Journal of Materials Engineering and Performance 16(5) 578-583
- [184] Osmani M, Glass J, Price ADF (2006). *Architect and Contractor Attitudes to Waste Minimisation*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management 159, 65–72

- [185] Ouchagour Y (2007). *Sustainability of recycled concrete aggregate for use in binary cement concrete*. Doctoral Dissertation, Kingston University London, UK
- [186] Ozsahin TS, Oruc S (2008). *Neural network model for resilient modulus of emulsified asphalt mixtures*. Construction and Building Materials 22, 1436-1445
- [187] Palit SK, Reddy KS, Pandey BB (2004). *Laboratory evaluation of crumb rubber modified asphalt mixes*. Journal of Materials in Civil Engineering 16, 45–53
- [188] Paranavithana S, Mohajerani A (2006). *Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete*. Resources Conservation & Recycling 48, 1-12
- [189] Park T (2003). *Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement*. Journal of Transportation Engineering 129(5), 558-563
- [190] Pasandín AR (2013). *Sensibilidad al agua y propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición*. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña
- [191] Pasandín AR, Pérez I (2013). *Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste*. Construction and Building Materials 43, 497-505
- [192] Pasandín AR, Pérez I (2014a). *Adhesion of Recycled Concrete Aggregates, Demolition Debris, and Asphalt*. Petroleum Science and Technology, 32, 2584–2591
- [193] Pasandín AR, Pérez I (2014b). *Effect of ageing time on properties of hot-mix asphalt containing recycled concrete aggregates*. Construction and Building Materials 52, 284-293

- [194] Pasandín AR, Pérez I (2014c). *Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion*. Construction and Building Materials 55, 350-358
- [195] Pasandín AR, Pérez I (2015). Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials 74, 151-161
- [196] Pasetto M, Baldo N (2011). *Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag*. Construction and Building Materials 25, 3458-3468
- [197] Peng CL, Scorpio DE, Kitbert CJ (1997). *Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations*. Construction Management and Economics 15(1), 49-58
- [198] Pennsylvania Department of Transportation (2003). Bituminous concrete mixtures, design, procedures, and specifications for special bituminous mixtures. Pub. 27. Change 5
- [199] Pepe M, Toledo Filho RD, Koenders EAB, Martinelli E (2014). *Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete*. Construction and Building Materials 69, 124-132
- [200] Pérez I, Gallego J, Toledano M, Taibo J (2010). *Asphalt mixtures with construction and demolition debris*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 163, 165-174
- [201] Pérez I, Medina L, del Val MA (2013). *Mechanical properties and behavior of in situ materials which are stabilized with bitumen emulsion*. Road Materials and Pavement Design 14(2), 221-238
- [202] Pérez F, Miró R, Martínez C (2003). *Proyecto PARAMIX. Investigación sobre reciclado de pavimentos*. Carreteras 4(130), 77-85
- [203] Pérez F, Miró R, Martínez C, Fernández M, Soto JA (2004). *Mix designs and performance of cold pavement recycling with emulsion in the PARAMIX-*

- PROJECT*. Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress. Vienna, Austria
- [204] Pérez I, Pasandín AR, Medina L (2012). *Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates*. *Materials and Design* 36, 849-846
- [205] Pérez I, Toledano M, Gallego J, Taibo J (2007). *Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris*. *Materiales de Construcción* 57(285), 17-29
- [206] PG-3/75 (1976). *Orden Ministerial de 6 de febrero de 1976, por la que se aprueba el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y puentes de la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales (PG-3/75)*. BOE del 7 de Julio de 1976. Ministerio de Fomento. Madrid, España
- [207] PG-3/75 (2004). *Orden/FOM/891 por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, relativos a firmes y pavimentos*. BOE, No. 83, 14446-14509. Ministerio de Fomento. Madrid, España
- [208] Ping XV, Xiao Y (2008). *Empirical correlation of indirect tension resilient modulus and complex modulus test results for asphalt concrete mixtures*. *Road Materials and Pavement Design* 9, sup1, 177-200
- [209] PNIR (2009). *Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaria de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el periodo 2008–2015*. BOE, No 49, 19893–20016. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Madrid, España
- [210] PNRCD (2001). *Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001–2006*. BOE, No 166. 25305-25313. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España

- [211] Poon CS (2007a). *Management of construction and demolition waste*. Waste Management 27, 159-160
- [212] Poon CS (2007b). *Reducing construction waste*. Waste Management 27(12), 1715– 1716
- [213] Poon CS, Chan D (2006). *Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base*. Construction and Building Materials 20, 578-585
- [214] Poon CS, Yu ATW, Ng LH (2003). *Comparison of low-waste building technologies adopted in public and private housing projects in Hong Kong*. Engineering, Construction and Architectural Management 10(2), 88–98
- [215] Qadir A, Imam M (2005). *Use of recycled plastic waste aggregate as a partial substitution material in pavement structure*. Proceedings of the International Symposium on Pavement Recycling
- [216] Rafi MM, Qadir A, Ali S, Siddiqui SH (2014). *Performance of Hot Mix Asphalt Mixtures Made of Recycled Aggregates*. Journal of Testing and Evaluation 42(2)
- [217] Rahal K (2007). *Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate*. Building Environment 42, 407-415
- [218] Rakshvir S, Barai SV (2006) *Studies on recycled aggregates-bases concrete*. Waste Management and Research 24(3), 225-233
- [219] Reyes F, Reyes O, Figueroa AS (2005). *Study of the rutting in asphalt mixtures by addition of plastic waste*. Proceedings of the International Symposium on Pavement Recycling. 11 pp. Sao Paulo, Brazil
- [220] Ruiz MP, Acevedo P, Puello J (2014). *Evaluation of the Environmental Impact of a Dense Graded Hot Mix Asphalt (HMA)*. Chemical Engineering Transactions 36, 229-234

- [221] Sánchez de Juan M, Alaejos Gutiérrez P (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycle concrete aggregate. *Construction and Building Materials* 23, 872-877
- [222] Santagata FA, Canestrari F, Pasquini E. (2007). *Mechanical characterization of asphalt rubber-wet process*. Proceedings of 4th International SIIV Congress. Palermo, Italia
- [223] Santagata E, Chiappinelli G, Riviera PP, Baglieri O (2010). *Triaxial testing for the short term evaluation of cold-recycled bituminous mixtures*. *Asphalt Pavements and Environment*. 11(1), 123-147
- [224] Sandler K, Swingle P (2006). *OSWER Innovations Pilot: Building Deconstruction and Reuse*. Disponible en la web: <http://www.epa.gov/oswer/>. Última visita Febrero 2015.
- [225] Selim AA, Muniandy R, Abdelrahman M (2005). *Potential use of ground tyre rubber in stone matrix asphalt (SMA)—a laboratory evaluation*. Proceedings of the 2005 International Symposium on Pavement Recycling. Sao Paulo, Brazil
- [226] Shayan A, Bell D, Westgate P (1997). *Performance of recycled concrete as a road-making material*. *Municipal Engineering in Australia* 24, 22–23, 26, 28–30
- [227] Shen DH, Du JC (2005). *Application of gray relational analysis to evaluate HMA with reclaimed building materials*. *Journal of Materials in Civil Engineering* 17(4), 400-406
- [228] Shen LY, Tam VWY, Tam CM, Drew D (2004). *Mapping approach for examining waste management on construction sites*. *Journal of Construction Engineering and Management* 130(4), 472–481
- [229] Shi J, Xu Y (2006). *Estimation and forecasting of concrete debris amount in China*. *Resources, Conservation & Recycling* 49, 147-158

- [230] Stimilli A, Ferrotti G, Graziani A, Canestrari F. (2013). *Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt*. Road Materials and Pavement Design 14, sup. 1, 149-161
- [231] Su N, Chen JS (2002). *Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass*. Resources, Conservation and Recycling 35, 259-274
- [232] Tahmoressi M (2001). *Evaluation of asphalt rubber pavements in texas*. PaveTex Engineering and Testing, Inc. USA
- [233] Tam VWY (2008a). *Economic comparison of concrete recycling: a case study approach*. Resources, Conservation and Recycling 52(5), 821–828
- [234] Tam VWY (2008b). *On the effectiveness in implementing a waste-management plan method in construction*. Waste Management 28 (6), 1072–1080
- [235] Tam VWY, Gao XF, Tam CM, Chan CH (2008). *New approach in measuring water absorption or recycled aggregates*. Construction and Building Materials 22, 364-369
- [236] Tam VWY, Kotrayothar D, Loo YC (2009). *On the prevailing construction waste recycling practices: a South East Queensland study*. Waste Management and Research 27(2), 167–174
- [237] Tam VWY, Tam CM (2006). *A review on the viable technology for construction waste recycling*. Resources, Conservation and Recycling 47, 209–221
- [238] Tam VWY, Tam CM, Zeng SX, Ng CY (2007). *Towards adoption of prefabrication in construction*. Building and Environment 42(10), 3642–3654
- [239] Texas DOT (2000). *A comprehensive laboratory and field study of high-cure crumb rubber modified asphalt materials*. Texas Transportation Institute. Texas, USA
- [240] Thanaya INA (2003). *Improving the performance of cold bituminous emulsion mixtures incorporating waste materials*. Doctoral Dissertation, The University of Leeds. UK

- [241] Thanaya INA (2006). *Prevention of early life failure on cold bituminous emulsion mixtures*. Forum Teknik 30(1)
- [242] Thanaya, INA (2007). *Evaluating and improving the performance of cold asphalt emulsion mixes*. Civil Engineering Dimension 9(2), 64-69
- [243] Thanaya INA (2010). *Utilization of sustainable materials in cold asphalt emulsion mixture for lightly trafficked road*. The 6th International Student Conference at Ibaraki University ISCIU6. Japan
- [244] Thanaya INA, Zoorob SE, Forth JP (2009). *A laboratory study on cold-mix, cold lay emulsion mixtures*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 162, 47-55
- [245] Tortum A, Celik C, Aydin AC (2005). *Determination of the optimum conditions for tyre rubber in asphalt concrete*. Building and Environment 40, 1492–1504
- [246] del Val, MA Rocci S. (1998). *Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados en frío*. Probisa. España
- [247] 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*. AENOR (2012)
- [248] UNE-EN 932-2:1999. *Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio*. AENOR (1999)
- [249] 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*. AENOR (2012)
- [250] 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*. AENOR (1999)

- [251] UNE-EN 933-8:2000. *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.* AENOR (2000)
- [252] UNE-EN 933-9:2010. *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno.* AENOR (2010)
- [253] UNE-EN 933-11:2009/AC:2010. *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.* AENOR (2009)
- [254] 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.* AENOR (2010)
- [255] UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006. *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.* AENOR (2006)
- [256] UNE-EN 12697-11:2007. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 11: Determinación de la afinidad entre áridos y betún.* AENOR (2007)
- [257] UNE-EN 12697-12:2009. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.* AENOR (2009)
- [258] UNE-EN 12697-23:2004. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.* AENOR (2004)
- [259] UNE-EN 12697-24:2006+A1:2007. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga.* AENOR (2006)

- [260] UNE-EN 12697-25:2006. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 25: Ensayo de compresión cíclico.* AENOR (2006)
- [261] UNE-EN 12697-26:2006. *Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 26: Rigidez.* AENOR (2006)
- [262] UNE-EN 12848:2003. *Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la estabilidad de las emulsiones bituminosas mezcladas con cemento.* AENOR (2003)
- [263] UNE-EN 13074-1:2011. *Betunes y ligantes bituminosos. Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados. Parte 1: Recuperación por evaporación.* AENOR (2011)
- [264] UNE-EN 13074-2:2011. *Betunes y ligantes bituminosos. Recuperación del ligante de las emulsiones bituminosas o de los ligantes bituminosos fluidificados o fluxados. Parte 2: Estabilización después de la recuperación por evaporación.* AENOR (2011)
- [265] UNE-EN 13286-7:2008. *Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico. Parte 7: Ensayo triaxial con carga cíclica para mezclas sin ligante.* AENOR (2008)
- [266] UNE-EN 14769:2006. *Betunes y ligantes bituminosos. Acondicionamiento por envejecimiento a largo plazo acelerado usando un recipiente de envejecimiento a presión (PAV).* AENOR (2006)
- [267] Unión Europea (2008). Directiva 2008/98/CE del parlamento europeo y del Consejo de 19 de Noviembre de 2008 sobre residuos y por la que se derogan determinadas Directivas
- [268] Uzan J, Witczak MW, Scullion T, Lytton RL (1992). *Development and validation of realistic pavement response models.* Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements. Nottingham, UK

- [269] Van Niekerk AA (2002). *Mechanical behavior and performance of granular bases and sub-bases in pavements*. Doctoral Dissertation, Delft University of Technology. The Netherlands
- [270] Vegas I, Ibáñez JA, San José JT, Urzelati A (2008) *Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction*. Waste Management 28(3), 565-574
- [271] Vignali V, Mazzotta F, Sangiorgi C, Simone A, Lantieri C, Dondi G (2014). *Rheological and 3D DEM characterization of potential rutting of cold bituminous mastics*. Construction and Building Materials 73, 339-349
- [272] Wang JY, Kang XP, Tam VWY (2008). *An investigation of construction wastes: an empirical study in Shenzhen*. Journal of Engineering, Design and Technology 6(3), 227–236
- [273] Werkmeister S (2003). *Permanent deformation behavior of unbound granular materials in pavement constructions*. Doctoral Dissertation, Technische Universität Dresden
- [274] West RC, Page GC, Veilleux J (1998). *Effect of tyre rubber grinding method on asphalt-rubber binder characteristics*. Proceedings of the TRB Annual Meeting. Washington DC, USA
- [275] Witczak MW, Bari J (2004). *Development of a master curve (E^*) database for lime modified asphaltic mixtures*. Arizona State University Research Project. 29 pp.
- [276] Wong YD, Sun DD, Lai D (2007). *Value-added utilization of recycled concrete in hot-mix asphalt*. Waste Management 27, 294-301
- [277] Woodside AR, Woodward WDH, Phillips P, Mills A (2000). *Sustainable reuse of highway materials in hot and cold bituminous mixtures*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 139, 181-186

- [278] Wu S, Zhu J, Zhong J, Wang D (2011). *Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder*. Construction and Building Materials 25, 2883-2887
- [279] Yan J, Zhang Z, Charmot S, Ding W, Li F (2015). *Investigation and prediction model for the dynamic modulus of asphalt emulsion cold recycled mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering 27(1), 1-7
- [280] Yan J, Zhu H, Zhang Z, Gao L, Charmot S (2014). *The theoretical analysis of the RAP aged asphalt influence on the performance of asphalt emulsion cold recycled mixes*. Construction and Building Materials 71, 444-450
- [281] Yeo REY, Sharp KG (1997). *Recycled crushed concrete stabilized with cementitious binder, in investigation into the use of recycled crushed concrete for road base use*. Report prepared by VicRoads et Al. for EcoRecycle Victoria, Australia
- [282] Yuan H, Shen L (2001). Trend of the research on construction and demolition waste management. Waste Management 31, 670-679
- [283] Zaharieva R, Buyle-Bodin F, Skoczylas F, Wirquin E (2003). *Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Composites 25, 223-232
- [284] Zborowski A, Sotil A, Kaloush K, Way G (2004). *Materials characteristics of asphalt rubber mixtures*. Proceedings of the TRB Annual Meeting. Washington DC, USA
- [285] Zoorob SE, Suparma LB (2000). *Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregates replacement (plastiphalt)*. Cement and Concrete Composites 22, 233-422

ANEXOS

ANEXO I

**GRÁFICAS DE TENSION-
DEFORMACIÓN DE ROTURA**

1 Ensayo de Inmersión-compresión

1.1 Compresión simple con árido reciclado y tras acondicionamiento de 4 días al aire

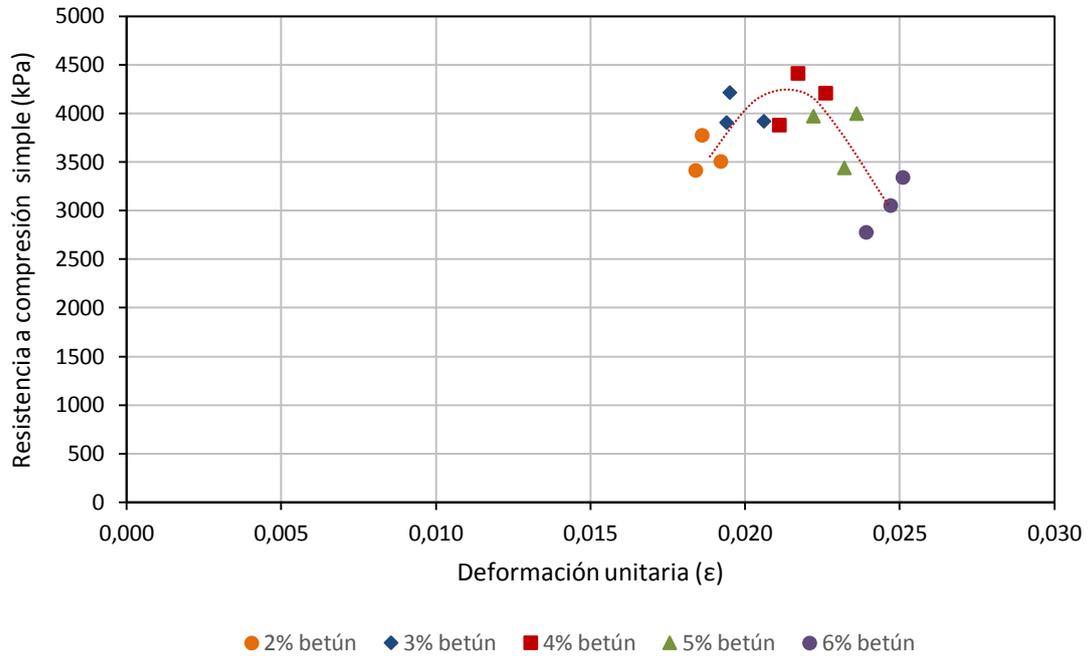


Figura I.1 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido reciclado y tras acondicionamiento de 4 días al aire según contenido de betún

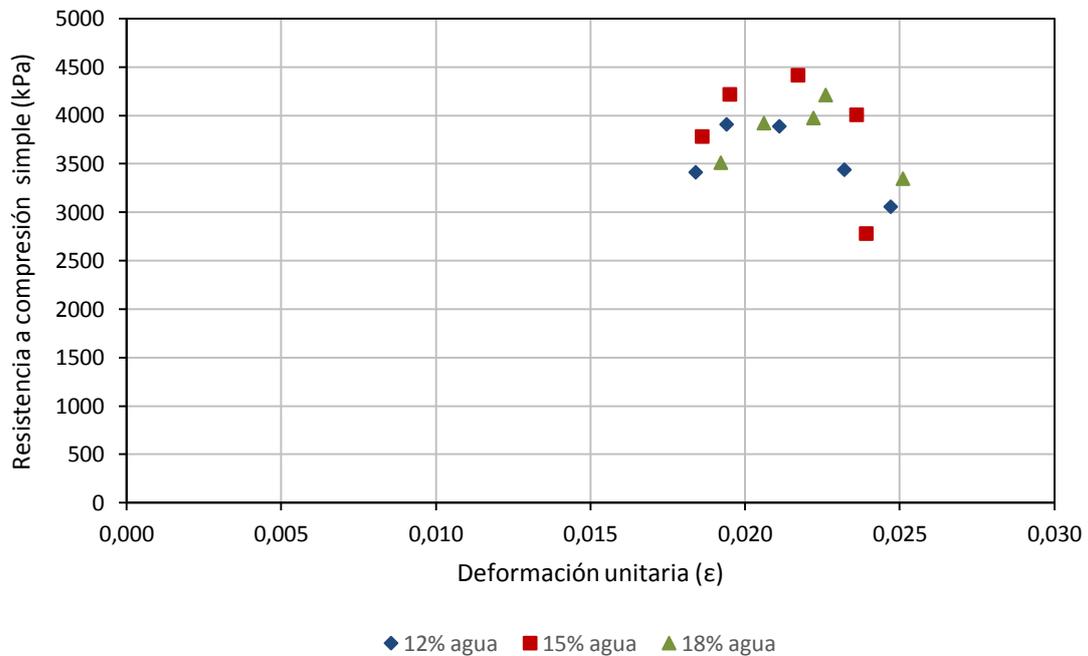


Figura I.2 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido reciclado y tras acondicionamiento de 4 días al aire según contenido de agua

1.2 Compresión simple con árido reciclado y tras acondicionamiento de 4 días en baño de agua a 49°C

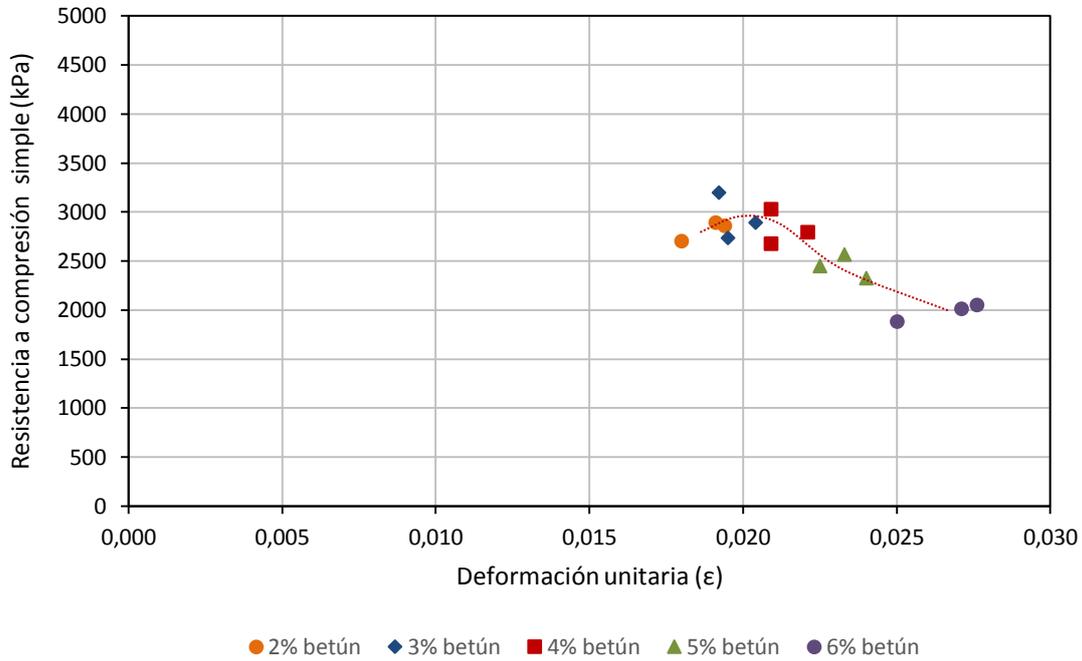


Figura 11.3 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido reciclado y tras acondicionamiento de 4 días en baño de agua a 49°C según contenido de betún

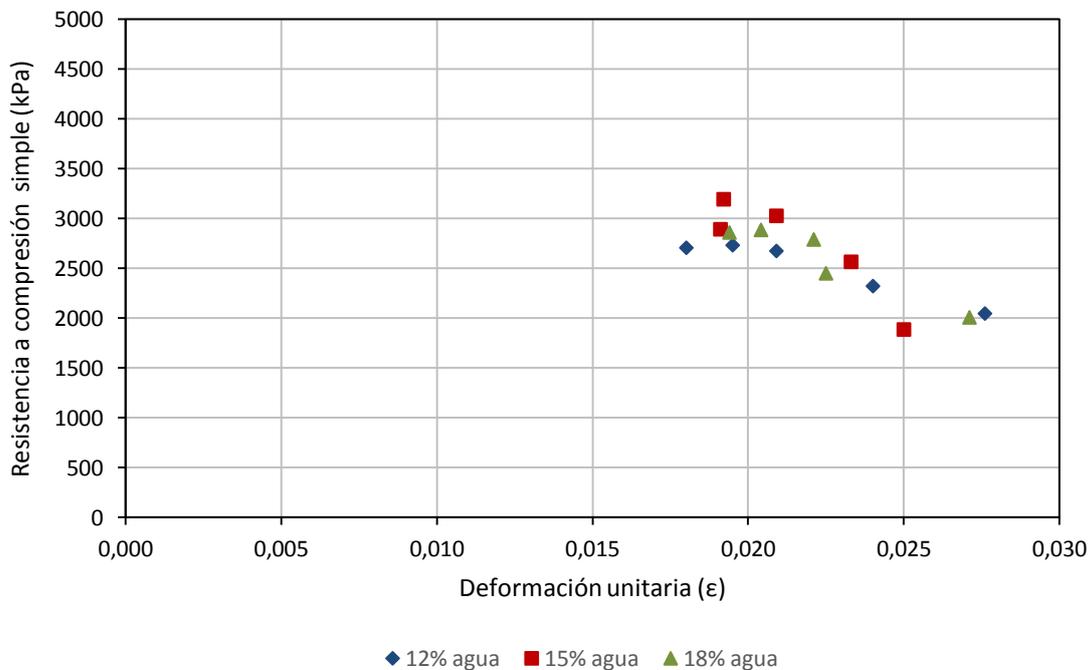


Figura I.4 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido reciclado y tras acondicionamiento de 4 días en baño de agua a 49°C según contenido de agua

1.3 Compresión simple con árido natural y tras acondicionamiento de 4 días al aire

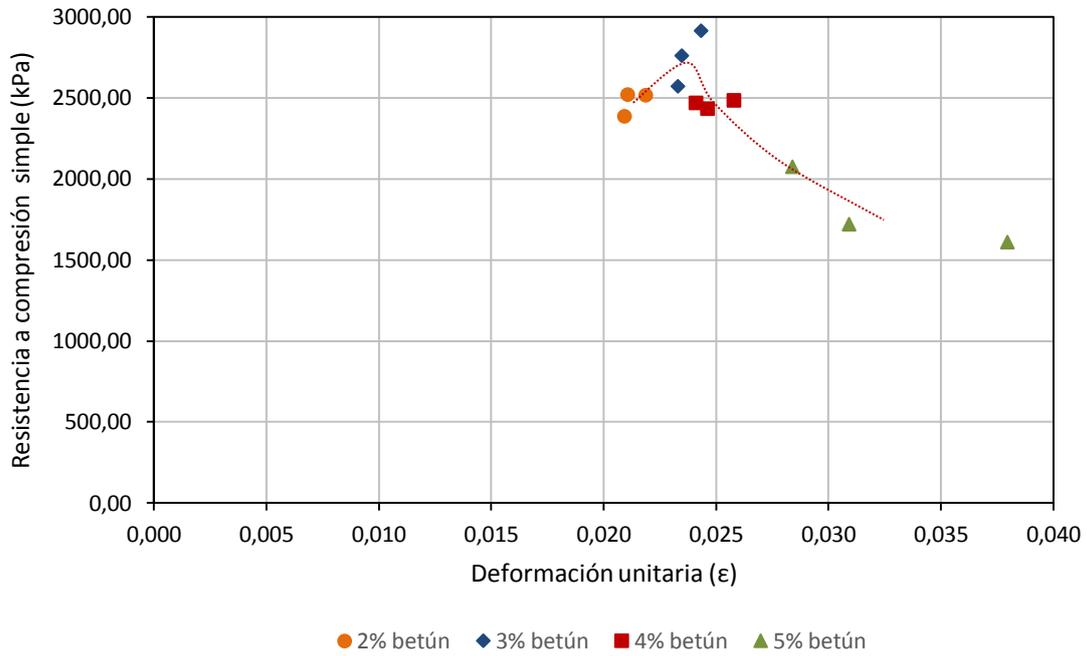


Figura I.5 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido natural y tras acondicionamiento de 4 días al aire según contenido de betún

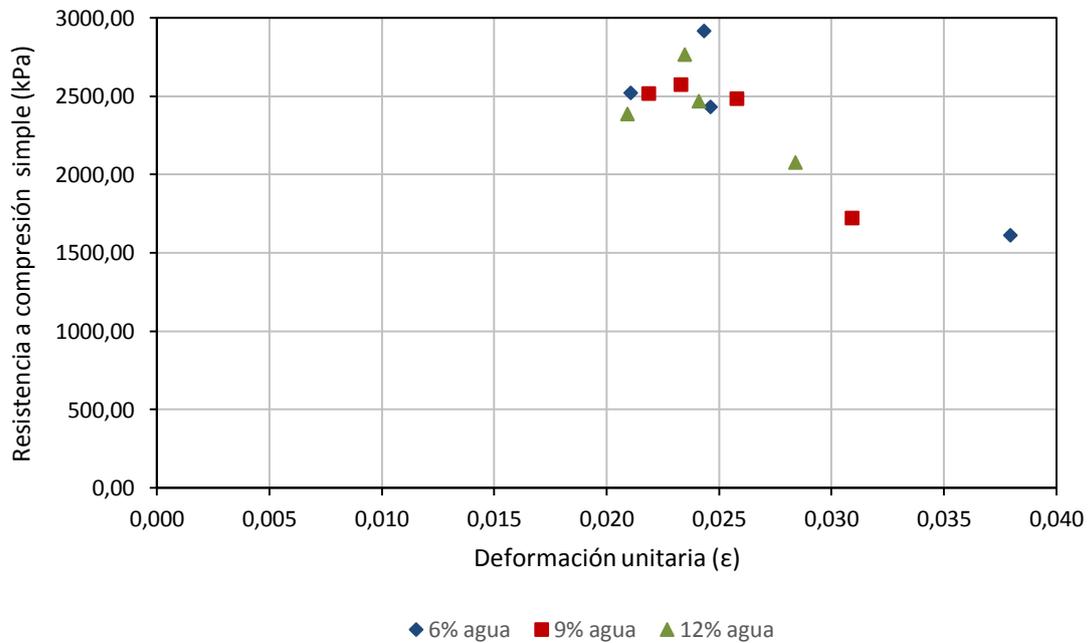


Figura I.6 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido natural y tras acondicionamiento de 4 días al aire según contenido de agua

1.4 Compresión simple con árido natural y tras acondicionamiento de 4 días en baño de agua a 49°C

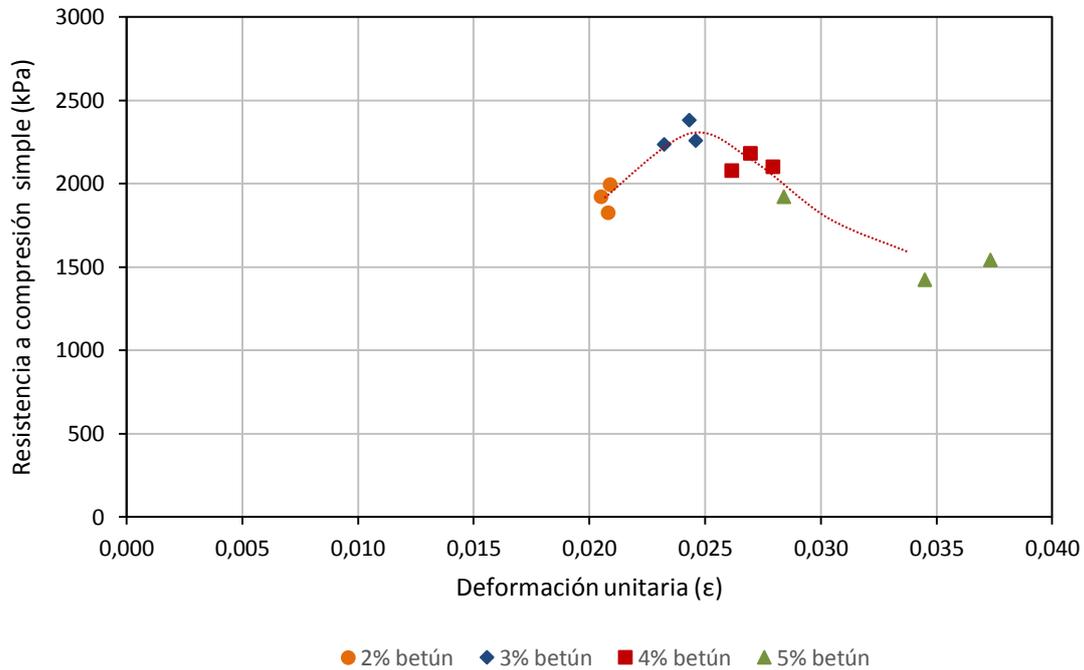


Figura I.7 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido natural y tras acondicionamiento de 4 días en baño de agua a 49°C según contenido de betún

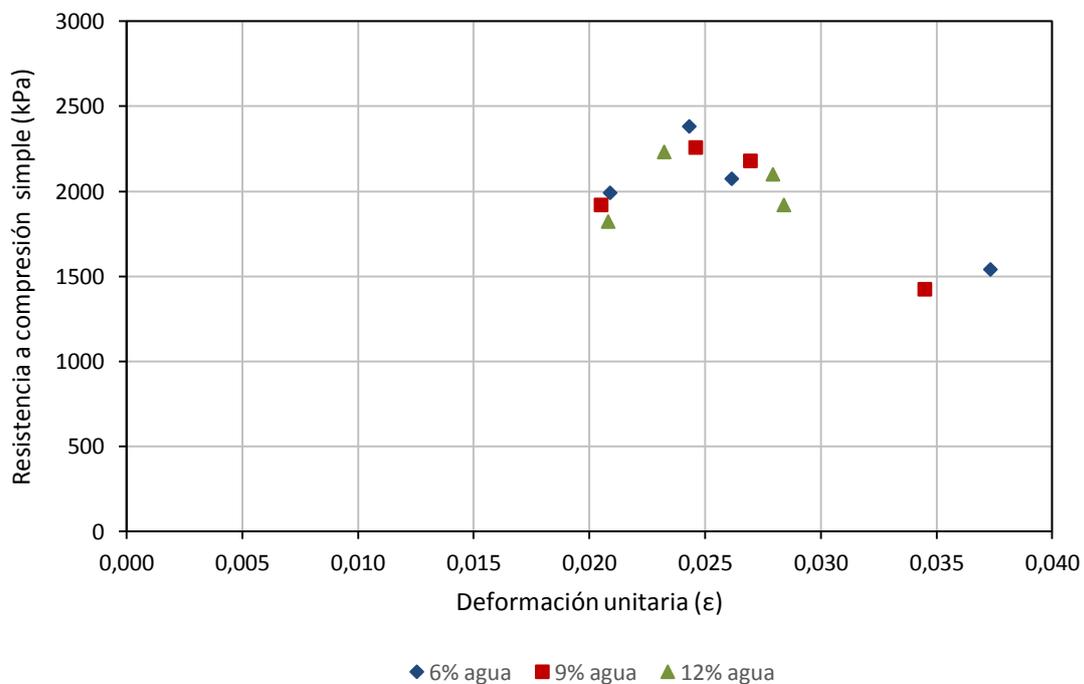


Figura I.8 Relación entre deformación de rotura y resistencia a compresión simple para mezclas con un 100% de árido natural y tras acondicionamiento de 4 días en baño de agua a 49°C según contenido de agua

2 Ensayo de tracción indirecta

2.1 Tracción indirecta con árido reciclado

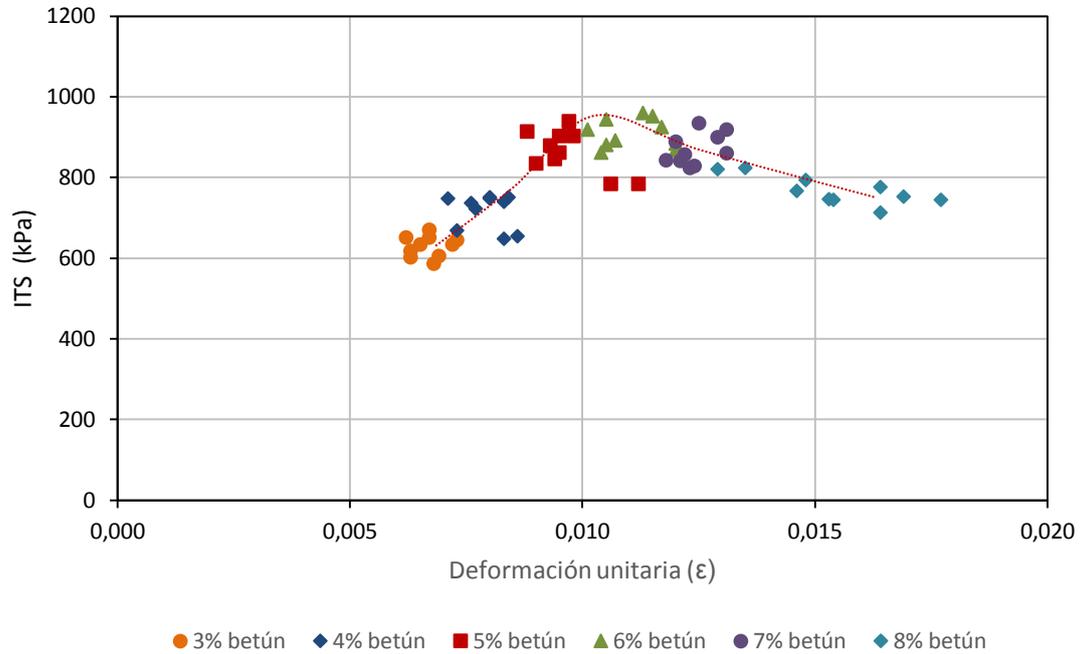


Figura I.9 Relación entre deformación de rotura y resistencia a tracción indirecta para mezclas con un 100% de árido reciclado según porcentajes de betún

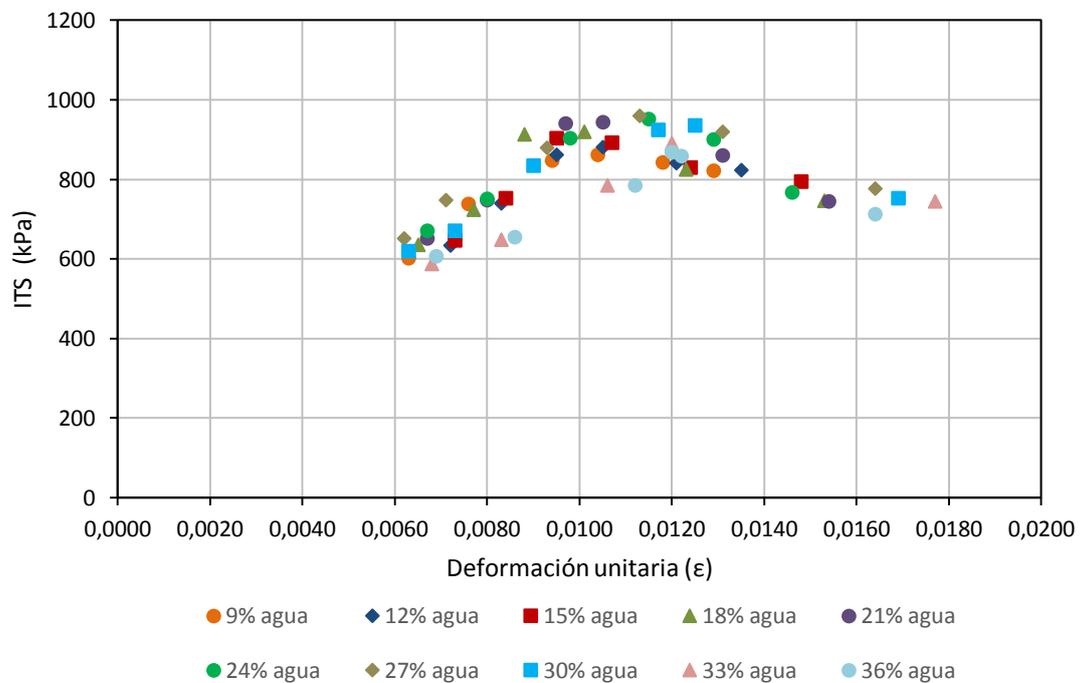


Figura I.10 Relación entre deformación de rotura y resistencia a tracción indirecta para mezclas con un 100% de árido reciclado según porcentajes de agua

2.1 Tracción indirecta con árido natural

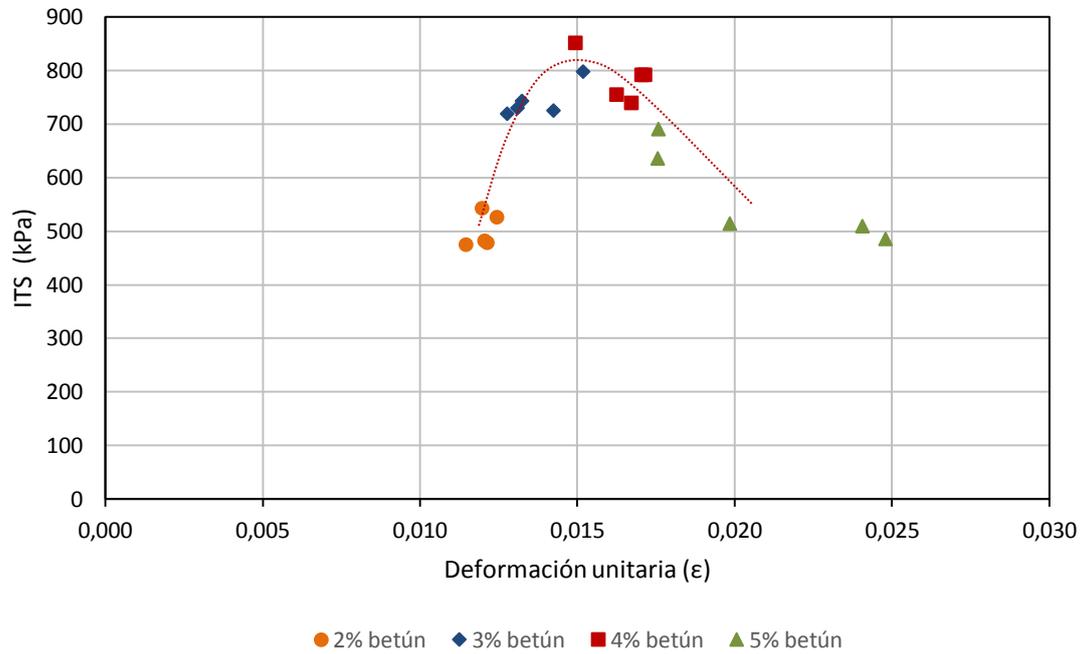


Figura I.11 Relación entre deformación de rotura y resistencia a tracción indirecta para mezclas con un 100% de árido natural según porcentajes de betún

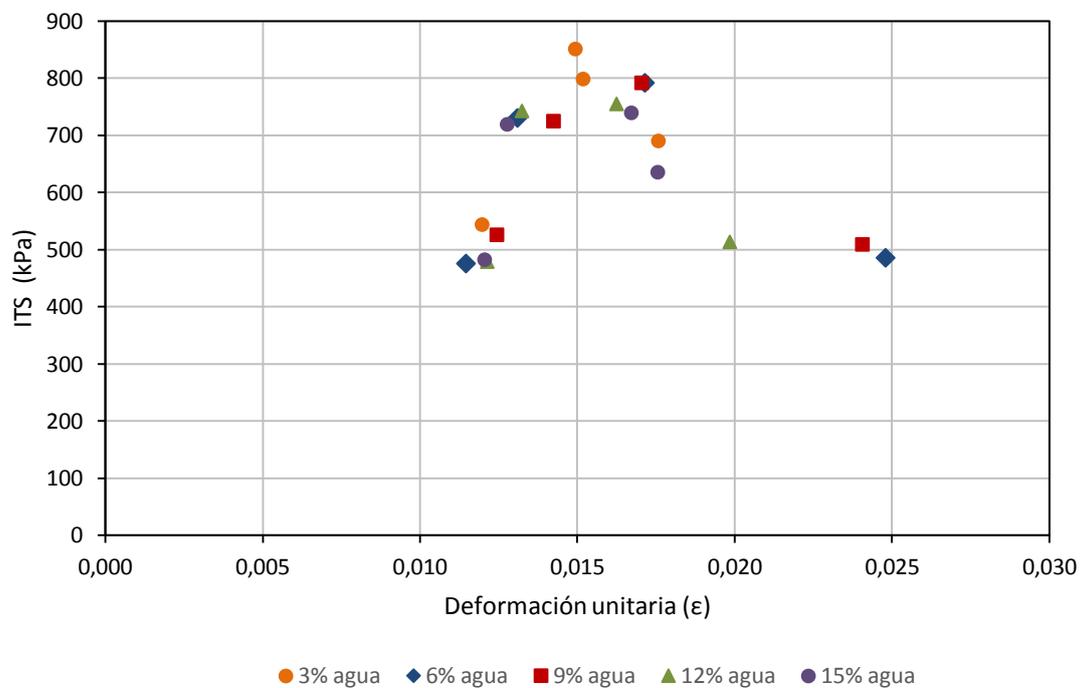


Figura I.12 Relación entre deformación de rotura y resistencia a tracción indirecta para mezclas con un 100% de árido natural según porcentajes de agua

ANEXO II

**RESULTADOS DEL ENSAYO ESTÁTICO
DE COMPRESIÓN TRIAXIAL**

Mezcla:

Tipo de árido	100% Reciclado
Contenido de agua	9%
Contenido de betún	6%
Curado	Ninguno

Rotura:

Probeta	N_{max} (kN)	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1 (kPa)	Resultados	
1	9,05	25	1114,08106	1139,08106	ϕ (rad)	0,73463343
2	9,502	50	1167,42661	1217,42661	ϕ (°)	42,0913951
3	11,239	100	1383,55327	1483,55327	C (kPa)	219,253341
4	14,686	200	1807,88889	2007,88889		

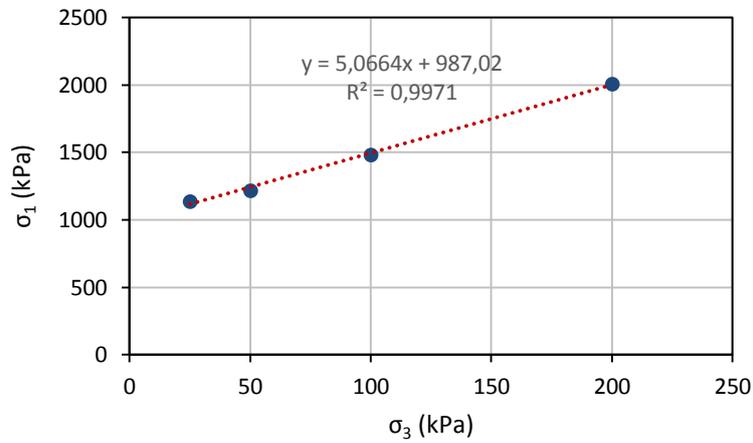


Figura II.1 Tensiones principales de rotura

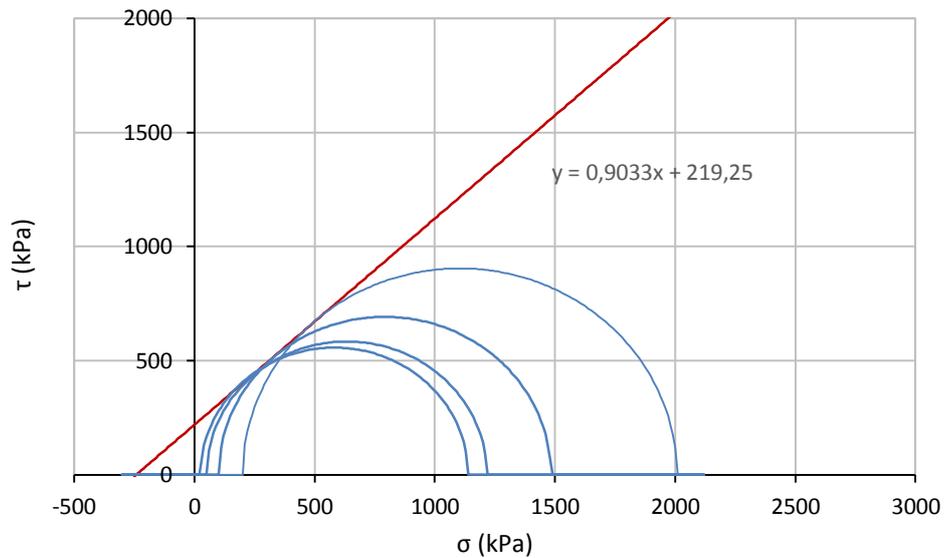


Figura II.2 Diagrama de Mohr

Mezcla:

Tipo de árido	100% Reciclado
Contenido de agua	9%
Contenido de betún	6%
Curado	3 días a 50°C

Rotura:

Probeta	N _{max} (kN)	σ ₃ (kPa)	σ _d (kPa)	σ ₁ (kPa)	Resultados	
1	15,702	25	1921,60778	1946,60778	φ (rad)	0,75942235
2	15,78	50	1931,1534	1981,1534	φ (°)	43,5116958
3	19,612	100	2400,11284	2500,11284	C (kPa)	388,709271
4	21,613	200	2644,99484	2844,99484		

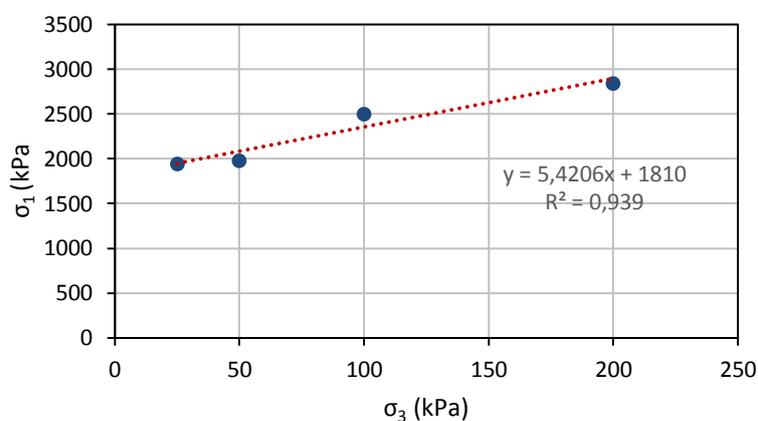


Figura II.3 Tensiones principales de rotura

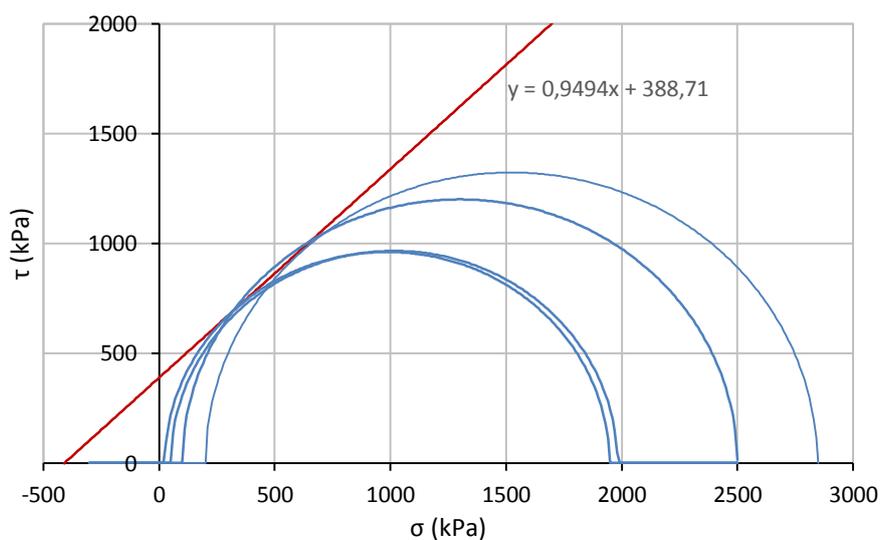


Figura II.4 Diagrama de Mohr

Mezcla:

Tipo de árido	100% Natural
Contenido de agua	3%
Contenido de betún	4%
Curado	Ninguno

Rotura:

Probeta	N _{max} (kN)	σ ₃ (kPa)	σ _d (kPa)	σ ₁ (kPa)	Resultados	
					φ (rad)	φ (°)
1	10,182	25	1253,43352	1278,43352	0,7605039	
2	11,592	50	1427,00858	1477,00858	43,5736637	
3	14,163	100	1743,50609	1843,50609		
4	16,591	200	2046,42233	2246,42233		

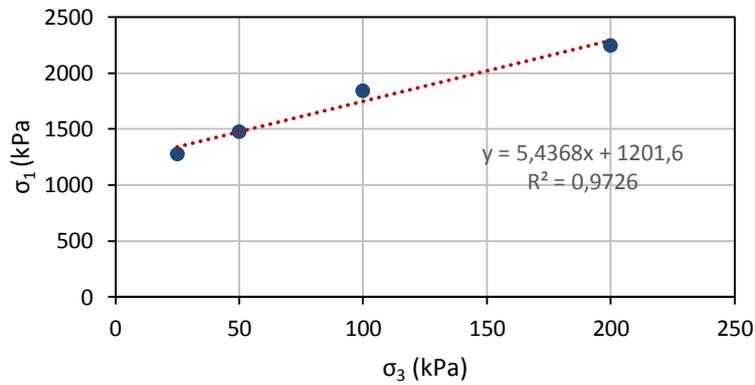


Figura II.5 Tensiones principales de rotura

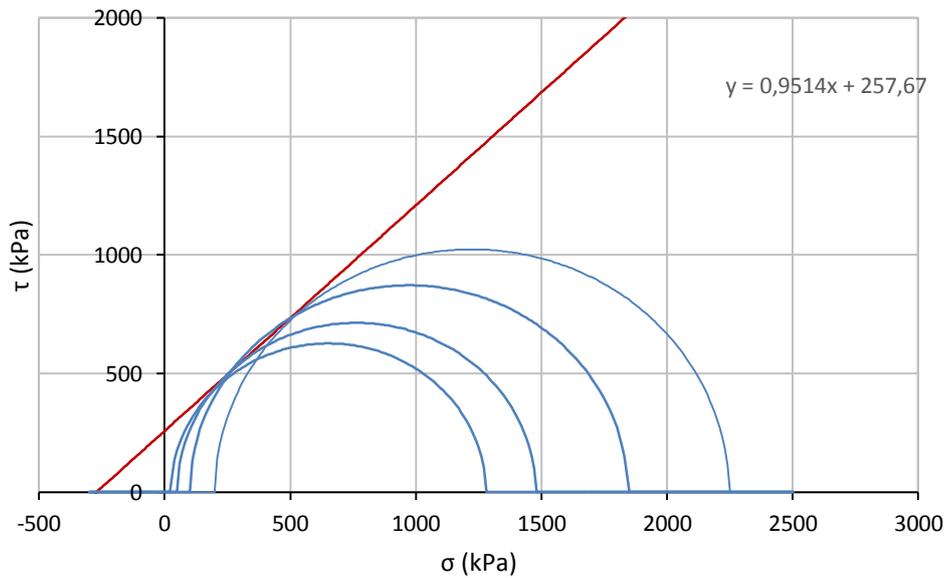


Figura II.6 Diagrama de Mohr

Mezcla:

Tipo de árido	100% Natural
Contenido de agua	3%
Contenido de betún	4%
Curado	3 días a 50°C

Rotura:

Probeta	N _{max} (kN)	σ ₃ (kPa)	σ _d (kPa)	σ ₁ (kPa)	Resultados	
1	15,137	25	1863,40829	1888,40829	φ (rad)	0,78686039
2	16,579	50	2036,91494	2086,91494	φ (°)	45,0837795
3	19,267	100	2367,1657	2467,1657	C (kPa)	370,67813
4	22,274	200	2725,88789	2925,88789		

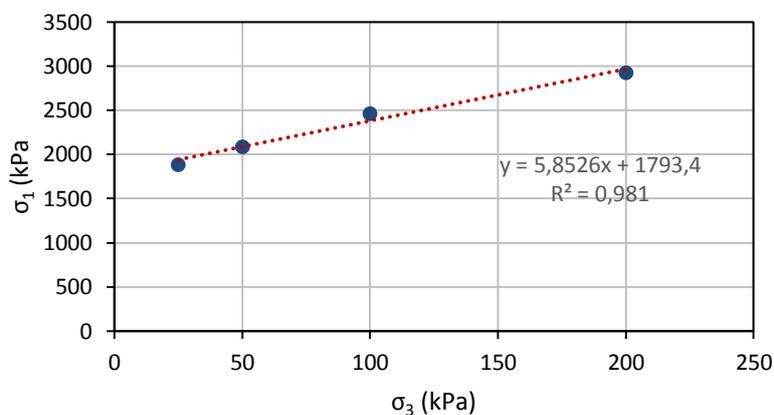


Figura II.7 Tensiones principales de rotura

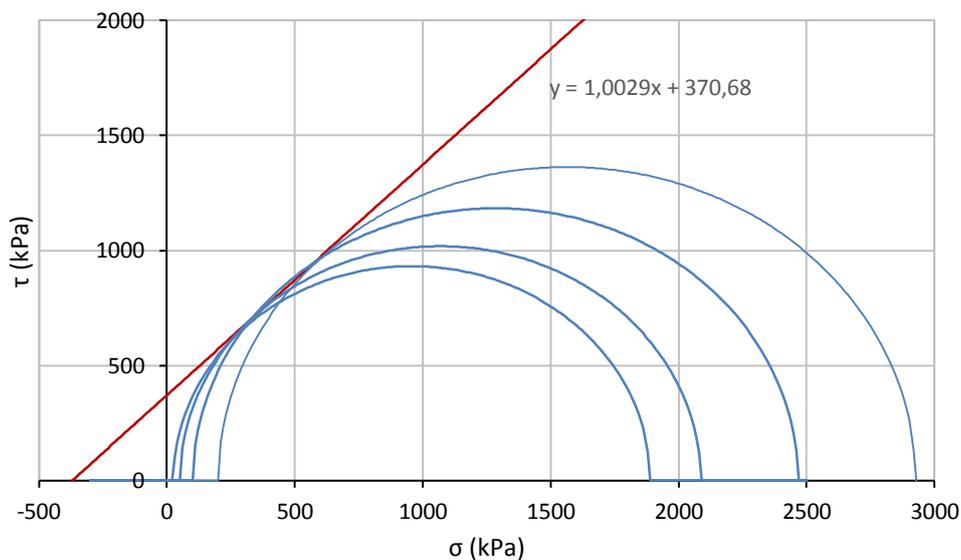


Figura II.8 Diagrama de Mohr