



UNIVERSIDADE DA CORUÑA
Escola Técnica Superior de Enxeñeiros
de Camiños, Canais e Portos
Departamento de Métodos Matemáticos e Representación



Proyecto técnico

ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE FABRICADAS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Autor

Óscar Brandón Basdediós

Profesores responsables

Dra. Ana María Rodríguez Pasandín

Dr. Ignacio Pérez Pérez

A Coruña, julio de 2016

Agradecimientos

Quisiera expresar mi gratitud hacia los profesores Ignacio Pérez y Ana Rodríguez por haberme brindado la oportunidad de realizar este proyecto técnico, así como por todo el tiempo que han dedicado a guiarme durante su desarrollo.

También quisiera dar las gracias a Natalia Pérez, que pacientemente me enseñó a fabricar, desmoldar y ensayar probetas (necesariamente en ese orden). Sin duda alguna, las horas de trabajo compartidas en el laboratorio han sido una de las experiencias más gratificantes de mi paso por la Escuela.

Gracias a toda la gente que me ha acompañado a lo largo de mi periplo por la Escuela, en especial a Alejandro, Daniel, Pablo, Sandra, Patricia, Belén, Carmen, Lidia y Luis.

Finalmente, mi agradecimiento más personal se lo quiero dedicar a mi familia. A mis padres, por aconsejarme, escucharme y apoyarme. A mi hermano, porque a pesar de la distancia siempre lo tengo muy presente. A mis tíos, Carmen y Pepe, que durante estos dos últimos años me han dado cobijo. Y por último a mis abuelos, Ana y Ricardo, por todo su cariño y su inigualable ejemplo de trabajo, sacrificio y superación.

Resumen

En el presente proyecto técnico se estudia la viabilidad del empleo de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como árido reciclado (AR) para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para capas intermedias en firmes de carreteras. Con ello, se busca reducir la demanda de árido natural y la deposición de RCD en vertederos.

A tal fin, se fabricaron distintas combinaciones de porcentajes de sustitución de AR (0%, 35%, 42%, 48% y 69%) junto con diferentes contenidos de ligante. De todas ellas fueron analizadas sus propiedades volumétricas y sensibilidad al agua.

Los resultados muestran que la sensibilidad al agua de la mezcla bituminosa empeora con la inclusión de AR, estando condicionada tanto por el porcentaje de sustitución como por las diferentes fracciones en las que se hace. No obstante, para los porcentajes de AR más bajos (35% y 42%) se obtuvieron resultados que verifican las exigencias impuestas por la normativa española.

Resumo

No presente proxecto técnico estúdase a viabilidade do emprego dos Residuos de Construción e Demolición (RCD) como árido reciclado (AR) para a fabricación de mesturas bituminosas en quente para capas intermedias en firmes de estradas. Con isto, búscase reducir a demanda de árido natural e a deposición de RCD en vertedoiros.

A tal fin, fabricáronse distintas combinacións de porcentaxes de substitución de AR (0%, 35%, 42%, 48% y 69%) xunto con diferentes contidos de ligante. De todas elas foron analizadas as súas propiedades volumétricas e sensibilidade á auga.

Os resultados amosan que a sensibilidade á auga da mestura bituminosa empeora coa inclusión de AR, estando condicionada tanto pola porcentaxe de substitución como polas diferentes fraccións nas que se fai. Porén, para as porcentaxes de AR máis baixas (35% e 42%) os resultados obtidos verifican as esixencias impostas pola normativa española.

Abstract

In this study, the viability of using Construction and Demolition Waste (CDW) as recycled concrete aggregates (RCA) in hot-mix asphalt (HMA) for binder course of road pavement is studied with the aim of reducing raw aggregates consumption and CDW disposal in landfills.

A hot-mix asphalt type AC 22 bin S has been manufactured using RCA in different substitution percentages (0%, 35%, 42%, 48% and 69%). Volumetric properties and water sensitivity were analyzed.

The results indicate that RCA inclusion worsens water sensitivity of HMA. It depends on the substitution percentage and in the fractions where it is carried out. Notwithstanding, mixtures made with 35% and 42% of RCA comply with Spanish specifications.

Índice General

1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes y planteamiento general del problema.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organización de los capítulos.....	3
2. Los RCD (Residuos de Construcción y Demolición)	5
2.1. Definición	5
2.2. Producción de los RCD.....	7
2.3. Gestión de los RCD	10
2.4. Obtención de árido reciclado (AR) a partir de RCD.....	11
2.5. Propiedades de los AR.....	14
2.6. Marco normativo	14
3. Propiedades de las mezclas bituminosas.....	16
3.1. Propiedades volumétricas.....	16
3.2. Propiedades mecánicas.....	18
3.2.1. Rigidez	18
3.2.2. Deformación permanente.....	21
3.2.3. Resistencia a la fatiga	22
3.3. Durabilidad	25
3.4. Sensibilidad al agua	25
3.4.1. Factores intervinientes en la adhesividad árido-ligante	25
3.4.2. Ensayo de tracción indirecta tras inmersión.....	26
4. Estado del arte de las mezclas bituminosas con RCD	28
4.1. Mezclas bituminosas con RCD en caliente	28
4.1.1. Propiedades volumétricas.....	28

4.1.2.	Sensibilidad al agua	30
4.1.3.	Rigidez	32
4.1.4.	Deformación permanente.....	34
4.1.5.	Resistencia a la fatiga	35
4.2.	Mezclas bituminosas con RCD en frío.....	37
4.2.1.	Contenido de agua	37
4.2.2.	Propiedades volumétricas.....	38
4.2.3.	Sensibilidad al agua	39
4.2.4.	Rigidez	40
4.2.5.	Deformación permanente.....	41
5.	Caracterización de los materiales	42
5.1.	Árido reciclado	42
5.1.1.	Granulometría.....	42
5.1.2.	Propiedades geométricas.....	43
5.1.3.	Propiedades mecánicas y físicas.....	45
5.2.	Árido natural.....	46
5.2.1.	Propiedades geométricas.....	46
5.2.2.	Propiedades mecánicas y físicas.....	47
5.3.	Comparativa de la densidad y absorción del AR y el árido natural	47
5.4.	Ligante bituminoso	48
6.	Diseño de la mezcla	50
6.1.	Introducción	50
6.2.	Elección de la mezcla	50
6.3.	Elección de la granulometría	50
6.4.	Contenido de huecos en mezcla y en árido	52

6.5.	Sensibilidad al agua	54
6.6.	Dotación mínima de ligante.....	57
6.7.	Proceso de fabricación	59
7.	Resultados	65
7.1.	Introducción.....	65
7.2.	Análisis experimental de las propiedades volumétricas	65
7.2.1.	Densidad aparente	65
7.2.2.	Densidad máxima.....	67
7.2.3.	Huecos en mezcla (Vm).....	70
7.2.4.	Huecos en el árido mineral (VMA).....	73
7.2.5.	Huecos rellenos con ligante (VFB)	75
7.3.	Análisis experimental de la sensibilidad al agua.....	77
7.3.1.	Tracción indirecta (ITS) y conservada (ITSR) según % AR	77
8.	Conclusiones y recomendaciones	85
8.1.	Introducción.....	85
8.2.	Conclusiones relativas a las propiedades de las mezclas bituminosas	85
8.2.1.	Propiedades volumétricas.....	85
8.2.2.	Sensibilidad al agua	86
8.3.	Recomendaciones	87
9.	Bibliografía.....	88

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Capítulo 17 de la Lista Europea de Residuos (Ministerio de Medio Ambiente, 2002).....	7
Tabla 2-2 Recopilación de datos de producción de RCD en diferentes países. Fuente: Gómez-Meijide (2015).	7
Tabla 2-3 Producción de RCD y % reciclado en los Estados Miembro de la UE. Fuente: DG ENV (2011).....	8
Tabla 2-4 Volumen de RCD producidos en 2012. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015).....	8
Tabla 2-5 Destinos posibles de las fracciones de los RCD. Fuente: Consellería de Medio Ambiente (2005).....	10
Tabla 3-1 Principales características del ensayo de rodadura (AENOR, 2008).	22
Tabla 4-1 Comparación del contenido de huecos con 100% de árido reciclado y natural para distintos contenidos de betún y agua total en la amasada. Fuente: Gómez-Meijide (2015).	38
Tabla 5-1 Caras de fractura del AR. Fuente: Pasandín (2013).....	43
Tabla 5-2 Coeficiente de Los Ángeles máximo permitido por el PG-3 para el árido grueso de mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso. (*) En vías de servicio. 45	
Tabla 5-3 Densidades y absorción tras inmersión. Fuente: Pasandín (2013).	46
Tabla 5-4 Densidades aparentes y absorción de las distintas fracciones de árido reciclado (AR) y árido natural (AN) utilizadas.	47
Tabla 5-5 Principales características del betún B 35/50 empleado.....	48
Tabla 6-1 Cantidad de árido (%) para cada fracción según la curva granulométrica escogida (en negrita las fracciones en las que se sustituye el árido natural por reciclado).....	52
Tabla 6-2 Contenido de huecos en mezcla (%) según tipo de capa y categoría de tráfico pesado (PG-3). (*) En MAM: 4-6%. (**) En vías de servicio.	53
Tabla 6-3 Dotación mínima de ligante hidrocarbonado fijada por el PG-3.	58
Tabla 6-4 Dotación mínima de ligante corregida para cada una de las granulometrías estudiadas.	58

Tabla 6-5 Resumen de las cantidades de betún y árido necesarias para la fabricación de las probetas.	64
Tabla 7-1 Densidades aparentes mediante SSD obtenidas para las mezclas estudiadas según contenido de betún y árido reciclado.	66
Tabla 7-2 Densidades máximas por procedimiento volumétrico obtenidas para las mezclas estudiadas según contenido de betún y árido reciclado.	68
Tabla 7-3 Huecos de aire de las mezclas estudiadas según el contenido de ligante y árido reciclado.	71
Tabla 7-4 Huecos en el árido mineral de las mezclas estudiadas según el contenido de ligante y árido reciclado.	74
Tabla 7-5 Huecos rellenos de ligante de las mezclas estudiadas según el contenido de betún y árido reciclado.	76

Índice de Figuras

Figura 2-1 Composición media de los RCD. Fuente: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (2009).	5
Figura 2-2 Rangos máximos y mínimos de los materiales que componen los RCD. Fuente: GERD (2010).	6
Figura 2-3 Plantas de tratamiento de RCD en España y porcentajes de reciclaje de RCD. Fuente: Rodríguez-Robles et al. (2015).....	9
Figura 2-4 Esquema general de procesos de una planta de reciclaje. Fuente: GERD (2010)	12
Figura 3-1 Vm (Huecos de aire). Fuente: Pavement Interactive (2012).	17
Figura 3-2 VFB (Huecos rellenos con ligante). Fuente: Pavement Interactive (2012).	17
Figura 3-3 Vm, VFB y VMA. Fuente: Pavement Interactive (2012).	17
Figura 3-4 Deformación plástica acumulada después de N ciclos de carga. Fuente: Moreno Rubio (2005).	20
Figura 3-5 Fases del proceso de agotamiento por fatiga de una mezcla bituminosa. Fuente: Di Benedetto et al. (2004).	23
Figura 3-6 Determinación de la vida hasta la rotura de una probeta. Fuente: AENOR (2013a).....	24
Figura 3-7 Huecos en mezcla (Vm) frente a porcentaje de AR empleado. Fuente: Pasandín et al., 2013.Vida hasta la rotura	24
Figura 4-1 Huecos en mezcla (Vm) frente a porcentaje de AR empleado. Fuente: Pasandín et al. (2013).	29
Figura 4-2 Huecos en el árido mineral (VMA) frente al porcentaje de AR empleado. Fuente: Pasandín et al. (2013).	29
Figura 4-3 Huecos rellenos con ligante (VFB) frente al porcentaje de AR empleado. Fuente: Pasandín et al. (2013).	29
Figura 4-4 Morfología microscópica de (a) árido reciclado y (b) árido natural calizo [x1000] Fuente: Wu et al. (2013).	31
Figura 4-5 TSR en función del % AR presente en la mezcla. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).....	31

Figura 4-6 Comparación de los valores del módulo resiliente a 25 °C y 40 °C con AR en fracción fina (FA), gruesa (CA) o como filler. Fuente: Arabani et al. (2013)..	33
Figura 4-7 Módulo resiliente (MR) frente al contenido de AR a distintas temperaturas. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).	33
Figura 4-8 Deformación permanente acumulada a 30 °C para mezclas bituminosas con distinto contenido de árido reciclado. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).	35
Figura 4-9 Deformación horizontal inicial vs número de ciclos hasta fallo a una temperatura de 20 °C para distintos contenidos de árido reciclado. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).	36
Figura 4-10 Resistencia seca y húmeda a compresión en función del porcentaje de betún. Contenido de agua de 6% para 0% AR y del 15% para 100% AR. Fuente: elaboración propia a partir de Gómez-Meijide (2015).	39
Figura 4-11 Módulo resiliente según el contenido de betún a distintas temperaturas para el contenido de agua que proporciona el mayor ITSM. Fuente: elaboración propia a partir de (Gómez-Meijide, 2015).	41
Figura 5-1 Curva granulométrica de la fracción 0/40 mm del árido reciclado. Fuente: Pasandín (2013).	42
Figura 5-2 Composición (% en masa) de los áridos reciclados gruesos empleados. Fuente: Pasandín (2013).	44
Figura 5-3 Detalle de los principales componentes del árido reciclado.	45
Figura 5-4 Comparación entre el árido reciclado y el árido calizo para la fracción 8/16 mm.	48
Figura 6-1 Curva granulométrica escogida de acuerdo con los husos establecidos en el Art. 542 del PG-3.	51
Figura 6-2 Determinación de la densidad máxima (foto izquierda) y aparente (foto derecha) de la mezcla bituminosa.	53
Figura 6-3 Ensayo de tracción indirecta tras inmersión para la determinación del ITSR.	54
Figura 6-4 Probetas depositadas en el recipiente de vacío.	55
Figura 6-5 Equipos utilizados para aplicar el vacío a las probetas. De izquierda a derecha: controladora, bomba, vaso Dewar y recipiente de vacío.	56

Figura 6-6 Baño de agua a $(40 \pm 1) ^\circ\text{C}$ en el que se sumergen las probetas durante un periodo de 68 h a 72 h.	56
Figura 6-7 Cámara termostatazada empleada para llevar las probetas a la temperatura del ensayo a tracción indirecta.....	57
Figura 6-8 Diagrama de flujo del proceso de fabricación.....	60
Figura 6-9 Pesado de la fracción 8/16 mm de AR (foto izquierda) y bandeja con toda la granulometría y vaso con filler (foto derecha).....	60
Figura 6-10 Calentamiento del árido (foto izquierda) y cazo con betún (foto derecha). 61	
Figura 6-11 Estufa empleada para el calentamiento de los áridos.	61
Figura 6-12 Proceso de mezcla en fotografías.	62
Figura 6-13 Fotografías del proceso de compactación y probeta desmoldada.....	63
Figura 7-1 Densidad aparente frente a contenido de ligante para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.....	67
Figura 7-2 Muestras sueltas de 69% AR con 4.5% (foto izquierda) y 4.75% de ligante (foto derecha).....	68
Figura 7-3 Densidad máxima frente a contenido de ligante para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.....	69
Figura 7-4 Contenido de huecos en mezcla (V_m) frente a contenido de ligante para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.....	71
Figura 7-5 Contenido de huecos en el árido mineral (VMA) frente a contenido de ligante para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.....	74
Figura 7-6 Contenido de huecos rellenos con ligante (VFB) frente a contenido de betún para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.....	76
Figura 7-7 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 0% AR. .	78
Figura 7-8 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 35% AR. 79	
Figura 7-9 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 42% AR. 80	
Figura 7-10 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 48% AR. 81	

Figura 7-11 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 69% AR.	82
Figura 7-12 Resistencia a tracción indirecta conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para los diferentes porcentajes de sustitución de AR.	83

Abreviaturas

AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AR	Árido Reciclado
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
DG ENV	Directorate-General for Environment. European Commission
EEA	European Environment Agency
EPA	Environmental Protection Administration. Taiwan
EPD	Environmental Protection Department. Hong Kong
GERD	Asociación Española de Gestores de RCD
INE	Instituto Nacional de Estadística
PEMAR	Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición
PNIR	Plan Nacional Integrado de Residuos de España
PNRCD	Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición
RCD	Residuos de Construcción y Demolición

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

1.1. Antecedentes y planteamiento general del problema

La generación de residuos se ha convertido en las últimas décadas en una de las principales preocupaciones de las sociedades desarrolladas. Desde que a finales de los 1980s se definiera el concepto *desarrollo sostenible* en el Informe Brutland de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo de la ONU, este se ha erigido como principio fundamental a partir del cual fijar las pautas que rigen el desarrollo económico, social y la protección del medio ambiente para *satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades*.

El sector de la construcción está directamente involucrado en el desarrollo sostenible, pues su actividad se caracteriza por el *consumo de recursos naturales* (a nivel europeo más del 50% de los recursos) a la vez que *genera ingentes cantidades de residuos* (un 34% de los 2500 millones de toneladas anuales en Europa) (SOER, 2015).

La extracción de árido natural no solo supone agotar recursos naturales limitados, sino que acarrea impactos medioambientales negativos tanto durante su explotación: polvo, ruido; afección visual, paisajística, a hábitats existentes, ... como al producirse el cese de su actividad, siendo necesaria la regeneración de su estado natural.

Por su parte, la deposición de residuos de construcción (RCD) en vertederos tiene consecuencias perjudiciales tanto desde el punto de vista medioambiental (ruido, polvo, impacto visual, etc.) como social, puesto que se desaprovecha suelo que podría ser destinado a otros usos. Además, en el caso de aquellos de carácter ilegal –que escapan a cualquier control o regulación– se producen grandes impactos sobre las zonas en las que se asientan, como lo son la contaminación de suelos y acuíferos.

En consecuencia, el sector de la construcción puede y debe conseguir armonizar sus actividades con la sostenibilidad de las mismas, buscando tanto reducir la demanda de nuevos recursos, como el desecho de materiales que correctamente tratados podrían ser reincorporados al proceso productivo. Por tanto, el reciclaje de los RCD para su transformación en árido reciclado (AR) pretende dar respuesta a estas dos grandes cuestiones en el marco del desarrollo sostenible, siendo la construcción de obras lineales

–p.ej. la ejecución y conservación de carreteras– uno de los ámbitos de mayor interés por la enorme necesidad de áridos que suele conllevar.

En los últimos años, el empleo de AR de RCD es cada vez más usual en el ámbito de la construcción en usos como: la fabricación de hormigón, realización de capas de firme y construcción de rellenos y terraplenes (Pasandín, 2013). Asimismo, en la revisión del estado del arte se constata el creciente interés de investigadores de todo el mundo por conocer mejor sus propiedades y características para analizar la viabilidad de sus diferentes aplicaciones.

Sin embargo, la utilización de AR procedente de RCD se ve todavía lastrada por dos motivos fundamentales: por un lado, los AR no suelen cumplir por sí solos las exigencias técnicas de los áridos naturales, por lo que hay que recurrir a pretratamientos y otros procesos como demolición selectiva y retirada de impurezas que encarecen su precio (Pasandín, 2013) siendo además escasas las plantas que disponen de medios adecuados para el tratamiento de este tipo de residuos. Por otro lado, su falta de homogeneidad debida a su diversa procedencia afecta a su composición y propiedades, así como a la continuidad de su suministro durante largos periodos de tiempo, bien por la posible incapacidad de procesamiento de la planta de tratamiento, bien por la escasez de fuentes de RCD (Gómez-Meijide, 2015).

La profundización en el estudio de los RCD permitirá afrontar sus dos grandes retos. Un mayor conocimiento de sus propiedades facilitará el desarrollo de tecnologías y especificaciones relativas a sus posibles usos para poder dar cumplimiento a las exigencias técnicas; mientras que el perfeccionamiento de su gestión y tratamiento ayudará –junto con medidas de corte político como tasas de vertido y extracción– a hacerlos competitivos a nivel económico.

1.2. Objetivos

En este proyecto técnico se ha estudiado la viabilidad del empleo de árido reciclado en mezclas bituminosas en caliente para capas intermedias de firmes de carreteras.

En primer lugar, se ha confeccionado un breve estado del arte sobre la utilización de AR tanto en mezclas bituminosas en caliente como en frío, para conocer los resultados de las investigaciones ya realizadas y la problemática asociada hasta el momento.

El siguiente paso ha sido la realización de ensayos de laboratorio para determinar las propiedades volumétricas y la sensibilidad al agua de las diferentes dosificaciones estudiadas.

A continuación, se han comparado los resultados obtenidos para las propiedades volumétricas y la sensibilidad al agua de la muestra de control (0% AR) con las diferentes combinaciones de AR propuestas, para tratar de discernir cómo influye en ellas la presencia del árido reciclado.

Finalmente, se han establecido recomendaciones para el empleo de AR en mezclas bituminosas en caliente para capas intermedias.

1.3. Organización de los capítulos

En el **Capítulo 2** se proporciona una visión global sobre los RCD, describiendo su producción y gestión para la obtención de árido reciclado (AR). A mayores se introducen sus principales características y el marco normativo que los regula.

En el **Capítulo 3** se recoge un compendio de las principales propiedades de las mezclas bituminosas, así como los ensayos que permiten evaluarlas.

En el **Capítulo 4** se hace una revisión del estado del arte sobre el empleo de RCD en mezclas bituminosas en caliente y frío, fundamental para conocer las particularidades que supone su uso y cómo influye en las propiedades de las mezclas obtenidas.

En el **Capítulo 5** se aborda la caracterización de todos los materiales intervinientes en la fabricación de las mezclas –áridos y betún– con un especial interés sobre las propiedades geométricas, mecánicas y físicas del árido reciclado y natural.

En el **Capítulo 6** se describen los pasos seguidos en el diseño de la mezcla bituminosa en caliente para capas intermedias con distintos porcentajes de sustitución de AR y contenido de ligante, así como el posterior proceso de fabricación.

En el **Capítulo 7** se exponen los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades volumétricas y el estudio de la sensibilidad al agua mediante tracción indirecta tras inmersión de las distintas dosificaciones consideradas.

En el **Capítulo 8** se exponen las conclusiones alcanzadas tras el estudio de los resultados obtenidos y se enumeran posibles recomendaciones para el empleo de AR en mezclas bituminosas en caliente para capas intermedias.

En el **Capítulo 9** se incluye la relación de todas las referencias bibliográficas consultadas para la realización de este proyecto técnico.

Capítulo 2
LOS RESIDUOS DE
CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN

2. Los RCD (Residuos de Construcción y Demolición)

2.1. Definición

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) engloban al conjunto de residuos sólidos originados por el sector de la construcción durante los procesos de construcción y deconstrucción: demolición de edificaciones y obras de ingeniería civil, rehabilitaciones y reparaciones, sobrantes de ejecución, etc.

En cuanto a su composición, destacan por su heterogeneidad siendo posible agrupar los materiales que posteriormente darán lugar a los áridos reciclados en cinco grandes grupos con comportamientos y características análogas (GERD, 2010):

- Hormigón y mortero: con propiedades similares a las del árido natural, si bien con menor densidad y mayor absorción debido al mortero adherido.
- Piedra natural: aunque depende de su clase, en general su presencia aporta mayor densidad y resistencia y menor absorción al árido reciclado.
- Material cerámico, albañilería y obra de fábrica: contribuye con una menor densidad y mayor absorción.
- Asfalto y mezclas bituminosas: aportan resistencia en capas granulares.
- Impropios: plástico, madera, vidrio, textil, etc. Suelen aparecer debido a la incapacidad de los sistemas de limpieza y separación para segregarlos.

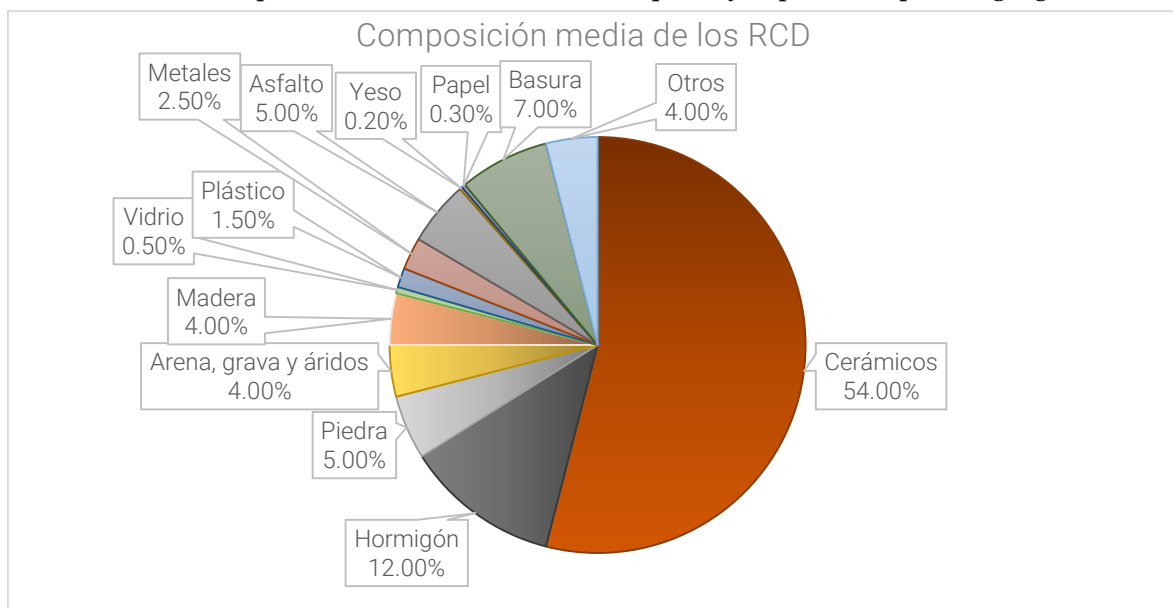


Figura 2-1 Composición media de los RCD. Fuente: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (2009).

La mayor parte de los RCD pueden considerarse inertes o asimilables a inertes –no peligrosos puesto que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas–. Sin embargo, es posible encontrar residuos peligrosos en ellos debido a una deficiente gestión en origen en la que sustancias peligrosas tales como amianto o fibras minerales no son correctamente separadas y gestionadas de forma acorde a su naturaleza.

Observando la composición media ilustrada en la Figura 2-1, se percibe una preponderancia de los materiales cerámicos, pétreos y el hormigón; si bien cabe destacar su variabilidad, hecho que se pone de manifiesto en la Figura 2-2 donde se recoge la composición máxima, mínima y media de los RCD expresada en % en peso de cada fracción, extraída de (GERD, 2010), entendiéndose dichos datos representativos del panorama español.

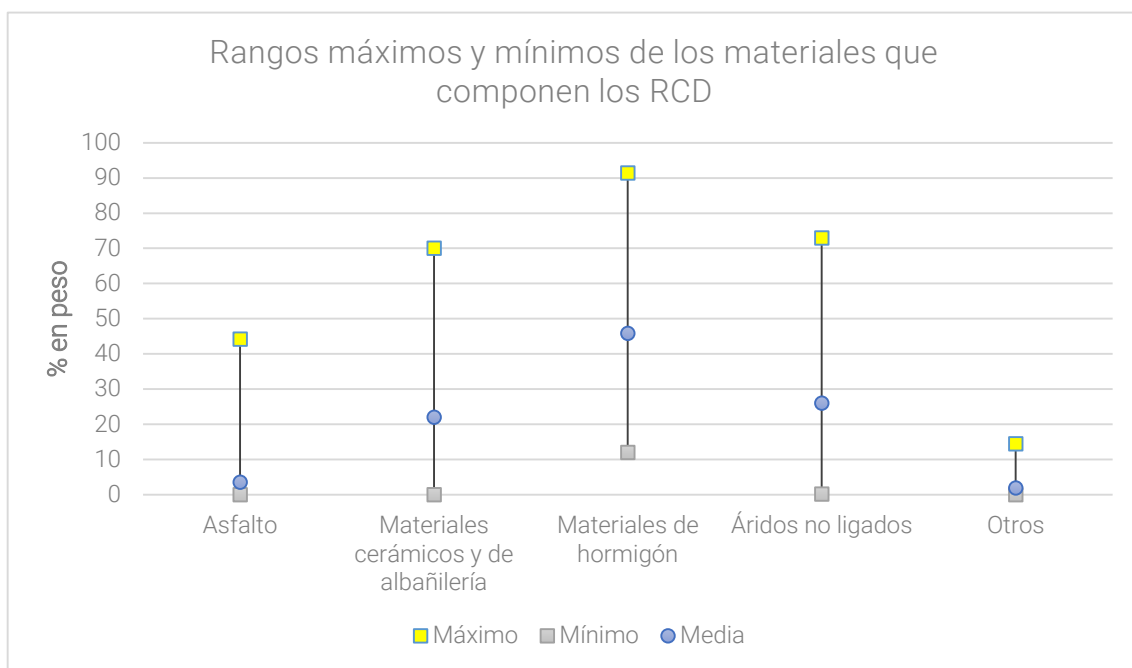


Figura 2-2 Rangos máximos y mínimos de los materiales que componen los RCD. Fuente: GERD (2010).

Por último, a nivel normativo los RCD se clasifican de acuerdo a la Lista Europea de Residuos (LER) traspuesta al ordenamiento jurídico español en la Orden MAM/304/2002, encontrándose agrupados en su epígrafe 17 (Tabla 2-1):

Código	Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)
17 01	Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
17 02	Madera, vidrio y plástico
17 03	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados
17 04	Metales (incluidas sus aleaciones)
17 05	Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje
17 06	Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto
17 08	Materiales de construcción a partir de yeso
17 09	Otros residuos de construcción y demolición

Tabla 2-1 Capítulo 17 de la Lista Europea de Residuos (Ministerio de Medio Ambiente, 2002).

Del capítulo 17 de la LER (Tabla 2-1) se han empleado en el presente proyecto técnico los materiales codificados como 17 01 y 17 05, que se corresponden respectivamente con el hormigón y la piedra.

2.2. Producción de los RCD

La generación de RCD está ligada de modo indisoluble con la actividad constructora, cuyos usos y costumbres difieren entre países. Por ello, se recoge a continuación un resumen del panorama mundial, europeo y español con el fin de proporcionar una visión de conjunto sobre la producción de RCD y sus diferentes características según países.

A nivel mundial, a partir del compendio de datos extraídos de distintas publicaciones (Gómez-Meijide, 2015) se presentan en la Tabla 2-2 los datos –según su disponibilidad– de producción de RCD, su porcentaje respecto del total de residuos sólidos y el % reciclado.

País	Producción RCD	% con respecto total residuos sólidos	% Reciclado	Autor
Mundo	-	13-29	-	Bossink y Brouwers (1996)
China	- 88 mill ton/año	-	30-40	Li (2008)
USA	136 mill ton/año	-	20-30	Sandler y Swingle (2006)
	- 610-780 mill ton/año en 2002	23	-	Apotheker (1990)
		-	-	Cochran y Townsend (2010)
Australia	-	16-40	-	Bell (1998)
Hong Kong	2900 ton/día	-	-	Hong Kong EPD (2007)
Taiwán	-	15-20	-	EPA (1999)

Tabla 2-2 Recopilación de datos de producción de RCD en diferentes países. Fuente: Gómez-Meijide (2015).

A nivel europeo se ha venido trabajando con creciente interés en la compilación de datos que permitan conocer la situación en cada uno de los Estados Miembro, con el fin de impulsar mejores políticas en materia de gestión de los RCD.

País	RCD (mill ton)	% Reciclado	País	RCD (mill ton)	% Reciclado
Alemania	72.40	86	Irlanda	2.54	80
Austria	6.60	60	Italia	46.31	-
Bélgica	11.02	68	Letonia	2.32	46
Bulgaria	7.80	-	Lituania	3.45	60
Chipre	0.73	1	Luxemburgo	0.67	46
Dinamarca	5.27	94	Malta	0.8	-
Eslovaquia	5.38	-	Países Bajos	23.9	98
España	31.34	14	Polonia	38.19	28
Estonia	1.51	92	Portugal	11.42	5
Finlandia	5.21	26	Reino Unido	99.10	75
Francia	85.65	45	Rep. Checa	14.70	23
Grecia	11.04	5	Rumanía	21.71	-
Hungría	10.12	16	Suecia	10.23	-

Tabla 2-3 Producción de RCD y % reciclado en los Estados Miembro de la UE. Fuente: DG ENV (2011).

Los datos expuestos en la Tabla 2-3 forman parte de un informe de la Comisión Europea (DG ENV, 2011) y pertenecen a fechas anteriores a la crisis económica de 2008. Como datos más reseñables, la media de porcentaje reciclado de RCD era de un 46% y los países que la encabezaban eran los Países Bajos y Dinamarca con un 98% y 94% respectivamente.

En cuanto a las cifras sobre la producción de RCD en España, el PEMAR (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015) recoge como parte de su diagnóstico datos elaborados por el INE en el año 2012 (Tabla 2-4) que reflejan un importante descenso respecto a lo visto en la anterior tabla (Tabla 2-3) y se alejan de las previsiones del PNIR (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008) como consecuencia del declive del sector de la construcción a partir del año 2008.

	Residuos generados (ton)	Residuos destinados a valorización (ton)	Residuos destinados a rellenos (ton)	Residuos destinados a incineración (ton)	Residuos depositados en vertedero (ton)
No peligrosos	27,637,698	19,007,146	4,328,999	0	4,301,553
Peligrosos	66,156	3,878	0	0	62,278
Total	27,703,854	19,011,024	4,328,999	0	4,363,831

Tabla 2-4 Volumen de RCD producidos en 2012. Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015).

A la vista de la Tabla 2-4 puede verse cómo el porcentaje de RCD destinados a valorización supone un 68.63%. No obstante, diversas fuentes (REUoMW, 2015 y Rodríguez-Robles et al., 2015) señalan entre los principales obstáculos en nuestro país para realizar una mejor gestión de los RCD:

- La inexistencia de procesos de demolición selectiva, excepto en algunas comunidades como el País Vasco, lo que condiciona la calidad de los RCD.
- La desigual distribución de las plantas de tratamiento de RCD en las diferentes CC.AA. (Figura 2-3).
- La escasa conciencia por parte de muchos profesionales del sector de la construcción, ayudada por un alto grado de subcontratación donde, por una parte, los profesionales carecen de una adecuada formación ambiental, y por otra, no se delimitan correctamente las responsabilidades.
- La disponibilidad de vertederos a costes competitivos frente a los de valorización.
- La abundancia de recursos naturales en España desincentiva el desarrollo del mercado de los RCD.

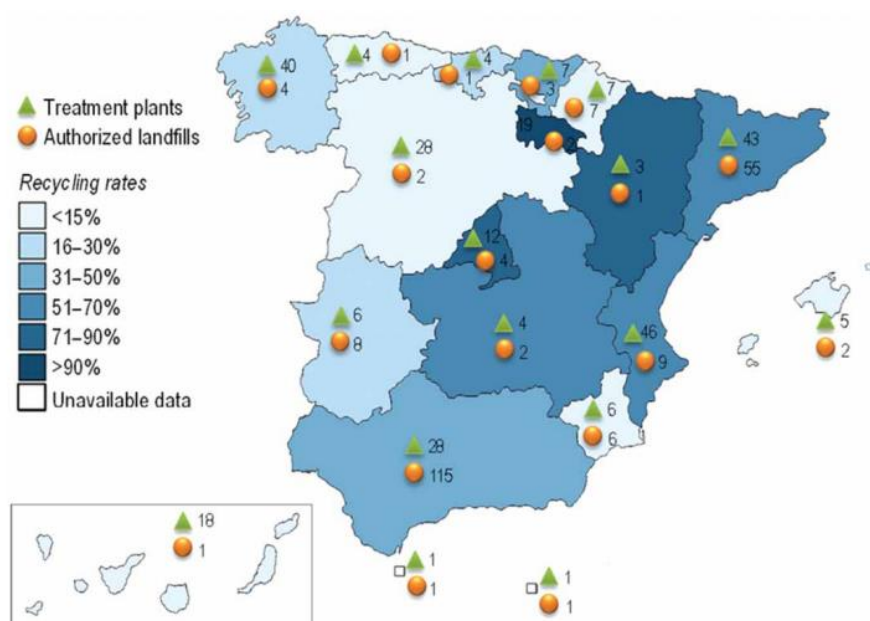


Figura 2-3 Plantas de tratamiento de RCD en España y porcentajes de reciclaje de RCD. Fuente: Rodríguez-Robles et al. (2015).

2.3. Gestión de los RCD

Una vez conocidos los datos de producción de RCD y asumiendo que su generación es inevitable, cabe preguntarse cómo han de gestionarse para minimizar los impactos que ejercen sobre el medio ambiente. En este sentido suele proponerse un enfoque jerárquico que se materializa mediante la aplicación de los siguientes principios que, ordenados según su impacto sobre el medio ambiente –de bajo a alto– son:

- Prevención: medidas que reducen la cantidad de residuos, sus impactos negativos para el medioambiente o el contenido de sustancias peligrosas.
- Reutilización: empleo del mismo material para el uso para el que fue concebido o como materia prima para un uso diferente.
- Reciclado: tras someterse a un proceso de transformación se pueden utilizar para el mismo fin que fueron concebidos u otro distinto.
- Otro tipo de valorización: por ejemplo, la valorización energética.
- Eliminación: aquellos residuos que no pueden ser sometidos a ninguna de las anteriores técnicas pueden ser depositados en vertederos cuyas condiciones garantizan el mínimo impacto posible sobre el medio ambiente.

Dado que los materiales que componen los RCD son heterogéneos, las técnicas anteriormente expuestas no son aplicables por igual a todos sus componentes. Para ilustrar este hecho se incluyen a continuación en la Tabla 2-5 los posibles destinos de cada uno de los componentes añadiéndose la valorización o revalorización en el caso de aquellos que pueden aprovecharse a nivel energético.

Tipo de residuo	Reutilización	Reciclado	Revalorización
Material cerámico	✓	✓	
Hormigón		✓	
Materiales pétreos		✓	
Madera	✓		✓
Vidrio		✓	
Plástico		✓	✓
Metales	✓	✓	
Papel y cartón		✓	✓
Yeso			✓
Materiales bituminosos		✓	

Tabla 2-5 Destinos posibles de las fracciones de los RCD. Fuente: Conselleria de Medio Ambiente (2005).

Dentro de las fracciones de los RCD que nos ocupan –hormigón y materiales pétreos– aparece como opción común el reciclado, por lo que en las próximas líneas se resumirán a partir de (CEDEX, 2014) las principales labores para el procesado de los residuos de construcción con el objetivo de reciclarlos.

El que podría denominarse “paso cero” comienza incluso antes de iniciarse el reciclado y tiene que ver con la necesidad de emplear métodos de demolición que, por un lado, ayuden a disminuir la presencia de impurezas en los escombros (p.ej. el yeso) y por otro, limiten su tamaño para poder ser tratados por los trituradores de las plantas (de 400 mm a 700 mm, en el caso de las móviles; y a 1200 mm en el caso de las fijas).

Las operaciones de tratamiento se realizan en dos tipos de plantas:

- Móviles: se suelen desplazar a las obras para reciclar en origen. Disponen de una capacidad de procesamiento de hasta 100 toneladas/hora y montan equipos de precibado, trituración, separación magnética y cribado final.
- Fijas: se caracterizan fundamentalmente por proporcionar una mayor capacidad de tratamiento que las móviles (sobre 300-400 toneladas/hora) y son análogas a las plantas de machaqueo de árido natural con la inclusión de sistemas que permiten separar las impurezas.

A mayores han de mencionarse las plantas de *transferencia*, cuyo cometido consiste en actuar de depósito temporal para abaratar los costes de transporte cuando las plantas de tratamiento se sitúan a grandes distancias.

2.4. Obtención de árido reciclado (AR) a partir de RCD

Una vez que se han visto las distintas posibilidades a la hora de gestionar los RCD, el reciclado se presenta como la opción preferente en el caso de los materiales cerámicos, pétreos y el hormigón –que suponen alrededor del 70% del total– y cuyo destino fundamental será la producción de árido reciclado (AR).

Con el objetivo de que el árido reciclado obtenido cumpla los requisitos técnicos y especificaciones exigidos por la normativa, en las plantas de tratamiento de RCD se llevan a cabo los procesos expuestos en la Figura 2-4, excluyéndose de esta descripción las plantas móviles, pues habitualmente se utilizan para la obtención de árido reciclado in situ que será empleado en usos de menor nivel cualitativo que el original.

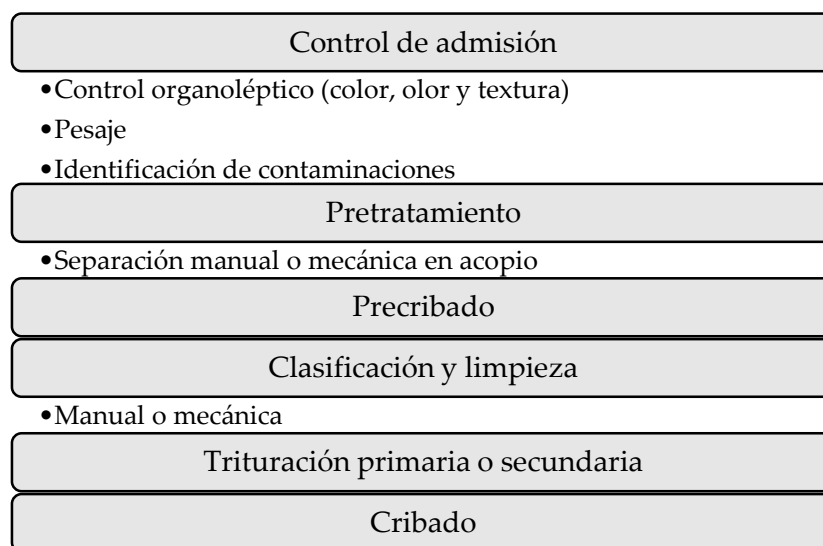


Figura 2-4 Esquema general de procesos de una planta de reciclaje. Fuente: GERD (2010)

A continuación, se describen brevemente los pasos a seguir según su orden en el proceso (GERD, 2010):

1. Control de admisión: se procede al pesaje e inspección visual verificando que no estén presentes residuos peligrosos.
2. Pretratamiento: son separados los elementos impropios como: piezas mayores de madera, paredes aislantes, metales, etc.
3. Precibado: por una parte, se realiza el cribado pre-alimentación para controlar el tamaño máximo y por otra, se separan aquellos materiales con una granulometría más fina que no necesitan pasar por trituración y clasificación y cuya calidad suele ser inferior.
4. Clasificación y limpieza: se separan los materiales perjudiciales del resto de residuos tratados de modo manual (triaje) o mecánico (electroimanes, soplantes, ...)
5. Trituración 1ª o 2ª: habitualmente se emplean machacadoras, molinos de impactos o de conos. El tipo de trituración elegido condiciona el producto

final ya que influye en propiedades como el índice de lajas, el coeficiente de forma y la granulometría.

6. Cribado: separación por husos granulométricos del producto final.

Por último, una vez conocidos los procesos necesarios para la obtención del árido reciclado y su heterogeneidad es necesario clasificarlos en función de características que permitan agruparlos dentro de su diversidad. Si bien existen diferentes criterios basados en la calidad, uso o limpieza, es bastante común hacerlo por su composición. Podemos pues discernir –según la categorización propuesta en (GERD, 2010)– entre:

- Áridos Reciclados de Hormigón: cuando el contenido de hormigón y piedra natural es mayor igual al 90% en peso. En España suponen menos del 15% de la producción.
- Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón: tienen un contenido de hormigón y piedra inferior al 90% y el contenido de material cerámico es inferior al 30%.
- Áridos Reciclados Mixtos Cerámicos: cuando el contenido de material cerámico es superior al 30% en peso.
- Áridos Reciclados Cerámicos: en este caso la fracción de materiales cerámicos supone más del 70% en peso. Básicamente de origen industrial.

Cabe reseñar que la mayoría de los áridos reciclados producidos en España son de carácter mixto, bien sea aquellos con predominio del hormigón/piedra natural o bien los que presentan un contenido mayor de materiales cerámicos. Este hecho determina su rango de aplicaciones, dado que en el primer supuesto uno de sus principales usos es en bases y subbases de carreteras; mientras que en el segundo caso, los materiales cerámicos se suelen emplear como material de relleno careciendo de aplicación en capas de firmes (Pasandín, 2013).

2.5. Propiedades de los AR

Las propiedades de los AR vienen determinadas por las proporciones de cada uno de sus componentes, lo cual les confiere una gran heterogeneidad. No obstante, es posible identificar ciertas tendencias en el comportamiento que presentan respecto a las siguientes propiedades generales:

- Inestabilidad granulométrica: muestran cierta tendencia a fragmentarse, de modo que aumenta la cantidad de finos y disminuye la de gruesos de manera que los áridos pierden rugosidad y angulosidad (Melbouci, 2009).
- Propiedades volumétricas: se caracterizan por una mayor porosidad y menor densidad respecto de los áridos naturales (CEDEX, 2014).
- Propiedades geométricas: dado que se obtienen por un proceso de machaqueo, habitualmente presentan un índice de lajas menor que los áridos naturales y un mayor porcentaje de caras de fractura (Adams, 2012).
- Textura: son más rugosos que los áridos naturales debido a la presencia de mortero adherido, lo que les confiere un mayor rozamiento interno, pero incrementa su dificultad para ser envueltos por ligante bituminoso (Shen y Du, 2005).

2.6. Marco normativo

Desde las instituciones tanto a nivel europeo como nacional ha ido aumentando el interés por la gestión de los RCD dentro de las políticas de gestión sostenible, lo que se ha venido traduciendo en los últimos tiempos en normativas y planes de diversa índole.

A nivel europeo destaca la *Directiva Marco de Residuos* (Unión Europea, 2008) que sentó las bases para la implantación de un marco jurídico común sobre el tratamiento de residuos en la Unión Europea, obligando a los Estados Miembro a establecer planes de gestión de residuos.

En España, el primer plan de residuos fue el *Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición* (PNRCD) 2001-2006 (Ministerio de Medio Ambiente, 2001), al que siguió el *Plan Nacional Integrado de Residuos* (PNIR) 2008-2015 (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008) y cuyo sustituto ya ha sido aprobado bajo la

denominación de *Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos* (PEMAR) 2016-2022 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015).

De modo más conciso y en cuanto a normativa sectorial se refiere, la última revisión (03/01/2015) del *Pliego de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3) (Ministerio de Fomento, 2015) incluye en varios de sus artículos mención expresa respecto al uso de AR. Podemos encontrar referencias al empleo de AR en los artículos:

- Art. 510 “Zahorras”: se permite su uso para categorías de tráfico pesado T2 a T4 siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas.
- Art. 513 “Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento)”: en donde se limita el uso de AR a categorías de tráfico pesado de T2 a T4 (T1 y T2 con prescripciones adicionales).
- Art. 542 “Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso”: donde se excluye el empleo de AR en su fracción fina –cernido por el tamiz de 2 mm y retenido por el de 0.063 mm– especificando que el árido deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o grava natural, pero sí se permite en su fracción gruesa (> 2 mm).
- Art. 550 “Pavimentos de hormigón”: que permite el uso de materiales granulares reciclados en la capa inferior de los pavimentos bicapa.
- Art. 551 “Hormigón magro vibrado”: que permite el uso de materiales granulares reciclados.

La normativa técnica para la fabricación de mezclas bituminosas empieza por tanto a introducir el empleo de AR en sus diferentes aplicaciones, si bien lo hace imponiendo, en general, los mismos requerimientos –a veces incluso prescripciones adicionales– para áridos de distinta naturaleza.

No obstante, en el PEMAR (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015) se alude a la creación de instrumentos normativos como medida para lograr la consolidación de las actividades de reciclado.

Capítulo 3
PROPIEDADES DE LAS
MEZCLAS BITUMINOSAS

3. Propiedades de las mezclas bituminosas

Los firmes deben atenuar las solicitaciones que reciben de modo que lleguen a la explanada sin dañarla, así como protegerla de las distintas acciones climáticas y garantizar una superficie de rodadura cómoda y segura.

Las propiedades que deben presentar las mezclas bituminosas a emplear en firmes de carreteras varían según sus condiciones de utilización, por lo que su conocimiento es fundamental para abordar su diseño y determinar su rango de aplicaciones.

A continuación, se describen las principales propiedades a considerar en el diseño de las mezclas bituminosas.

3.1. Propiedades volumétricas

Cuando se habla de las propiedades volumétricas se emplean los términos que a continuación se definen (AENOR, 2003):

- V_m (huecos de aire o huecos en mezcla): volumen que ocupan los huecos de aire en una probeta bituminosa, expresado como un porcentaje del volumen total de la probeta.
- VMA (huecos en el árido mineral): volumen del espacio hueco intergranular que incluye los huecos de aire (V_m) y el volumen del ligante bituminoso de la probeta, expresado como porcentaje del volumen total de la probeta.
- VFB (huecos rellenos con ligante): porcentaje de huecos rellenos con ligante que existen en el árido mineral, expresado como porcentaje del volumen de huecos en el árido mineral (VMA).

Al determinar las propiedades volumétricas cabe señalar que parte del ligante es absorbido por los áridos, hecho que se refleja en la distinción entre Pba (porcentaje de ligante absorbido por los poros del árido) y Pbe (porcentaje de ligante no absorbido por el árido o ligante efectivo).

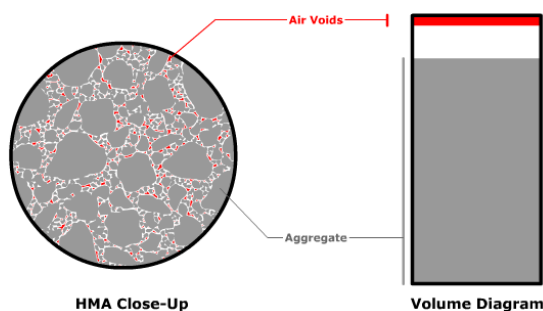


Figura 3-1 Vm (Huecos de aire). Fuente: Pavement Interactive (2012).

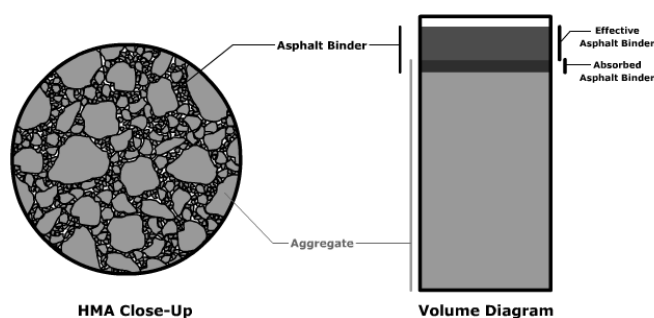


Figura 3-2 VFB (Huecos rellenos con ligante). Fuente: Pavement Interactive (2012).

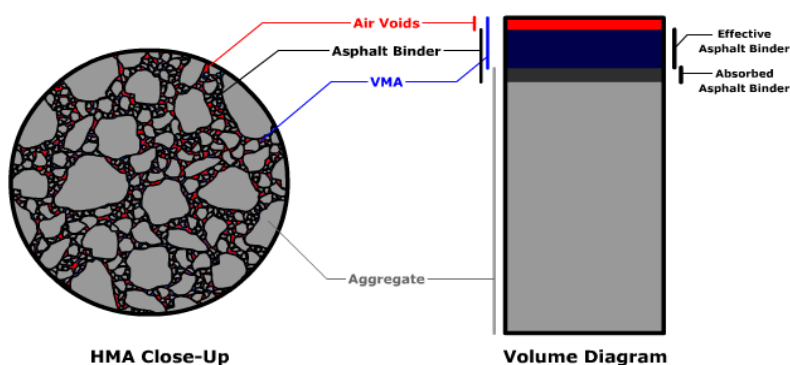


Figura 3-3 Vm, VFB y VMA. Fuente: Pavement Interactive (2012).

En el caso de la normativa europea, esta diferenciación se considera admitiendo cierta tolerancia en la determinación de los huecos en el árido mineral (VMA) con el objetivo de no sobreestimarlos, de modo que los parámetros empleados para determinar los huecos son:

- ρ_m (densidad máxima de la mezcla) [Mg/m^3]: masa por unidad de volumen (sin incluir los huecos de aire) de un material bituminoso a una temperatura de ensayo conocida. Se puede determinar mediante tres procedimientos: volumétrico, hidrostático y matemático (AENOR, 2010b).
- ρ_b (densidad aparente de la mezcla) [Mg/m^3]: masa por unidad de volumen (incluyendo los huecos de aire) de una probeta de mezcla bituminosa a una temperatura de ensayo conocida mediante: SSD (superficie seca saturada),

probeta impermeabilizada, método geométrico y procedimiento en seco (AENOR, 2012a).

- **B**: contenido de ligante de la probeta en porcentaje sobre el total de la mezcla.
- ρ_B [Mg/m³]: densidad del ligante bituminoso.

Y las expresiones resultantes para la obtención de V_m , VMA y VFB:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100(\%) \quad (3.1)$$

$$VMA = V_m + B \frac{\rho_b}{\rho_B} (\%) \quad (3.2)$$

$$VFB = \frac{B \rho_b}{VMA} \times 100(\%) \quad (3.3)$$

Las propiedades volumétricas están estrechamente relacionadas con la durabilidad de las mezclas bituminosas pudiendo apreciarse en:

- **V_m**: a mayor contenido de huecos de aire, más rápido se produce el envejecimiento pudiendo incluso fallar por fatiga si se supera el 6%. Sin embargo, se recomienda un contenido mínimo del 3% para prevenir la formación de roderas (Khandal y Chakraborty, 1996).
- **VMA**: es necesario un contenido mínimo que garantice la existencia del espacio suficiente para que el óptimo de ligante se pueda acomodar en la mezcla (Murali Krishnan y Rajagopal, 2004).
- **VFB**: cuanto menor sea el contenido de huecos rellenos con ligante, menor será la durabilidad (Murphy y Bentsen, 2001).

3.2. Propiedades mecánicas

3.2.1. Rigidez

La rigidez de una mezcla bituminosa se define como la relación entre las tensiones y deformaciones para una carga y tiempo de aplicación dadas. Depende numerosos factores, tales como el estado tensional, las propiedades mecánicas de los componentes de la mezcla, su composición, el tiempo de aplicación de la carga, etc.

Dado que las capas de base y subbase de un firme flexible son las que absorben la mayor parte de los esfuerzos ocasionados por el tráfico, es importante lograr que presenten una elevada rigidez para que las cargas lleguen atenuadas a la explanada.

Puesto que las mezclas bituminosas se componen de áridos, ligante hidrocarbonado y huecos de aire, su comportamiento conjunto depende de la interacción entre estas tres fases, siendo notoria la diferencia de rigidez entre el ligante y los áridos (Abbas et al., 2003). Además, mientras que los áridos tienen naturaleza elastoplástica, la del ligante hidrocarbonado es viscoelástica, de modo que las mezclas bituminosas son en general un material viscoelastoplástico (Kraemer et al., 2004).

El comportamiento de las mezclas bituminosas depende por tanto de la temperatura y tiempo de aplicación de la carga, siendo el ligante hidrocarbonado –de naturaleza viscoelástica– quien determina la respuesta de la mezcla. En el caso de bajas temperaturas y cortos periodos de aplicación de la carga, la respuesta será elástica, mientras que a elevadas temperaturas y largos periodos de aplicación, será viscosa. Si las temperaturas y los periodos de aplicación son intermedios –escenario previsto de funcionamiento de los firmes– la respuesta será viscoelástica.

La caracterización del comportamiento de las mezclas bituminosas viene dada por si este es elástico o viscoelástico. En el primer caso, que se produce cuando las cargas aplicadas son pequeñas –y por tanto la deformación es recuperable en su práctica totalidad– se emplea el *módulo resiliente*. En el segundo supuesto, el comportamiento viscoelástico se puede describir mediante *modelos mecánicos* o a través de *funciones de respuesta* siendo las más usuales el módulo complejo y la deformación de fluencia.

Módulo resiliente

En una capa de mezcla bituminosa sometida a la acción de cargas cíclicas se pueden considerar dos tipos de deformaciones: *resilientes* o *elásticas* –cuya recuperación es instantánea– y *remanentes* o *plásticas*, las cuales permanecen después de retirar la carga.

A medida que aumenta el número de repeticiones de una carga cíclica, la deformación plástica para cada ciclo se reduce hasta prácticamente desaparecer en los

ciclos finales, momento en el que se alcanza un comportamiento resiliente, hecho que se puede apreciar en la Figura 3-4.

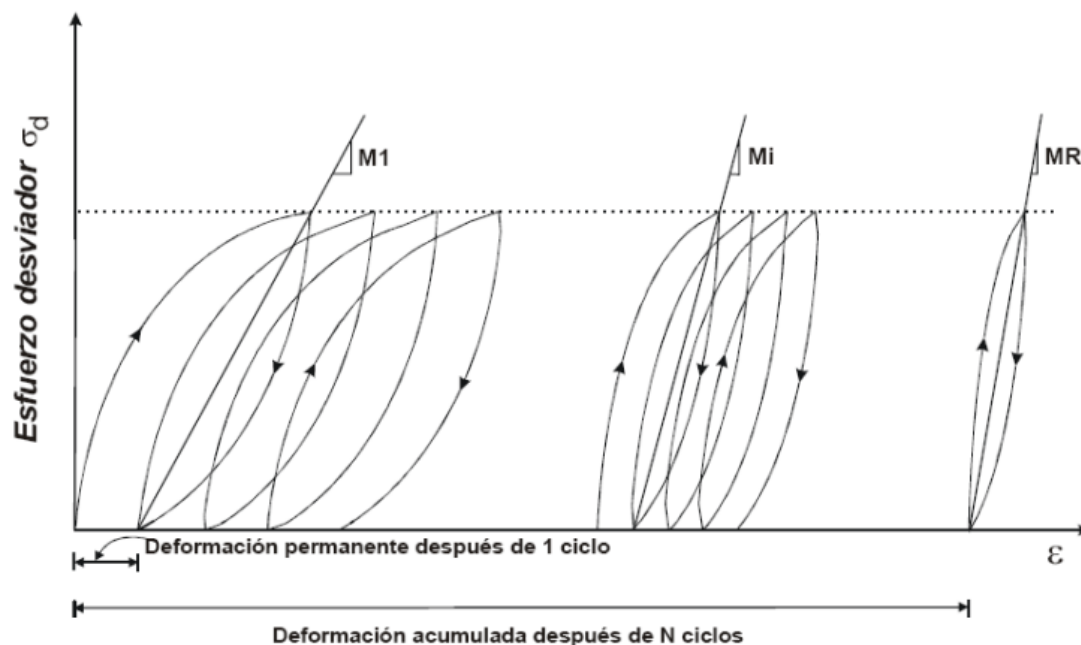


Figura 3-4 Deformación plástica acumulada después de N ciclos de carga. Fuente: Moreno Rubio (2005).

A la vista de la Figura 3-4, se observa que tras un determinado número de ciclos de carga, la relación entre las tensiones y deformaciones en la mezcla bituminosa se hace prácticamente constante, pudiendo asumirse un comportamiento elástico. Dicha relación se denomina *módulo resiliente* M_R y es el cociente entre el esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial σ_a y la deformación axial recuperable ϵ_r .

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (3.4)$$

Determinación del módulo resiliente

El ensayo empleado de forma más frecuente para la determinación del módulo resiliente es el de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas UNE-EN 12697-26 (AENOR, 2006a) consistente en someter una probeta cilíndrica de 101.5 mm de diámetro y 63.5 mm de altura, compactada mediante 75 golpes por cara, a cargas de compresión – que suelen ser pulsos de tipo sinusoidal aplicados un número suficiente de ciclos (entre 50 y 200 a frecuencias de 0.3, 0.5 y 1 Hz)– en el plano vertical diametral. El ensayo se realiza en una cámara termostatazada con temperaturas habituales de 5, 25 y 40 °C.

Así se obtiene el módulo resiliente como:

$$M_R = \frac{F \cdot (0.27 + \nu)}{z \cdot h} \quad (3.5)$$

Siendo:

M_R : módulo resiliente (MPa)

F : carga máxima vertical aplicada (N)

z : amplitud de la deformación horizontal total obtenida durante el ciclo de carga (mm)

h : espesor medio de la probeta (mm)

ν : coeficiente de Poisson. Habitualmente 0.35.

3.2.2. Deformación permanente

Las deformaciones permanentes se producen cuando las mezclas bituminosas presentan una baja rigidez, algo que sucede a elevadas temperaturas o grandes periodos de aplicación de las cargas. Estas deformaciones se pueden presentar en forma de *roderas* en la capa de rodadura de los firmes.

Entre los factores que influyen en su formación destacan: el tamaño, forma, textura y granulometría de los áridos, la rigidez y contenido del ligante, el porcentaje de huecos en mezcla y en árido mineral, el método de compactación la temperatura, el estado tensional, el contenido de agua y el número de repeticiones de la carga (Sousa et al., 1991).

Para caracterizar el comportamiento de las mezclas bituminosas frente a la deformación permanente suele recurrirse a los siguientes ensayos: cíclico de compresión uniaxial y de rodadura.

Ensayo cíclico de compresión uniaxial

Se somete una probeta –habitualmente cilíndrica Marshall a temperatura fija– a cargas de compresión uniaxial aplicadas de manera repetida y se miden las deformaciones plásticas acumuladas en función del número de ciclos de carga.

Las cargas se aplican situando la probeta entre dos platos de carga planos y paralelos –uno fijo y otro móvil– a los que se les administra un lubricante, p.ej. grasa de

silicona y polvo de grafito, con la finalidad de reducir la fricción entre la probeta y los platos.

Ensayo de rodadura

Evalúa la susceptibilidad de un material bituminoso a deformarse midiendo la profundidad de la rodera producida por pasadas repetidas, a una temperatura fija, de una rueda sometida a cierta carga. Existen diversos ensayos según las características de la probeta ensayada, la carga, velocidad, la rueda y la duración, entre otros, enunciándose a continuación las principales características del descrito en la UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008) según el tamaño del dispositivo empleado.

	Probeta	Carga	Velocidad	Neumático	Duración
<i>Extragrande</i>	700x500 mm	10000 ± 100 N	2.5 + 0.5 s	6.00 R9 con anchura rodada de 110 ± 5 mm	Nº ciclos o profundidad de la rodera (lo que se dé antes). Varía según dispositivo.
<i>Grande</i>	500x180x50 mm 500x180x100 mm	5000 ± 50 N	1.0 ± 0.1 Hz	Diámetro 400 mm y espesor 80 mm inflado a 600 ± 30 kPa	
<i>Pequeño</i>	260x300 mm	$\left(700 \frac{50 \pm 5}{50}\right) \pm 10$ N	26.5 ± 1.0 ciclos de carga cada 60 s	Diámetro exterior 200-205 mm con grosor de 20 ± 2 mm	

Tabla 3-1 Principales características del ensayo de rodadura (AENOR, 2008).

3.2.3. Resistencia a la fatiga

Las cargas de tráfico que actúan sobre los materiales bituminosos dispuestos en los firmes de las carreteras suelen ser de corta duración y carácter intermitente, dado que se aplican cada vez que pasa un vehículo. Sin embargo, aunque la magnitud de estas cargas sea inferior a la resistencia a rotura del material frente a una carga individual, la acumulación de los efectos producidos por un número suficientemente elevado de sollicitaciones puede producir el agotamiento por fatiga de la mezcla bituminosa.

El fenómeno por el cual se manifiesta la fatiga se conoce como *piel de cocodrilo* y se caracteriza por la aparición en la capa de rodadura de un conjunto de fracturas interconectadas formando pequeñas piezas.

De manera clásica en el fallo por fatiga se pueden distinguir dos modos de fallo, descritos a continuación (Di Benedetto et al., 2004) e ilustrados en la Figura 3-5:

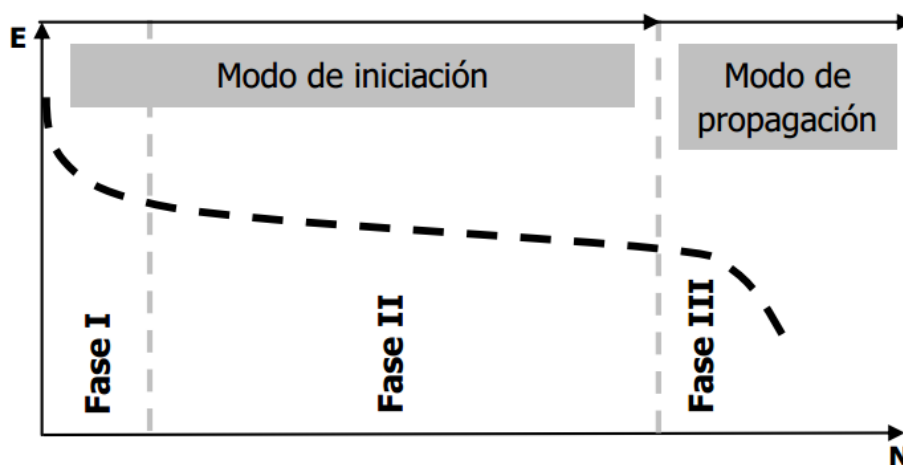


Figura 3-5 Fases del proceso de agotamiento por fatiga de una mezcla bituminosa. Fuente: Di Benedetto et al. (2004).

- **Iniciación:** la degradación del material se manifiesta con la aparición de microfisuras que conllevan una reducción del módulo de rigidez del material bituminoso. Se subdivide en:
 - **Fase I** (de adaptación): rápido descenso del módulo de rigidez de la mezcla a causa de la excitación repetitiva, el calentamiento de la mezcla por su comportamiento viscoso y la tixotropía del ligante, entre otros.
 - **Fase II** (cuasi estacionaria): el módulo de rigidez desciende de forma continua.
- **Propagación. Fase III** (de fallo): a partir de un cierto nivel de daño, la unión de las microfisuras existentes genera macrofisuras que se propagan en el material ocasionando un rápido descenso del módulo de rigidez.

Entre los principales condicionantes para el agotamiento por fatiga debidos a las propiedades de las mezclas bituminosas destacan: el contenido de ligante (cuanto mayor sea –hasta cierto límite– mayor es la resistencia a fatiga) y el contenido de huecos de aire.

Ensayo de tracción indirecta

Dentro de los ensayos que permiten determinar la ley de fatiga de una mezcla bituminosa puede distinguirse entre los que se realizan a *tensión o carga controlada*, en los

que se aplica una carga o tensión de amplitud constante y los de *deformación o desplazamiento controlado*, donde se somete la probeta a la carga que produce deformación o desplazamiento de amplitud constante.

En el caso del primer grupo, estos suelen ser de aplicación para mezclas dispuestas en capas de gran espesor donde la rigidez es el parámetro determinante –de modo que a mayor rigidez, mayor será la vida esperada a fatiga– (Khalid, 2000).

En cuanto al segundo conjunto, son empleados para caracterizar el comportamiento de mezclas bituminosas en capas delgadas, ya que el aspecto clave en este supuesto no es necesariamente la rigidez sino la recuperación elástica tras cesar la aplicación de las cargas (Khalid, 2000).

El ensayo de tracción indirecta UNE-EN 12697-24: 2013, anexo E (AENOR, 2013a) se encuentra dentro del grupo de los ensayos a carga o tensión de amplitud constante, de manera que una probeta cilíndrica Marshall es sometida a cargas de compresión repetidas de tipo Haversine en el plano diametral vertical. La probeta falla a lo largo de la parte central del diámetro vertical debido a que los pulsos de carga aplicados provocan tensiones de tracción perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga. La vida hasta rotura por fatiga se define por tanto como el número total de aplicaciones de carga que causa una rotura completa de la probeta.

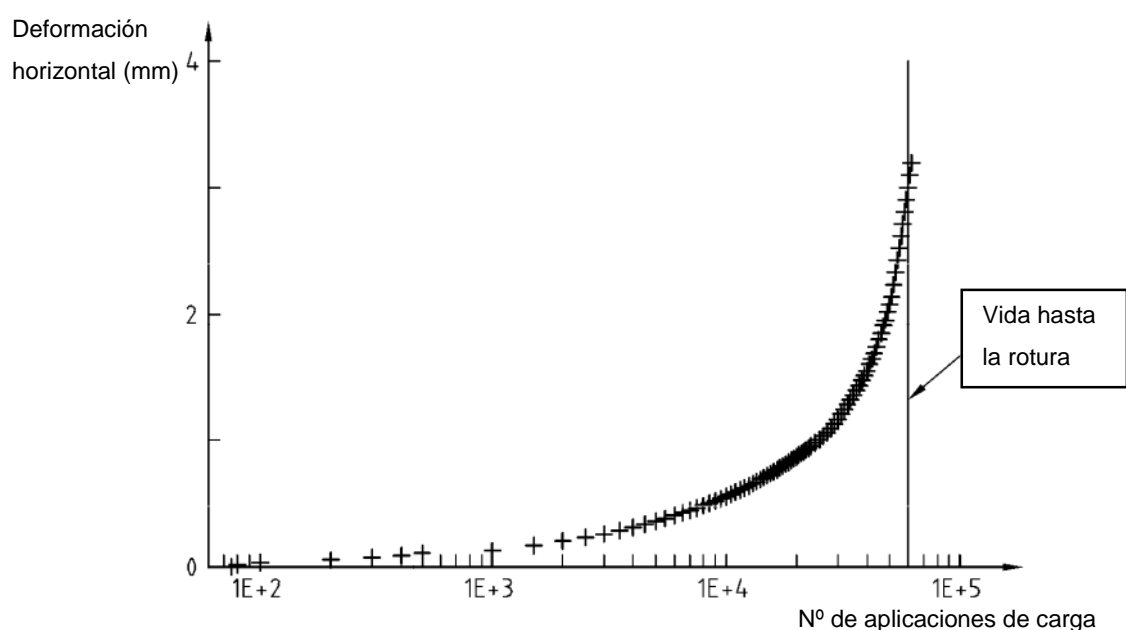


Figura 3-7 Determinación de la vida hasta la rotura de una probeta. Fuente: AENOR (2013a).

3.3. Durabilidad

La durabilidad de una mezcla bituminosa es su resistencia a los agentes meteorológicos –que provocan la oxidación o endurecimiento del betún, así como su sensibilidad al agua–, la fisuración y la abrasión ocasionada por el tráfico (Lavin, 2003).

Las mezclas bituminosas durables tienen suficiente ligante para recubrir y proteger los áridos, así como para permitir su compactación. Demasiado betún puede conducir a una sobre compactación, apareciendo el ligante en la superficie tras ser exudado. No obstante, una cantidad insuficiente producirá una muy fina película protectora sobre los áridos, de modo que habrá múltiples huecos de aire interconectados en la mezcla empeorando su sensibilidad al agua y facilitando el envejecimiento del betún (Lavin, 2003).

3.4. Sensibilidad al agua

La sensibilidad al agua es la facilidad que presentan las mezclas bituminosas para degradar progresivamente sus propiedades mecánicas debido a la acción del agua –tanto en estado líquido como en forma de vapor de agua– ocasionando:

- Stripping: pérdida de adhesividad en la interfaz entre betún y árido.
- Falta de cohesión del mástico (conjunto formado por betún y filler).

Esta pérdida de adhesividad y/o cohesión suele manifestarse mediante alguna de las siguientes formas: *desprendimiento* de la película de ligante de la superficie del árido sin presentar rotura evidente; *desplazamiento* del betún como consecuencia de la penetración del agua a través de las grietas presentes en el mismo, *emulsificación espontánea*, *presión en los poros* y producción de superficies de árido sin ligante debidas a *fenómenos de desenvuelta* causados por reacciones químicas y electrostáticas entre el agua y los áridos.

3.4.1. Factores intervinientes en la adhesividad árido-ligante

Propiedades del ligante hidrocarbonado

- Composición química: el betún se considera una mezcla compleja de moléculas polares y no polares donde la solidez de la adherencia depende

de la tendencia relativa de las moléculas a ser absorbidas en la superficie de los áridos y desplazadas en presencia de agua (Branthaver et al., 1993).

- Propiedades reológicas: la viscosidad mide la movilidad molecular y la magnitud de las fuerzas intermoleculares de atracción, de modo que altas viscosidades proporcionan mayores resistencias al fenómeno de desenvuelta, si bien dificultan las operaciones de mezclado (Bagampadde, 2004).

Propiedades de los áridos

- Composición química y mineralógica: los áridos empleados en firmes pueden agruparse en categorías según su relación con el fenómeno de desenvuelta, entre las que destacan dos grupos: *silíceos* y *calizos*. En el caso de los primeros, suelen presentar mala adhesividad con el betún; mientras que los segundos tienen pocos problemas al respecto (Bagampadde, 2004).
- Propiedades físicas: la adhesividad entre los áridos y el ligante también está condicionada por la angulosidad, porosidad y textura de los primeros. En el caso de la angulosidad, la presencia de aristas facilita la ruptura de la película de ligante. Por otro lado, el efecto de la porosidad depende de una combinación del porcentaje de huecos en mezcla, su tamaño y su estructura, de modo que puede ser tanto positiva –cuando favorece que el árido y ligante se entrelacen químicamente– como negativa, cuando permite el transporte de agua a través de la mezcla. Por último, cuanto más rugosa sea la textura de los áridos mejor será la adhesión con el ligante.

3.4.2. Ensayo de tracción indirecta tras inmersión

De entre los ensayos que buscan determinar la sensibilidad al agua se distingue entre los que se aplican a *probetas compactadas*, basados en la evaluación de una propiedad mecánica de la mezcla antes y después de sumergirla en agua y los aplicados a la *muestra suelta*, que solo reflejan la pérdida de adhesividad y no la de cohesión.

Pertenciente al primer grupo, el ensayo de tracción indirecta tras inmersión recogido en la norma UNE-EN 12697-12:2009 (AENOR, 2009a) consiste en la fabricación de probetas cilíndricas compactadas de mezcla bituminosa, que se subdividen en un

conjunto seco y otro húmedo –que se satura por vacío e introduce en un baño de agua a (40 ± 1) °C durante un periodo de 68 a 72 h–. Tras acondicionar ambos grupos a la temperatura de ensayo durante al menos 2 h, se lleva a cabo su rotura a tracción indirecta siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12697-23 (AENOR, 2004).

Finalmente, la relación de la resistencia a tracción indirecta, **ITSR**, se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$ITSR = 100x \frac{ITS_w}{ITS_d} (\%) \quad (3.6)$$

Obteniéndose **ITS_w** (resistencia media para el grupo húmedo) e **ITS_d** (resistencia media para el grupo seco) a partir de **ITS** (resistencia a tracción indirecta para cada probeta):

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot H \cdot d} (MPa) \quad (3.7)$$

Siendo:

P: carga de rotura (N)

H: altura de la probeta (mm)

d: diámetro de la probeta (mm)

Capítulo 4
ESTADO DEL ARTE
DE LAS MEZCLAS
BITUMINOSAS CON RCD

4. Estado del arte de las mezclas bituminosas con RCD

4.1. Mezclas bituminosas con RCD en caliente

La utilización de árido reciclado (AR) procedente de RCD ha encontrado hasta la fecha su uso mayoritario como árido para la fabricación de hormigón y en capas de firme sin ligante –bases y subbases– siendo su uso en mezclas bituminosas en caliente prácticamente testimonial. Cabe pensar que el distinto comportamiento que ofrecen las mezclas bituminosas con y sin AR ha sido uno de los factores que ha determinado su escaso uso hasta el momento, por lo que a continuación se comentan las principales propiedades de las mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados procedentes de RCD.

4.1.1. Propiedades volumétricas

Sin duda, una de las características que definen y condicionan el comportamiento de los áridos reciclados es su porosidad, en general superior a la de los áridos naturales y cuyo origen se encuentra en el mortero de cemento adherido que presentan. Esta provoca una superior absorción de ligante, hecho que queda patente en las propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas con RCD en caliente.

El aumento de absorción de ligante conlleva un mayor contenido óptimo de betún (Bo), una menor densidad aparente y un menor contenido de huecos en el árido mineral (VMA) y huecos rellenos con ligante (VFB). A su vez, el porcentaje de ligante absorbido (Pba) aumenta cuanto mayor es la cantidad de AR presente, mientras que el porcentaje de ligante efectivo (Pbe) –i.e. el no absorbido por el árido– disminuye, lo que provoca una reducción del espesor de la película de betún que recubre los áridos pudiendo afectar al comportamiento de la mezcla. Por otra parte, el contenido de huecos en mezcla (Vm) incrementa conforme lo hace la cantidad de AR, pues su mayor rugosidad supone una compactación más difícil, con un peor encaje entre áridos (Pasandín et al., 2013).

En las siguientes figuras (Figura 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3) se presenta la variación de las propiedades volumétricas según el porcentaje de sustitución de árido natural por reciclado procedente de hormigón en (Pasandín et al., 2013) observándose las tendencias descritas.

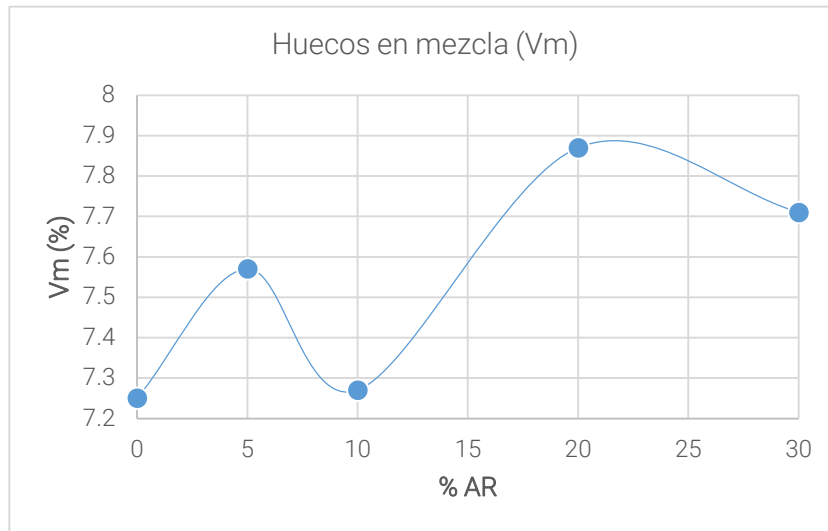


Figura 4-1 Huecos en mezcla (Vm) frente a porcentaje de AR empleado. Fuente: Pasandín et al. (2013).

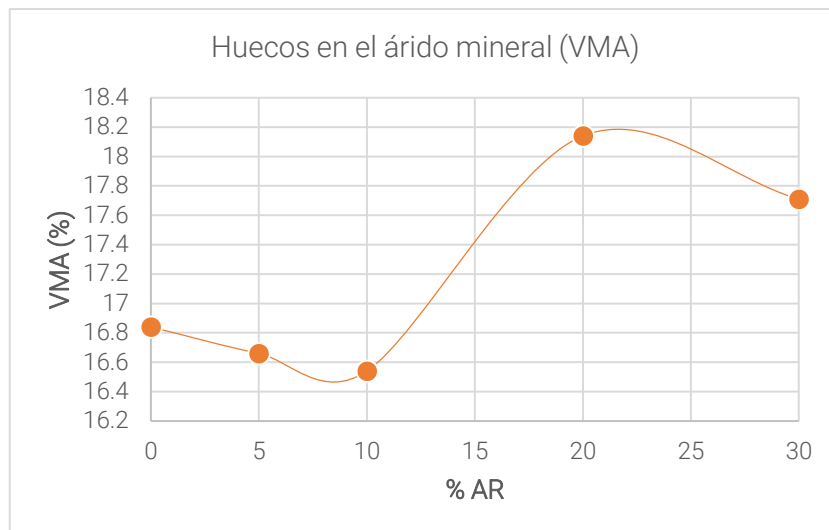


Figura 4-2 Huecos en el árido mineral (VMA) frente al porcentaje de AR empleado. Fuente: Pasandín et al. (2013).

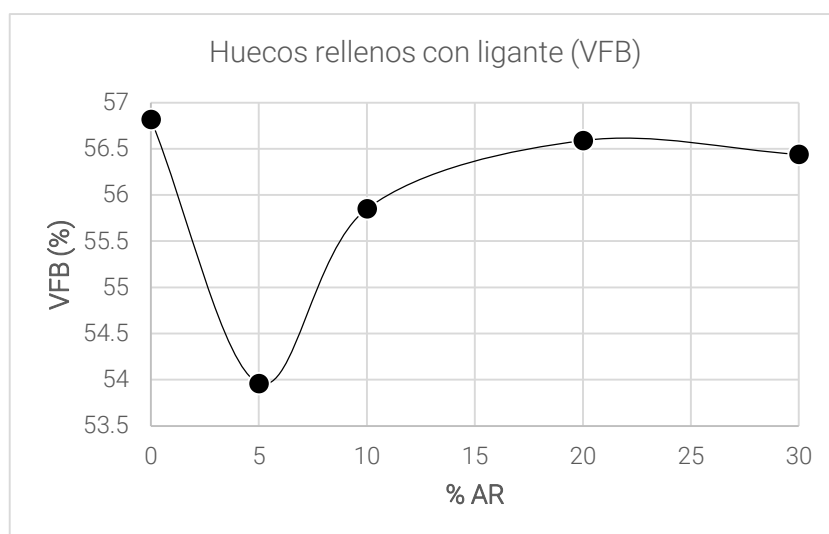


Figura 4-3 Huecos rellenos con ligante (VFB) frente al porcentaje de AR empleado. Fuente: Pasandín et al. (2013).

4.1.2. Sensibilidad al agua

La sensibilidad al agua consiste en el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla causado por la presencia de agua, tanto en estado líquido como gaseoso, en el interior de su microestructura (Kiggundu et al., 1988).

Entre los factores intervinientes en la sensibilidad al agua se encuentran las propiedades de los áridos, por lo que la heterogeneidad que caracteriza a los áridos reciclados propicia que los resultados obtenidos hasta el momento por diversos investigadores sean dispares, si bien la tendencia general es que la inclusión de AR en las mezclas bituminosas aumenta su sensibilidad al agua (Gómez-Meijide, 2015).

Shen y Du (2005), compararon dos grupos –uno seco y otro húmedo– en los que el árido natural empleado era de tipo ígneo y el reciclado de tipo hormigón, empleando además dos tipos de betún con distinto grado de penetración. En todos los casos la resistencia conservada fue superior al 75%.

Mills-Beale y You (2010), comprobaron que la sensibilidad al agua empeora a medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado. Para ello emplearon árido reciclado procedente únicamente de la demolición de estructuras de hormigón con sustituciones del 25%, 35%, 50% y 75% del árido natural basáltico. Exceptuando la mezcla con 75% de AR, todas las demás presentaron un ITSR (índice de resistencia a tracción indirecta) superior al 80% cumpliendo la normativa americana de aplicación.

Pasandín y Pérez (2013), llevaron a cabo un estudio con mezclas en las que se sustituía el árido natural silíceo por reciclado procedente de hormigón (RCA) en cantidades del 0%, 5%, 10%, 20% y 30%. En primer lugar, señalan la mayor conveniencia de reemplazar el árido natural por reciclado en la fracción gruesa frente a la fina, dado que es más fácil remover las impurezas y la fracción fina presenta una mayor absorción de agua, factores que contribuyen a la heterogeneidad de los resultados. Por otro lado, tras fabricar la mezcla y como paso previo a la compactación, dejaron que ésta se curase en el horno a 170 °C durante 4 horas con el fin de mejorar su sensibilidad al agua. Los resultados que obtuvieron indican que el ITSR (o TSR en terminología anglosajona) desciende a medida que aumenta el contenido de AR en la mezcla –exceptuando el

contenido del 5% de AR, algo que achacan a la heterogeneidad del árido empleado–, conservándose como mínimo en todos los casos un 80% de la resistencia a tracción indirecta de las probetas ensayadas.

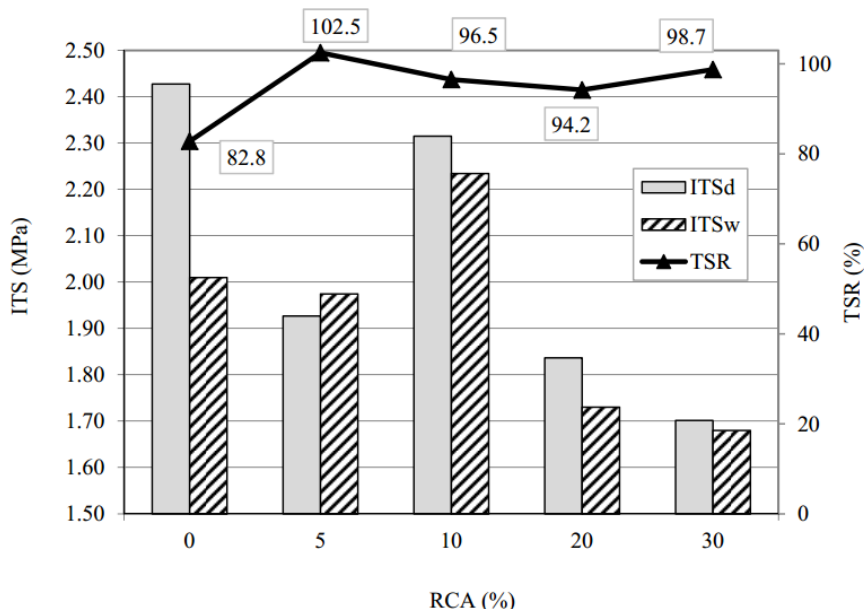


Figura 4-5 TSR en función del % AR presente en la mezcla. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).

Wu et al. (2013), estudiaron la morfología microscópica del AR mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) comparándola con la de un árido natural calizo (Figura 4-4). En el reciclado distinguieron una superficie más áspera y porosa –conducente a una mayor absorción, así como a un menor peso específico– y una

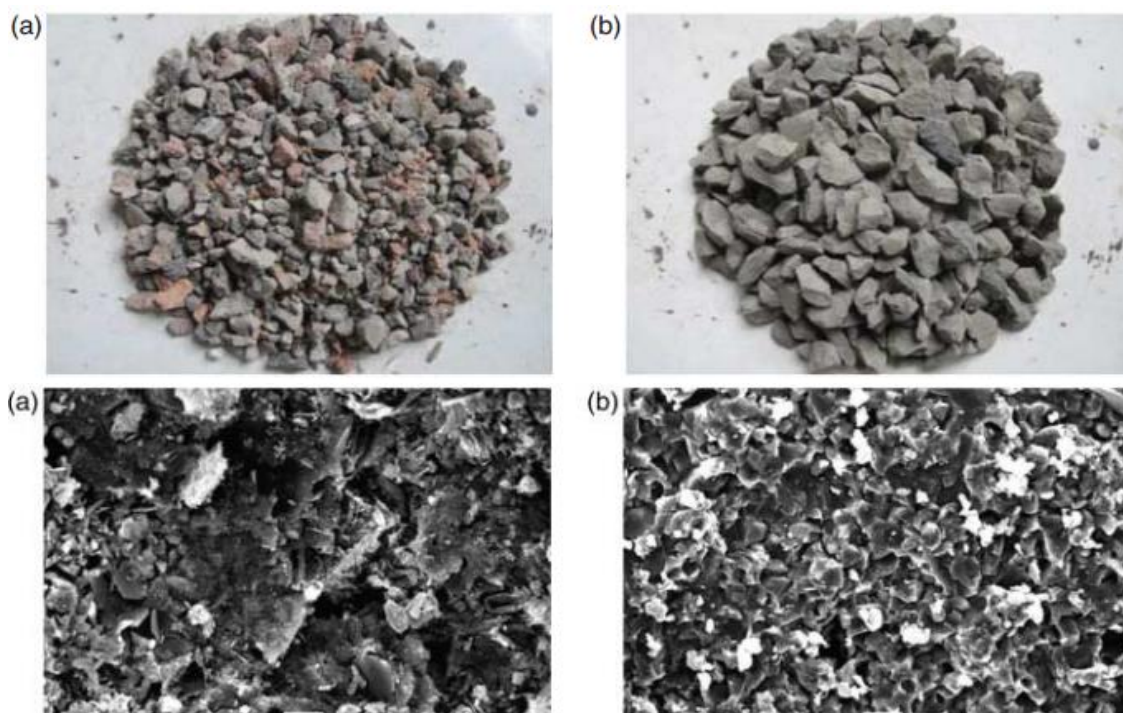


Figura 4-4 Morfología microscópica de (a) árido reciclado y (b) árido natural calizo [x1000] Fuente: Wu et al. (2013).

cantidad superior de microfisuras, causantes de una menor resistencia. Con el objetivo de evaluar la sensibilidad al agua emplearon dos ensayos, el TSR y el MS_0 (Residual Stability Ratio). Para ambos y en todas las muestras analizadas alcanzaron los requerimientos de la normativa china.

4.1.3. Rigidez

La rigidez de la mezcla bituminosa está directamente relacionada con su capacidad para distribuir las cargas que recibe, por lo que su conocimiento resulta imprescindible en el diseño de los firmes.

En lo referente a cómo influye la introducción de áridos reciclados en la rigidez de las mezclas bituminosas, de nuevo su naturaleza parece producir resultados dispares. Por un lado, investigadores como (Arabani et al., 2012) indican que la rigidez disminuye a causa de la fragilidad del mortero adherido al AR, mientras que (Wong et al., 2007) obtuvieron un mayor módulo resiliente para las mezclas que ensayaron con un 45% de sustitución frente a aquellas con tan solo un 6% de AR. Sin embargo, señalan que este aumento de resistencia también se ve acompañado de una mayor demanda de ligante.

Otros investigadores como Chen et al. (2011) comprobaron la relevancia de la fracción en la que interviene el AR. En su caso lo incorporaron como filler y llegaron a la conclusión de que no tenía influencia considerable en el módulo a tracción indirecta (ITS) de las mezclas. Las muestras fueron ensayadas a 5 °C, 25 °C y 40 °C y observaron que en los dos primeros casos el módulo viene principalmente dado por el esqueleto mineral de la fracción gruesa, mientras que a 40 °C es el ligante el principal responsable de la rigidez del material bituminoso.

Poniendo de manifiesto la importancia de la fracción en la que se emplea el AR, Arabani et al. (2013) obtuvieron el módulo resiliente (M_R) a 25 °C y 40 °C de 5 mezclas en las que intervino el AR en la fracción fina, en la gruesa y como filler junto con dacita –árido natural de tipo ígneo-. En la Figura 4-6 se ofrecen los resultados, entre los que destaca el obtenido para la mezcla de dacita en la fracción gruesa y como filler con AR en la fina, con un incremento de más del 40% del M_R a 25 °C con respecto al de la mezcla de control. El incremento de rigidez causado por el AR en la fracción fina viene dado por

la mayor angulosidad que presenta, mientras que como ya se dijo, el mortero adherido parece provocar la mayor debilidad de las mezclas con AR en la fracción gruesa.

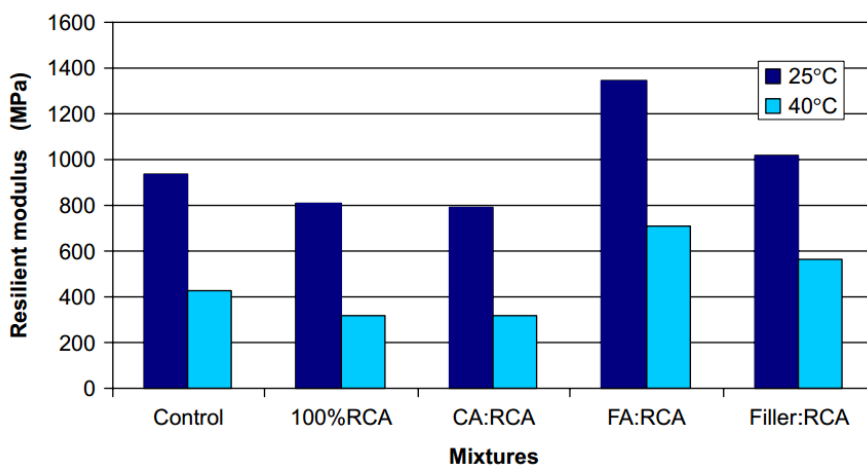


Figura 4-6 Comparación de los valores del módulo resiliente a 25 °C y 40 °C con AR en fracción fina (FA), gruesa (CA) o como filler. Fuente: Arabani et al. (2013).

Pasandín y Pérez (2013) ensayaron muestras con contenidos de 0%, 5%, 10%, 20% y 30% de AR en las fracciones gruesas que exhibieron una rigidez superior a la de mezclas convencionales y gran dependencia de ésta con la temperatura del ensayo, no existiendo un patrón claro que relacione el contenido de AR y el módulo resiliente (M_R). No obstante, señalan que a 20 °C sí se puede afirmar que el M_R aumenta con el porcentaje de AR (Figura 4-7).

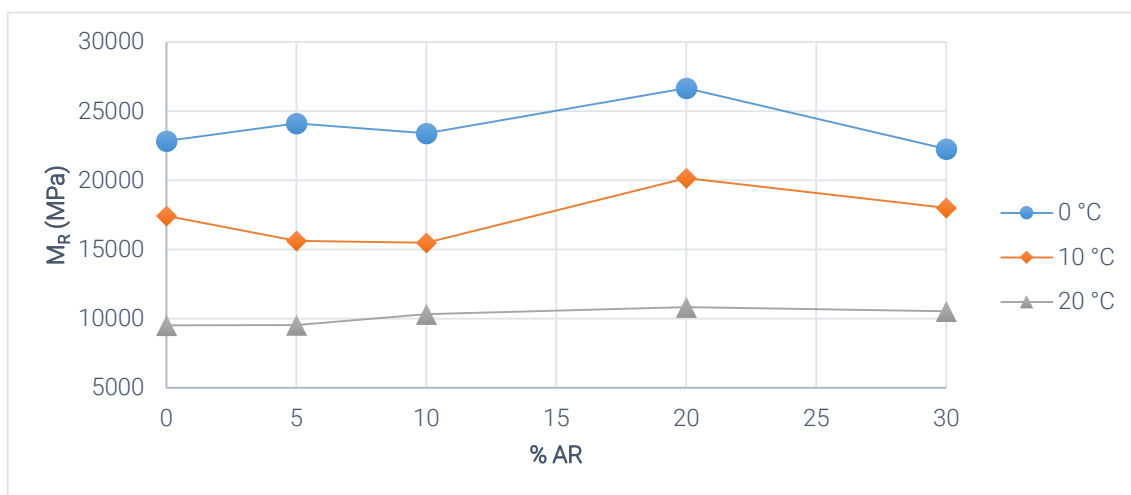


Figura 4-7 Módulo resiliente (M_R) frente al contenido de AR a distintas temperaturas. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).

Por tanto, la mayoría de los investigadores afirman que la rigidez de las mezclas bituminosas con AR se encuentra dentro de los rangos previstos por las diferentes normativas nacionales, si bien además del contenido de AR y su tamaño, también es preciso examinar otros factores como el grado de compactación, el contenido de ligante o la temperatura a la que se realizan los ensayos.

4.1.4. Deformación permanente

Deformación superficial que se presenta en forma de depresión longitudinal a lo largo de las trayectorias de las ruedas de los vehículos. Se ve favorecida, entre otros factores, por excesivas cantidades de ligante, áridos poco rugosos o un bajo contenido de huecos en el árido mineral (VMA) (Lavin, 2003).

Como características diferenciales de los áridos reciclados pueden distinguirse su rugosidad superficial y angulosidad –puesto que se obtienen por machaqueo–, además de una tendencia a aumentar el contenido de huecos. Las dos primeras dotan a la mezcla de una mayor resistencia, mientras que el mayor contenido de huecos facilita la aparición de deformaciones permanentes (Gómez-Meijide, 2015).

Como ya ocurría en el caso de la rigidez, existe cierta disparidad en cuanto a cómo influye la introducción de AR en la deformación permanente de las mezclas bituminosas. Autores como Pérez et al. (2010) indican que el comportamiento es similar al exhibido por las mezclas con árido natural y que la inclusión de AR en la fracción gruesa de mezclas bituminosas en caliente cumple lo exigido por la normativa.

Sin embargo, investigadores como Mills-Beale y You (2010) señalan que pese a cumplir los requerimientos normativos, las mezclas que incorporan AR ven disminuida su resistencia a deformación permanente según aumenta el porcentaje de árido reciclado presente. A pesar de esto, afirman que en carreteras de bajo tráfico es asumible hasta un 75% de sustitución sin que las deformaciones permanentes puedan ser problemáticas.

Pasandín y Pérez (2013), evaluaron también el comportamiento a deformación permanente exhibido por probetas con distinto contenido de AR y curadas en horno durante 4 horas. Afirman que la deformación permanente en el caso de mezclas con AR se produce por densificación y que existe una relación lineal entre el número de ciclos

de carga y la deformación permanente, exceptuando las muestras con un 30% de AR. Por otro lado, indican que el principal responsable de este fenómeno es la densificación inicial de la mezcla, que se produce de forma más acentuada cuanto mayor sea el contenido de AR. Aunque obtuvieron buenos resultados para todas las mezclas ensayadas, recalcan que aquellas con mayor contenido de AR ofrecen un peor comportamiento, puesto que demandan un mayor contenido de betún lo que provoca una susceptibilidad superior a deformaciones permanentes (Figura 4-8).

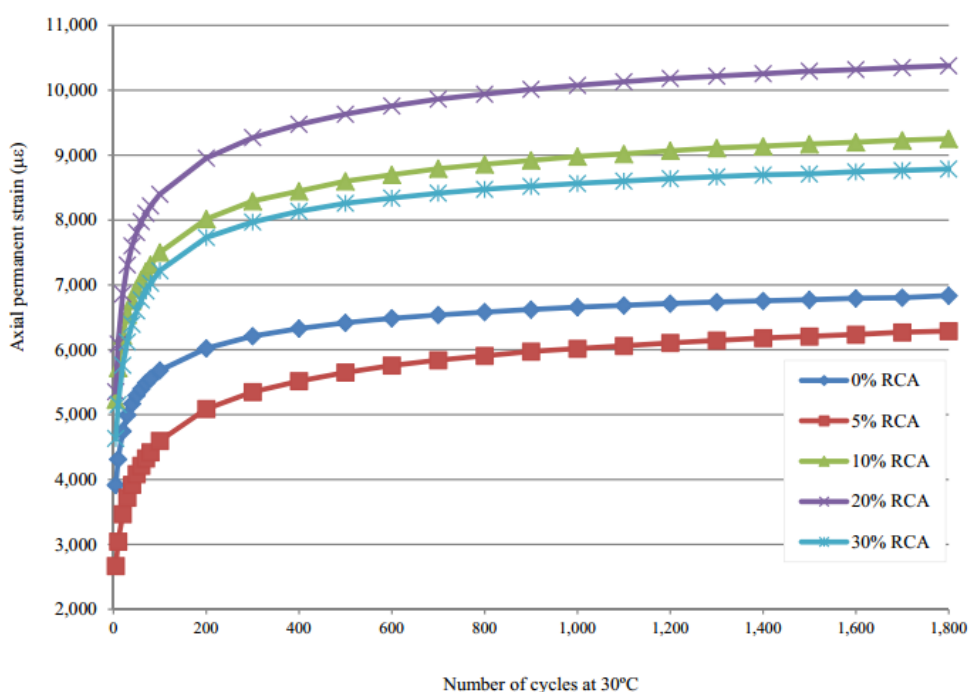


Figura 4-8 Deformación permanente acumulada a 30 °C para mezclas bituminosas con distinto contenido de árido reciclado. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).

4.1.5. Resistencia a la fatiga

La fatiga de los materiales bituminosos consiste en la reducción de su resistencia debido a la sucesiva aplicación de cargas que, aun siendo inferiores a la resistencia a rotura del material, pueden terminar ocasionando su agotamiento. Puesto que las cargas de tráfico poseen un carácter intermitente y cíclico, la fatiga será un factor relevante a tener en cuenta en el diseño de las mezclas. Aun así, ésta es una de las propiedades

menos estudiadas de las mezclas bituminosas con AR (árido reciclado) (Pasandín y Pérez, 2013).

Pérez et al. (2010) concluyeron que las mezclas bituminosas con AR ensayadas presentaban un comportamiento similar a fatiga que las convencionales, mientras que Chen et al. (2011) encontraron que la introducción de AR –polvo de ladrillo– como filler mejoraba la resistencia a fatiga de las mezclas ensayadas.

Nejad et al. (2013) señalan que incluso es posible sustituir hasta el 100% de árido natural por reciclado obteniendo mejor resistencia a fatiga. Para ello ensayaron a tracción indirecta (ITFT) mezclas en caliente con contenidos de 0%, 35%, 70% y 100% de AR.

Pasandín y Pérez (2013) ensayaron contenidos de 0%, 5%, 10%, 20% y 30% de AR mediante el ensayo de tracción indirecta (ITFT). Todas las muestras estudiadas con contenidos de AR inferiores al 20% mostraron un comportamiento similar a fatiga que el resto –siendo incluso mejor que el de mezclas convencionales para un elevado número de ciclos–, mientras para un 30% de AR empeora. A mayores, representaron gráficamente las ecuaciones de las leyes de fatiga pudiendo verse por un lado que la pendiente del mayor contenido de AR –un 30%– es mucho más pronunciada que el resto

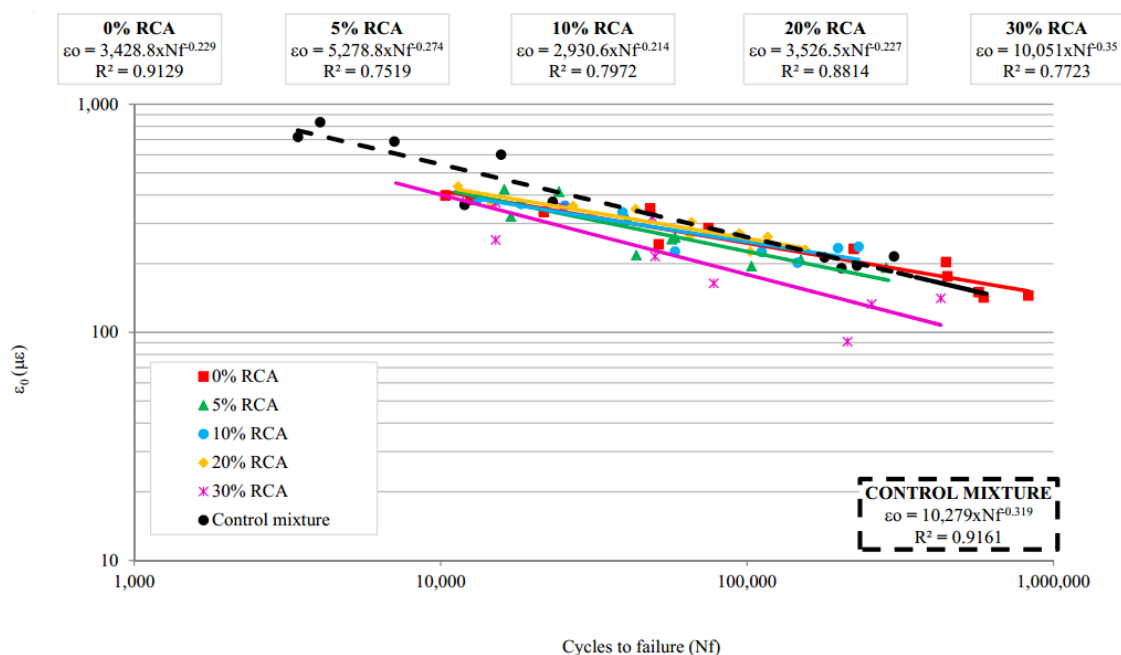


Figura 4-9 Deformación horizontal inicial vs número de ciclos hasta fallo a una temperatura de 20 °C para distintos contenidos de árido reciclado. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).

y por otro, que los coeficientes de ajuste (R^2) de las distintas ecuaciones varían significativamente, poniendo de nuevo de manifiesto la heterogeneidad del AR.

4.2. Mezclas bituminosas con RCD en frío

Si hasta la fecha la aplicación de los residuos de construcción y demolición (RCD) como árido reciclado (AR) en mezclas bituminosas en caliente ha sido mucho más reducida que en otros usos –como capas granulares sin ligante y en la fabricación de hormigón–, en el caso de las mezclas bituminosas en frío su presencia es todavía más pequeña si cabe. El número de investigaciones llevadas a cabo es menor y se ha centrado especialmente en residuos con propiedades puzolánicas, p.ej. cenizas volantes (Al-Hdabi et al., 2013).

Una de las características, sino la que más, definitoria del AR procedente de RCD, es su elevada absorción causada por el mortero adherido –hasta 15 veces superior a la del árido natural–. En el caso de las mezclas en frío, esta gran absorción lleva a la emulsión a romper de forma prematura durante las fases de mezclado y compactación, por lo que se hace necesaria una mayor aportación de agua a la mezcla, así como el empleo de emulsiones de rotura lenta.

Otro de los aspectos negativos, que a su vez limita el empleo de RCD como árido a mezclas para carreteras de bajo tráfico, tiene que ver con su elevado coeficiente de Los Ángeles, que no cumple las exigencias normativas de fragmentación y provoca un aumento excesivo de la cantidad de finos en los procesos de mezclado y compactación (Gómez-Meijide, 2015).

Las propiedades de las mezclas bituminosas en frío con RCD que a continuación se exponen han sido extraídas de la tesis realizada por Gómez-Meijide (2015). Este investigador estudió la utilización de estas mezclas –concretamente las de tipo grava-emulsión– con un 100% de AR de tipo hormigón con aproximadamente un 95% de materiales pétreos, hormigón y/o mortero.

4.2.1. Contenido de agua

En el caso de las mezclas en frío, proviene de la emulsión y de la que se aporta en el proceso de fabricación. El contenido de agua varía durante la compactación y curado

de las mezclas, teniendo gran influencia el tipo de árido empleado en el contenido remanente de agua de las probetas, siendo la naturaleza especialmente absorbente del AR responsable de su retención en el interior de las probetas.

4.2.2. Propiedades volumétricas

La alta porosidad del AR y su menor densidad conducen a obtener contenidos de huecos de aire (V_a) superiores al 10% y pesos específicos aparentes menores –en torno a un 18% inferiores–. Por tanto, los huecos en el árido mineral (VMA), rellenos de aire (V_a) y rellenos de agua (V_{aw}) crecen al emplearse AR en vez de natural. Si se compara este crecimiento con el contenido de betún, a mayor cantidad de ligante, mayor es VMA, mientras que V_a y V_{aw} decrecen –ya que el betún impermeabiliza al árido taponando los poros, de modo que la expulsión del agua ocluida resulta más fácil–.

En la Tabla 4-1 se presenta una comparación del contenido de huecos entre las mezclas con árido reciclado y natural en función del contenido de agua total en amasada 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%	-	-	-	-

Tabla 4-1 Comparación del contenido de huecos con 100% de árido reciclado y natural para distintos contenidos de betún y agua total en la amasada. Fuente: Gómez-Meijide (2015).

4.2.3. Sensibilidad al agua

Entre los posibles ensayos que permiten analizar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas, Gómez-Meijide la estudió mediante el de inmersión-compresión de manera que el grupo húmedo fue acondicionado durante 4 días en baño de agua a 49 °C y posteriormente se procedió a la rotura de las probetas por compresión axial.

Tras analizar mezclas con 100% de AR y distintos contenidos de betún y agua, señala que se produce un fuerte descenso de la resistencia conservada al aumentar la cantidad de ligante. Esto parece deberse a que la pérdida de adherencia ligante-árido se hace más notoria conforme aumenta la cantidad de betún presente. Por otro lado, el contenido de agua también tiene repercusiones negativas –si bien menos severas– ya que una mayor presencia de agua da lugar a probetas más porosas y por tanto más expuestas a la acción del agua.

A pesar de todo esto, el uso de árido reciclado (AR) mejoró tanto la resistencia seca como húmeda de las probetas –especialmente la primera– y aunque los óptimos de betún y agua son mayores que para el árido natural, el incremento de la resistencia obtenido fue muy importante. En la Figura 4-10 se muestra la evolución de la resistencia seca y húmeda según la cantidad de betún para un contenido de agua durante mezclado del 6% en el caso del árido natural y del 15% en el caso del árido reciclado, que resultaron ser aquellos para los que se obtuvieron las mayores resistencias medias.

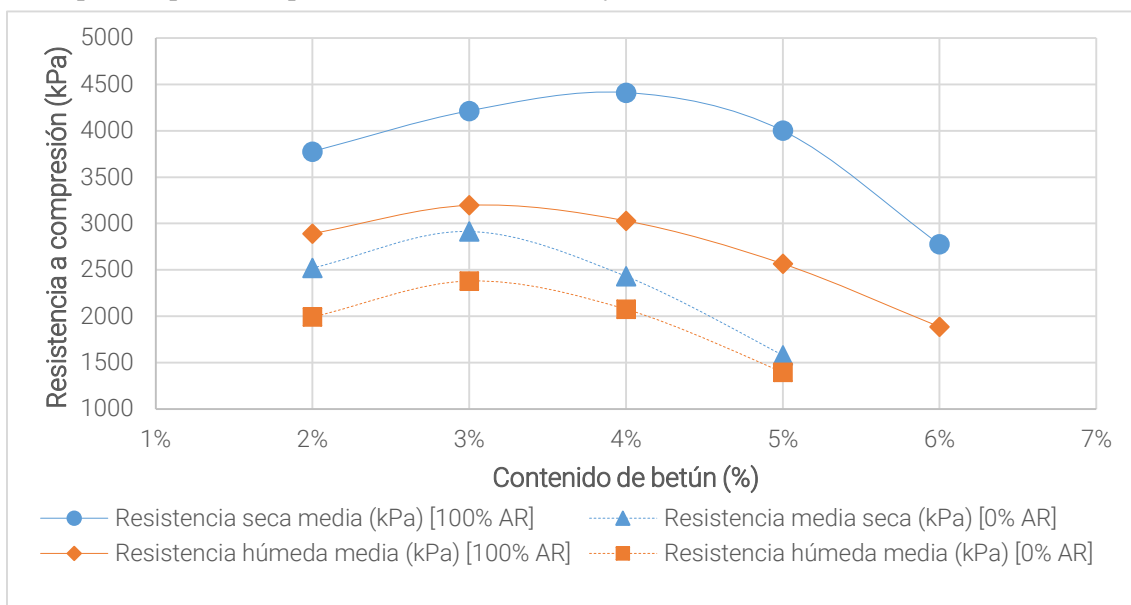


Figura 4-10 Resistencia seca y húmeda a compresión en función del porcentaje de betún. Contenido de agua de 6% para 0% AR y del 15% para 100% AR. Fuente: elaboración propia a partir de Gómez-Meijide (2015).

4.2.4. Rigidez

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento viscoelastoplástico de las mezclas en frío fabricadas, Gómez-Meijide realizó dos tipos de ensayo a las probetas, el de *tracción indirecta* y el de *módulo resiliente a tracción indirecta* (ITSM) a 2, 10 y 20 °C.

El uso de AR mejoró el comportamiento de las grava-emulsiones estudiadas por el autor, ya que para bajas temperaturas (2 °C y 10 °C) las mezclas resultaron ser más rígidas que aquellas con árido natural –para contenidos de betún superiores al 4%– mientras que a temperatura ambiental (20 °C) presentaron mayor rigidez para cualquier contenido de ligante.

En cuanto a las resistencias obtenidas para los óptimos, las que resultan para las mezclas con AR son superiores a temperatura ambiental (20 °C) a aquellas formadas únicamente por árido natural (4000 MPa frente a 2500 MPa). A bajas temperaturas, el comportamiento se invierte y las hechas de AR exhiben una menor rigidez que las de árido natural (8500 MPa frente a 11000 MPa). Este hecho tiene un efecto positivo en términos de durabilidad, ya que tanto las deformaciones permanentes como la rotura frágil se verán mitigadas. Sin embargo, la excesiva rigidez que presentan frente a las mezclas convencionales a 20 °C puede ser limitante en el caso de explanadas de baja calidad.

Finalmente, Gómez-Meijide también evalúa la influencia del tiempo de curado en la evolución de la rigidez de las mezclas, llegando a la conclusión de que el tipo de árido del que se componen –reciclado o natural– no influye en dicha evolución y que tanto el crecimiento como la estabilización de la rigidez se producen de modo parejo.

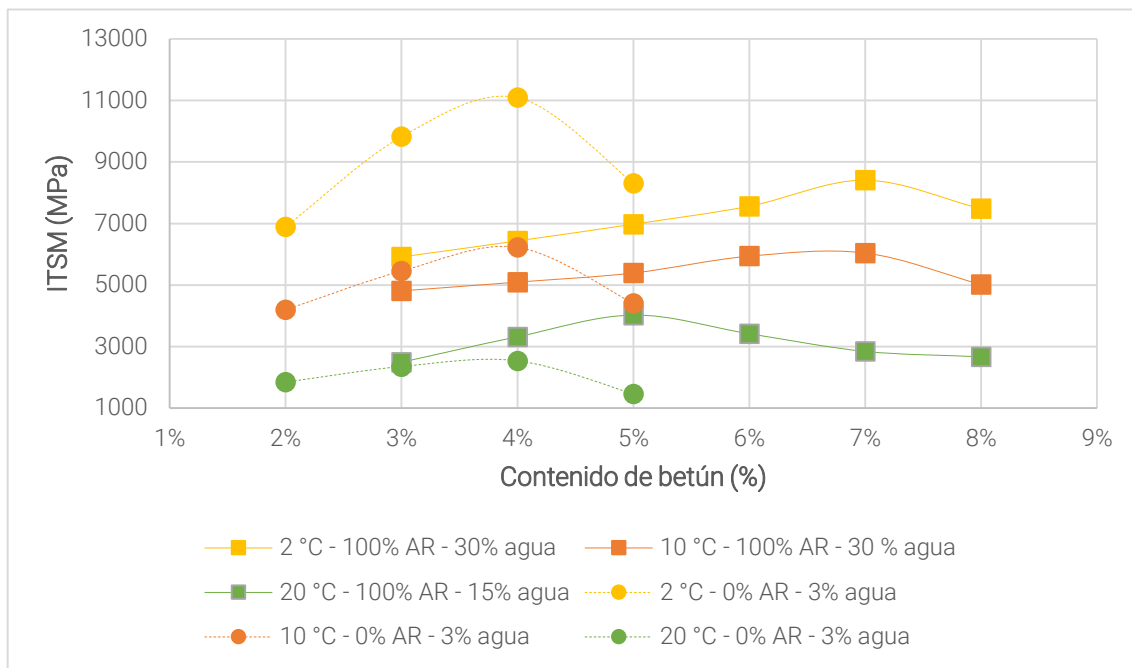


Figura 4-11 Módulo resiliente según el contenido de betún a distintas temperaturas para el contenido de agua que proporciona el mayor ITSM. Fuente: elaboración propia a partir de (Gómez-Meijide, 2015).

4.2.5. Deformación permanente

Entre los métodos que permiten analizarla, Gómez-Meijide la estudió mediante el ensayo de compresión axial bajo carga repetida (RLAT) una vez que las probetas de grava-emulsión habían alcanzado su completa maduración.

Como conclusiones principales, el autor comenta que para los primeros ciclos de carga –en los que se produce la densificación de la mezcla– las deformaciones obtenidas para las probetas con AR son menores que para las compuestas de árido natural. Indica también que las deformaciones permanentes se desarrollan de modo más lento en las probetas con AR y que al final del ensayo –tras 5000 ciclos– son similares a las resultantes para las mezclas con árido natural.

Capítulo 5
CARACTERIZACIÓN
DE LOS MATERIALES

5. Caracterización de los materiales

5.1. Árido reciclado

El árido reciclado (AR) empleado procede del tratamiento de residuos de construcción y demolición realizado por la planta de gestión y reciclado de la empresa TEC REC (Tecnología y Reciclado, S.L.) ubicada en el PK 0+700 de la carretera de Valdemingómez en Madrid. El material tratado es sometido a un proceso de cribado y machaqueo, así como a otro de separación magnética.

La planta TEC REC suministró el AR con la granulometría de una zahorra artificial ZA25. Los datos de las diferentes propiedades del AR han sido extraídos de la investigación realizada por Pasandín (2013), en la que se empleó este mismo árido.

5.1.1. Granulometría

La distribución granulométrica fue determinada de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1 (AENOR, 2012b) por el procedimiento de lavado y tamizado. En la Figura 5-1 se presenta la curva granulométrica de la fracción 0/40 mm en la que se distingue una variación gradual de los diferentes tamaños de árido.

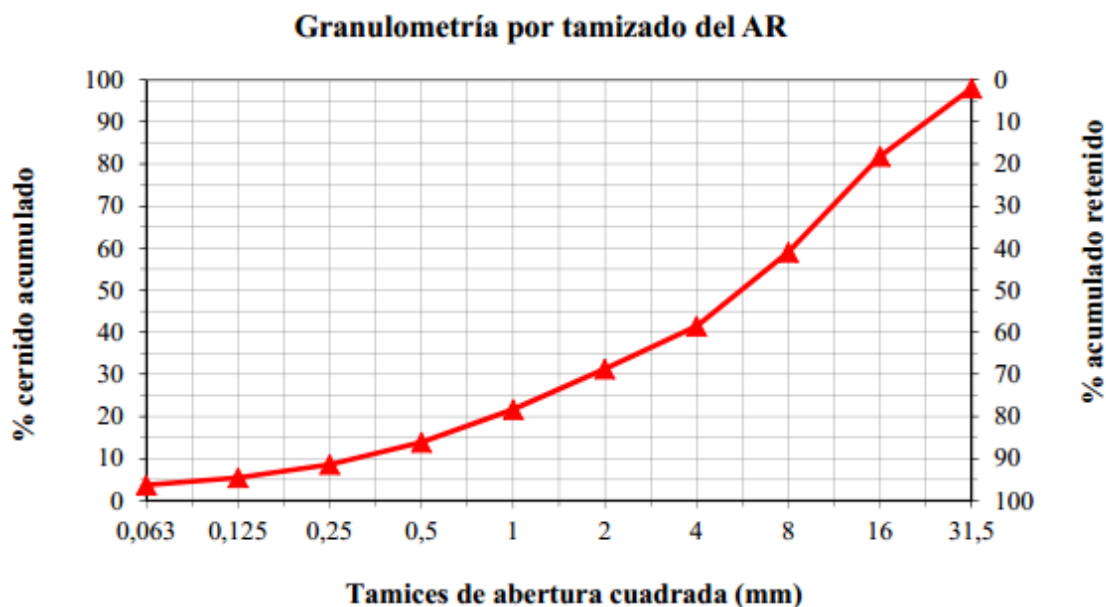


Figura 5-1 Curva granulométrica de la fracción 0/40 mm del árido reciclado. Fuente: Pasandín (2013).

Es importante señalar que la distribución granulométrica del AR usado es continua, ya que todos los tamices retienen árido, por lo que a priori será posible emplear cualquier fracción, aunque en la práctica se han escogido las de 2/4 mm a 16/22.4 mm

Esto es debido a que como se vio en el estado del arte, las fracciones gruesas son menos sensibles a fenómenos adversos como el de sensibilidad al agua.

5.1.2. Propiedades geométricas

Índice de lajas

Se determinó de acuerdo con la norma UNE-EN 933-3 (AENOR, 2012c). El AR presenta un índice de lajas global (I_L) del 8%, obteniéndose el mayor de los valores –13%– para la fracción 25/31.5 mm. En todos los casos cumple las especificaciones del PG-3 que exige para una categoría de tráfico pesado T00 un índice de lajas inferior o igual al 20%.

Porcentaje de caras de fractura del árido grueso

Se evalúa siguiendo lo indicado por la norma UNE-EN 933-3 (AENOR, 2012c). Los resultados obtenidos evidencian la debilidad del mortero adherido al árido, lo que origina superficies romas –aunque rugosas– limitando la categoría de tráfico pesado en la que se puede utilizar a T3 y para arcenes, según las exigencias del PG-3.

	<i>Árido reciclado 0/40 mm</i>	<i>Requisito PG-3 (T3 y arcenes)</i>
<i>Cc (% de partículas trituradas)</i>	85.48 %	≥ 75 %
<i>Ctr (% de partículas totalmente redondeadas)</i>	2.41%	< 10%

Tabla 5-1 Caras de fractura del AR. Fuente: Pasandín (2013).

Evaluación de finos. Equivalente de arena

Se obtuvo un resultado del 67%, superior al 50% requerido por el PG-3 para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

Componentes del árido reciclado (AR)

Siguiendo el procedimiento descrito por la norma UNE-EN 933-11 (AENOR, 2009b) es posible la identificación y estimación de las proporciones relativas de los componentes de los áridos gruesos reciclados, exceptuando la porción no flotante del mismo.

En el caso del árido empleado pueden observarse en la Figura 5-2, que revela que el AR es de tipo hormigón, ya que pese a estar presentes otros componentes como restos de albañilería o material bituminoso; el hormigón, mortero, prefabricados de hormigón, las piedras y los áridos –unidos o no con conglomerante hidráulico– suponen un 89.3% en masa.

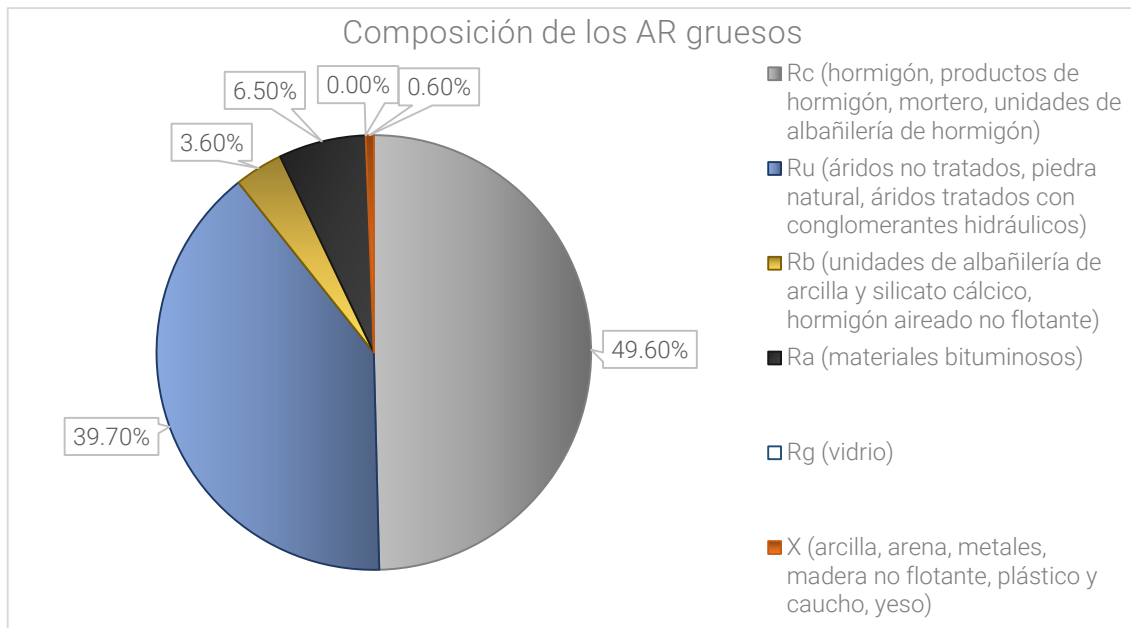


Figura 5-2 Composición (% en masa) de los áridos reciclados gruesos empleados. Fuente: Pasandín (2013).

La Figura 5-3 intenta mostrar la heterogeneidad del AR de la que se ha venido hablando hasta el momento a través de cuatro fotografías de sus principales componentes, que se comentan en las siguientes líneas:

- (a) Rc (productos de hormigón, mortero, etc.): se advierte cómo el mortero cohesionaba una serie de áridos de menor tamaño que en conjunto dan lugar a un AR mayor. Es en áridos como éste donde se aprecia con mayor nitidez uno de los problemas ocasionados por la presencia de mortero, ya que su fragilidad posibilita la disgregación en partículas de menor tamaño.
- (b) Ru (piedra natural, áridos no tratados, etc.): en este ejemplo, la piedra se encuentra prácticamente limpia con una ínfima cantidad de mortero en una de sus caras. Esto evidencia que debido a que parte del AR procede de restos de hormigón, es probable que haya áridos que no sean de machaqueo, por lo que carecen de caras de fractura y por consiguiente no

aportan el necesario rozamiento interno a la mezcla bituminosa, siendo indeseables.

- (c) Ra (materiales bituminosos)
- (d) Rb (unidades de albañilería): básicamente elementos de arcilla –ladrillos, tejas, azulejos, etc.– cuya presencia conduce a una mayor absorción de agua y menor densidad.

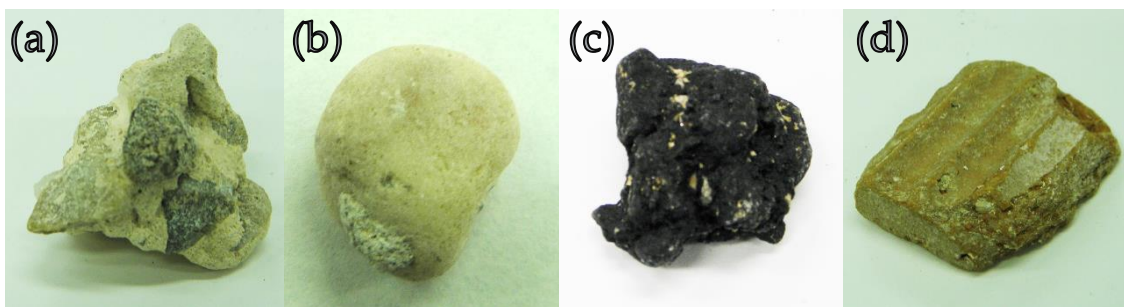


Figura 5-3 Detalle de los principales componentes del árido reciclado.

5.1.3. Propiedades mecánicas y físicas

Resistencia a la fragmentación

El AR que se ha utilizado tiene un elevado coeficiente de Los Ángeles –un 32%– debido principalmente al mortero adherido en su superficie. En consecuencia, la categoría de tráfico pesado en la que se puede emplear es baja, concretamente una T4, según lo especificado en el PG-3 (Tabla 5-2). No obstante, las mezclas bituminosas a emplear combinarán árido natural y reciclado, por lo que la resistencia a la fragmentación del conjunto mejorará gracias a la presencia del árido natural.

Tipo de capa	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00 y T0	T1	T2	T3 y ARCENES	T4
Rodadura	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 25	≤ 25
Intermedia	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 25*
Base	≤ 25	≤ 25	≤ 30	≤ 30	-

Tabla 5-2 Coeficiente de Los Ángeles máximo permitido por el PG-3 para el árido grueso de mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso. (*) En vías de servicio.

Densidad de las partículas y absorción de agua del AR

De nuevo el mortero juega un papel clave en las propiedades exhibidas por el árido reciclado. En este caso, la densidad disminuye con respecto a la del natural debido a la baja densidad del mortero de cemento adherido.

Por su parte, la absorción es hasta 10 veces mayor que la del árido convencional, hecho que se manifiesta de manera más relevante en la fracción fina que en la gruesa por su mayor superficie específica. Este motivo, junto con la mayor sensibilidad a fenómenos de adhesividad exhibidos por la fracción fina del AR, hacen más recomendable el uso de la fracción gruesa en sustitución del árido natural –como se señala en (Pasandín, 2013)– En la Tabla 5-3 se recogen las densidades y absorción de agua, obtenidas mediante picnómetro en el caso de las fracciones 0.063/4 mm y 4/31.5 mm y con balanza hidrostática para la de 31.5/40 mm.

Fracción de árido	0.063/4 mm	4/31.5 mm	31.5/40 mm
ρ_a (g/cm ³)	2.65	2.63	2.63
ρ_{rd} (g/cm ³)	2.15	2.32	2.29
ρ_{ssd} (g/cm ³)	2.34	2.44	2.42
WA ₂₄ (%)	8.74	5.08	5.6

Tabla 5-3 Densidades y absorción tras inmersión. Fuente: Pasandín (2013).

5.2. Árido natural

El árido natural empleado se obtuvo a partir de piedra caliza en la cantera de Eiffage en Orusco de Tajuña (Madrid).

Dado que este proyecto técnico se enmarca dentro del Proyecto de Investigación conjunta “BC-WARM” con la ETSICCP de Madrid, el árido fue facilitado directamente por ellos en *big bags* que contenían las siguientes fracciones: 0/4 mm, 4/8 mm y 8/32 mm.

Consecuentemente, los datos sobre las propiedades del árido calizo que a continuación se exponen han sido igualmente proporcionados por la ETSICCP de Madrid.

5.2.1. Propiedades geométricas

Índice de lajas

Se determinó de acuerdo con la norma UNE-EN 933-3 (AENOR, 2012c). El árido calizo empleado presenta un índice de lajas global (I_L) del **15%**, inferior al límite del 20% que impone el PG-3 para la categoría de tráfico pesado T00, por lo que sería apto para cualquier categoría.

Partículas totalmente trituradas

Determinado según la norma UNE-EN 933-5 (AENOR, 2005) se obtuvo un porcentaje de partículas totalmente trituradas del **100%**.

Equivalente de arena

Se ha utilizado la norma UNE-EN 933-8 (AENOR, 2012a) obteniéndose un equivalente de arena del **59%** que es superior al 50% fijado en el PG-3 para áridos empleados en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

5.2.2. Propiedades mecánicas y físicas

Resistencia a la fragmentación

El árido calizo que se ha utilizado tiene un elevado coeficiente de Los Ángeles –un **26%**–. En consecuencia, la categoría de tráfico pesado en la que se podrá emplear es baja, concretamente una T4, ya que el árido reciclado posee también un elevado coeficiente de Los Ángeles, por lo que cabe esperar que el coeficiente de Los Ángeles conjunto lo sea también.

Coefficiente de pulimento acelerado

El coeficiente de pulimento acelerado, evaluado mediante la norma UNE-EN 1097-8 (AENOR, 2010a) es del **43%**. Dado que el árido calizo forma parte de una mezcla para capas intermedias, el PG-3 no fija ningún valor mínimo que deba alcanzar –puesto que solo lo hace para capas de rodadura–.

5.3. Comparativa de la densidad y absorción del AR y el árido natural

Entre las propiedades que se han nombrado de modo más recurrente en el presente capítulo y anteriores se encuentran la densidad y absorción del AR. Por ello, en la Tabla 5-4 se muestran a modo de comparación las densidades aparentes y absorción de las distintas fracciones de AR y árido natural (AN) empleadas.

Fracción de árido	AR- ρ_a (g/cm ³)	AN- ρ_a (g/cm ³)	AR-WA ₂₄ (%)	AN-WA ₂₄ (%)
0/2 mm	2.6927	2.7198	7.4670	1.4040
2/4 mm	2.6747	2.7092	5.7720	2.3511
4/8 mm	2.6452	2.6859	5.0646	1.4727
8/16 mm	2.6296	2.6881	4.3756	1.6711
16/22.4 mm	2.6052	2.6857	4.0877	1.6306

Tabla 5-4 Densidades aparentes y absorción de las distintas fracciones de árido reciclado (AR) y árido natural (AN) utilizadas.

Por tanto, las diferencias entre árido natural y reciclado no solo se manifiestan visualmente debido a la diversidad de componentes del AR (Figura 5-4), sino que también lo hacen en cuanto a su densidad y absorción se refiere.

El árido reciclado presenta densidades menores en todas sus fracciones a las del árido natural, acrecentándose esta diferencia en la fracción más gruesa 16/22.4 mm, que como ya se dijo es la que por su superior tamaño introduce mayores heterogeneidades, con componentes menos densos como los procedentes de materiales cerámicos.

Por otro lado, se pone de manifiesto la gran absorción que cabía esperar tras la revisión del estado del arte del AR frente al árido natural, la cual –como se mencionó anteriormente– disminuye de modo notable para la fracción más gruesa 16/22.4 mm.



Figura 5-4 Comparación entre el árido reciclado y el árido calizo para la fracción 8/16 mm.

5.4. Ligante bituminoso

El ligante bituminoso empleado, un B 35/50, ha venido impuesto de nuevo debido a la colaboración con la ETSICCP de Madrid en el proyecto BC-WARM, quienes han facilitado los datos de sus principales características (Tabla 5-5).

Propiedad	Unidades	Norma de ensayo	B 35/50
Penetración	mm/10	UNE-EN 1426	41
Anillo y bola	°C	UNE-EN 1427	53
Recuperación elástica	%	UNE-EN 13398	8

Tabla 5-5 Principales características del betún B 35/50 empleado.

Capítulo 6

DISEÑO DE LA MEZCLA

6. Diseño de la mezcla

6.1. Introducción

Una vez que se han caracterizado todos los materiales intervinientes, se recogen a continuación los aspectos básicos que definen la mezcla bituminosa en caliente que se ha estudiado –i.e. granulometría, contenido de huecos y sensibilidad al agua– establecidos de acuerdo con el PG-3, para pasar en último lugar a la descripción del proceso de fabricación.

6.2. Elección de la mezcla

La inclusión de árido reciclado, cuyas características difieren del natural, debe garantizar que las características de la mezcla en la que se incorpore sean iguales o superiores a aquellas que se obtendrían empleando únicamente árido natural.

Por otro lado, dado que como ya se dijo el presente proyecto técnico se enmarca dentro del proyecto de investigación conjunta “BC-WARM”, se ha partido de ciertos condicionantes –entre ellos la mezcla a estudiar–, así como resultados previos que han orientado el camino a seguir y a los que se hará mención en los siguientes apartados.

Teniendo todas estas consideraciones en cuenta, la mezcla a estudiar es:

AC 22 bin S

Recogida en el artículo 542 del PG-3, se trata de una mezcla de tipo hormigón bituminoso (AC), empleada en capas intermedias (*bin*), con un tamaño máximo de árido de 22 mm y una granulometría semidensa (S).

6.3. Elección de la granulometría

A partir de los husos superior e inferior estipulados por el PG-3 para la mezcla elegida, se ha escogido la línea media entre ambos como curva granulométrica – independientemente del grado de sustitución por AR– (Figura 6-1), excepto en el tamiz de 22 mm donde se ha tomado el valor del huso superior para evitar tamaños mayores.

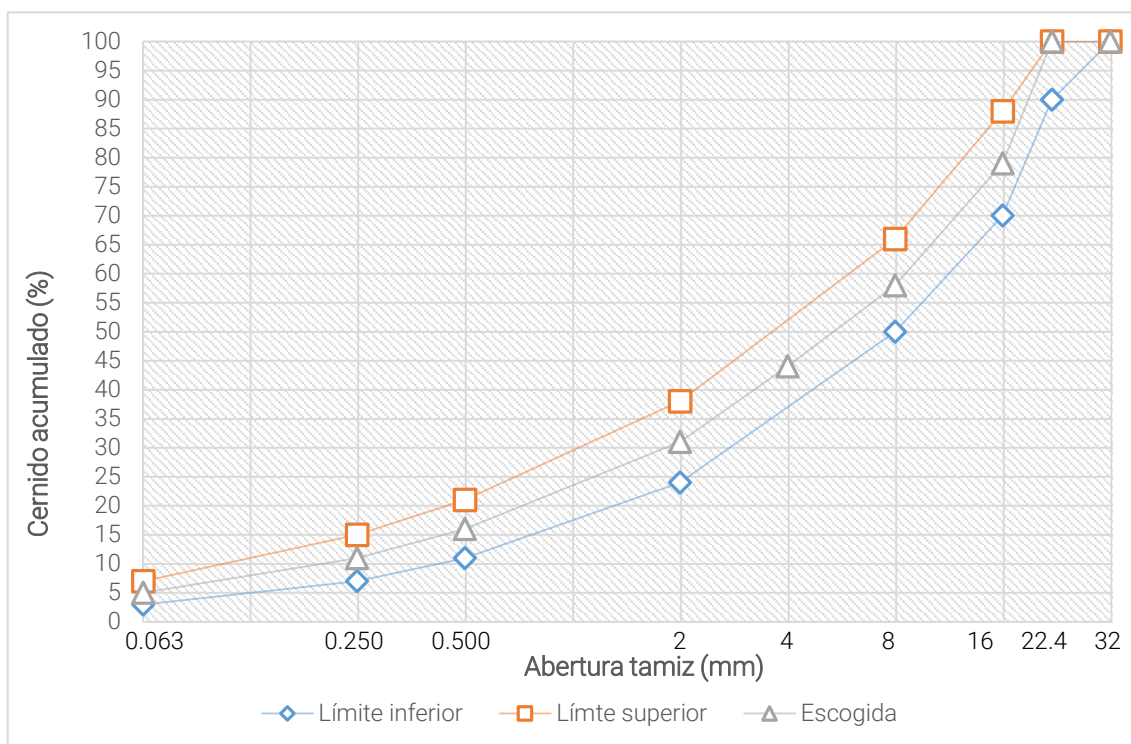


Figura 6-1 Curva granulométrica escogida de acuerdo con los husos establecidos en el Art. 542 del PG-3.

En cuanto al reemplazo de árido natural por reciclado, se ha llevado a cabo en los porcentajes sobre la masa total de árido y fracciones –excluido el filler– que se exponen en la Tabla 6-1, partiendo de la premisa de conseguir incorporar la mayor cantidad posible de árido reciclado (AR) a la mezcla, evitando utilizar la fracción fina por su inadecuada sensibilidad al agua. Por su parte, de las fracciones gruesas dos presentan características que las hacen más problemáticas:

- La fracción 2/4 mm, debido a su mayor superficie específica, genera mayores problemas de sensibilidad al agua.
- La fracción 16/22.4 mm, debido a su tamaño, introduce mayores heterogeneidades en la mezcla.

Por estos motivos, el orden cronológico en el que se analizaron los distintos porcentajes de sustitución es el que sigue:

- Se comenzó fabricando la mezcla de control con un 0% AR.
- El primer intento, contenía un 69% AR sustituyendo toda la fracción gruesa, incorporando tanto la fracción 2/4 mm como la 16/22.4 mm.

- El siguiente paso, consistió en no introducir la fracción más gruesa 16/22.4 mm para ver su influencia en el desempeño de la mezcla, quedando el porcentaje de reemplazo en un 48% AR.
- Tras no introducir la fracción más gruesa, se decidió estudiar los efectos de la fracción 2/4 mm, incorporando de nuevo la fracción gruesa 16/22.4 mm y quedando el porcentaje total de sustitución en un 42% AR.
- En último lugar, se optó por no sustituir el árido natural por reciclado ni en la fracción 16/22.4 mm ni en la 2/4 mm, siendo el porcentaje total de reemplazo del 35% AR.

Fracción (mm)	0 % AR	35 % AR	42 % AR	48 % AR	69 % AR
22.4/32	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
16/22.4	21 %	21 %	21 %	21 %	21 %
8/16	21 %	21 %	21 %	21 %	21 %
4/8	14 %	14 %	14 %	14 %	14 %
2/4	13 %	13 %	13 %	13 %	13 %
0.5/2	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %
0.25/0.5	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %
0.063/0.25	6 %	6 %	6 %	6 %	6 %
0/0.063 (filler)	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %

Tabla 6-1 Cantidad de árido (%) para cada fracción según la curva granulométrica escogida (en negrita las fracciones en las que se sustituye el árido natural por reciclado).

6.4. Contenido de huecos en mezcla y en árido

Entre las diferentes características de la mezcla que el PG-3 estipula que el Contratista ha de entregar al Director de las Obras, se encuentran el contenido de huecos en mezcla (Vm) –obligatoriamente– y huecos en árido (VMA), opcional cuando se prevean anomalías en la fórmula de trabajo debidas a las características de los áridos o por su granulometría combinada.

El contenido de huecos en mezcla se determina de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003) a partir de las densidades máximas y aparente de la mezcla (Figura 6-2), habiendo de encontrarse dentro de los rangos que se exponen en la Tabla 6-2.

Tipo de capa	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
	T00 y T0	T1 y T2	T3 y ARCENES	T4
Rodadura	4-6	4-6	3-6	3-6
Intermedia	4-6	4-7 (*)	4-7	4-7(**)
Base	4-7 (*)	4-8 (*)	4-8	-

Tabla 6-2. Contenido de huecos en mezcla (%) según tipo de capa y categoría de tráfico pesado (PG-3). (*) En MAM: 4-6%. (**) En vías de servicio.

Por tanto, como la mezcla **AC 22 bin S** se utiliza en capas intermedias, el contenido de huecos en mezcla (Vm) ha de situarse entre el 4%–6% para las categorías de tráfico pesado más exigentes (T00 y T0), pudiendo llegar hasta un 7% en las restantes categorías.



Figura 6-2. Determinación de la densidad máxima (foto izquierda) y aparente (foto derecha) de la mezcla bituminosa.

Además, dado que se combinan áridos de distinta naturaleza, se ha buscado dar cumplimiento a lo establecido en cuanto al contenido de huecos en árido (VMA) para mezclas con tamaño máximo de árido 22 mm, de modo que sea superior o igual al catorce por ciento, esto es $VMA \geq 14\%$.

Por otro lado, el PG-3 menciona a la densidad aparente como requisito para establecer la densidad de referencia para la compactación, aunque no fija rangos ni valores específicos. No obstante, su estudio puede ser interesante en relación a su

evolución según el contenido de ligante y el porcentaje de sustitución de árido reciclado, motivo por el que se analizará en el siguiente capítulo.

6.5. Sensibilidad al agua

Junto con el contenido de huecos en mezcla (V_m) y en árido (VMA), la sensibilidad al agua evaluada mediante la resistencia a tracción indirecta (Figura 6-3) es la característica fundamental que se ha analizado en el estudio de la viabilidad de los distintos porcentajes de árido reciclado (AR) considerados.

Como se ha venido mencionando en capítulos anteriores, la adhesividad árido-ligante en presencia de agua es uno de los talones de Aquiles de las mezclas que incorporan árido reciclado, lo que supone la degradación de sus propiedades mecánicas mediante principalmente fenómenos de *stripping* –desenvuelta de la mezcla– que se acentúan conforme aumenta la cantidad de árido reciclado presente y disminuye el tamaño del mismo (Pasandín, 2013).

Atendiendo a las exigencias del PG-3 para la mezcla objeto de estudio, se ha buscado que la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión –según la norma UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009a)– sea superior al ochenta por ciento, esto es $ITSR \geq 80\%$.

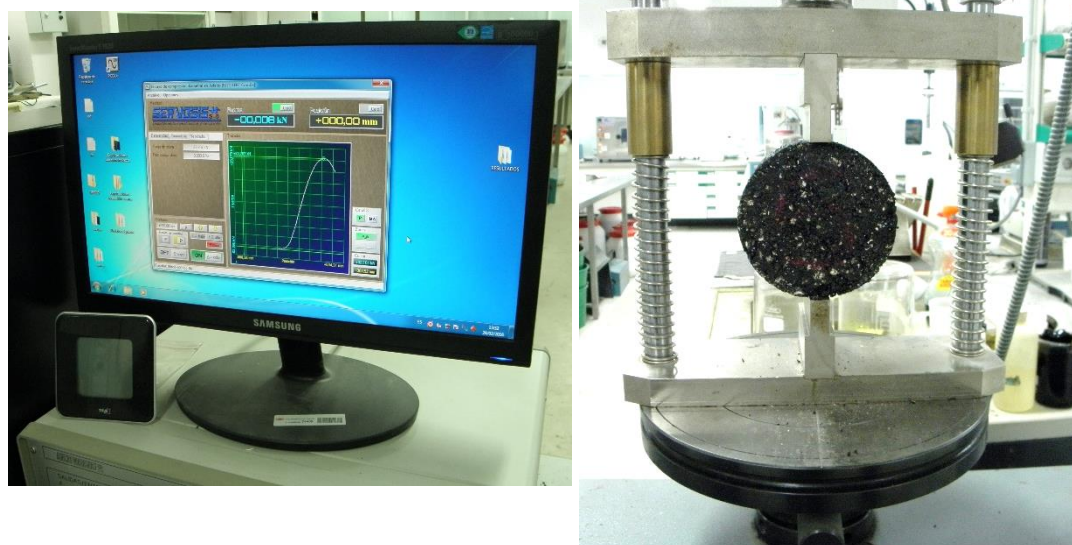


Figura 6-3 Ensayo de tracción indirecta tras inmersión para la determinación del ITSR.

Para verificar dicho cumplimiento, se han fabricado 10 probetas por cada contenido de betún para los diferentes porcentajes de sustitución, de modo que de las 10 probetas cinco formaban parte del grupo seco y las cinco restantes, del húmedo.

Las probetas del grupo seco se almacenaban sobre una superficie plana a temperatura ambiente, mientras que las del grupo húmedo se sometían al proceso que a continuación se describe:

- 1) Las probetas se miden y se calcula su densidad aparente antes de aplicar el vacío a las del grupo húmedo. Deben de ser aproximadamente de la misma longitud (se admiten diferencias en las longitudes medias de hasta 5 mm) y densidad media (hasta 15 kg/m^3 de variación), de modo que si no cumplen se reordenan los grupos seco y húmedo hasta lograr un grupo húmedo que cumpla los requisitos de dimensiones y densidad media.
- 2) Se depositan sobre el anaquel perforado del recipiente de vacío (Figura 6-4).
- 3) Se aplica el vacío para obtener una presión absoluta (residual) de 6.7 kPa en $(10 \pm 1 \text{ min})$. La presión se disminuye lentamente para evitar posibles daños en las probetas. El vacío se mantiene durante $(30 \pm 5 \text{ min})$ tras los cuales se deja entrar lentamente la presión atmosférica en el recipiente de vacío. (Figura 6-5).



Figura 6-4 Probetas depositadas en el recipiente de vacío.

- 4) Se dejan las probetas sumergidas en agua durante otros (30 ± 5 min).
- 5) Se calcula el volumen –por método geométrico– de las probetas de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-6 (AENOR, 2012b) descartándose aquellas que hayan incrementado su volumen en más de un 2%.
- 6) El subconjunto de probetas húmedas se coloca en un baño de agua a (40 ± 1) °C durante un periodo de 68 h a 72 h (Figura 6-6).



Figura 6-5 Equipos utilizados para aplicar el vacío a las probetas. De izquierda a derecha: controladora, bomba, vaso Dewar y recipiente de vacío.



Figura 6-6 Baño de agua a (40 ± 1) °C en el que se sumergen las probetas durante un periodo de 68 h a 72 h.

Si bien la citada norma solo exige tres por cada grupo –es decir, un total de 6– se fabricaban 4 adicionales de modo que así se cubrían los posibles descartes a la vez que se trataba de mitigar las dispersiones introducidas por el AR en los resultados.

Como paso previo a la rotura por tracción indirecta (Figura 6-3), es necesario llevar las probetas a la temperatura de ensayo (15 ± 1) °C durante 2 h 30 min. Para ello, se hace uso de una cámara termostaticada (Figura 6-7). Las probetas del grupo seco se depositan directamente sobre una bandeja mientras que las del grupo húmedo se introducen en un recipiente con agua en el interior de la cámara.



Figura 6-7 Cámara termostaticada empleada para llevar las probetas a la temperatura del ensayo a tracción indirecta.

Finalmente, con el objetivo de alcanzar la ya mencionada limitación de $ITSR \geq 80\%$, la cantidad mínima de ligante de la que se hablará a continuación se modificó a partir de los resultados obtenidos en la muestra de control (0 % AR).

6.6. Dotación mínima de ligante

En función del tipo de mezcla –densa, semidensa, gruesa y alto módulo– y la capa en la que ésta se dispone –rodadura, intermedia o base–, el PG-3 fija la dotación mínima de betún como porcentaje en masa sobre el total de la mezcla (Tabla 6-3).

Los valores estipulados son para áridos que poseen una densidad de 2.65 g/cm³, de modo que han de ser corregidos según las densidades reales de cada fracción. Para ello, se ha calculado la densidad de cada una siguiendo la norma UNE-EN 1097-6 AENOR, 2014) siendo finalmente determinada la densidad conjunta de todos los áridos de la mezcla.

<i>Tipo de capa</i>	<i>Tipo de mezcla</i>	<i>Dotación mínima (%)</i>
<i>Rodadura</i>	Densa y semidensa	4.50
<i>Intermedia</i>	Densa y semidensa	4.00
	Alto módulo	4.50
<i>Base</i>	Semidensa y gruesa	4.00
	Alto módulo	4.75

Tabla 6-3 Dotación mínima de ligante hidrocarbonado fijada por el PG-3.

La corrección de las dotaciones mínimas, efectuada a partir de la densidad conjunta de los áridos (ρ_d), se realiza afectando por un coeficiente α el contenido mínimo de 4.00% correspondiente a la mezcla objeto de estudio.

$$\alpha = \frac{2.65}{\rho_d} \quad (6.1)$$

En la Tabla 6-4 se muestran las dotaciones mínimas de ligante obtenidas para cada una de las granulometrías según el porcentaje de sustitución de AR.

<i>Contenido de AR (%)</i>	<i>Fracciones con AR</i>	ρ_d (g/cm ³)	α	<i>Dotación mínima (%)</i>
0 %	-	2.69986	0.9815	3.926
35 %	4/8, 8/16	2.68189	0.9881	3.952
42 %	8/16, 16/22.4	2.67067	0.9923	3.969
48 %	2/4, 4/8, 8/16	2.67739	0.9898	3.959
69 %	2/4, 4/8, 8/16, 16/22.4	2.66049	0.9961	3.984

Tabla 6-4 Dotación mínima de ligante corregida para cada una de las granulometrías estudiadas.

El contenido mínimo de ligante adoptado tuvo que ver por una parte con los datos previos ya conocidos debido a la colaboración dentro del proyecto “BC-WARM”, cuyo valor se sabía que había sido del entorno del 4% para un 100% de árido calizo. En base a una previsible mayor absorción de ligante provocada por la incorporación de árido reciclado –como se indicó en el estado del arte–, finalmente se tomó un contenido inicial ligeramente superior, en concreto del 4.25%.

Por otra parte, se estudió la dotación mínima (Tabla 6-4) resultante para los distintos porcentajes de sustitución. Sabiendo que el AR posee una menor densidad, los contenidos mínimos fueron superiores según aumentaba el porcentaje de AR presente. Teniendo ambos motivos en mente, se probaron contenidos de hasta el 6% en intervalos de 0.25% (4.25%-4.50%-4.75%-5.00%-5.25%-5.50%-5.75%-6.00%).

Para las restantes mezclas, tras haber evaluado la resistencia a tracción indirecta (ITRS) de la mezcla de control (0% AR) y comprobar que solo se verificaba $ITSR \geq 80\%$ en el caso de las probetas cuyo contenido de ligante era superior o igual al 4.75 %, se tomó como mínimo de betún necesario un 5 %, a partir del cual se ensayaron contenidos en escalones de 0.25 % (5.00% - 5.25% - 5.50% - 5.75% - 6.00%).

6.7. Proceso de fabricación

La fabricación de las probetas de las diversas muestras estudiadas se ha realizado de acuerdo con las siguientes normas UNE:

- UNE-EN 12697-35 (AENOR, 2006b) → mezclado en laboratorio.
- UNE-EN 12697-30 (AENOR, 2013b) → preparación de las probetas mediante compactador de impactos.

El proceso que se ha seguido es el que se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 6-8.



Figura 6-8 Diagrama de flujo del proceso de fabricación.

Composición de muestras y preparación del betún

La granulometría de la mezcla se compone pesando el árido –que ha de estar lavado y seco– de las distintas fracciones que la componen con una precisión del 0.1%. En la Figura 6-9 se muestran la balanza empleada para el pesado de las diferentes fracciones así como la bandeja que contiene todo el árido que formará parte de la probeta a excepción del filler, que se vierte en un vaso de plástico para ser adicionado durante la amasada.



Figura 6-9 Pesado de la fracción 8/16 mm de AR (foto izquierda) y bandeja con toda la granulometría y vaso con filler (foto derecha).

El betún por su parte, se vierte en recipientes metálicos en la cantidad que se incorporará a la mezcla, siendo posteriormente tapados con papel de aluminio para evitar la evaporación de volátiles.

Calentamiento

Antes de dar comienzo al mezclado, es necesario calentar los áridos y betún que formarán parte de la mezcla –depositados en bandeja y cazo respectivamente (Figura 6-10)–, así como la cubeta del mezclador y los moldes para la compactación.

Los áridos se calientan a 175 °C en una estufa ventilada durante un mínimo de 8 horas (Figura 6-11). En cuanto al betún, se lleva a una temperatura de 165 °C durante 3 horas. Además, en esta estufa se introducen también los moldes de acero necesarios para la posterior compactación.



Figura 6-10 Calentamiento del árido (foto izquierda) y cazo con betún (foto derecha).



Figura 6-11 Estufa empleada para el calentamiento de los áridos.

Mezclado

El procedimiento adoptado para el mezclado de los áridos con el betún consiste en los siguientes pasos:

- 1) Vertido de los áridos que compondrán la probeta que han sido calentados previamente en bandejas en la estufa (Figura 6-12, 1).
- 2) Vertido de la cantidad de ligante correspondiente (Figura 6-12, 2).
- 3) Un minuto de mezclado.
- 4) Adición de filler (Figura 6-12, 3).
- 5) Un minuto de mezclado.
- 6) Volcado de la mezcla en bandeja para su vertido en el molde para compactar (Figura 6-12, 4).



Figura 6-12 Proceso de mezcla en fotografías.

Compactación

La compactación de las probetas se ha realizado mediante compactador de impactos, según la norma UNE-EN 12697-30 (AENOR, 2013b). El proceso consistía en:

- 1) Vertido de la mezcla en un molde de acero calentado a la temperatura de compactación, de diámetro 101.6 ± 0.1 mm y altura 63.5 ± 2.5 mm, sobre cuya base se dispone papel de filtro no absorbente. Para mitigar la segregación se pica de forma homogénea 25 veces (Figura 6-13, 1).
- 2) Se dispone el segundo papel de filtro en la parte superior y se coloca sobre la base del compactador. Una vez asegurada la probeta con su correspondiente collarín de prolongación, se activa el mecanismo de elevación de la maza con el número de impactos requerido (Figura 6-13, 2).
- 3) Tras haberse compactado una cara de la probeta, se voltea y se activa de nuevo el mecanismo de elevación de la maza. Una vez terminada la compactación se separa el molde con la probeta del collarín y la base y se deposita en una bandeja en la que enfría al aire libre. Finalmente se desmoldan las probetas al día siguiente de trabajo (Figura 6-13, 3).

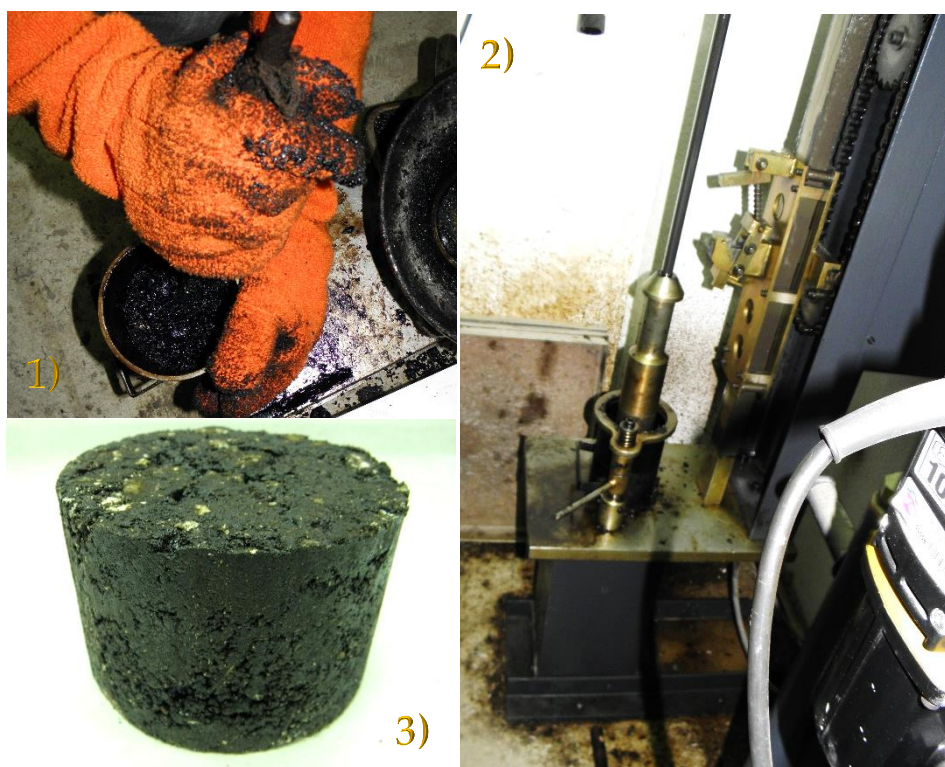


Figura 6-13 Fotografías del proceso de compactación y probeta desmoldada.

Resumen de las cantidades de árido y contenidos de betún empleados

Para concluir con la síntesis de lo que ha sido el proceso de fabricación, se muestran a continuación las cantidades necesarias de árido y betún para la fabricación de probetas de masa 1150 gramos y dimensiones: diámetro 101.6 ± 0.1 mm y altura 63.5 ± 2.5 mm.

Nótese que la granulometría es la misma en todas las mezclas, independientemente de que el árido empleado sea natural o reciclado, por lo que las cantidades son idénticas.

<i>Fracción (mm)</i>	<i>Cantidad (gramos)</i>	<i>Contenido de betún (%)</i>	<i>Cantidad (gramos)</i>
22/32	0	4.25	51.0
16/22	241.5	4.5	54.2
8/16	241.5	4.75	57.3
4/8	161.0	5.0	60.5
2/4	149.5	5.25	63.7
0.5/2	172.5	5.5	66.9
0.25/0.5	57.5	5.75	70.2
0.063/0.25	69.0	6.0	73.4
0/0.063 (<i>filler</i>)	57.5		
Total	1150		

Tabla 6-5 Resumen de las cantidades de betún y árido necesarias para la fabricación de las probetas.

Capítulo 7

RESULTADOS

7. Resultados

7.1. Introducción

En el presente capítulo se muestran los resultados de los trabajos que se han llevado a cabo en el Laboratorio de Caminos de la ETSECCP de A Coruña con la finalidad de caracterizar el comportamiento de la mezcla objeto de estudio. Para ello y dado que solo se trabaja con un tipo de mezcla –**AC 22 bin S**–, lo que se ha hecho es variar el porcentaje de árido reciclado y la cantidad de ligante para ver cómo afectan a la mezcla y de este modo elegir la combinación más apropiada (mayor contenido de AR –árido reciclado– posible y menor dotación de betún necesaria).

Para estudiar cómo se comporta la mezcla fabricada –según los distintos porcentajes de AR y contenidos de ligante– se han realizado los ensayos ya descritos en capítulos anteriores –obtención de densidades (máxima y aparente) y resistencia a tracción indirecta tras inmersión– para comprobar qué combinaciones %AR-%betún de entre las ensayadas verifican las especificaciones técnicas exigidas por el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3).

7.2. Análisis experimental de las propiedades volumétricas

Como se comentó anteriormente, autores como Pasandín et al. (2013) han estudiado cómo influye la presencia de mortero adherido al árido reciclado, concluyendo en líneas generales que la mayor porosidad induce a una mayor absorción de ligante, lo que conlleva una mayor demanda de éste y menores contenidos de huecos en el árido mineral (VMA) y huecos rellenos con ligante (VFB). Por su parte, la superior rugosidad exhibida por el AR se traduce en un contenido de huecos en mezcla (V_m) mayor, puesto que la compactación es más difícil, viéndose además perjudicada por el hecho de que existe menos ligante efectivo –a causa de la mayor absorción– que pueda facilitar el encaje entre los áridos.

7.2.1. Densidad aparente

Para el estudio de la densidad aparente mediante SSD –norma UNE-EN 12697 (AENOR, 2012a)– se han fabricado un total de 28 probetas, una por cada contenido de

betún para cada uno de los porcentajes de sustitución de AR ensayados (0%-35%-42%-48%-69%), resultando las densidades que se presentan en la Tabla 7-1.

Contenido de betún (%)	Densidad Aparente (kg/m ³)				
	0% AR	35% AR	42% AR	48% AR	69% AR
4.25	2325.37	-	-	-	-
4.5	2330.83	-	-	-	-
4.75	2357.93	-	-	-	-
5	2360.59	2305.83	2273.12	2271.37	2184.59
5.25	2378.49	2314.03	2269.49	2289.32	2261.74
5.5	2391.60	2321.98	2278.82	2275.84	2265.10
5.75	2381.71	2308.50	2293.98	2297.23	2237.99
6	2377.95	2302.20	2313.81	2297.24	2230.25

Tabla 7-1 Densidades aparentes mediante SSD obtenidas para las mezclas estudiadas según contenido de betún y árido reciclado.

Como cabía esperar según lo expuesto en la revisión del estado del arte, la densidad aparente disminuye según incrementa la presencia de árido reciclado en la mezcla, si bien se observan ciertas excepciones a la tendencia general que se pueden achacar a la heterogeneidad del árido reciclado.

En la Figura 7-1 se representan las densidades aparentes frente al contenido de ligante para cada porcentaje de sustitución de AR. Entre las tendencias que se pueden percibir encontramos:

- El aumento del porcentaje de árido reciclado en la mezcla provoca la disminución para cualquier contenido de betún de la densidad aparente. Existen sin embargo ciertos puntos en los que esto no es cierto, p.ej. para un 48% AR y 5.25% de ligante, no obstante, en líneas generales la tendencia es la descrita, provocada por la presencia de mortero (baja densidad y alta absorción) y a una mayor dificultad para lograr la compactación.
- Las curvas correspondientes al 0% AR y 35% AR son bastante similares entre sí, produciéndose un aumento gradual de su densidad aparente conforme crece el contenido de ligante –puesto que actúa como lubricante facilitando la compactación– hasta llegar a un punto máximo a partir del cual este efecto se desvanece.

- Las dos curvas que se alejan más de la tendencia descrita en el párrafo anterior, la del 69% AR y 42% AR, comparten en su granulometría la fracción 16/22.4 mm, pudiéndose comprobar que su mayor heterogeneidad acarrea la obtención de resultados desemejantes.
- En general las curvas para cada contenido de AR son bastante planas, de manera que la cantidad de betún tiene poca influencia en la densidad aparente. Esto es cierto para todas las curvas a excepción de la correspondiente al 69% AR, que describe una fuerte pendiente en comparación con el resto de curvas, entre los contenidos de betún 5% y 5.25%.
- La curva correspondiente al 35% AR es la que describe una trayectoria más similar a la de 0% AR, lo que sin duda se debe al hecho de que no incorpora en su granulometría las dos fracciones más problemáticas (16/22.4 mm y 2/4 mm).

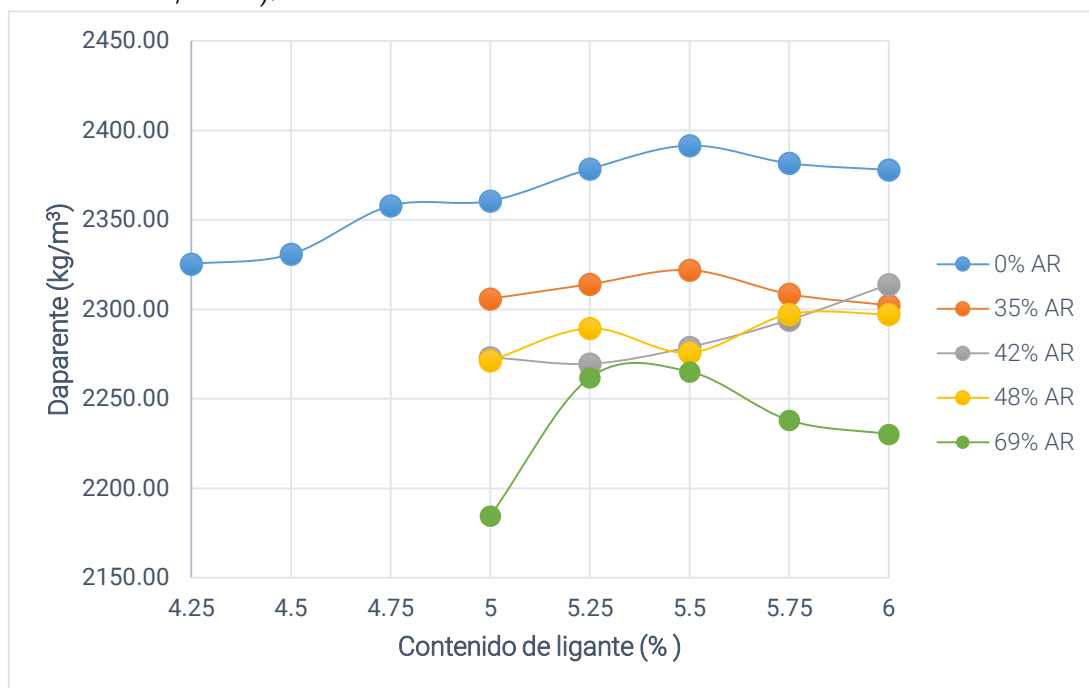


Figura 7-1 Densidad aparente frente a contenido de ligante para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.

7.2.2. Densidad máxima

Con el fin de obtener la densidad máxima de las mezclas estudiadas, se recurrió al procedimiento volumétrico descrito en la norma UNE-EN 12697-5 (AENOR, 2010b).

Para ello se fabricaron 28 muestras sueltas (i.e. sin compactar) –de nuevo una por cada contenido de betún para los distintos porcentajes de sustitución de AR– siendo depositadas sobre bandejas en las que se dejaban enfriar a temperatura ambiente para ser posteriormente ensayadas (Figura 7-2).



Figura 7-2 Muestras sueltas de 69% AR con 4.5% (foto izquierda) y 4.75% de ligante (foto derecha)

Los resultados obtenidos fueron los que se recogen en la Tabla 7-2:

Contenido de betún (%)	Densidad Máxima (kg/m ³)				
	0% AR	35% AR	42% AR	48% AR	69% AR
4.25	2482.73	-	-	-	-
4.5	2457.28	-	-	-	-
4.75	2468.66	-	-	-	-
5	2438.58	2446.34	2454.75	2403.39	2387.05
5.25	2451.09	2429.70	2446.49	2397.59	2421.61
5.5	2424.19	2447.29	2432.98	2384.34	2403.03
5.75	2414.37	2440.35	2417.99	2346.67	2332.34
6	2409.64	2421.37	2404.86	2344.46	2325.01

Tabla 7-2 Densidades máximas por procedimiento volumétrico obtenidas para las mezclas estudiadas según contenido de betún y árido reciclado.

Al igual que pasaba con la densidad aparente, se constata que el incremento de la cantidad de árido reciclado en la mezcla supone un decremento de su densidad, sin embargo, se observa una dispersión de los resultados – inherente al procedimiento de ensayo– mucho mayor que en el caso anterior.

Entre las distintas tendencias que podemos apreciar representando las densidades máximas frente al contenido de ligante se encuentran (Figura 7-3):

- Para porcentajes de sustitución de árido reciclado de 0%, 35% y 42% la evolución de la densidad a medida que incrementa el contenido de ligante es similar, de modo que existe un contenido óptimo de betún de entre el 5.25% y 5.5% para el que las muestras ensayadas alcanzan el mayor valor de densidad máxima.
- En líneas generales, cuanto mayor es el porcentaje de árido reciclado incorporado a la mezcla, menor es la densidad máxima obtenida. Resulta por tanto llamativo lo que sucede para el 48% y 69% de AR, siendo mayor la densidad de la segunda para el 5.25% y 5.5% de contenido de betún. No obstante, vemos que esto también sucede –aunque en menor medida– con la mezcla de control (0% AR), cuyas densidades se sitúan por debajo

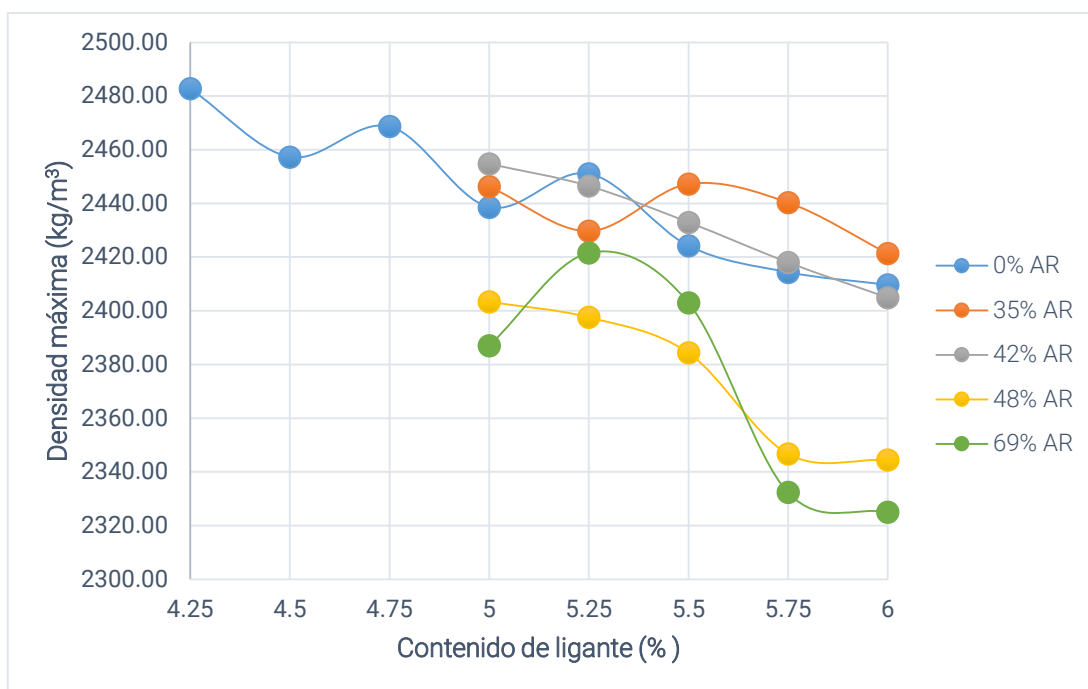


Figura 7-3 Densidad máxima frente a contenido de ligante para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.

- de lo que cabría esperar y a diferencia de lo que pasaba con la densidad aparente, no se distingue un claro distanciamiento entre el conjunto de densidades para las mezclas sin árido reciclado y las que sí lo incorporan.
- Los resultados obtenidos muestran una mayor variabilidad que en el caso de las densidades aparentes presentadas en el punto anterior. La heterogeneidad introducida por el árido reciclado se revela de forma más contundente y se puede ver ayudada entre otros: por el propio procedimiento de ensayo, en el que la separación de la muestra se hace manualmente dando lugar a aglomeraciones de árido de distinto tamaño; existen pequeñas variaciones entre las cantidades de material ensayado; etc.
 - La influencia del contenido de ligante bituminoso sobre la densidad máxima de las mezclas se manifiesta de manera más pronunciada para el 48% y 69% de AR, resultado que se produce de forma análoga en ambos casos y que apunta a la mayor presencia de árido reciclado como su causante.

7.2.3. Huecos en mezcla (V_m)

El contenido de huecos en mezcla (V_m) representa el volumen ocupado por los huecos de aire sobre el total de la probeta y se trata de uno de los parámetros de diseño estipulados por el PG-3 para garantizar entre otros: la durabilidad de la mezcla, la post-compactación durante la vida útil de la carretera debido al paso de vehículos y la expansión del betún con los cambios térmicos.

Para su determinación, de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003) fue necesario determinar las densidades aparente y máxima de la mezcla, a partir de las cuales se obtiene.

En la Tabla 7-3 se exponen los resultados, haciéndose notar que el PG-3 exige para capas intermedias un mínimo común a todas las categorías de tráfico pesado del 4% y un máximo del 6% para T00 y T0 y, del 7% para T1, T2, T3, T4 y arcenes (Tabla 6-2).

Contenido de betún (%)	Huecos en mezcla "Vm" (%)				
	0% AR	35% AR	42% AR	48% AR	69% AR
4.25	6.34	-	-	-	-
4.5	5.15	-	-	-	-
4.75	4.49	-	-	-	-
5	3.20	5.74	7.40	5.49	8.48
5.25	2.96	4.76	4.75	4.52	6.60
5.5	1.34	5.12	6.34	4.55	5.74
5.75	1.35	5.40	5.13	2.11	4.05
6	1.32	4.92	3.79	2.01	4.08

Tabla 7-3 Huecos de aire de las mezclas estudiadas según el contenido de ligante y árido reciclado.

De nuevo, para aclarar los resultados y facilitar su comprensión, se representan en la Figura 7-4.

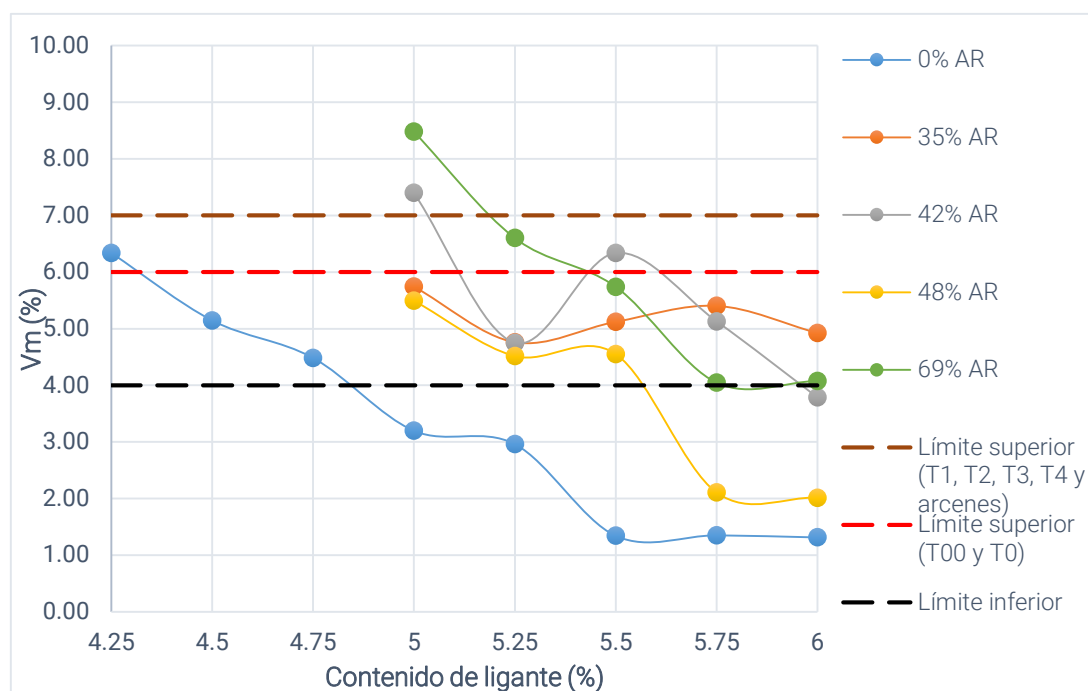


Figura 7-4 Contenido de huecos en mezcla (Vm) frente a contenido de ligante para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.

A la vista de la Figura 7-4 se distinguen las siguientes tendencias:

- En líneas generales, se advierte cómo para un mismo contenido de betún aumenta el contenido de huecos de aire a medida que lo hace la cantidad de árido reciclado (AR) empleada. El principal responsable de este incremento es el mortero de cemento adherido. Aporta *rugosidad*, entorpeciendo la compactación, y una *alta porosidad*, acarreado una mayor

demanda de ligante. Además, una mayor absorción de betún por parte del AR conlleva una disminución de la cantidad de ligante efectivo, lo que redundaría en una peor compactación, conduciendo todo ello a una mayor presencia de huecos de aire.

- Para el 0% AR se cumple el mínimo de huecos en mezcla exigido por el PG-3 para contenidos de betún no superiores al 4.75%, evidenciando que una cantidad excesiva de ligante provoca escasez de huecos de aire en mezcla, algo que se observa también para la mezcla con 48% AR, que para contenidos superiores al 5.5% de betún posee un contenido de huecos de aire (V_m) insuficiente.

- La tendencia que han de describir teóricamente las curvas para los distintos porcentajes de sustitución de AR debería ser un paulatino decremento de los huecos de aire conforme aumenta el contenido de ligante, algo que se observa –aunque con ligeras dispersiones– para el 0% AR y el 69% AR.

Sin embargo, en las restantes curvas, las tendencias descritas varían respecto a lo que cabría esperar, encontrando en la correspondiente al 48% AR la más semejante a la teórica si no fuera por el contenido de huecos en mezcla correspondiente al 5.5% de betún. Para este porcentaje de sustitución no se incluye AR en la fracción 16/22.4 mm, pero sí en la 2/4 mm, de modo que la mayor absorción junto con la mayor superficie específica de dicha fracción podrían ser los responsables de un menor contenido de huecos de aire en términos generales, así como de la excepción a la tendencia para el 5.5% de ligante.

Por otro lado, la curva del 42% AR –cuya granulometría no incluye AR en la fracción 2/4 mm, pero sí en la 16/22.4 mm– es la que presenta, de entre todas las estudiadas, unos resultados más dispersos. Como se mencionó anteriormente, la fracción 16/22.4 mm es la que introduce mayores heterogeneidades y este hecho se ve reflejado con una gran variabilidad de los huecos en mezcla.

- La influencia del contenido de ligante se hace más notoria en las mezclas con mayor presencia de árido reciclado. Mientras que para el 35% de AR se

mantiene estable V_m entre el 5%-6%, a causa de no incorporar las dos fracciones de AR más problemáticas (2/4 mm y 16/22.4 mm), cuanto mayor es la cantidad de AR, mayor es el rango de valores en el que se mueve. Otra vez más, es necesario achacar a la porosidad y rugosidad del mortero el que las variaciones introducidas por las distintas cantidades de betún sean más significativas.

- Según lo expuesto anteriormente, las fracciones 2/4 mm y 16/22.4 mm son las responsables de la mayor variabilidad de los resultados, siendo la 16/22.4 mm la causante de las mayores dispersiones. Resulta por tanto llamativo el que la curva correspondiente al 69% AR describa una tendencia acorde con lo que cabría esperar a nivel teórico, pues incorpora AR en dichas fracciones.
- En cuanto al cumplimiento del PG-3: las distintas combinaciones %AR-%betún estudiadas presentan contenidos de huecos en mezcla (V_m) que se sitúan en el rango de valores requerido por la norma –para categoría de tráfico pesado T00 y T0– con cantidades de ligante entre el 5.25% y 5.75%, exceptuando el 48% AR.

7.2.4. Huecos en el árido mineral (VMA)

Representan el volumen ocupado por los huecos de aire (V_m) más el ligante efectivo –i.e. el betún que no ha sido absorbido por el árido–. Como se mencionó en capítulos anteriores, se recoge en el PG-3 una referencia explícita a un contenido de huecos en áridos mínimo (del 14%), para aquellos casos en los que sean previsibles anomalías debidas a, entre otros factores, granulometrías combinadas como es el caso.

Para obtener los contenidos de huecos en áridos se ha seguido nuevamente la norma UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003) recurriendo a las densidades máxima, aparente y del ligante hidrocarbonado para su determinación.

En la Tabla 7-4 se muestran los resultados obtenidos, que ponen de relieve el amplio cumplimiento exhibido por todas las mezclas que incorporan árido reciclado.

Contenido de betún (%)	Huecos en el árido mineral "VMA" (%)				
	0% AR	35% AR	42% AR	48% AR	69% AR
4.25	15.93	-	-	-	-
4.5	15.33	-	-	-	-
4.75	15.36	-	-	-	-
5	14.66	16.94	18.43	16.52	19.09
5.25	15.09	16.56	16.52	16.18	18.13
5.5	14.11	17.52	18.50	16.70	17.83
5.75	14.65	18.29	17.93	14.93	16.54
6	15.17	18.33	17.26	15.40	17.07

Tabla 7-4 Huecos en el árido mineral de las mezclas estudiadas según el contenido de ligante y árido reciclado.

Como anteriormente se representan los resultados gráficamente a continuación (Figura 7-5):

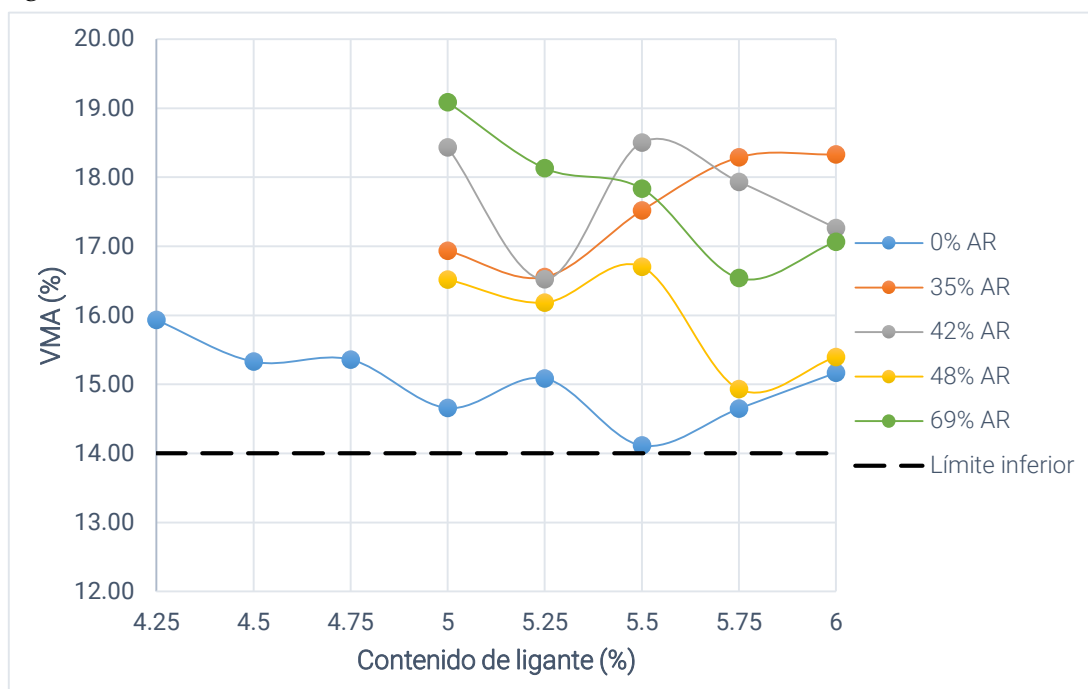


Figura 7-5 Contenido de huecos en el árido mineral (VMA) frente a contenido de ligante para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.

De la Figura 7-5 se extraen las siguientes observaciones:

- Todas las mezclas ensayadas poseen un contenido de huecos en el árido mineral (VMA) superior al 14%, verificando así lo requerido por el PG-3, por lo que dispondrían de espacio suficiente para albergar el betún sin producirse exudaciones cuando se vean sometidas a altas temperaturas.
- A nivel teórico, la tendencia del contenido de huecos en el árido mineral debería ser disminuir con el aumento del contenido de betún hasta alcanzar

un cierto mínimo a partir del cual aumenta VMA de nuevo. Dicha tendencia parece intuirse presentando rama descendente y posteriormente ascendente para 0% AR (con ligeras dispersiones).

En el caso de 48% AR y 69% AR (exceptuando el dato relativo a un 5.5 de ligante para 48% AR), se identifica con ligeras variabilidades la rama descendente y un mínimo VMA desde el cual este comienza a aumentar de nuevo.

Por su parte, la curva correspondiente al 35% AR presenta (tras haber alcanzado su mínimo para un 5.25% de ligante) una rama ascendente mucho mayor que en los casos anteriores, probablemente debida a su menor demanda de betún en relación al resto de granulometrías que incorporan AR, alcanzándose el mínimo de ligante para un contenido de betún menor.

- Aunque el cumplimiento del mínimo contenido de huecos en áridos (del 14%) se satisface con cierta holgura en la totalidad de las mezclas estudiadas, conviene recordar que tal y como se ha calculado se considera que todo el ligante es efectivo, de manera que los valores resultantes sobreestiman los huecos en el árido mineral al no tener en cuenta la notable absorción que se produce por parte del árido reciclado.

7.2.5. Huecos rellenos con ligante (VFB)

Representa el contenido de huecos rellenos con betún en el árido mineral y en este caso no se especifica nada en el PG-3 respecto al rango de valores en el que se ha de situar. En la Tabla 7-5 se muestran los contenidos de huecos rellenos con ligante (VFB) resultantes para las diferentes combinaciones %AR-%betún.

Como se ha comentado, no se ha calculado el porcentaje de ligante efectivo (P_{be}) real, por lo que se ha supuesto que todo el ligante es efectivo –lo cual no es cierto– ya que el árido reciclado absorbe parte del betún, de modo que los contenidos de huecos rellenos con ligante que a continuación se presentan consideran nula la absorción de ligante por parte del árido.

Contenido de betún (%)	Huecos rellenos con ligante "VFB" (%)				
	0% AR	35% AR	42% AR	48% AR	69% AR
4.25	60.22	-	-	-	-
4.5	66.43	-	-	-	-
4.75	70.80	-	-	-	-
5	78.18	66.09	59.86	66.75	55.56
5.25	80.37	71.25	70.02	72.10	63.59
5.5	90.48	70.77	65.76	72.76	67.82
5.75	90.77	70.46	71.40	85.89	75.54
6	91.33	73.15	78.07	86.92	76.12

Tabla 7-5 Huecos rellenos de ligante de las mezclas estudiadas según el contenido de betún y árido reciclado.

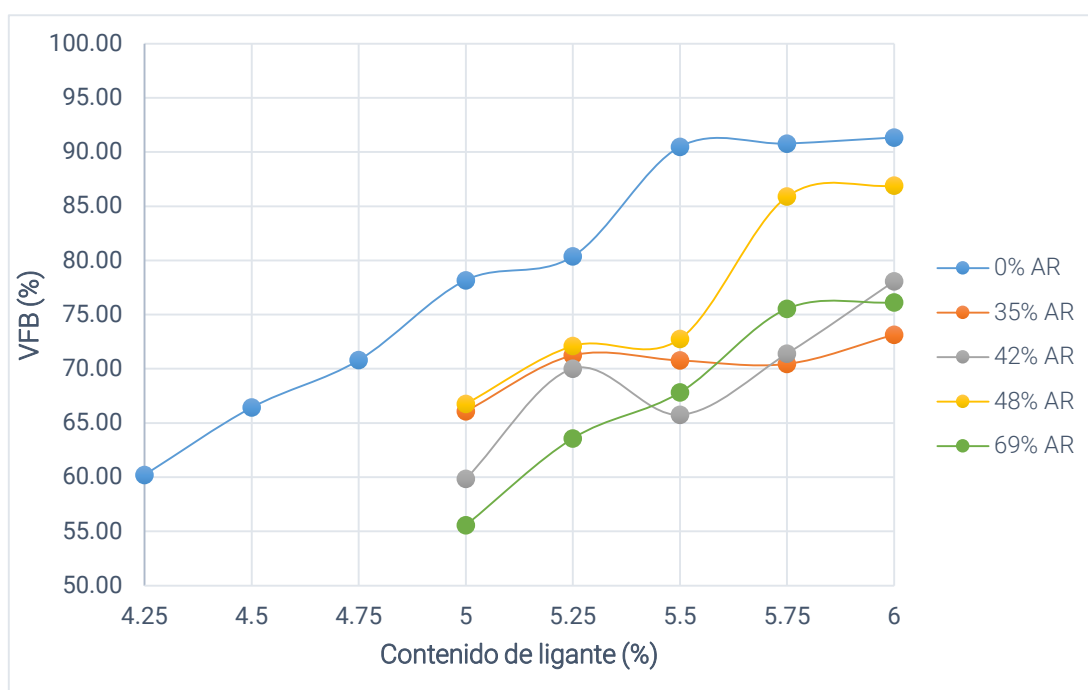


Figura 7-6 Contenido de huecos rellenos con ligante (VFB) frente a contenido de betún para los distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado.

A la vista de la Figura 7-6 es posible advertir las tendencias que a continuación se describen:

–A nivel teórico la tendencia que deberían describir la distintas curvas es de una rama ascendente con el contenido de ligante. En todas las curvas analizadas se distingue dicha rama, con ligeras dispersiones, que de nuevo se revelan de modo más pronunciado para el 42% AR. Por su parte, las curvas para 48% AR y 69% AR parecen ser –como sucedía anteriormente–

las que más se aproximan a la tendencia descrita por 0% AR. Nuevamente, para el 35% AR se observa un contenido de huecos rellenos con ligante más estable para los distintos contenidos de betún ensayados.

7.3. Análisis experimental de la sensibilidad al agua

El efecto que tiene el agua sobre la adhesividad árido–ligante y la cohesión de la mezcla es otro parámetro fundamental a estudiar para lograr que el empleo de árido reciclado (AR) en sustitución del natural sea viable, ya que la degradación de las propiedades mecánicas de las mezclas por la acción del agua compromete su capacidad resistente y durabilidad.

Con el fin de analizar la sensibilidad al agua de las mezclas estudiadas, se fabricaron un total de 260 probetas tipo Marshall, 10 por cada contenido de betún para los diferentes porcentajes de sustitución de AR, de modo que de las 10 probetas cinco formaban parte del grupo seco y las cinco restantes, del húmedo; para posteriormente ser ensayadas de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009a).

7.3.1. Tracción indirecta (ITS) y conservada (ITSR) según % AR

En las figuras (Figura 7-7, Figura 7-8, Figura 7-9, Figura 7-10 y Figura 7-11) se muestra la evolución de la resistencia a tracción indirecta (ITS) de los grupos seco (ITS_d) y húmedo (ITS_w) –para cada uno de los porcentajes de sustitución de árido natural por reciclado– según la cantidad de ligante utilizada.

La finalidad, es discernir tendencias de manera individualizada analizando únicamente la influencia que tiene para una granulometría dada el contenido de ligante empleado, para finalmente comparar a nivel global las resistencias a tracción indirecta conservadas (ITSR) de todas las mezclas estudiadas.

0% Árido Reciclado

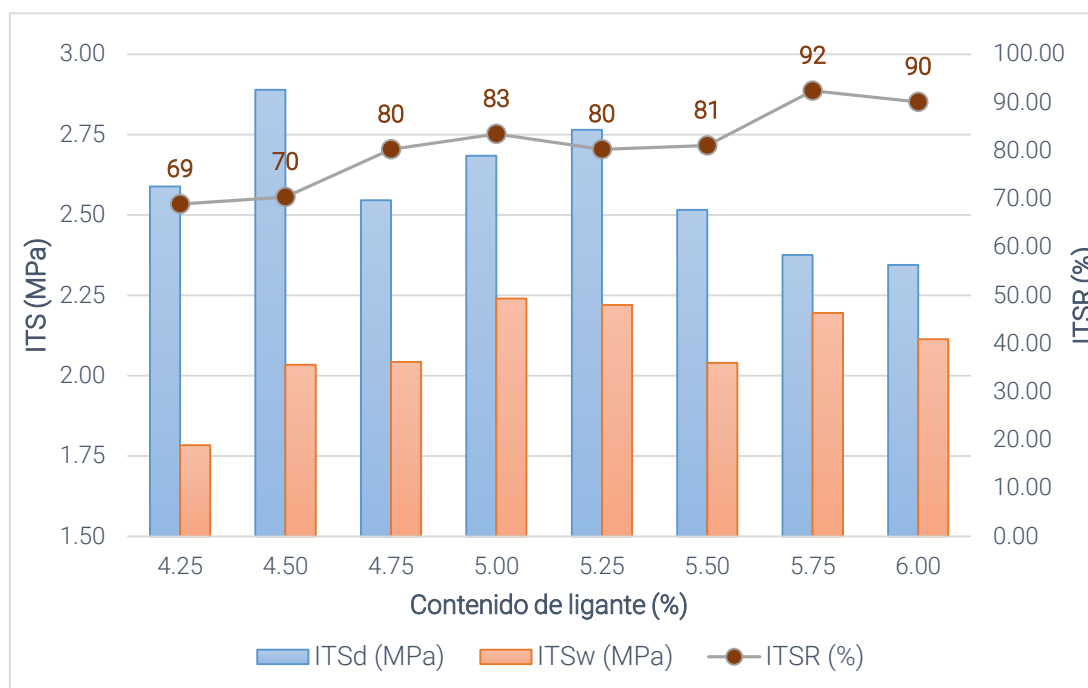


Figura 7-7 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 0% AR.

En la Figura 7-7 se incluyen contenidos de ligante desde el 4.25% hasta el 6.00% por tratarse de la muestra de control. En las posteriores mezclas analizadas, se tomó la decisión de comenzar en un 4.75%, por ser este el primer contenido para el que se verifica la condición impuesta por el PG-3 de $ITSR \geq 80\%$.

La resistencia a tracción indirecta del grupo seco (ITSd) se mantiene en el entorno de los 2.50-2.75 MPa, produciéndose un descenso para los mayores contenidos de betún, que no mejoran su capacidad resistente. Por el contrario, en el caso del grupo húmedo la resistencia a tracción indirecta es superior –a excepción de la mezcla con un 5.50% de betún, para la que también es menor la ITSd– de modo que el incremento de ligante supone una mejora de su resistencia, como cabía esperar.

En lo referente a la resistencia a tracción indirecta conservada (ITSR), se ve cómo crece con el contenido de ligante, manteniéndose prácticamente estable entre el 5.00%-5.50% de betún, para acabar en el entorno del 90% de ITSR.

35% Árido Reciclado

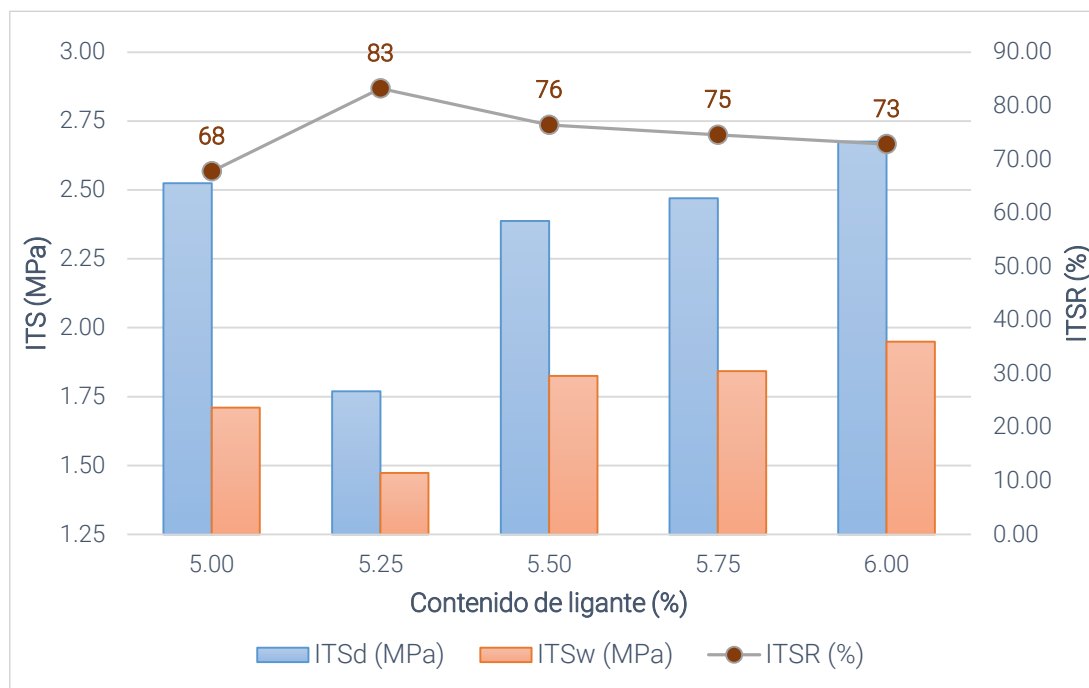


Figura 7-8 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 35% AR.

Si lo comparamos con los resultados para el 0% AR (Figura 7-7), se percibe una disminución de la resistencia a tracción indirecta del grupo seco (ITSd) que, sin embargo, se mantiene estable en el entorno de los 2.5 MPa a excepción de la mezcla con 5.25% de ligante. Por otro lado, esta caída de la resistencia es mucho mayor en el grupo húmedo, situándose en todos los casos por debajo de los 2 MPa, de forma que la sustitución de árido natural por reciclado provoca –como era previsible– la degradación de la capacidad resistente de las mezclas debido a su mayor sensibilidad al agua.

De entre todas las muestras analizadas, solo la realizada con un 5.25% de ligante presenta un ITSR que cumple lo exigido por la normativa española ($ITSR \geq 80\%$). Asimismo, se verifica que dicho cumplimiento supone un 0.5% más de ligante que para el 0% AR. Cabe resaltar que si bien se verifica el requerimiento del PG-3, la resistencia a tracción indirecta tanto del grupo seco como el húmedo descienden de forma significativa respecto al resto de combinaciones %AR-%betún estudiadas, quedando patente la mayor heterogeneidad en los resultados introducida por el AR, pudiendo ser perjudicial para el comportamiento en servicio de la mezcla.

Por tanto, a pesar del cumplimiento de la resistencia conservada para el 5.25% de ligante, sería preciso acometer ensayos adicionales que permitan controlar el cumplimiento de las especificaciones exigidas por el PG-3, para garantizar la correcta dosificación de la mezcla.

42% Árido Reciclado

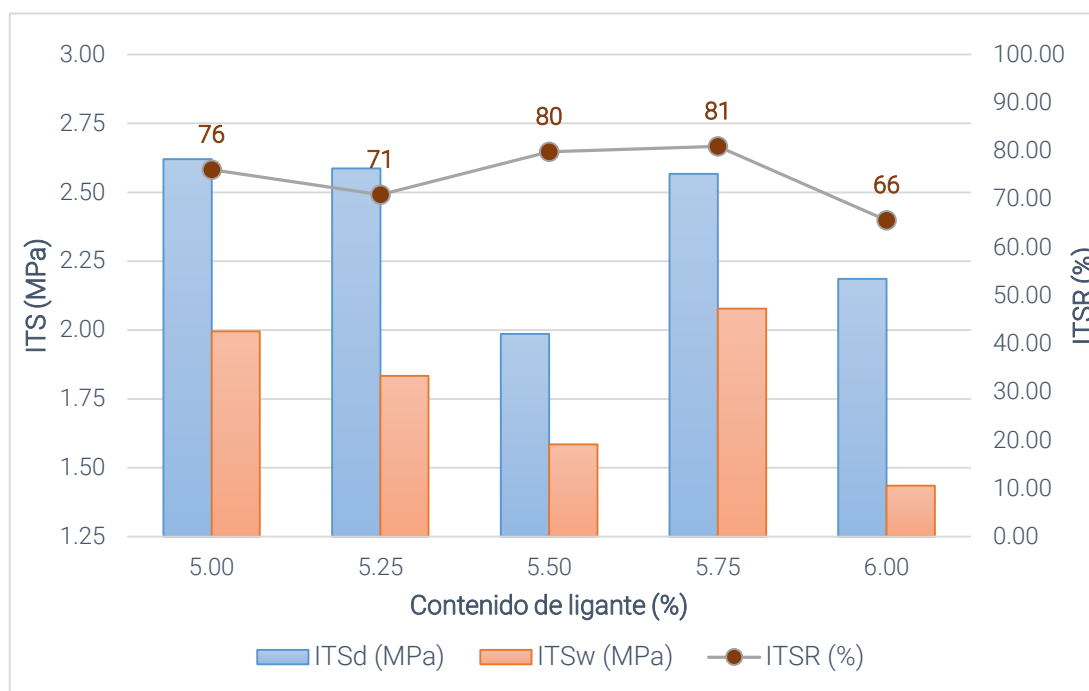


Figura 7-9 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 42% AR.

En el caso de los distintos contenidos de ligante ensayados para un 42% AR, los resultados obtenidos pueden verse en la Figura 7-9. La resistencia a tracción indirecta del grupo seco se mantiene en el entorno de los 2.5 MPa, mientras que para el grupo húmedo se alcanzan valores superiores a los obtenidos para el 35% AR.

Para contenidos de ligante del 5.50% y 5.75%, la resistencia a tracción indirecta conservada es mayor o igual al 80% y parece estabilizarse entre ambos valores para posteriormente disminuir en las mezclas con un 6.00% de betún, cuyo grupo húmedo muestra la resistencia a tracción indirecta más baja de todas las probetas ensayadas con un 42% AR.

Si se establece una comparación con los resultados analizados en el punto anterior (Figura 7-8), resulta interesante ver cómo con una cantidad superior de AR –así como

con una dotación de ligante un 0.25% mayor– se pueden alcanzar resultados satisfactorios ya no solo por la resistencia conservada entre los grupos seco y húmedo estudiados a nivel individual, sino por lograrse para los mismos contenidos de ligante unas resistencias a tracción indirecta seca (ITSd) y húmeda (ITSw) superiores.

48% Árido Reciclado

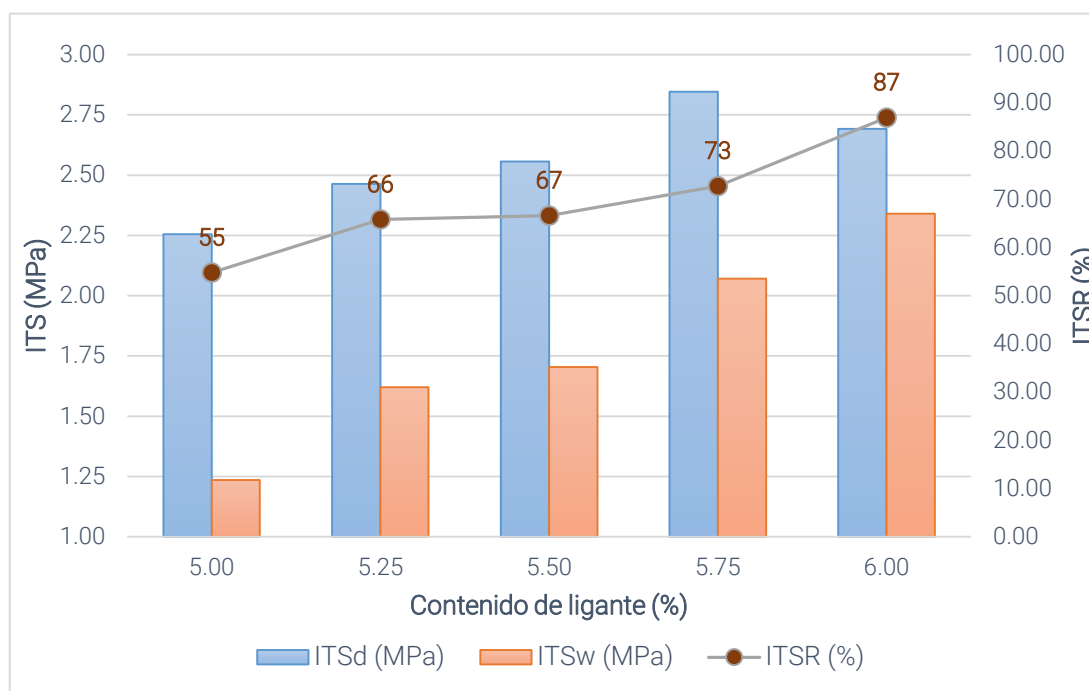


Figura 7-10 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 48% AR.

A la vista de la Figura 7-10 es destacable que tanto la resistencia a tracción indirecta del grupo seco (ITSd) como del húmedo (ITSw) crecen con el contenido de ligante, algo que no sucedía en los casos anteriormente vistos. En consecuencia, se observa que el betún contribuye de modo beneficioso a la mejora de la capacidad resistente de las mezclas, mitigando también la sensibilidad al agua de las probetas ensayadas.

Se alcanza para el 48% AR el mayor valor de resistencia a tracción indirecta conservada (ITSR) de todas las combinaciones que incorporan árido reciclado ensayadas, siendo del 87%. Aunque se trata de un valor elevado, se produce para las mezclas con mayor contenido de ligante –un 6%– encareciendo el precio de la mezcla.

69% Árido Reciclado

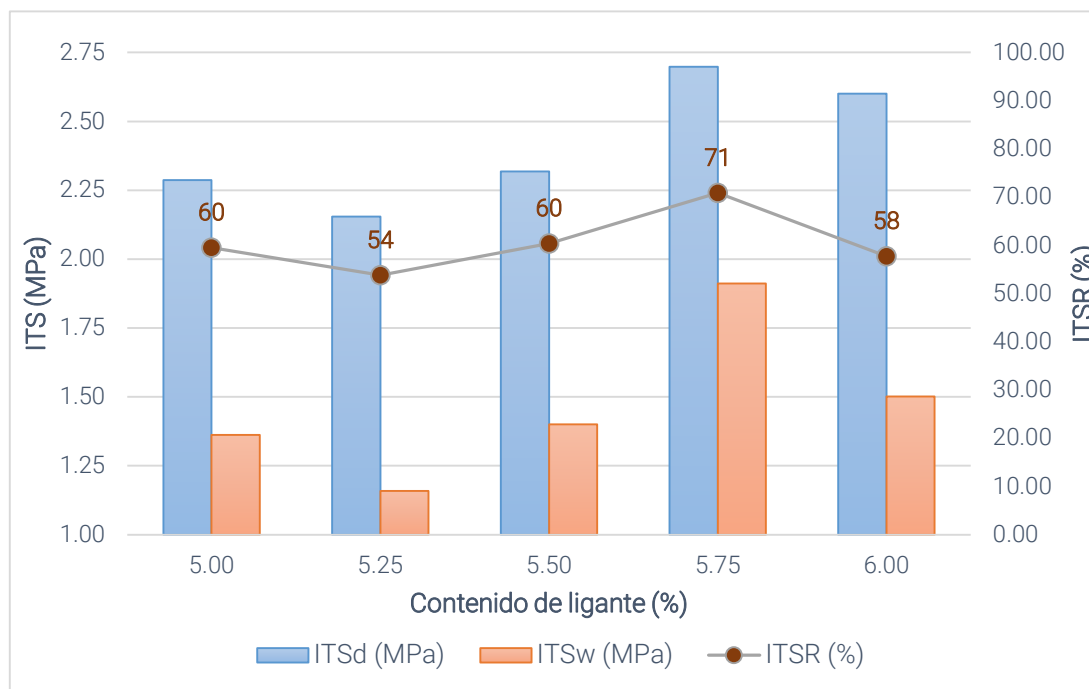


Figura 7-11 Resistencia a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para mezclas con 69% AR.

Para las mezclas ensayadas con la mayor cantidad de árido reciclado, un 69%, se producen los peores resultados y es donde se comprueba de forma más nítida la mayor sensibilidad al agua del árido reciclado frente al natural.

Mientras que la resistencia a tracción indirecta del grupo seco (ITSd) se mantiene estable como ya sucedía en los casos vistos anteriormente, es en la del grupo húmedo donde se registran los mayores descensos, de modo que la resistencia a tracción indirecta conservada (ITSR) no alcanza en ningún caso el mínimo del 80% estipulado por el PG-3, haciendo claramente inviable el empleo de las mezclas con este porcentaje de sustitución de árido reciclado, siempre y cuando no se aplique algún tipo de medida adicional como un pretratamiento del AR.

Comparación de la resistencia a tracción indirecta conservada (ITSR)

Para brindar una visión global tras haber analizado de modo individual las resistencias a tracción indirecta de los grupos seco (ITSd), húmedo (ITSw) y conservada (ITSR) para los diferentes porcentajes de inclusión de árido reciclado, a continuación, se muestra en la Figura 7-12 cómo varía la ITSR en función del porcentaje de AR.

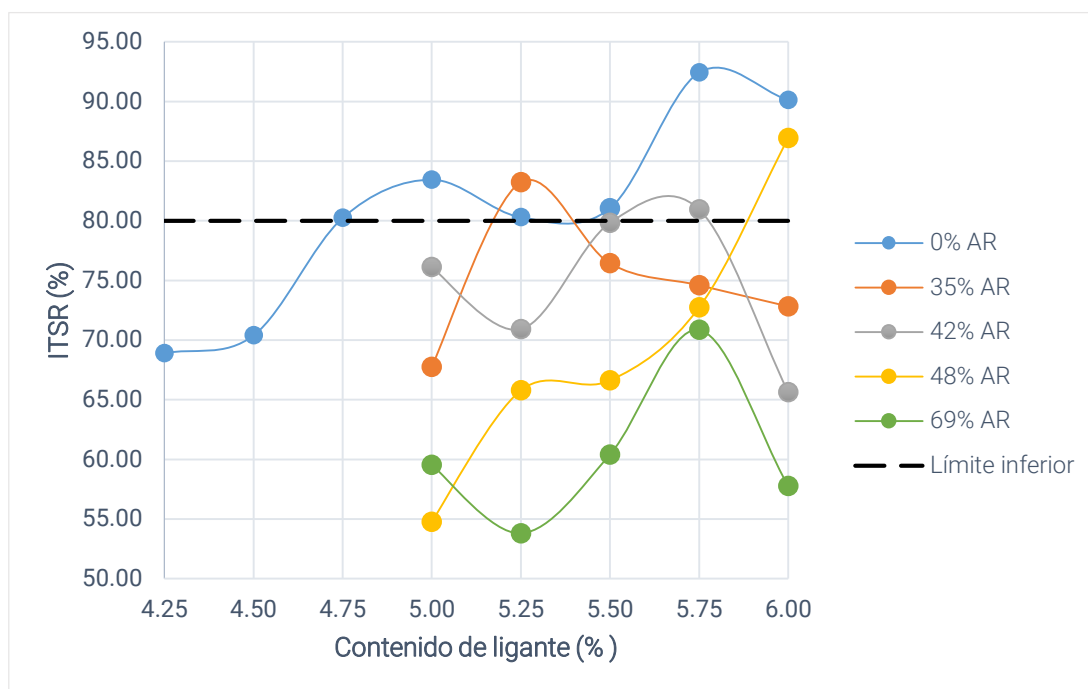


Figura 7-12 Resistencia a tracción indirecta conservada (ITSR) frente a contenido de ligante para los diferentes porcentajes de sustitución de AR.

En primer lugar, se evidencia que, en las mezclas en las que interviene el AR, el cumplimiento del requerimiento impuesto por el PG-3 ($ITSR \geq 80\%$) solo se produce para 4 de las combinaciones estudiadas:

- 35% de AR y 5.25% de ligante
- 42% de AR y 5.50% de ligante
- 42% de AR y 5.75% de ligante
- 48% de AR y 6.00% de ligante

Por otra parte, las curvas correspondientes al 69% AR y 42% AR son las que presentan –salvando las diferencias– unas tendencias más semejantes a las de la muestra de control (0% AR), mientras que para el 48% AR y 35% AR se encuentran las mayores

diferencias, así como las variaciones más pronunciadas (en el caso del 48% AR), teniendo una gran influencia el contenido de ligante sobre la resistencia a tracción indirecta conservada exhibida.

Capítulo 8
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1. Introducción

En el presente proyecto técnico, se analizó la viabilidad de sustitución de árido natural calizo por reciclado (AR) en la fracción gruesa de una mezcla bituminosa en caliente para capa intermedia de tipo "AC 22 bin S". Para ello, se estudiaron las propiedades volumétricas y la sensibilidad al agua para diferentes combinaciones de inclusión de árido reciclado (0%, 35%, 42%, 48% y 69%) con distintos contenidos de ligante (del 4.25% al 6.00%).

8.2. Conclusiones relativas a las propiedades de las mezclas bituminosas

8.2.1. Propiedades volumétricas

Se ha comprobado que los huecos en mezcla (V_m) aumentan con el porcentaje de árido reciclado incorporado a la mezcla, debido al mortero de cemento, que aporta rugosidad y una alta porosidad, empeorando así la compactación y siendo por tanto superior el contenido de huecos de aire.

No obstante, se ha logrado el cumplimiento de los requerimientos del PG-3 para gran parte de las combinaciones estudiadas –tanto en categorías de tráfico pesado altas como bajas–, a excepción de las siguientes: 42% AR y 5% de ligante; 42% AR y 6% de ligante; 48% AR y 5.75% de ligante; 48% AR y 6% de ligante; 69% AR y 5% de ligante y 69% AR y 5.25% de ligante.

En cuanto al contenido de huecos en el árido mineral (VMA), en todas las combinaciones analizadas se superan las exigencias impuestas por el PG-3, situándose por encima de los resultados obtenidos para la mezcla de control (0% AR).

Asimismo, también se estudió el contenido de huecos rellenos con ligante (VFB), si bien no existe ninguna exigencia a su respecto en el PG-3.

Es preciso señalar que dado que el PG-3 considera todo el ligante como efectivo, tanto el contenido de huecos en el árido mineral (VMA) como el contenido de huecos rellenos de ligante (VFB) se han sobreestimado.

8.2.2. Sensibilidad al agua

Evaluada mediante el ensayo de rotura a tracción indirecta, reveló en términos generales que la inclusión de AR en la mezcla estudiada conlleva una peor resistencia a la acción del agua.

De entre las diferentes combinaciones analizadas, solo alcanzaron el mínimo impuesto por el PG-3 las compuestas por: 35% de AR y 5.25% de ligante; 42% AR y 5.50% de ligante; 42% AR y 5.75% de ligante y 48% AR y 6% de ligante.

Atendiendo a los contenidos para los que se logró alcanzar el requerimiento del PG-3 (resistencia a tracción indirecta conservada igual o superior al 80%), se observó la relevancia de las fracciones en las que se sustituía árido natural calizo por AR dado que:

- En la combinación con 35% AR no estaban presentes ni la fracción 2/4 mm ni la 16/22.4 mm.
- Para el 42% AR, cumplieron dos combinaciones con distinta cantidad de ligante (5.50% y 5.75%). Para este porcentaje de AR no se incluía árido reciclado en la fracción 2/4 mm.
- En el 48% AR no estaba presente la fracción 16/22.4 mm.

En consecuencia, la inclusión de AR en la fracción 2/4 mm se mostró como la menos adecuada por su mayor sensibilidad al agua. También se puso de manifiesto la inviabilidad del uso de la combinación con el mayor porcentaje de AR estudiado (69%), que presentaba AR en las dos fracciones más problemáticas (2/4 mm y 16/22.4 mm).

Además, se constató que en aquellas combinaciones %AR-%betún que cumplían los requisitos del PG-3, el contenido de ligante para el que lo hacían aumentaba conforme lo hacía el porcentaje de sustitución de AR.

En conclusión, los resultados de la resistencia a tracción indirecta conservada (ITSR) exhibidos por las distintas combinaciones, siendo éste el más restrictivo de los parámetros analizados (huecos en mezcla, huecos en el árido mineral e ITSR), hicieron únicamente viable el uso de AR en las combinaciones con 35% y 42%.

A pesar de que para el 48% AR se alcanzaba la resistencia a tracción indirecta conservada, habría que descartarlo, ya que presentó un contenido de huecos en mezcla (Vm) insuficiente.

Por consiguiente, de entre todas las combinaciones estudiadas, cumplirían todos los requerimientos exigidos en el PG-3:

- 35% AR y 5.25% de ligante
- 42% AR y 5.50% de ligante
- 42% AR y 5.75% de ligante

8.3. Recomendaciones

A continuación, se recoge una serie de recomendaciones para el empleo de árido reciclado en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para capas intermedias:

- Dada la heterogeneidad que caracteriza a los residuos de construcción y demolición (RCD) que dan origen al árido reciclado (AR), se hace imprescindible su correcta caracterización, ya que según su procedencia sus características pueden ser muy distintas.
- Uso preferible del AR en fracciones gruesas, ya que la fracción fina es más sensible al agua, posee una mayor absorción y en ella resulta más difícil retirar impurezas.
- Analizar el proceso de mezclado, puesto que la envuelta con AR resulta más difícil debido a su alta porosidad y rugosidad, por lo que los tiempos de mezclado para mezclas convencionales podrían ser insuficientes.
- Acometer la creación de una normativa técnica que regule la utilización de AR en las mezclas bituminosas en caliente.

Capítulo 9

BIBLIOGRAFÍA

9. Bibliografía

- [1] Adams M.P. (2012). "Alkali-silica reaction in concrete containing recycled concrete aggregates". An Abstract of the Thesis. Oregon State University.
- [2] AENOR (2003). UNE-EN 12697-8 "Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezcla Bituminosa En Caliente. Parte 8: Determinación Del Contenido De Huecos En Las Probetas Bituminosas".
- [3] AENOR (2004). UNE-EN 12697-23 "Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezclas Bituminosas En Caliente. Parte 23: Determinación De La Resistencia a La Tracción Indirecta De Probetas Bituminosas".
- [4] AENOR (2005). UNE-EN 933-5 "Ensayos Para Determinar Las Propiedades Geométricas De Los Áridos. Parte 5: Determinación Del Porcentaje De Caras De Fractura De Las Partículas De Árido Grueso".
- [5] AENOR (2006a). UNE-EN 12697-26 "Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezcla Bituminosa En Caliente. Parte 26: Rigidez".
- [6] AENOR (2006b). UNE-EN 12697-35 "Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezclas Bituminosas En Caliente. Parte 35: Mezclado En Laboratorio".
- [7] AENOR (2007a). UNE-EN 1426 "Betunes y Ligantes Bituminosos. Determinación De La Penetración Con Aguja".
- [8] AENOR (2007b). UNE-EN 1427 "Betunes y Ligantes Bituminosos. Determinación Del Punto De Reblandecimiento. Método Del Anillo y Bola".
- [9] AENOR (2008). UNE-EN 12697-22 "Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezclas Bituminosas En Caliente. Parte 22: Ensayo De Rodadura".
- [10] AENOR (2009a). UNE-EN 12697-12 "Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezclas Bituminosas En Caliente. Parte 12: Determinación De La Sensibilidad Al Agua De Las Probetas De Mezcla Bituminosa".

- [11] AENOR (2009b). UNE-EN 933-11 “Ensayos Para Determinar Las Propiedades Geométricas De Los Áridos. Parte 11: Ensayo De Clasificación De Los Componentes De Los Áridos Gruesos Reciclados”.
- [12] AENOR (2010a). UNE-EN 1097-8 “Ensayos Para Determinar Las Propiedades Mecánicas y Físicas De Los Áridos. Parte 8: Determinación Del Coeficiente De Pulimento Acelerado”.
- [13] AENOR (2010b). UNE-EN 12697-5 “Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezclas Bituminosas En Caliente. Parte 5: Determinación De La Densidad Máxima”.
- [14] AENOR (2010c). UNE-EN 13398 “Betunes y Ligantes Bituminosos. Determinación De La Recuperación Elástica De Los Betunes Modificados”.
- [15] AENOR (2012a). UNE-EN 933-8 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena”.
- [16] AENOR (2012b). UNE-EN 12697-6 “Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezclas Bituminosas En Caliente. Parte 6: Determinación De La Densidad Aparente De Probetas Bituminosas”.
- [17] AENOR (2012c). UNE-EN 933-1 “Ensayos Para Determinar Las Propiedades Geométricas De Los Áridos. Parte 1: Determinación De La Granulometría De Las Partículas. Método Del Tamizado”.
- [18] AENOR (2012d). UNE-EN 933-3 “Ensayos Para Determinar Las Propiedades Geométricas De Los Áridos. Parte 3: Determinación De La Forma De Las Partículas. Índice De Lajas”.
- [19] AENOR (2013a). UNE-EN 12697-24 “Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezclas Bituminosas En Caliente. Parte 24: Resistencia a La Fatiga”.

- [20] AENOR (2013b). UNE-EN 12697-30 "Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezclas Bituminosas En Caliente. Parte 30: Preparación De Probetas Mediante Compactador De Impactos".
- [21] AENOR (2014). UNE-EN 1097-6 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua".
- [22] Al-Hdabi, A., Nageim, H. A., Ruddock, F., & Seton, L. (2013). "A novel cold rolled asphalt mixtures for heavy trafficked surface course". *Construction and Building Materials*, 49, 598-603.
- [23] Apotheker, S. (1990). "Construction and demolition debris - the invisible waste stream". *Resource Recycling*, 9, 66-74.
- [24] Arabani, M., & Azarhoosh, A. R. (2012). "The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures". *Construction and Building Materials*, 35, 1-7.
- [25] Arabani, M., Moghadas Nejad, F., & Azarhoosh, A. R. (2013). "Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures". *International Journal of Pavement Engineering*, 14(6), 531-539.
- [26] Bagampadde, U. (2004). "On investigation of stripping propensity of bituminous mixtures". *Licentiate Thesis. Karlstad University*,
- [27] Bell N. (1998). "Waste minimization and resource recovery. the environmental design guide". Royal Australian Institute of Architects. Canberra.
- [28] Bossink B.A.G., B. H. J. H. (1996). "Construction waste: Quantification and source evaluation". *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(1), 55-60.
- [29] Branthaver, J. F. (SHRP-A-368, NRC, Washington D.C., 1993. "Binder characterization and evaluation", volume 2: Chemistry.

- [30] CEDEX (2014). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. "Catálogo de residuos utilizables en construcción".
- [31] Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2011). "Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture". *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909-3914.
- [32] Cochran, K. M., & Townsend, T. G. (2010). "Estimating construction and demolition debris generation using a materials flow analysis approach". *Waste Management*, 30(11), 2247-2254.
- [33] Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Comunidad de Madrid. (2009) "Plan regional de residuos de construcción y demolición (2006-2016)"
- [34] Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. (2005). "Programa de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición de Galicia 2005-2007"
- [35] Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras. Xunta de Galicia. (2013). "Programa De Gestión De Residuos De Construcción y Demolición De Galicia 2013-2016"
- [36] European Commission. Directorate-General Environment (2011). "Management Plan 2011 DG Environment".
- [37] Di Benedetto, H., De La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., & Lundström, R. (2004). "Fatigue of bituminous mixtures". *Materials and Structures/Materiaux Et Constructions*, 37(267), 202-216.
- [38] EEA (European Environment Agency) (2015). "SOER (State of the Environment Report)".
- [39] Environment European Comission. (2015). "Resource efficient use of mixed wastes. CDW management in Spain".
- [40] EPA. (1999). "EPA annual report on disposal of solid and liquid wastes". Taiwan.

- [41] GERD (Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición) (2010). "Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición"
- [42] Gómez-Meijide, B. (2015). "Aplicación sostenible de residuos de construcción y demolición como árido reciclado de mezclas bituminosas en frío". Tesis doctoral. Universidade da Coruña.
- [43] Hong Kong EPD (Environment Protection Department). (2007). "Monitoring of solid waste in Hong Kong".
- [44] Khalid, H. A. (2000). "A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials". *Materials and Structures*, 33(7), 457-465.
- [45] Khandal, P. S., & Chakraborty, S. (1996). "Evaluation of voids in the mineral aggregate for HMA paving mixtures". *NCAT Report*, 96-94.
- [46] Kiggundu, B. M., & Roberts, F. L. (1988). "Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods". *National Center for Asphalt Technology (NCAT)*, NCAT 88 - 02, 4-38.
- [47] Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., G. Romana, M., Sánchez Blanco, V., del Val, et al. (2004). In McGraw-Hill (Ed.), "Ingeniería de carreteras. volumen II".
- [48] Lavin (2003). In Spon Press (Ed.), "Asphalt pavements. A practical guide to design, production, and maintenance for engineers and architects".
- [49] Li, X. (2008). "Recycling and reuse of waste concrete in china: Part I. material behaviour of recycled aggregate concrete". *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), 36-44.
- [50] Mamlouk, M. (1988). "Modulus of asphalt mixtures - an unresolved dilemma". *Transportation Research Record*, (1171), 193-198.

- [51] Melbouci, B. (2009). "Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates". *Construction and Building Materials*, 23(8), 2723-2730.
- [52] Mills-Beale, J., & You, Z. (2010). "The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates". *Construction and Building Materials*, 24(3), 230-235.
- [53] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015). Plan Estatal Marco De Gestión De Residuos (PEMAR) 2016-2022.
- [54] Ministerio de Medio Ambiente (2001). Plan Nacional De Residuos De Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006.
- [55] 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.
- [56] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2008). Plan Nacional Integrado De Residuos De España (PNIR) 2008-2015.
- [57] Ministerio de Fomento (2015). Pliego De Prescripciones Técnicas Para Obras De Carreteras y Puentes (PG-3).
- [58] Murali Krishnan, J., & Rajagopal, K. R. (2004). "Thermodynamic framework for the constitutive modeling of asphalt concrete: Theory and applications". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(2), 155-166.
- [59] Murphy, T., & Bentsen, R. A. (2001). *Marshall mix design: Getting the most of your Marshall Mixes*. Humboldt Product Manual.
- [60] Nejad, F. M., Azarhoosh, A. R., & Hamed, G. H. (2013). "The effects of using recycled concrete on fatigue behavior of hot mix asphalt". *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(SUPPL.1), S61-S68.

- [61] Pasandín A.R., & Pérez I. (2014). "Effect of ageing time on properties of hot-mix asphalt containing recycled concrete aggregates". *Construction and Building Materials*, 52, 284-293.
- [62] Pasandín, A. R. (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.
- [63] Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2013). "Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste". *Construction and Building Materials*, 43, 497-505.
- [64] Pavement Interactive (2012). *HMA weight-volume terms and relationships*. Retrieved June 2016 from <http://www.pavementinteractive.org/article/hma-weight-volume-terms-and-relationships/>
- [65] 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(4), 165-174.
- [66] Rodríguez-Robles, D., García-González, J., Juan-Valdés, A., Morán-Del Pozo, J. M., & Guerra-Romero, M. I. (2015). "Overview regarding construction and demolition waste in Spain". *Environmental Technology (United Kingdom)*, 36(23), 3060-3070.
- [67] Shen, D. -, & Du, J. -. (2005). "Application of gray relational analysis to evaluate HMA with reclaimed building materials". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4), 400-406.
- [68] Shi, J., & Xu, Y. (2006). "Estimation and forecasting of concrete debris amount in China". *Resources, Conservation and Recycling*, 49(2), 147-158.
- [69] Sousa, J. B., Craus, J., & Monismith, C. L. (1991). "Summary report on permanent deformation in asphalt concrete". SHRP-A/JR-91-104. *Strategic Highway Research Program*. National Research Council,

- [70] Taibo Pose, J. (2005). "Estudio de las características mecánicas de las mezclas bituminosas en caliente realizadas con residuos de construcción y demolición para capas de base e intermedia de carreteras de bajo tráfico". Proyecto técnico. Universidade de A Coruña. Profesores responsables: Dr. Ignacio Pérez Pérez y Dra. Mar Toledano Prados.
- [71] Unión Europea (2008). *Directiva 2008/98/CE Del Parlamento Europeo y Del Consejo, De 19 de Noviembre De 2008, Sobre Los Residuos y Por La Que Se Derogan Determinadas Directivas.*
- [72] Wong, Y. D., Sun, D. D., & Lai, D. (2007). "Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt". *Waste Management*, 27(2), 294-301.