



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería Civil

**Proyecto Técnico**

**SENSIBILIDAD AL AGUA Y PROPIEDADES  
MECÁNICAS DE MEZCLAS TEMPLADAS  
FABRICADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS  
DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y  
DEMOLICIÓN**

Autora:

Lidia Caamaño Caamaño

Profesores responsables:

Dra. Ana María Rodríguez Pasandín

Dr. Ignacio Pérez Pérez

A Coruña, julio de 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quisiera agradecer a los profesores Ignacio Pérez y Ana Rodríguez Pasandín, por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto técnico, así como por su apoyo, experiencia y dedicación a lo largo de todo este tiempo.

Asimismo, me gustaría expresar mi gratitud hacia Natalia Pérez Barge, quien me ayudó en la realización de los diferentes ensayos, y sin la cual esta investigación no hubiera sido posible.

Gracias en general, a toda la gente que me ha acompañado a lo largo de mi paso por la escuela, especialmente a Pablo, Sandra, Óscar, Patri, Dani, Belén, Carmen, Alejandro y Conchi, con los que he compartido siete inolvidables años de trabajo y sacrificio, pero también de risas y diversión.

Finalmente, me gustaría demostrar mi más sincero agradecimiento a mi familia. A mis padres, quienes me han enseñado que con esfuerzo todo se puede. A mi hermana, quien siempre ha sabido sacarme una sonrisa incluso en ocasiones de máximo agobio. A mis abuelos por su cariño y preocupación. Y para terminar, a mi pareja, por escucharme, apoyarme y haber estado ahí en los mejores y peores momentos.

## **RESUMEN**

En el presente proyecto técnico se estudia la viabilidad del empleo de áridos reciclados (AR) de tipo hormigón procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD), en mezclas bituminosas templadas para capas intermedias de firmes de carreteras. En concreto se analiza la posibilidad de su empleo en una mezcla de tipo AC 22 bin S.

El objetivo último del presente proyecto técnico es el de contribuir al ahorro energético y a la reducción de emisiones de efecto invernadero. Así mismo, se busca disminuir la demanda de áridos naturales y reducir la acumulación de RCD en vertederos, con el consiguiente despilfarro de materias primas e impacto visual y paisajístico.

Para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto, se ha llevado a cabo, en primer lugar, un análisis de la temperatura y del tiempo de mezclado necesarios para conseguir un mezclado óptimo y así estandarizar el proceso de fabricación.

Una vez determinados la temperatura y el tiempo de mezclado más adecuados, se ha llevado a cabo un completo estudio de las propiedades volumétricas y de la sensibilidad al agua para mezclas fabricadas con un 100% y un 55% de árido reciclado con diferentes contenidos de ligante. También se determinaron las propiedades volumétricas y la sensibilidad al agua de una mezcla templada de control (fabricada con un 100% de árido natural silicio), a efectos de servir de base de comparación. Los resultados obtenidos mostraron que la resistencia a la acción del agua era menor cuanto mayor era el porcentaje de AR y que a medida que aumentaba el contenido de AR en la mezcla, el contenido de ligante óptimo también aumentaba.

Por último, con el contenido óptimo de ligante se llevó a cabo el estudio de la rigidez y de la resistencia a la deformación permanente. La conclusión obtenida de estos ensayos fue que el árido reciclado provoca una disminución de la rigidez y una mayor susceptibilidad a la deformación plástica. Sin embargo, con contenidos de AR de hasta un 55%, se obtendrían resultados suficientemente buenos para su uso en capas intermedias de carreteras de bajo tráfico en zonas no excesivamente cálidas ni con tráfico pesado canalizado.

## RESUMO

No presente proxecto técnico estúdase a viabilidade do emprego de áridos reciclados (AR) de tipo formigón procedentes de residuos de construción e demolición (RCD), en mesturas bituminosas temperadas para capas intermedias de firmes de estradas. En concreto analízase a posibilidade do seu emprego nunha mestura de tipo AC 22 bin S.

O obxectivo último do presente proxecto técnico é o de contribuír ao aforro enerxético e á redución de emisións de efecto invernadoiro. Así mesmo, búscase diminuír a demanda de áridos naturais e reducir a acumulación de RCD en vertedoiros, co consecuente malgasto de materias primas e impacto visual e paisaxístico.

Para dar cumprimento aos obxectivos do proxecto, levouse a cabo, en primeiro lugar, unha análise da temperatura e do tempo de mesturado necesarios para conseguir un mesturado óptimo e así estandarizar o proceso de fabricación.

Unha vez determinados a temperatura e o tempo de mesturado máis adecuados, levouse a cabo un completo estudo das propiedades volumétricas e da sensibilidade á auga para mesturas fabricadas cun 100% e un 55% de árido reciclado con diferentes contidos de ligante. Tamén se determinaron as propiedades volumétricas e a sensibilidade á auga dunha mestura temperada de control (fabricada cun 100% de árido natural silicio), a efectos de servir de base de comparación. Os resultados obtidos mostraron que a resistencia á acción da auga era menor canto maior era a porcentaxe de AR e que a medida que aumentaba o contido de AR na mestura, o contido de ligante óptimo tamén aumentaba.

Por último, co contido óptimo de ligante levouse a cabo o estudo da rixidez e da resistencia á deformación permanente. A conclusión obtida destes ensaios foi que o árido reciclado provoca unha diminución da rixidez e unha maior susceptibilidade á deformación plástica. Con todo, con contidos de AR de ata un 55%, obteríanse resultados suficientemente bos para o seu uso en capas intermedias de estradas de baixo tráfico en zonas non excesivamente cálidas nin con tráfico pesado canalizado.

## **ABSTRACT**

In this study, the viability of using recycled concrete aggregates (RCA) from Construction and Demolition Waste (CDW) in half-warm mix asphalt (HWMA) for binder course of road pavement was studied. A HWMA type AC 22 bin S was chosen in order to perform this research.

The aim of the present project is to contribute to the energy savings and to reduce the greenhouse gas emissions. Also, the aim is to reduce natural aggregates consumption and CDW disposal, with the consequent waste of raw materials and visual and landscape impact.

In order to fulfill the aims of the project, several tasks were carried out. Firstly, it was conducted a temperature and mixing time analysis.

After determining the most suitable temperature and mixing time, a complete study of the volumetric properties and the moisture damage resistance was carried out. This study was made for mixtures manufactured with 100% and 55% RCA and different binder contents. Also, volumetric properties and moisture damage resistance were determined for a control mixture (made with 100% of natural siliceous aggregates), to serve as a basis of comparison. The results showed that mixtures made with RCA, display higher water sensitivity than mixtures made only with natural aggregates. This effect was more pronounced as RCA percentage grows. Moreover, as RCA content increases, the optimum binder content also increases.

Finally, with the optimum binder content, the stiffness and the resistance to the permanent deformation were determined. Results showed that the RCA causes a stiffness decrease. Also, RCA lead to mixtures with lower resistance to the permanent deformation. Nevertheless, the results indicate that HWMA with RCA content up to 55% are suitable for their use as binder course of low traffic roads. However, it use in warm regions or in roads carrying heavy and channelized traffic must be avoided.

## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Antecedentes y planteamiento general del problema.....	1
1.2.	Objetivos.....	3
1.3.	Organización de los capítulos .....	4
2.	ESTADO DEL ARTE .....	6
2.1.	Mezclas a baja temperatura – mezclas templadas.....	6
2.2.	Residuos de construcción y demolición.....	8
2.2.1.	Composición.....	8
2.2.2.	Producción de los RCD .....	10
2.2.3.	Gestión de los RCD .....	12
2.2.4.	Producción de los AR.....	16
2.2.5.	Aplicaciones de los ARs en capas de firme.....	18
2.2.6.	Marco normativo .....	19
2.3.	Mezclas bituminosas con áridos reciclados de RCD .....	20
2.3.1.	Introducción.....	20
2.3.2.	Mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados de RCD.....	20
2.3.3.	Mezclas bituminosas en frío con AR de RCD.....	34
2.3.4.	Mezclas bituminosas a bajas temperaturas con árido reciclado.....	39
3.	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES BÁSICOS .....	43
3.1.	Introducción .....	43
3.2.	Árido natural .....	43
3.2.1.	Propiedades mecánicas y físicas.....	44
3.2.2.	Propiedades geométricas .....	45
3.3.	Áridos reciclados .....	46

3.3.1.	Granulometría.....	47
3.3.2.	Propiedades mecánicas y físicas.....	48
3.3.3.	Propiedades geométricas .....	50
3.4.	Emulsión bituminosa .....	52
4.	ANÁLISIS DE TEMPERATURA Y TIEMPO DE MEZCLADO.....	53
4.1.	Introducción .....	53
4.2.	Diseño de mezcla.....	53
4.2.1.	Tipo de mezcla.....	53
4.2.2.	Granulometría.....	54
4.2.3.	Sustitución del árido natural por AR .....	55
4.2.4.	Dotación mínima de ligante.....	55
4.3.	Análisis de la temperatura de mezclado .....	57
4.3.1.	Determinación de las temperaturas de mezclado .....	57
4.3.2.	Resultados obtenidos .....	59
4.4.	Análisis del tiempo de mezclado .....	64
5.	PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE MEZCLAS TEMPLADAS CON ÁRIDO RECICLADO DE RCD Y ÁRIDO CONVENCIONAL .....	65
5.1.	Introducción .....	65
5.2.	Descripción de los ensayos realizados.....	66
5.2.1.	Densidad aparente.....	66
5.2.2.	Densidad máxima .....	68
5.2.3.	Determinación del contenido de huecos de las probetas .....	70
5.4.	Fabricación de las probetas.....	71
5.5.	Resultados.....	79
5.5.1.	Densidad aparente.....	80

5.5.2.	Densidad máxima .....	81
5.5.3.	Huecos en mezcla .....	83
5.5.4.	Huecos en el árido mineral .....	85
5.5.5.	Huecos rellenos de ligante .....	86
6.	<b>SENSIBILIDAD AL AGUA DE MEZCLAS TEMPLADAS CON ÁRIDO RECICLADO DE RCD Y ÁRIDO CONVENCIONAL .....</b>	<b>88</b>
6.1.	Introducción .....	88
6.2.	Descripción del ensayo .....	88
6.3.	Resultados.....	93
7.	<b>PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS TEMPLADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD Y ÁRIDO CONVENCIONAL.....</b>	<b>98</b>
7.1.	Introducción .....	98
7.2.	Módulo resiliente .....	98
7.2.1.	Descripción del ensayo .....	99
7.2.2.	Resultados.....	102
7.3.	Deformación permanente.....	103
7.3.1.	Descripción del ensayo.....	103
7.3.1.	Resultados.....	107
8.	<b>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>110</b>
8.1.	Introducción .....	110
8.2.	Conclusiones relativas a las propiedades volumétricas de la mezcla .....	110
8.3.	Conclusiones relativas a la sensibilidad al agua .....	112
8.4.	Conclusiones relativas a las propiedades mecánicas .....	113
8.4.1.	Rigidez.....	113

8.4.2. Deformación permanente .....	113
8.5. Recomendaciones .....	114
8.6. Futuras líneas de investigación.....	115
9. BIBLIOGRAFÍA .....	116

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2. 1. Composición media de los RCD. Fuente: Plan Regional de Residuos de Construcción y Demolición (2006-2016).....	9
Tabla 2. 2. Clasificación de los componentes de los RCD. Fuente: Lista Europea de Residuos (2014).....	9
Tabla 2. 3. Producción de RCD en la Unión Europea. Fuente: DG ENV (2011) .....	10
Tabla 2. 4. Generación y gestión de RCD en el año 2012. Fuente: PEMAR (2016-2020). .....	11
Tabla 2. 5. Posibles destinos de las fracciones de RCD. Fuente: Xunta de Galicia (2005). .....	13
Tabla 2. 6. Número de plantas de transferencia, de tratamiento y vertederos de RCD. Fuente: PEMAR (2016-2022). .....	16
Tabla 2. 7. Composición de las mezclas a ensayar. Fuente: Arabani y Azanhoosh (2012). .....	33
Tabla 2. 8. Propiedades volumétricas de las mezclas compactadas con compactador giratorio. Fuente: Gómez-Meijide et al. (2015).....	36
Tabla 2. 9. Propiedades volumétricas de las mezclas compactadas con prensa estática. Fuente: Gómez-Meijide et al. (2015). .....	36
Tabla 3. 1. Categorías de tráfico pesado. Fuente: Norma 6.1 IC. ....	43
Tabla 3. 2. Densidad y absorción del árido natural. ....	45
Tabla 3. 3. Porcentaje de caras de fractura del árido grueso procedente del árido natural. .....	46
Tabla 3. 4. Densidad y absorción del árido reciclado. ....	49
Tabla 3. 5. Porcentaje de caras de fractura del árido grueso procedente del árido reciclado. ....	50
Tabla 3. 6. Características de la emulsión bituminosa. ....	52

Tabla 4. 1. Porcentaje retenido acumulado y retenido parcial para la granulometría escogida. ....	55
Tabla 4. 2. Dotación mínima de ligante. Fuente: Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB). ....	56
Tabla 4. 3. Dotación mínima de ligante corregida para cada contenido de AR estudiado .....	57
Tabla 5. 1. Rango aceptable de huecos en mezcla (según el procedimiento de superficie saturada seca) según la ATEB. ....	65
Tabla 5. 2. Porcentaje de huecos en mezcla por superficie saturada seca en probetas según el PG-3. ....	66
Tabla 5. 3. Temperaturas de calentamiento de los áridos y de la emulsión para los distintos contenidos de AR. ....	74
Tabla 5. 4. Cantidades de árido utilizadas en la fabricación de las probetas. ....	78
Tabla 5. 5. Cantidades de emulsión utilizadas en la fabricación de las probetas. ....	79
Tabla 6. 1. Valores de resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSd), del húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 0%. ....	93
Tabla 6. 2. Valores de resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSd), del húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 100%. ....	94
Tabla 6. 3. Valores de resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSd), del húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 55%. ....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Comparación entre un betún (a) y una emulsión bituminosa (b).....	6
Figura 2. 2. Residuos de construcción y demolición destinados a reciclaje u operaciones de relleno en los diferentes países de la Unión Europea. Fuente: Comisión Europea (2011). .....	11
Figura 2. 3. Jerarquía de residuos. Fuente: Rodríguez Pasandín (2013) .....	13
Figura 2. 4. Planta de valorización semimóvil en la zona sur de Cáceres.....	15
Figura 2. 5. Áridos reciclados con asfalto. ....	18
Figura 2. 6. Huecos en el árido mineral (VMA), huecos rellenos de ligante (VFB) y huecos en mezcla (Vm). ....	21
Figura 2. 7. Detalle de la superficie rugosa de las partículas de AR, así como del mortero adherido a su superficie. ....	22
Figura 2. 8. Relación entre el contenido de AR en mezcla y VMA. Fuente: Qasrawi y Asi (2016). ....	24
Figura 2. 9. Relación entre el contenido de AR en mezcla y VFB. Fuente: Qasrawi y Asi (2016). ....	24
Figura 2. 10. Filler procedente de la producción de RCA. Fuente: Chen et al. (2011)...	26
Figura 2. 11. Relación entre el contenido de AR en mezcla y la resistencia a tracción indirecta. Fuente: Pasandín y Pérez (2013). ....	27
Figura 2. 12. Módulo resiliente para diferentes porcentajes de RCA. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).....	29
Figura 2. 13. Deformación permanente acumulada para mezclas bituminosas con diferentes porcentajes de RCA. Fuente: Pasandín y Pérez (2013). ....	32
Figura 2. 14. Deformación producida tras 10000 ciclos de carga para diferentes contenidos de árido reciclado. Fuente: Ossa et al. (2016). ....	32
Figura 2. 15. Leyes de fatiga de las mezclas G-20. Fuente: Pérez et al. (2007).....	32

Figura 2. 16. Leyes de fatiga de las mezclas S-20. Fuente: Pérez et al. (2007). .....	34
Figura 2. 17. Leyes de fatiga obtenidas para cada tipo de mezcla. Fuente: Arabani y Azanhoosh (2012). .....	34
Figura 2. 18. Resistencias (con y sin acondicionamiento) para un 100% de AR y distintos contenidos de betún y agua. Fuente: Gómez-Mejide (2015). .....	38
Figura 2. 19. Evolución del ITSM durante el tiempo de curado. Fuente: Gómez-Mejide et al. (2016). .....	40
Figura 2. 20. Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo Fénix a la temperatura de 20°C. ....	43
Figura 2. 21. Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo Fénix a la temperatura de -5°C. ....	43
Figura 3. 1. Fracción 4/8 mm de la corneana utilizada. ....	44
Figura 3. 2. Obtención de la densidad de la fracción 0/4 mm del árido natural. ....	45
Figura 3. 3. Fracción 8/16 mm del árido reciclado utilizado. ....	47
Figura 3. 4. Curva granulométrica de la fracción 0/40 mm del árido reciclado. ....	48
Figura 3. 5. Obtención de las densidades del árido reciclado. ....	49
Figura 3. 6. Composición de los áridos reciclados. ....	51
Figura 3. 7. Componentes principales de los áridos reciclados. ....	52
Figura 4. 1. Curva granulométrica escogida. ....	54
Figura 4. 2. Medida de la temperatura en el árido (fotografía izquierda) y en la emulsión (fotografía derecha). ....	58
Figura 4. 3. Amasada y control de la temperatura final de la muestra. ....	58
Figura 4. 4. Envueltas realizadas para la fracción 6,3/20 mm para distintas temperaturas .....	59

Figura 4. 5. Comparación resultado obtenido con filler incorporado al inicio y con filler incorporado a los 2 minutos para un 100% de árido natural. T <sup>a</sup> árido: 100°C / T <sup>a</sup> emulsión 60 °C.....	60
Figura 4. 6. Mezcla 100% árido natural con 105°C de temperatura de árido y 60°C de temperatura de emulsión.....	61
Figura 4. 7. Comparación resultado obtenido con filler incorporado al inicio y con filler incorporado a los 2 minutos para un 100% de árido reciclado. T <sup>a</sup> árido: 100°C / T <sup>a</sup> emulsión 70 °C.....	61
Figura 4. 8. Comparación resultado obtenido con filler incorporado al inicio y con filler incorporado a los 2 minutos para un 100% de árido reciclado. T <sup>a</sup> árido: 110°C / T <sup>a</sup> emulsión 80 °C.....	62
Figura 4. 9. Mezcla 100% árido reciclado con 110°C de temperatura de árido y 65°C de temperatura de emulsión.....	62
Figura 4. 10. Comparación de los resultados obtenidos para un 55% de AR y para distintas combinaciones de temperaturas. ....	64
Figura 5. 1. Determinación de la densidad aparente de las probetas. Detalle de las probetas saturándose en el baño de agua y de la pesada sumergida.....	68
Figura 5. 2. Determinación de la densidad máxima de las muestras.....	69
Figura 5. 3. Detalle de la bandeja con áridos y del pesaje del filler silicio y de la emulsión bituminosa.....	72
Figura 5. 4. Calentamiento del árido. ....	73
Figura 5. 5. Calentamiento de la emulsión.....	73
Figura 5. 6. Proceso de mezclado de la mezcla bituminosa. ....	75
Figura 5. 7. Detalle de la apertura de la tapa de la amasadora durante la fabricación. ...	75
Figura 5. 8. Compactación de las probetas.....	77
Figura 5. 9. Curado en estufa de las probetas.....	78

Figura 5. 10. Densidad aparente para distintos contenidos de ligante y árido reciclado.	81
Figura 5. 11. Densidad máxima para distintos contenidos de ligante y árido reciclado.	82
Figura 5. 12. Contenido de huecos en mezcla para distintos contenidos de ligante y de árido reciclado .....	83
Figura 5. 13. Contenido de huecos en el árido mineral para distintos porcentajes de ligante y de árido reciclado.....	85
Figura 5. 14. Contenido de huecos rellenos de ligante para distintos porcentajes de ligante y de árido reciclado.....	87
Figura 6. 1. Equipo de vacío. Consta, de izquierda a derecha, de un controlador del vacío, una bomba, un vaso Dewar y un recipiente de vacío.....	90
Figura 6. 2. Baño de agua a $40 \pm 1$ °C para el acondicionamiento del grupo húmedo....	90
Figura 6. 3. Cámara de aire controlada termoestáticamente.....	91
Figura 6. 4. Ensayo de tracción indirecta para la determinación del índice de resistencia conservada. Detalle de la rotura a tracción indirecta en la prensa estática del Laboratorio de Caminos de la ETSI Caminos, Canales y Puertos de la UDC. ....	92
Figura 6. 5. Resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSd) y húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 100%. ....	95
Figura 6. 6. Resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSd) y húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 55%. ....	96
Figura 7. 1. Detalle de la máquina servo-neumática NU 14 de Cooper con el utillaje para la realización del ensayo de módulo resiliente. ....	99
Figura 7. 2. Detalle del trazado de los dos diámetros perpendiculares. ....	100
Figura 7. 3. Ensayo de rigidez (módulo resiliente) con un 55% de árido reciclado y un 6,5% de ligante. ....	101
Figura 7. 4. Forma del impulso de carga. Fuente: AENOR (2012).....	102

Figura 7. 5. Ensayo de compresión uniaxial sin confinamiento bajo carga repetida para un 55% de AR y un 6,5% de ligante. ....	104
Figura 7. 6. Relación entre las tensiones ( $\sigma$ ), las deformaciones ( $\epsilon$ ) y el tiempo ( $t$ ) para un ciclo de carga. Fuente: Lu y Wright (1998).....	105
Figura 7. 7. Curva de fluencia típica. Fuente: AENOR (2006). ....	106
Figura 7. 8. Deformación axial permanente acumulada respecto del número de ciclos de carga para un 0% y un 55% de AR y sus contenidos óptimos de ligante.....	107
Figura 7. 9. Deformación axial permanente acumulada media de las dos probetas del 0% y del 55% de AR.....	108

**ABREVIATURAS**

AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AR	Árido Reciclado
ATEB	Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas
BSI	British Standards Institution
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CEN	European Committee for Standardization
DG ENV	Directorate–General for Environment. European Commission
EAPA	European Asphalt Pavement Association
GERD	Asociación Española de Gestores de RCD
INE	Instituto Nacional de Estadística
NLT	Normas del Laboratorio de Transporte
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
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RCD	Residuos de Construcción y Demolición

*CAPÍTULO 1*  
**INTRODUCCIÓN**

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes y planteamiento general del problema**

Desde la firma del Protocolo de Kyoto, los esfuerzos encaminados a disminuir el cambio climático se han visto incrementados. En el sector de las mezclas bituminosas, se han desarrollado nuevas tecnologías y productos que permiten la reducción del consumo energético y de los gases de efecto invernadero, conservando los beneficios solicitados (Martínez-Díaz et al., 2013).

Tanto las mezclas templadas como las mezclas semicalientes se desarrollaron con el objetivo de mantener las mismas prestaciones y exigencias de una mezcla en caliente pero con un mayor respeto por el medio ambiente propio de las mezclas en frío.

El uso de mezclas bituminosas a temperaturas inferiores tiene numerosos efectos beneficiosos además del ahorro energético y la reducción de emisiones antes mencionados. Así, la bajada de las temperaturas mejora la salud y seguridad de los trabajadores, reduce la dependencia de la climatología y de las distancias de transporte, minimiza el envejecimiento del ligante y permite fabricar mezclas con una cantidad de materiales reciclados superior (Franesqui, 2009).

No obstante, existe cierta resistencia a utilizar estas nuevas tecnologías debido al desconocimiento, por parte de los fabricantes, sobre los cambios necesarios en las plantas asfálticas así como sobre las consecuencias económicas de su utilización (Martínez-Díaz et al., 2013).

Al problema anterior se suma la producción de grandes cantidades de residuos cada vez que se construye o se procede a la demolición de una estructura (Gómez-Meijide, 2015). El Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, define residuo de construcción y demolición (RCD) como cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo con la definición de “residuo” se haya generado en una obra de construcción y demolición.

La producción de RCD en España no cuenta con datos fiables, pero si es sabido que existía una tendencia creciente anterior a la crisis económica del 2008 que se ha ido frenando a partir de ese año.

La acumulación de estos residuos en vertederos (en muchas ocasiones de forma incontrolada) era especialmente importante hace unas décadas, aunque hoy en día este sigue siendo el destino de una parte importante de los RCD. Estos depósitos afectan de manera negativa al entorno (impacto visual, polvo...) y provocan la pérdida de suelo que podría estar dedicado a otros usos. Por otro lado, de esta manera se está desaprovechando energía y un material que podría ser reutilizado para otros usos.

En los últimos años, el reciclaje de los RCD ha cobrado importancia ya que se considera como una forma de colaborar al desarrollo sostenible a nivel mundial. El concepto de desarrollo sostenible fue definido en 1987 en el Informe de la Comisión de Brundland como un un “*desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades*”. La sostenibilidad es la idea de pensar en un futuro en donde las consideraciones ambientales, sociales y económicas estén equilibradas en la búsqueda de una mejor calidad de vida (UNESCO, 2017).

La extracción de áridos para el sector de la construcción se suele realizar de canteras, lo cual tiene efectos negativos para el medioambiente tales como impactos visuales, ruidos, polvo, agotamiento de recursos naturales... (Rodríguez Pasandín, 2013). Los residuos de construcción y demolición pueden constituir una fuente importante para la obtención de áridos y materias primas para este sector, que es un gran consumidor de áridos.

A través del reciclaje de las fracciones mayoritarias de los RCD se obtienen nuevos áridos conocidos como áridos reciclados (AR) pudiendo diferenciarse varios tipos (de tipo hormigón, aglomerado asfáltico, cerámicos y mixtos). La utilización de estos áridos en la construcción es cada vez más frecuente, empleándose en la fabricación de hormigones, en las capas de firmes y para rellenos y terraplenes.

No obstante, existe una cierta reticencia a utilizar AR procedente de residuos de construcción y demolición, al igual que sucedía con las mezclas templadas y semicalientes. Esta oposición, es debida a que estos áridos no suelen cumplir con las exigencias técnicas propias de los áridos naturales, por lo que, para su utilización, habría que recurrir a una serie de operaciones (demolición selectiva, retirada de metales, plásticos...) que producen un aumento de los costes (Rodríguez Pasandín, 2013). A esto hay que sumarle que todavía existe un número reducido de plantas de gestión de este

tipo de residuos, por lo que no siempre es sencillo encontrar un suministrador cerca de la obra, lo que supone un sobrecoste en el transporte (Gómez-Meijide, 2015).

El mayor conocimiento de los AR permitirá el establecimiento de normas y especificaciones que regulen su uso y de tecnologías que provoquen una mejora en su calidad. Esto, unido a la toma de medidas como la prohibición de vertederos ilegales, dará lugar a una bajada de los precios haciendo el uso de áridos reciclados más atractivo.

## 1.2. Objetivos

En el presente proyecto técnico se ha analizado la viabilidad del empleo de **árido reciclado de tipo hormigón procedente de RCD en la fabricación de mezclas bituminosas templadas para capas intermedias de firmes de carreteras**.

Para ello, en primer lugar se ha elaborado un **estado del arte** con el fin de conocer la problemática existente y los resultados de los estudios llevados a cabo hasta el momento. En esta búsqueda bibliográfica se incluyeron tanto datos acerca de la situación actual de la generación y reciclaje de RCD a nivel nacional y europeo, como investigaciones sobre la utilización de AR en mezclas bituminosas en caliente y en frío. No se han incluido resultados sobre la utilización de AR en mezclas templadas o semicalientes ya que, hasta la realización del presente proyecto técnico, no había ninguna investigación al respecto. Esto pone de manifiesto el carácter novedoso de esta investigación. Debido a esta ausencia de investigaciones, se consideró oportuno incluir investigaciones relativas al uso de RAP (áridos reciclados con asfalto) en mezclas semicalientes y templadas.

Como segundo paso, se ha llevado a cabo la **caracterización de los materiales** utilizados en la fabricación de las mezclas templadas. Es decir, del árido natural, del árido reciclado procedente de RCA y del ligante empleado.

En tercer lugar, se procedió a realizar un **análisis del tiempo y de la temperatura de mezclado** a los que se llevará a cabo la fabricación de las mezclas templadas.

En cuarto lugar se procedió a la **dosificación** de la mezcla templada. Para ello, se han realizado ensayos de laboratorio con el fin de determinar las propiedades volumétricas y la sensibilidad al agua con diferentes contenidos de ligante.

Finalmente, con el contenido óptimo de ligante obtenido a raíz del estudio de los datos de propiedades volumétricas y sensibilidad al agua, se realizaron ensayos para determinar las **propiedades mecánicas** de las mezclas (rigidez y resistencia a la deformación permanente).

Los resultados obtenidos para las mezclas fabricadas con AR se han comparado con los de una **mezcla de control** (es decir, una mezcla fabricada íntegramente con árido de cantera y, por tanto con un 0% de AR). con la intención de averiguar cómo afecta la presencia de este tipo de árido a las mezclas templadas.

Finalmente, se han establecido algunas recomendaciones para el empleo de árido reciclado en mezclas bituminosas templadas para capas intermedias.

### **1.3. Organización de los capítulos**

En el **Capítulo 2** se ofrece una visión global sobre los RCD, describiendo su composición, producción y gestión. Además, se presenta el resultado de una revisión bibliográfica acerca de la utilización de áridos reciclados procedentes de RCD en mezclas bituminosas en caliente y en frío y de RAP en mezclas templadas y semicalientes. Este capítulo posee una especial relevancia para conocer los problemas que entraña el uso de AR en la fabricación de mezclas bituminosas así como su influencia en las propiedades de las mezclas en las que interviene. Por otro lado, dado el carácter novedoso de las mezclas templadas, es importante disponer de toda la información disponible acerca de su fabricación y comportamiento.

En el **Capítulo 3** se incluye la caracterización de los materiales intervinientes en la fabricación de las mezclas templadas (árido natural, árido reciclado y emulsión). En el caso de los áridos se aborda la tanto la descripción de las propiedades mecánicas y físicas como las geométricas.

En el **Capítulo 4** se resume el proceso de diseño de la mezcla bituminosa templada para capas intermedias y se describen los trabajos realizados para el análisis de la

temperatura y tiempo de mezclado. La finalidad de este análisis es determinar las temperaturas de calentamiento de los áridos y de la emulsión para conseguir una buena envuelta con el mínimo consumo energético y las mínimas emisiones posibles. El tiempo de mezclado será aquel que, dentro de los rangos recomendados por la normativa, ayude a alcanzar los objetivos anteriores.

En el **Capítulo 5** se resume el proceso de fabricación de las mezclas templadas para las distintas dosificaciones consideradas y se exponen los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades volumétricas.

En el **Capítulo 6** se exponen los resultados obtenidos en el estudio de la sensibilidad al agua mediante el ensayo de tracción indirecta tras inmersión.

En el **Capítulo 7** se exponen los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades mecánicas (rigidez y resistencia a la deformación permanente). El estudio de la rigidez se llevó a cabo mediante el ensayo de módulo resiliente a tracción indirecta y el de resistencia a la deformación permanente mediante el ensayo cíclico de compresión uniaxial.

En el **Capítulo 8** se exponen las conclusiones obtenidas tras el estudio de los resultados de los diferentes ensayos, se citan las posibles recomendaciones para la utilización de AR en mezclas bituminosas templadas para capas intermedias y se mencionan las posibles líneas de investigación futuras.

En el **Capítulo 9** se incluye las referencias bibliográficas consultadas para la realización del presente proyecto técnico.

## *CAPÍTULO 2*

# **ESTADO DEL ARTE**

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Mezclas a baja temperatura – mezclas templadas

La clasificación principal de las mezclas bituminosas se realiza teniendo en cuenta la temperatura de fabricación y puesta en obra. Tradicionalmente, existen mezclas en caliente y en frío.

En las primeras se emplea betún asfáltico como ligante (figura 2.1a), el cual se debe calentar a temperaturas entre 150 y 180 °C para reducir su viscosidad y conseguir una correcta envuelta de los áridos, que también deben ser previamente calentados hasta las mismas temperaturas. La temperatura de extensión de estas mezclas suele tomar valores entre los 120 y los 150 °C y la de compactación entre los 85 y 150 °C.

En las mezclas en frío, sin embargo, se emplea una emulsión bituminosa (figura 2.1b), que tiene una viscosidad menor y permite fabricar, extender y compactar la mezcla a temperatura ambiente.

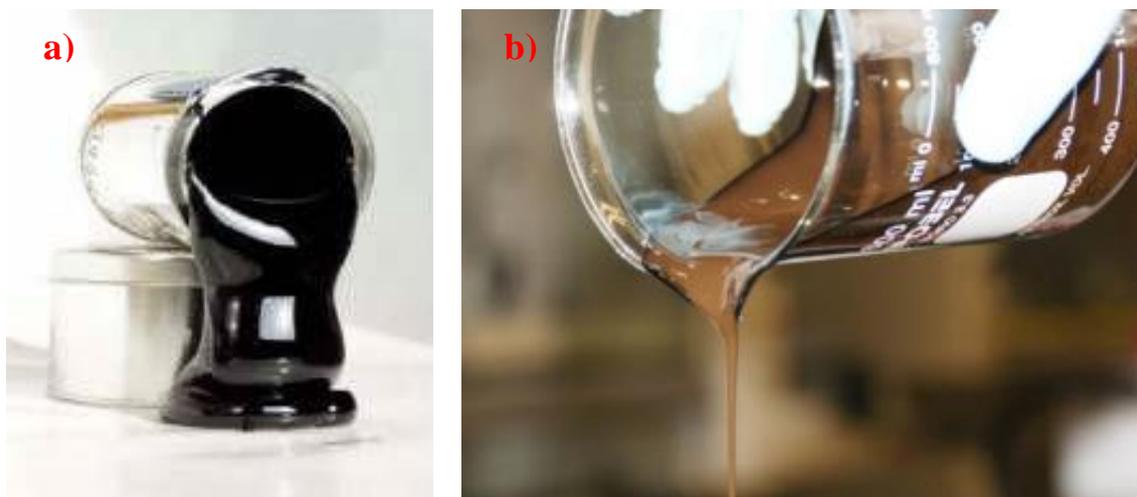


Figura 2. 1. Comparación entre un betún (a) y una emulsión bituminosa (b).

En el año 2007, España era uno de los mayores productores europeos de mezclas bituminosas en caliente, con casi 50 millones de toneladas anuales.

Para alcanzar las elevadas temperaturas de fabricación de las mezclas en caliente, es necesario consumir mucha energía. Además, se generan gran cantidad de emisiones en este proceso (ej: CO<sub>2</sub>, etc). Por ello, es fundamental la optimización de los recursos ambientales y energéticos de este sector.

Teniendo en cuenta esto, el sistema más eficiente (desde el punto de vista energético) para realizar las mezclas es la tecnología en frío. Sin embargo, las prestaciones de las mezclas en frío son menores que las de las mezclas en caliente, lo cual disminuye su eficiencia real.

Asimismo, las afecciones al tráfico en el caso de las mezclas en frío son mayores. Dado que para adquirir cohesión precisan de un período de maduración (eliminación de agua, tanto del agua contenida en la emulsión como del agua necesaria para mejorar su trabajabilidad) (Franesqui, 2009), la apertura al tráfico no puede ser inmediata.

Debido a los motivos expuestos, se han desarrollado mezclas con una temperatura de fabricación intermedia entre las mezclas en caliente y las mezclas en frío, aprovechando de este modo, las cualidades de ambas.

Estas mezclas se dividen en dos grupos:

- Mezclas semicalientes: son mezclas fabricadas con una temperatura por encima de los 100°C y por debajo de los 140°C (Bardesi y Soto, 2010).
- Mezclas templadas: permiten una reducción mayor de la temperatura. Así, los procesos de fabricación, extendido y compactación se realizan generalmente a temperaturas comprendidas entre los 70 y los 95°C (ATEB, 2014). En estas mezclas, suele utilizarse emulsión bituminosa como ligante aunque también se pueden emplear métodos de espumación de betún (inyección de agua a presión, en pequeñas cantidades, en el betún caliente, con el que se consigue un importante aumento de volumen y, por lo tanto, una mayor facilidad en la envuelta de los áridos). Para alcanzar unas temperaturas finales menores o iguales a 100°C, se recomienda que la temperatura de los áridos se encuentre entre los 100-110°C y la emulsión cerca de los 60°C, y nunca superando los 80°C (ATEB, 2014).

La reducción en las temperaturas de las mezclas bituminosas, tiene muchos efectos beneficiosos como pueden ser un menor consumo energético, la reducción de las emisiones de efecto invernadero y/o emisiones contaminantes, la mejora en la seguridad y salud de los trabajadores, una menor dependencia de la climatología y de las distancias de transporte, la minimización del envejecimiento del ligante y la inclusión de una cantidad de materiales reciclados mayor en las mezclas (Franesqui, 2009).

## **2.2. Residuos de construcción y demolición**

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son un tipo de residuos procedentes de obras de construcción y demolición, es decir, de obras de construcción, reparación, reforma o demolición de un edificio, una carretera, una presa, un ferrocarril, u de otras construcciones de ingeniería civil. También se engloban bajo la denominación de RCD los residuos procedentes de trabajos que introduzcan modificaciones en el terreno (por ejemplo excavaciones y urbanizaciones), excluyendo los que tienen su origen en las industrias extractivas (CEDEX, 2014).

Debido a que el sector de la construcción consume una gran cantidad de recursos naturales, es un buen candidato a la hora de reutilizar, como materia prima, este tipo de residuos. Concretamente, durante la construcción y reparación de carreteras, se consume una gran cantidad de áridos, por lo que sería muy beneficioso que parte de ellos fuesen áridos reciclados (AR) procedentes de RCD. Así se conseguiría reducir la cantidad de materias primas llevadas a vertedero o la apertura de nuevas canteras.

Dentro del mundo de las carreteras, la incorporación de residuos, se puede realizar de diferentes formas: como materiales para explanaciones y rellenos, como áridos reciclados (AR) para capas de firmes o como aditivos para ligantes y conglomerantes.

### **2.2.1. Composición**

Los RCD pueden agruparse, según su origen y características, en dos grupos (Plan Regional de Residuos de Construcción y Demolición 2006-2016):

- Tierras y materiales pétreos: son resultado de movimientos de tierras generados durante las obras, y están formados únicamente por piedras y tierras libres de contaminación, además de los excedentes procedentes de la construcción de infraestructuras. Suelen emplearse como relleno, en obras de restauración de zonas afectadas por extracciones, en obras de nueva construcción, etc.
- Escombros: son generados por actividades características del sector de la construcción, de reparaciones, demoliciones e implantación de servicios. Este tipo de residuos tienen una composición muy heterogénea. Generalmente, cuando se habla de RCD se refiere a este tipo.

Como puede apreciarse en la tabla 2.1, los componentes principales de los RCD son materiales de tipo cerámico (54%), seguidos por el hormigón (12%), la piedra, arena, grava y otros áridos (9%), la basura (7%) y el asfalto (5%).

<b>MATERIALES</b>	<b>% EN PESO</b>
Cerámicos	54,00%
Hormigón	12,00%
Piedra	5,00%
Arena, grava y áridos	4,00%
Madera	4,00%
Vidrio	0,50%
Plástico	1,50%
Metales	2,50%
Asfalto	5,00%
Yeso	0,20%
Papel	0,30%
Basura	7,00%
Otros	4,00%

Tabla 2. 1. Composición media de los RCD. Fuente: Plan Regional de Residuos de Construcción y Demolición (2006-2016).

Finalmente, en la Lista Europea de Residuos (LER) del 18 de diciembre de 2014, aparece una clasificación de los componentes de los RCD, la cual se muestra a continuación en la tabla 2.2:

<b>CÓDIGO</b>	<b>COMPONENTES RCD</b>
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, 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. 2. Clasificación de los componentes de los RCD. Fuente: Lista Europea de Residuos (2014).

### 2.2.2. Producción de los RCD

La generación de RCD está íntimamente ligada al sector de la construcción y el conocimiento de la cantidad de residuos producidos tiene una especial importancia a la hora de planificar su gestión. Con respecto a esto, existe un gran número de publicaciones que indican cuál es la producción de residuos de construcción y demolición producidos en los diferentes países del mundo.

A continuación, en la tabla 2.3, se recogen los datos de producción de RCD en los países de la Unión Europea, así como el porcentaje reciclado de dichos residuos. Los datos mostrados a continuación son anteriores al 2008.

País	Producción (mill tn)	% Reciclado o reutilizado	País	Producción (mill tn)	% Reciclado o reutilizado
Austria	6.60	60%	Letonia	2.32	46%
Bélgica	11.02	68%	Lituania	3.45	60%
Bulgaria	7.80	-	Luxemburgo	0.67	46%
Chipre	0.73	1%	Malta	0.80	-
República Checa	14.70	23%	Países Bajos	23.90	98%
Dinamarca	5.27	94%	Polonia	38.19	28%
Estonia	1.51	92%	Portugal	11.42	5%
Finlandia	5.21	26%	Rumania	21.71	-
Francia	85.65	45%	Eslovaquia	5.38	-
Alemania	72.40	86%	Eslovenia	2.00	53%
Grecia	11.04	5%	<i>España</i>	<i>31.34</i>	<i>14%</i>
Hungría	10.12	16%	Suecia	10.23	-
Irlanda	2.54	80%	UK	99.10	75%
Italia	46.31	-	<b>UE 27</b>	<b>531.38</b>	<b>46%</b>

Tabla 2. 3. Producción de RCD en la Unión Europea. Fuente: DG ENV (2011b).

El porcentaje de RCD que marca la Comisión Europea (DG ENV, 2011b) que debe ser reciclado, reutilizado o recuperado de otras formas por cada país, es del 70%. En la tabla 2.3 se puede observar que en esas fechas ya existían 6 países que cumplían este objetivo (Dinamarca, Estonia, Alemania, Irlanda, UK y los Países Bajos). Austria, Bélgica y Lituania, también se encontraban cerca de este valor con ratios entre el 60% y el 70%. En España, el porcentaje de RCD reciclado o reutilizado, era del 14%.

Según datos más recientes de la Comisión Europea, en el año 2011 el porcentaje de árido reciclado o reutilizado era del 65%. En la figura 2.2 se muestra un gráfico con los valores para los diferentes países de la UE.

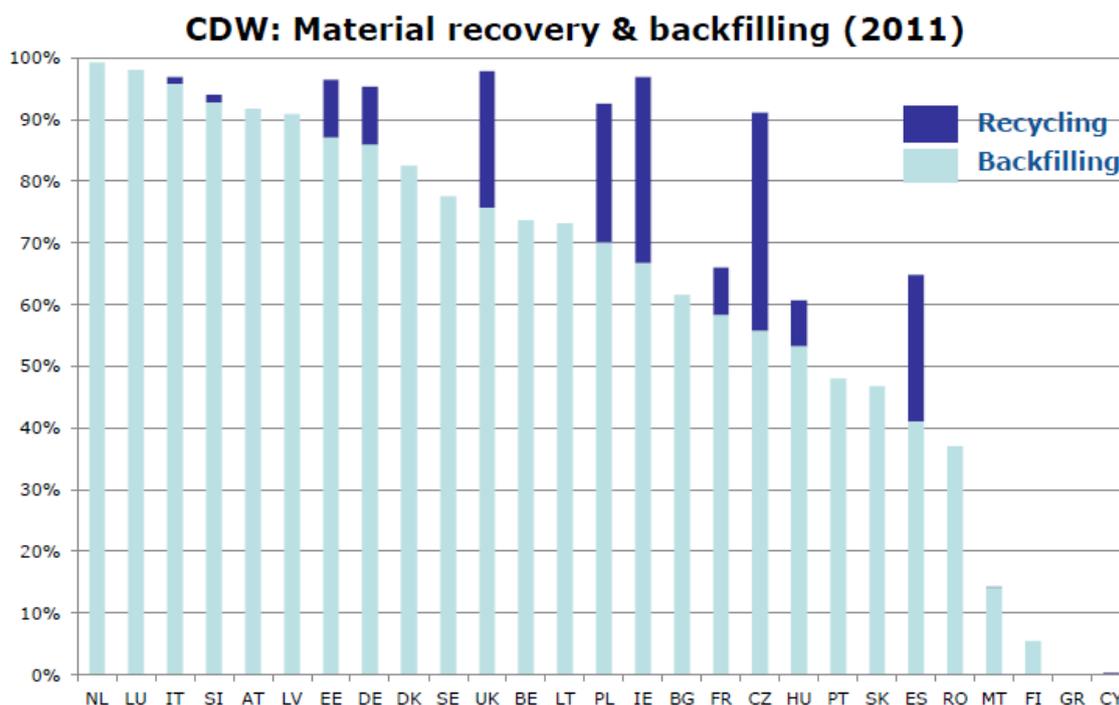


Figura 2. 2. Residuos de construcción y demolición destinados a reciclaje u operaciones de relleno en los diferentes países de la Unión Europea. Fuente: Comisión Europea (2011a).

Por otro lado, como puede apreciarse en la tabla 2.3, la producción de RCD en España en años anteriores a la crisis económica, era del orden de 31,34 millones de toneladas. Sin embargo, actualmente, la actividad de este sector se sitúa en niveles muy inferiores, debido al descenso de la demanda de viviendas, a la caída de los precios y a la escasa inversión en obra pública. Prueba de ello, son los últimos datos disponibles en el INE (Instituto Nacional de Estadística), sobre la generación y gestión de los RCD en España, correspondientes al año 2012 (tabla 2.4):

	Residuos generados (t)	Residuos destinados a valorización material (t)	Residuos destinados a operaciones de relleno (t)	Residuos destinados a incineración (t)	Residuos depositados en vertedero (t)
<b>No peligrosos</b>	27.637.698	19.007.146	4.328.999	0	4.301.553
<b>Peligrosos</b>	66.156	3.878	0	0	62.278
<b>Totales</b>	<b>27.703.854</b>	<b>19.011.024</b>	<b>4.328.999</b>	<b>0</b>	<b>4.363.821</b>

Tabla 2. 4. Generación y gestión de RCD en el año 2012. Fuente: PEMAR (2016-2020).

Según esta fuente, un 84,25% de los residuos de construcción o demolición estaban destinados a valorización u operaciones de relleno, siendo este dato superior al 70% que marcaba la Comisión Europea en su informe en el año 2011.

### 2.2.3. Gestión de los RCD

En general, los RCD no contienen residuos peligrosos y, si lo hacen, es en cantidades muy pequeñas. No obstante, si no son sometidos a una gestión adecuada, podrían mezclarse las distintas fracciones resultando un residuo contaminado no apto ni para ser aprovechado, ni para ser acumulado en vertedero. Esto, sumado al gran impacto ecológico, paisajístico y visual que los RCD producen, hace que su correcta gestión sea necesaria.

En las formas de gestión de los RCD se han diferenciado las siguientes estrategias:

- Reducción: es una medida preventiva, que trata de disminuir tanto la cantidad de RCD, como los contaminantes presentes en ellos.
- Reutilización: consiste en el empleo de los materiales obtenidos en nuevas construcciones, con un pequeño tratamiento específico. La reutilización puede ser directa en la misma obra, o en otra obra diferente.
- Reciclado: reconversión de los residuos obtenidos en materias primas para su utilización en nuevas obras o en la fabricación de nuevos productos.
- Revalorización: como valorización energética u otra no incluida en los pasos anteriores.
- Eliminación: como última alternativa en la gestión de los RCD, se encuentra la acumulación en vertedero. De todas las opciones mencionadas, esta es la que genera un mayor impacto.

En algunos países, entre los que, como se ha visto anteriormente, se encuentra España, la cantidad de residuos reciclados es baja, debido principalmente al bajo coste del depósito de los mismos en vertedero y de los áridos naturales. Además, existen pocas machacadoras dedicadas a la producción de áridos procedentes de residuos de construcción y demolición (Anónimo, 2006-2007).

En la figura 2.3 se muestra una jerarquía de las diferentes formas gestión de los residuos de construcción y demolición.

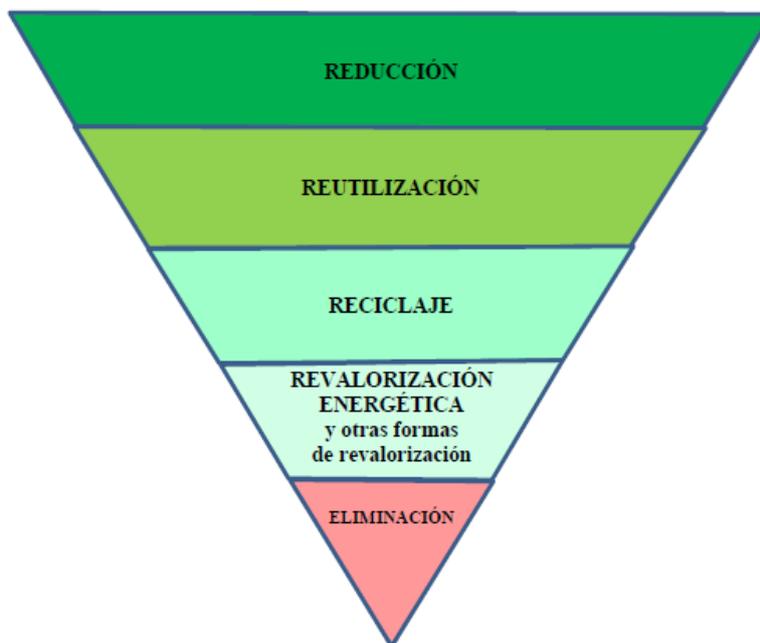


Figura 2. 3. Jerarquía de residuos. Fuente: Rodríguez Pasandín (2013).

Los residuos de construcción y demolición se caracterizan por una fuerte heterogeneidad. Debido a ello, no todas las formas de gestión pueden ser aplicadas a cada una de las fracciones que lo componen. En la tabla 2.5 se muestran los posibles destinos de cada una de ellas.

TIPO DE RESIDUO	POSIBLES DESTINOS		
	Reutilización	Reciclado	Revalorización
Material cerámico	×	×	
Hormigón		×	
Materiales pétreos		×	
Madera	×		×
Vidrio		×	
Plástico		×	×
Metales	×	×	
Papel y cartón		×	×
Yeso			×
Materiales bituminosos		×	

Tabla 2. 5. Posibles destinos de las fracciones de RCD. Fuente: Xunta de Galicia (2005).

Dentro de las fracciones relevantes para el presente proyecto (hormigón y materiales pétreos), la única opción de gestión es el reciclado, ya que ni son aprovechables desde el punto de vista energético ni pueden ser reutilizados sin sufrir previamente un proceso de transformación.

Existen 2 fases en el procesamiento de los residuos de construcción y demolición (CEDEX, 2014):

- **Demolición**

Este proceso tiene la finalidad de reducir el tamaño de los escombros para que puedan ser tratados en el triturador primario de la planta de reciclaje. En plantas móviles el tamaño de los escombros debe estar entre 400 y 700 mm mientras que en plantas fijas debe ser menor de 1200 mm. Asimismo, en el proceso de demolición debe reducirse la presencia de impurezas, como el yeso.

- **Reciclado**

Existen dos tipos de plantas:

Plantas de transferencia:

Se trata de instalaciones para el depósito temporal de RCD que han de ser tratados o eliminados en instalaciones situadas a grandes distancias.

Plantas de valorización

Son instalaciones destinadas al tratamiento de los residuos de construcción y demolición donde se depositan, seleccionan, clasifican y valorizan las diferentes fracciones contenidas en estos residuos, con el fin de obtener productos aptos para su empleo.

En función de su capacidad de desplazamiento estas plantas se pueden clasificar en plantas móviles, semimóviles y fijas.

Las *plantas móviles* están compuestas por maquinaria y equipos de reciclaje móviles que se desplazan a la obras para reciclar en origen. Pueden procesar hasta 100 toneladas a la hora en el caso de que los escombros sean del mismo tamaño y que se utilice separación magnética y sistemas de cribado. Estas plantas son capaces de procesar material con tamaño menor a 700 mm si se reduce el tamaño de los bloques mayores mediante martillos o cizallas hidráulicos.

Las *plantas semimóviles* son de mayor tamaño que las plantas móviles y se puede tardar hasta tres días en montarlas para su empleo en un determinado lugar (figura 2.4).

Las *plantas fijas* son instalaciones para el reciclaje de RCD que tienen un emplazamiento fijo. Estas plantas cuentan con varios procesos de trituración y pueden procesar entre 300 y 400 toneladas a la hora.



Figura 2. 4. Planta de valorización semimóvil en la zona sur de Cáceres..

Finalmente, en la tabla 2.6 se muestra la distribución por Comunidad Autónoma de las instalaciones de tratamiento de RCD, incluidos los vertederos, en el año 2013.

Comunidad Autónoma	Plantas de transferencia (nº)	Plantas de tratamiento fijas (nº)	Plantas de tratamiento móviles (nº)	Vertederos (nº)
Andalucía	92	119	21	71
Aragón	18	6	1	5
Asturias	3	4	5	1
Baleares	6	2	s/d	1
Canarias	0	23	s/d	7
Cantabria	12	4	12	2
Castilla-la Mancha	s/d	28	27	12
Castilla y León	0	45	0	3
Cataluña	12	50	0	57
Ceuta	s/d	s/d	s/d	s/d
Comunidad Valenciana	s/d	s/d	s/d	s/d
Extremadura	16	21	1	0
Galicia	3	43	21	5
La Rioja	s/d	16	0	2
Madrid	10	14	0	4

<b>Melilla</b>	s/d	s/d	s/d	s/d
<b>Murcia</b>	2	4	32	19
<b>Navarra</b>	s/d	7	3	7
<b>País Vasco</b>	s/d	s/d	11	s/d
<b>Total</b>	<b>174</b>	<b>386</b>	<b>134</b>	<b>196</b>

Tabla 2. 6. Número de plantas de transferencia, de tratamiento y vertederos de RCD. Fuente: PEMAR (2016-2022).

#### 2.2.4. Producción de los AR

Como se ha mencionado en apartados anteriores, la forma de gestión de los RCD más empleada es el reciclado, debido a que muchas de las fracciones que componen estos residuos necesitan de un tratamiento previo para la obtención de un material apto para ser utilizado nuevamente en el sector de la construcción.

Los materiales cerámicos, los hormigones y los materiales pétreos suponen en torno al 70-80% del total de los RCD (tabla 2.1). El reciclaje de dichas fracciones se utiliza, principalmente, para la obtención de áridos reciclados (AR). El resto de fracciones, presentes en una cantidad inferior, pueden emplearse como materias primas en otros sectores (por ejemplo los metales se emplean como materia prima en las fundiciones o siderurgias), o revalorizarse energéticamente, como es el caso de la madera o el papel.

Los AR se obtienen en plantas que difieren de las de árido natural en que en las de AR es necesario eliminar ciertos materiales. Las operaciones a realizar en el caso de una planta tipo, fija, son las siguientes (CEDEX, 2014):

- **Proceso de recepción del material**

El proceso de tratamiento se inicia con la recepción y el pesaje de los camiones que contienen el material. A continuación se realiza una inspección visual para determinar si se trata de residuos limpios (escombros de hormigón principalmente), o residuos cerámicos o mixtos (pueden incorporar otros contaminantes como papel, plásticos...). Existe una línea de tratamiento diferente para cada tipo de residuo.

- **Línea de residuos limpios**

Incluye las siguientes operaciones:

- Separación, en origen, de aquellos materiales no adecuados mediante maquinaria móvil y triaje manual.
- Selección del material superior a 60 o 80 mm mediante cribado, para su posterior procesamiento.
- Trituración del material seleccionado mediante machacadora de impactos o mandíbulas para así reducir los bloques de mayor tamaño.
- Eliminación mediante cinta magnética de las armaduras y otros elementos de metal que puedan contener los bloques.
- Separación manual de los contaminantes de mayor tamaño como plásticos, vidrios...
- Cribado vibratorio con el fin de separar el material inferior a 20 mm que contiene un alto nivel de contaminación.
- Trituración secundaria del material y cribado posterior por un tamiz de 40 o 60 mm. La fracción 0/40 o 0/60 se acopia para ahorros mientras que la retenida se retorna a la trituración secundaria.

Las características de los áridos reciclados dependen de las características de los RCD de los que proceden y de los equipos y procedimientos empleados en su producción. En este sentido, se puede distinguir entre (GERD, 2010):

- Áridos reciclados de hormigón (ARH): el contenido en hormigón y piedra natural es igual o superior al 90% en peso. Se considera un comportamiento parecido del hormigón y de la piedra natural.
- Áridos reciclados mixtos de hormigón (ARMh): el contenido de hormigón y piedra natural es inferior al 90% mientras que el contenido en material cerámico no alcanza el 30%.
- Áridos reciclados mixtos cerámicos (ARMc): el contenido de material cerámico es superior al 30%.
- Áridos reciclados cerámicos (ARC): el contenido de material cerámico es mayor al 70%.
- Áridos reciclados con asfalto (figura 2.5): el contenido de materiales bituminosos se sitúa entre un 5 y un 30%, más del 30% se considera mezcla bituminosa.



Figura 2. 5. Áridos reciclados con asfalto.

### 2.2.5. Aplicaciones de los AR en capas de firme

Las aplicaciones de los AR dentro de las capas de firme pueden ser muy variadas y dependen del tipo de árido reciclado del que se trate (CEDEX, 2014; GERD, 2010):

Los de tipo hormigón (ARH) pueden ser empleados para obras de tierra y terraplenes o bien como áridos reciclados para capas de firmes. En el primer caso, deben estar ausentes de armaduras y contaminantes y deben tener en cuenta la homogeneidad del residuo. En el segundo caso, deben cumplir unas especificaciones técnicas y medioambientales que los hagan aptos para ser utilizados en capas granulares sin tratar (zahorras) o como materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento).

En cuanto a los áridos reciclados mixtos (ARMh y ARMc) o cerámicos (ARC) estos no suelen cumplir las especificaciones para poder emplearse en capas de firme, pero si pueden ser utilizados para obras de tierra y terraplenes.

Finalmente, los áridos reciclados con asfalto, conocidos habitualmente como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) suelen ser muy adecuados para ser aplicados en capas de firmes, así como para la construcción de explanaciones.

### **2.2.6. Marco normativo**

Los residuos de construcción y demolición han sido identificados como un flujo prioritario debido a las grandes cantidades de estos residuos que se producen y a su alto potencial de reutilización y reciclaje (DG ENV). Por ello se han ido desarrollando diferentes normativas y planes tanto a nivel europeo como nacional e incluso regional, para su correcto tratamiento.

En la Unión Europea destaca la Directiva Marco de Residuos (Unión Europea, 2008) que establece un marco jurídico para el tratamiento de residuos dentro de la UE y unos objetivos de reciclado y recuperación que deberán ser alcanzados antes del 2020 (70% en RCD). Además, obliga a las autoridades nacionales a desarrollar programas de prevención de residuos y planes de gestión.

En el ámbito nacional se pueden mencionar el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006, al que siguió el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015 y finalmente el Plan Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020 y el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. Todos ellos destinados a la prevención en la generación de residuos y a la correcta gestión de estos una vez producidos.

Por otro lado, mediante la ORDEN FOM/2523/2014 de 12 de diciembre, se actualizaron varios artículos relativos a firmes del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Los nuevos cambios hacen referencia, entre otras cosas, al empleo de áridos reciclados en capas de firmes de carreteras y se encuentran en los siguientes artículos:

- Art. 510: Zahorras.
- Art. 513: Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento).
- Art. 542: Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso.
- Art. 550: Pavimentos de hormigón.
- Art. 551: Hormigón magro vibrado.

En lo referente a Galicia podemos destacar el Programa de gestión de residuos de construcción y demolición de Galicia 2013-2016.

## **2.3. Mezclas bituminosas con áridos reciclados de RCD**

### **2.3.1. Introducción**

Debido a la gran cantidad de residuos de construcción y demolición que se producen a nivel global, está claro que es necesario dotarlos de un correcto reciclaje para así reducir su impacto sobre el medio ambiente. En este sentido y como se ha comentado anteriormente, los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, se utilizan actualmente en el sector de la construcción, en diversas aplicaciones.

Sin embargo, con el fin de dar cumplimiento a los objetivos de reciclaje dados por la Comisión Europea (DG ENV, 2011b), se hace necesario buscar nuevas opciones de reciclaje. En ese sentido, el empleo de áridos reciclados de tipo hormigón procedentes de RCD en las mezclas bituminosas puede ayudar a la sostenibilidad debido a la gran cantidad de áridos que consume este sector.

Es necesario mencionar que las mezclas realizadas con AR tendrán un comportamiento diferente de las mezclas convencionales (realizadas con árido natural) debido a la diferencia de propiedades entre ambos tipos de áridos. Esta diferencia será mayor cuanto mayor sea el porcentaje de AR introducido en la mezcla.

Hasta la fecha, existen varias investigaciones sobre el uso de AR en mezclas bituminosas en caliente y en frío. En el apartado 2.3.2 se presenta un resumen de las aportaciones realizadas por diferentes autores sobre mezclas bituminosas en caliente.

Así mismo, en el apartado 2.3.3 se mencionan las investigaciones más relevantes sobre las mezclas bituminosas en frío que suponen una mejora medioambiental con respecto a las mezclas en caliente.

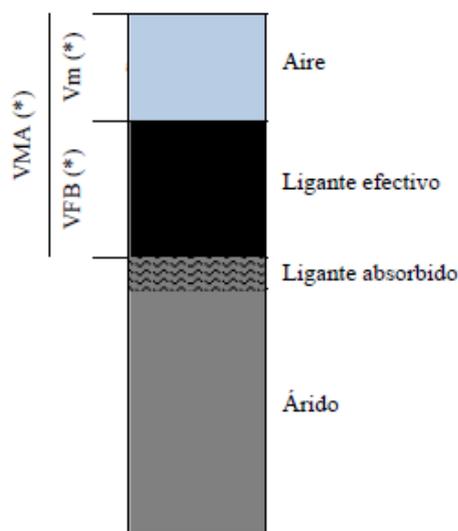
Sin embargo, hasta la fecha, la revisión bibliográfica ha podido constatar que no hay experiencias con la utilización de estos áridos en mezclas templadas o semicalientes.

### **2.3.2. Mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados de RCD**

#### *2.3.2.1. Propiedades volumétricas y contenido óptimo de ligante*

Las propiedades volumétricas son el contenido de huecos en mezcla ( $V_m$ ), los huecos rellenos de ligante (VFB) y los huecos en el árido mineral (VMA) (figura 2.6). A continuación se define cada una de ellas (AENOR, 2003):

- Contenido de huecos en mezcla ( $V_m$ ): volumen ocupado por los huecos de aire en una probeta bituminosa, expresado como un porcentaje del volumen total de la probeta.
- Huecos en el árido mineral (VMA): volumen del espacio hueco intergranular existente entre las partículas del árido de una mezcla bituminosa compactada, que incluye los huecos de aire y el volumen de ligante de la probeta. Se expresa como un porcentaje del volumen total de la probeta.
- Huecos rellenos con ligante (VFA): porcentaje de huecos rellenos de ligante presentes en el árido mineral.



**Diagrama de volúmenes**

(\*) VMA y  $V_m$  se expresan como porcentaje respecto al volumen total de la mezcla, VFB como porcentaje respecto al volumen total de huecos del árido mineral (VMA).

Figura 2. 6. Huecos en el árido mineral (VMA), huecos rellenos de ligante (VFB) y huecos en mezcla ( $V_m$ ).

Las propiedades volumétricas condicionan el comportamiento de las mezclas bituminosas en gran medida. Un contenido excesivo de huecos de aire tiene un efecto negativo sobre la durabilidad de la mezcla, ya que cuanto más elevado es el contenido de huecos en mezcla, más rápidamente se producirá el envejecimiento de la misma (Khandal y Chakraborty, 1996).

En general, en las mezclas con áridos reciclados el contenido de huecos en mezcla aumenta con el contenido de AR. Esto es debido a que la elevada rugosidad de la superficie del AR (figura 2.7) hace más difícil la compactación de la mezcla.

Asimismo, la absorción de ligante ( $P_{ba}$ ) y el contenido óptimo de betún ( $B_o$ ) aumentan con el porcentaje de AR en mezcla debido a la gran porosidad que posee el mortero adherido en los áridos reciclados (figura 2.7). Esta mayor absorción, también contribuye a que el contenido de huecos de aire sea mayor.

Por el contrario, el porcentaje de ligante efectivo ( $P_{be}$ ) (el ligante no absorbido por el árido) disminuye, lo cual indica que el espesor de la película de ligante que cubre los áridos es más fina pudiendo afectar al comportamiento de la mezcla.

En cuanto a VMA (si se tiene en cuenta la absorción de ligante) y VFB, ambos disminuyen con el contenido de árido reciclado en mezcla debido a la gran absorción mencionada (Pasandín y Pérez, 2013).



*Figura 2. 7. Detalle de la superficie rugosa de las partículas de AR, así como del mortero adherido a su superficie.*

Otros autores que concluyeron que el contenido óptimo de ligante es mayor en mezclas con áridos reciclados son: Shen y Du (2005), Wong et al. (2007), Pérez et al. (2007, 2010, 2012a, 2012b), Rafi et al. (2011), Muniz de Farias et al. (2012), Wu et al. (2013)

y Qasrawi y Asi (2016). Además, este fenómeno es más acusado cuando la sustitución por AR se realiza en las fracciones más finas (Rafi et al., 2011), ya que suelen presentar un mayor contenido de mortero.

En cuanto al contenido de ligante efectivo, Paranavithana et al. (2006) y Mills-Beale y You (2010) también obtuvieron que es menor en mezclas fabricadas con AR.

Finalmente, otros autores que concluyeron que tanto el contenido de huecos en el árido mineral, como el contenido de huecos rellenos de ligante disminuyen con el incremento del porcentaje de reciclado en mezcla son: Mills-Beale y You (2010), Bushal et al. (2011) y Qasrawi y Asi (2016) (figuras 2.8 y 2.9).

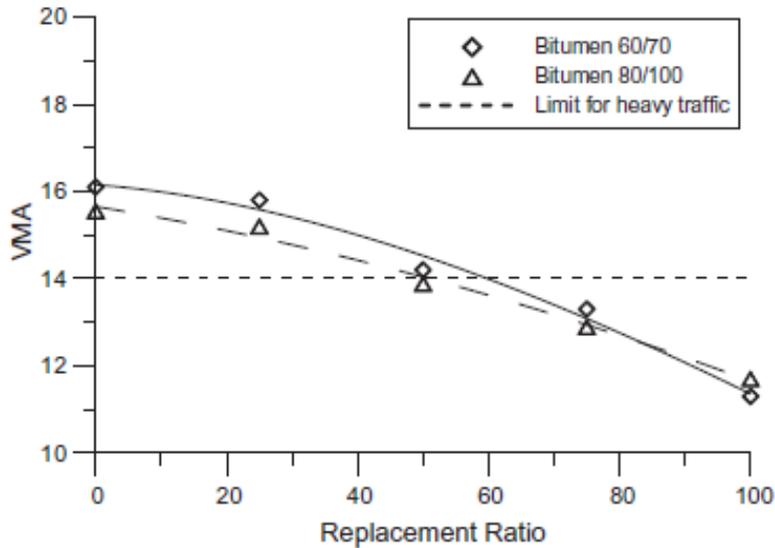


Figura 2. 8. Relación entre el contenido de AR en mezcla y VMA. Fuente: Qasrawi y Asi (2016).

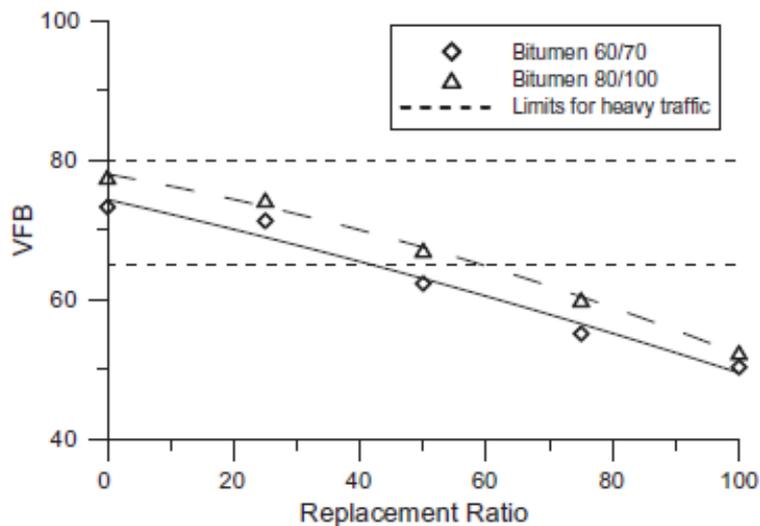


Figura 2. 9. Relación entre el contenido de AR en mezcla y VFB. Fuente: Qasrawi y Asi (2016).

### 2.3.2.2. *Sensibilidad al agua*

La sensibilidad al agua es la facilidad que presentan las mezclas bituminosas para sufrir una degradación de sus propiedades mecánicas debido a la presencia de agua en estado líquido o en forma de vapor (Caro et al., 2008).

Los resultados de sensibilidad al agua obtenidos por los distintos autores para mezclas bituminosas en caliente con AR son muy dispares, ya que esta propiedad es dependiente, entre otras cosas, de la naturaleza del árido reciclado y del árido natural, y del porcentaje de árido reciclado que contiene la mezcla (Rodríguez Pasandín, 2013).

Una de las primeras investigaciones fue llevada a cabo por Shen y Du (2005). Estos investigadores utilizaron un árido natural de tipo ígneo, un árido reciclado de tipo hormigón y un polvo mineral calizo comercial. Como ligante, usaron dos tipos de betún con diferentes grados de penetración. Para estudiar la sensibilidad al agua compararon dos grupos de probetas, uno seco y otro húmedo, y obtuvieron, en todos los casos, que la resistencia conservada era superior al 75%.

Pérez et al. (2007) dosificaron mezclas bituminosas con áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición y realizaron una serie de ensayos para determinar su sensibilidad al agua. Finalmente, llegaron a la conclusión de que para mezclas con un 50% de AR la pérdida de resistencia debida al agua era excesiva.

Mills-Beale y You (2009) llevaron a cabo un estudio sobre la viabilidad de fabricar mezclas bituminosas en caliente para carreteras de bajo tráfico con áridos reciclados procedentes exclusivamente de la demolición de estructuras de hormigón. El árido natural empleado fue un árido basáltico con sustituciones del 25, 35, 50 y 75% de árido reciclado. De este estudio se obtuvo que la sensibilidad al agua era mayor a medida que se incrementa el contenido de AR. Sin embargo, salvo en el caso del 75% de sustitución, se cumple la normativa americana aplicada.

Chen et al. (2011), analizaron el efecto del filler procedente de la producción de RCA (*Recycled Concrete Aggregate*), es decir, AR de RCD de tipo hormigón, en las mezclas bituminosas en caliente (figura 2.10). El polvo mineral fue obtenido mediante el tamizado de la fracción 0/1,18 de árido reciclado. El árido natural empleado fue de tipo basáltico y el betún de penetración 60/70. Tras los ensayos, se concluyó que el filler reciclado mejora la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente.



*Figura 2. 10. Filler procedente de la producción de RCA. Fuente: Chen et al. (2011).*

Wen y Bushal (2011), también analizaron el comportamiento frente a la acción del agua de las mezclas bituminosas en caliente con diferentes porcentajes de AR (0, 20, 40, 60, 80 y 100%). Como conclusión, obtuvieron que a medida que se incrementa el contenido de reciclado en mezcla, disminuye la resistencia a la acción del agua. Este resultado lo achacan a que el árido reciclado necesita un mayor contenido de ligante y tiene una gran facilidad de trituración. Zhu et al. (2012), también concluyeron que la utilización de RCA para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente da lugar a mezclas con baja resistencia a la acción del agua.

Posteriormente, Pasandín y Pérez (2013) realizaron una investigación con mezclas en caliente con contenidos del 0, 5, 10, 20 y 30% de áridos reciclados de tipo hormigón (RCA). La sustitución se llevó a cabo en las fracciones gruesas debido a que, la fracción fina, tiene una mayor dificultad para la eliminación de impurezas y posee una mayor absorción de agua. El árido natural empleado fue un árido silíceo. Cabe mencionar también, que para mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas se realizó un curado a 170 °C en estufa durante 4 horas antes de la compactación. Como puede verse en la figura 2.11, la resistencia a tracción indirecta (ITS) decrece con el incremento del contenido de árido reciclado, tanto para el grupo seco (ITSd) como para el húmedo (ITSw), a excepción del contenido del 5%, lo cual atribuyen a la heterogeneidad del RCA empleado. Por otro lado, todos los valores del índice de resistencia a tracción indirecta (ITSR) son superiores al 80% (valor establecido por la normativa española).

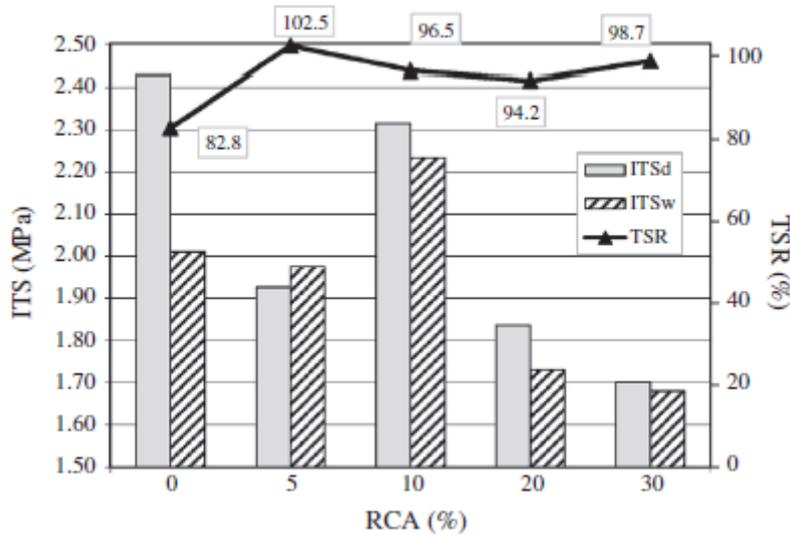


Figura 2. 11. Relación entre el contenido de AR en mezcla y la resistencia a tracción indirecta. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).

Wu et al. (2013), investigaron la influencia de los residuos de construcción y demolición sobre el rendimiento de las mezclas bituminosas. Para ello prepararon diferentes muestras incluyendo el árido reciclado en distintas fracciones. Para evaluar la sensibilidad al agua utilizaron dos ensayos, el TRS y el  $MS_0$  (Residual Stability Ratio). Los resultados obtenidos para todas las mezclas cumplieron lo requerido en la normativa china, siendo mejor la resistencia a la acción del agua para la mezcla con reciclado en la fracción fina ( $\leq 4,75$  mm) y no en la gruesa. Los autores explican en el artículo que la gran absorción del AR (que es mayor en los tamaños de árido pequeños), reduce la película de ligante que recubre los áridos provocando una menor resistencia a la acción del agua. Por lo tanto, el resultado de sensibilidad al agua obtenido lo achacan al bajo contenido de la fracción fina de AR en mezcla.

Qasrawi y Asi (2016), realizaron un estudio con mezclas bituminosas en caliente con árido natural con sustituciones del 0, 25, 50, 75 y 100% de RCA. Además, emplearon 2 grados de dureza de betún, (60/70 y 80/100). La sensibilidad al agua obtenida fue mayor para mezclas con RCA y, para contenidos superiores al 50%, aunque no se incumple el valor mínimo de ITSR (80%), las propiedades volumétricas no están dentro de los límites marcados por la normativa. No obstante, las mezclas realizadas con el betún 80/100 presentan un mejor comportamiento por lo que admitieron un mayor porcentaje de reciclado.

Como puede apreciarse, a pesar de la variabilidad de los resultados, en general puede decirse que a medida que el contenido de AR en mezcla aumenta, empeora su resistencia a la acción del agua.

### 2.3.2.3. Rigidez

La rigidez de una mezcla bituminosa es la relación existente entre las tensiones y las deformaciones para una carga y un tiempo de aplicación determinados (AENOR, 2012). Dicha rigidez está relacionada con su capacidad para transmitir las cargas de tráfico (Pasetto y Baldo, 2010). Para determinarla, el ensayo más empleado es el del módulo resiliente, aunque también se puede usar el módulo dinámico (Rodríguez Pasandín, 2013).

Paranavithana y Mohajerani (2006), llegan a la conclusión de que algunas propiedades de las mezclas en caliente como por ejemplo el módulo resiliente, son menores si contienen RCA que si están realizadas únicamente con árido natural. Posteriormente, Mils-Beale y You (2010), también obtienen que cuanto más AR se introduzca en la mezcla, menor será su módulo dinámico o rigidez.

Otros investigadores como Wong et al. (2007), introducen el RCA en la fracción fina o como polvo mineral y deducen que el valor del módulo resiliente de las mezclas con un mayor contenido de reciclado (45% en este caso), tienen una mayor capacidad para transmitir las cargas de tráfico que las mezclas convencionales aunque el contenido de ligante necesario es mayor.

Chen et al. (2011) que analizaron el efecto del polvo mineral de RCA en las mezclas bituminosas en caliente, realizaron el módulo a tracción indirecta (ITS) a diferentes temperaturas (5 °C, 25 °C y 40 °C) con filler natural y reciclado, y determinaron que el uso de polvo mineral de RCA no tiene una influencia relevante en el ITS de las mezclas. Además, concluyeron que el módulo de las mezclas a 40 °C viene dado principalmente por el mástico, mientras que a 5 °C y a 25 °C el principal responsable de la rigidez de la mezcla es el esqueleto mineral.

Zhu et al. (2012), fabricaron mezclas bituminosas con RCA utilizando una resina de silicona para cubrir los áridos reciclados a modo de pretratamiento. A la vista de los

resultados obtenidos, concluyeron que este proceso mejoraba la rigidez de las mezclas. Lee et al. (2012) también utilizaron RCA con un tratamiento previo, pero en este caso los áridos eran cubiertos por una pasta de escoria de cemento. La conclusión a la que llegaron fue que el módulo resiliente aumenta con el contenido en mezcla de RCA tratado.

Arabani et al. (2013) obtienen que la adición en mezclas en caliente de finos o polvo mineral de áridos reciclados de tipo hormigón aumenta el módulo resiliente. En este caso las mezclas se realizaron con árido natural ígneo con sustituciones de RCA en la fracción fina, en la gruesa y en el filler.

Pasandín y Pérez (2013), como ya se ha mencionado anteriormente, llevaron a cabo una investigación con mezclas bituminosas en caliente usando un árido natural silicio con porcentajes de sustitución del 0, 5, 10, 20 y 30% de RCA y curando las probetas a 170 °C antes de la compactación. Los resultados obtenidos, muestran una gran dependencia de la temperatura de las mezclas que contienen RCA lo que se muestra en la gráfica siguiente (figura 2.12). Por ello no deben ser empleadas en regiones frías.

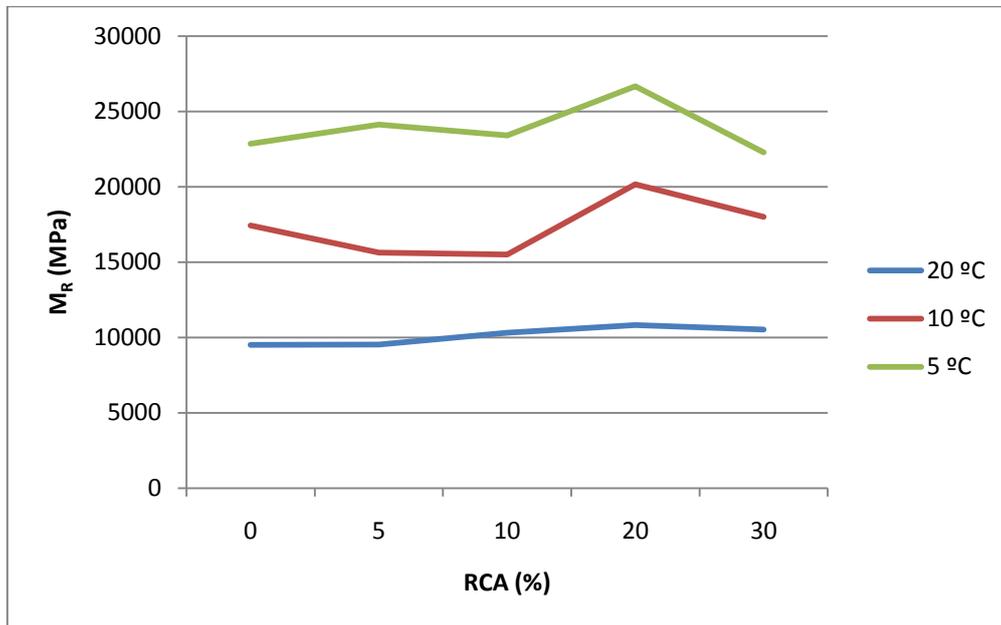


Figura 2. 12. Módulo resiliente para diferentes porcentajes de RCA. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).

Pasandín et al. (2015) estudiaron las consecuencias sobre el módulo resiliente de aplicar un tratamiento térmico antes de la compactación en las mezclas bituminosas en caliente. Las conclusiones extraídas fueron que el envejecimiento producido por el tratamiento térmico es la causa principal de que las mezclas incrementen su rigidez teniendo, el

porcentaje de RCA, una influencia menor, y que, en ausencia de curado, los áridos reciclados de tipo hormigón protegen al betún contra el envejecimiento. Esto último lo achacan a que los poros del mortero adherido en los AR protegen el betún durante los procesos de mezclado y compactación.

Qasrawi y Asi (2016), ensayaron mezclas con diferentes contenidos de RCA y utilizando 2 grados de dureza de betún, (60/70 y 80/100). Finalmente, concluyeron que la introducción de RCA en las mezclas bituminosas en caliente disminuye su módulo resiliente. Además, las mezclas realizadas con el betún 60/70 obtuvieron un valor de módulo resiliente superior al de las mezclas realizadas con el betún 80/100.

Radević et al. (2017), dosificaron mezclas bituminosas en caliente que incluían contenidos de RCA entre el 15 y el 45% en la fracción fina ( $\leq 4$  mm), en la gruesa (4/22,4 mm) y en ambas. Como resultado obtuvieron que el módulo de rigidez de las mezclas con RCA era más bajo que el de la mezcla de control.

Se puede observar que hay una gran variabilidad en los resultados, y que estos dependen de la fracción en la que es introducido el reciclado. No obstante, todos los autores indican que la rigidez de estas mezclas está dentro de los rangos admisibles.

#### *2.3.2.4. Resistencia a la deformación permanente*

En general, se puede demostrar que la deformación producida sobre una mezcla bituminosa sometida a cargas de tráfico está compuesta por dos componentes recuperables (elástica y viscoelástica) y dos que no lo son (plástica y viscoplástica) (Uzan, 1996; Garba, 2002). La acumulación de deformaciones permanentes en mezclas bituminosas es especialmente importante a altas temperaturas o bajas velocidades de aplicación de las cargas (Miro et al., 2002). Así, bajo la acción repetida de las cargas de tráfico, se pueden producir densificaciones o deformaciones excesivas si la resistencia a la deformación permanente no es suficiente (Sousa et al., 1991).

La deformación permanente puede estar condicionada por factores como una baja resistencia a cortante en las mezclas bituminosas, el grado de compactación, el contenido de ligante y las características de los áridos utilizados. En el caso de los AR, características como su gran rugosidad y angulosidad por proceder de procesos de

machaqueo, serían beneficiosos para la mezcla, dotándola de mayor resistencia. No obstante, el mayor contenido de huecos de las mezclas fabricadas con AR de RCD tiene efectos negativos, ya que propicia la aparición de deformaciones irreversibles (Gómez-Meijide, 2015).

Pérez et al. (2010) llegan a la conclusión de que el comportamiento de las mezclas al introducir el árido reciclado en la fracción gruesa, cumple las especificaciones de la normativa vigente en España. Así mismo, concluyeron que el comportamiento frente a las deformaciones plásticas de las mezclas que contienen AR es similar, o incluso algo mejor, al de las mezclas convencionales.

Algunos autores llevaron a cabo ensayos con tratamientos para la mejora del comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente con RCA. Zhu et al. (2012), utilizó una resina de silicona para cubrir los áridos, y llegaron a la conclusión de que las mezclas que utilizaban áridos reciclados con este pretratamiento, exhibían una mejor resistencia a la deformación permanente que las mezclas con RCA sin tratar. Además, en los dos casos (con RCA tratados o no) esta resistencia a la deformación es superior a la obtenida para mezclas realizadas únicamente con áridos naturales. Lee et al. (2012), recubrieron los áridos reciclados de tipo hormigón con una pasta de escoria de cemento a modo de pretratamiento, y obtuvieron que la utilización de RCA con este tratamiento disminuye la resistencia a la deformación permanente de la mezcla debido a que las uniones entre los RCA empleados es más fuerte.

Pasandín y Pérez (2013), analizaron el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente frente a la deformación permanente con distintos contenidos de árido reciclado y sometiendo las probetas a un curado en estufa de 4 horas. Tras ello, afirman que a medida que se incrementa el contenido de RCA en mezcla, también lo hace la deformación permanente, por lo que las mezclas con mayor contenido de RCA serán más sensibles a las deformaciones plásticas (esto es cierto para todos los casos analizados salvo el del 30% de RCA que no sigue este patrón). También mencionan que existe una relación lineal entre el número de ciclos de carga y la deformación producida. En la figura 2.13 se muestran las relaciones obtenidas entre el número de ciclos y la deformación permanente acumulada para los distintos porcentajes de RCA.

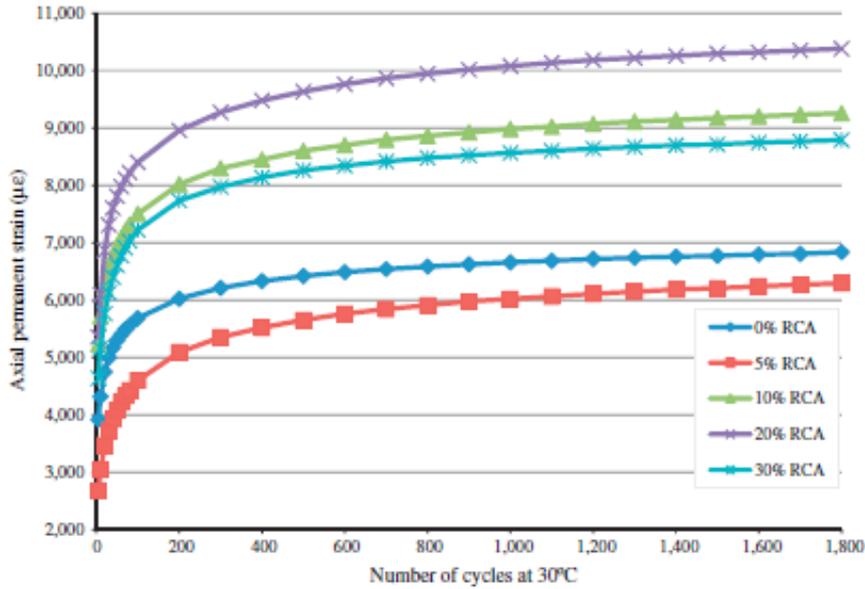


Figura 2. 13. Deformación permanente acumulada para mezclas bituminosas con diferentes porcentajes de RCA. Fuente: Pasandín y Pérez (2013).

Recientemente, como puede apreciarse en la figura 2.14, Ossa et al. (2016), obtienen que la deformación producida tras 10000 ciclos de carga se incrementa hasta contenidos de AR de RCD del 20%. Para contenidos mayores disminuye significativamente. Este suceso lo achacan a la existencia de grandes cantidades de cemento Portland sin hidratar, que cuando se activan incrementan la resistencia al corte de la mezcla.

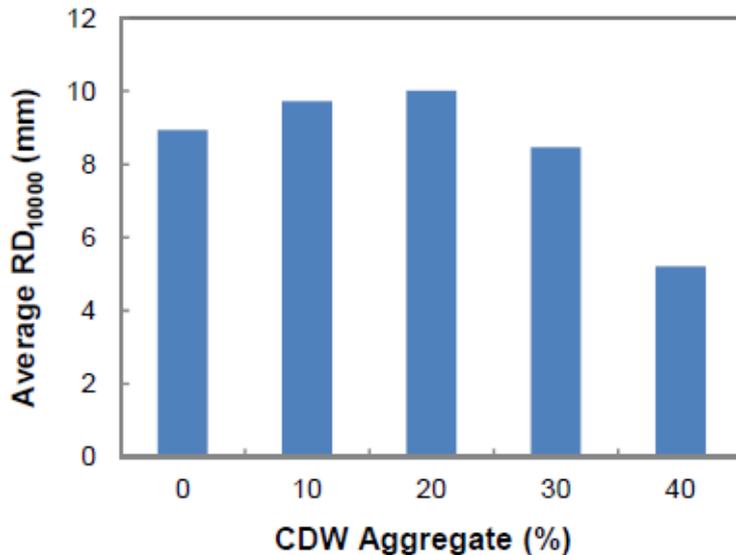


Figura 2. 14. Deformación producida tras 10000 ciclos de carga para diferentes contenidos de árido reciclado. Fuente: Ossa et al. (2016).

Por último, Radević et al. (2017), dosificaron mezclas bituminosas con diferentes contenidos de RCA en distintas fracciones, y concluyeron que el hecho de incluir áridos reciclados de tipo hormigón no tiene una influencia relevante en la deformación permanente obtenida en las mezclas.

### 2.3.2.5. Resistencia a la fatiga

Cuando a un firme se le aplica un elevado número de solicitaciones debidas al tráfico puede producirse su agotamiento por fatiga. Estas cargas son de corta duración y de magnitud menor a la resistencia de rotura. El fenómeno se produce por la acumulación de las consecuencias de cada solicitación por separado (Rodríguez Pasandín, 2013) y es una de las causas principales de fallo de los firmes asfálticos (Di Benedetto et al., 2004).

Pérez et al. (2007 y 2010) obtuvieron las leyes de fatiga para mezclas de tipo G-20 (figura 2.15) y S-20 (figura 2.16) con árido reciclado de RCD, concluyendo que su comportamiento a fatiga es similar al de las mezclas convencionales.

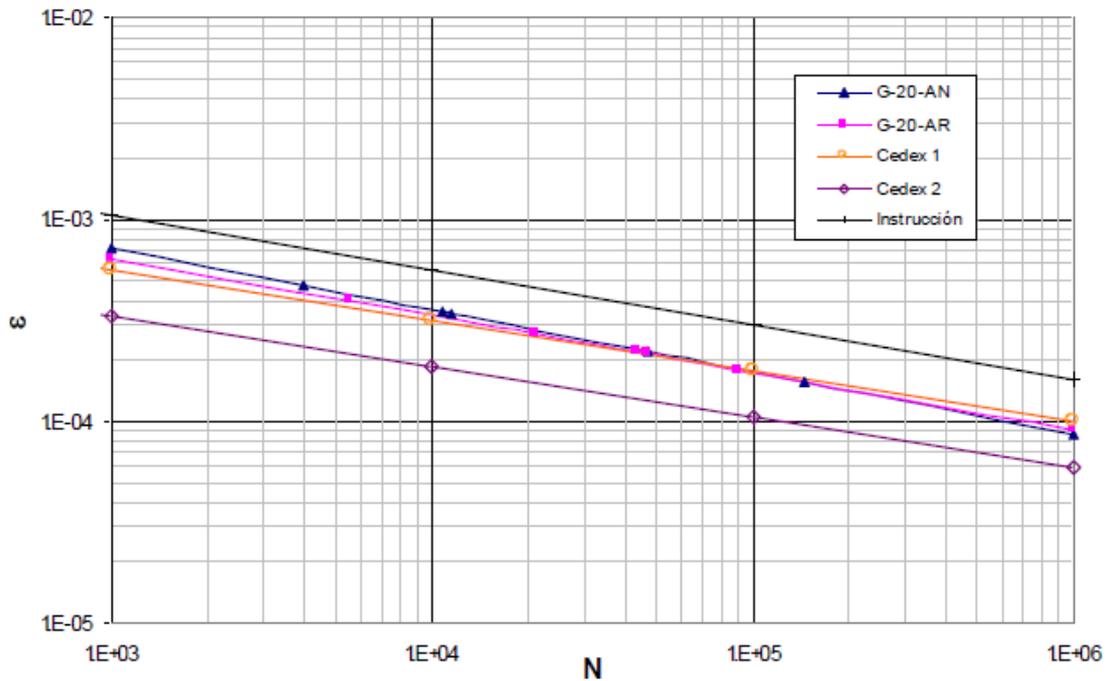


Figura 2. 15. Leyes de fatiga de las mezclas G-20. Fuente: Pérez et al. (2007).

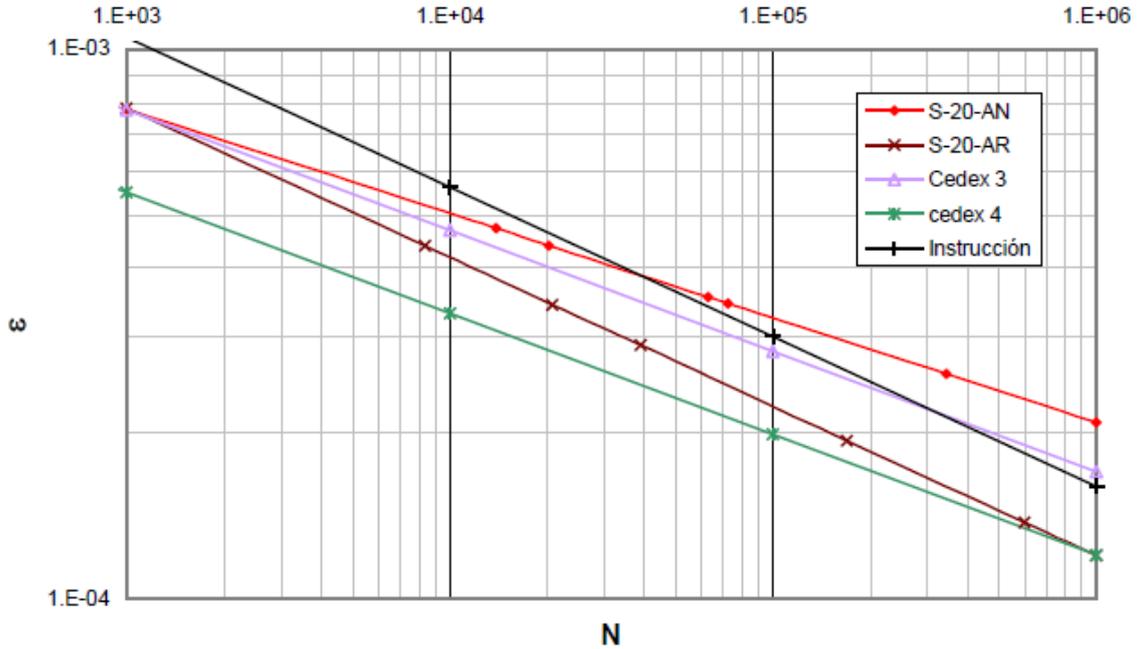


Figura 2. 16. Leyes de fatiga de las mezclas S-20. Fuente: Pérez et al. (2007).

Chen et al. (2011) comprobaron que el empleo de polvo mineral procedente de residuos de construcción y demolición mejora la vida a fatiga de la mezcla bituminosa, por lo que la fracción en la que se realice la sustitución por AR relevante desde el punto de vista del comportamiento final de la mezcla.

Posteriormente, Arabani y Azanhoosh (2012), dosificaron seis tipos diferentes de mezclas de bituminosas que contenían tres diferentes tipos de áridos (dacita, RCA y escoria de acero). En todas las mezclas El filler utilizado en todas las mezclas fue dacita. En la tabla 2.7, se muestra la composición de cada una de las mezclas.

Mixture	Coarse aggregates (57%) (CA)	Fine aggregates (37%) (FA)	Filler (6%)
Control mix:dacite	Dacite	Dacite	Dacite
CA:RCA	RCA	Dacite	Dacite
FA:RCA	Dacite	RCA	Dacite
CA:SS	Steel slag	Dacite	Dacite
FA:SS	Dacite	Steel slag	Dacite
CA:SS + FA:RCA	Steel slag	RCA	Dacite

Tabla 2. 7. Composición de las mezclas a ensayar. Fuente: Arabani y Azanhoosh (2012).

Finalmente, las leyes de fatiga obtenidas para cada tipo de mezcla se exponen en la figura 2.17. Como se puede observar, el resultado obtenido para la vida a fatiga de las mezclas CA:SS + FA:RCA fue mejor que el de la mezcla de control. Según los autores,

esto puede ser debido a que la cantidad de polvo de cemento presente en los áridos de RCA aumenta el contenido de filler en la mezcla y disminuye su contenido de huecos de aire y a que la presencia de RCA y de escoria de acero en mezcla, incrementa el contenido ligante, lo cual está directamente relacionado con la vida a fatiga.

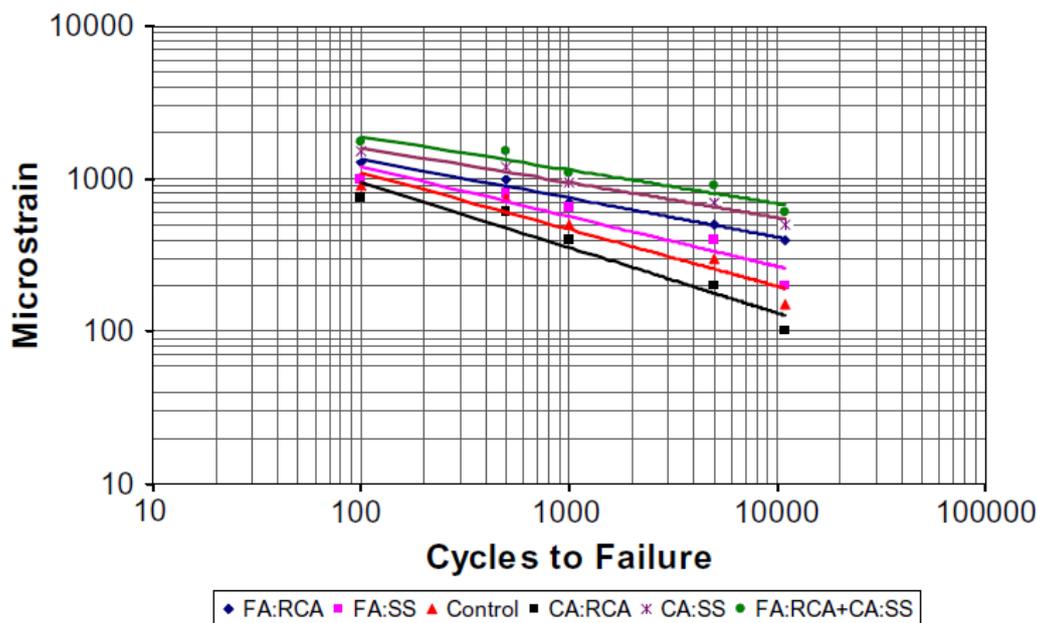


Figura 2. 17. Leyes de fatiga obtenidas para cada tipo de mezcla. Fuente: Arabani y Azanhoosh (2012).

Nejad et al. (2013) utilizaron el ensayo de tracción indirecta a fatiga a 5 y 40°C para analizar la vida a fatiga de las mezclas bituminosas en caliente con RCA. La conclusión a la que llegaron fue que una sustitución del 100% del árido natural por reciclado, mejora la vida a fatiga de las mezclas bituminosas.

Finalmente, Pasandín y Pérez (2013), también llegaron a la conclusión de que la vida a fatiga de las mezclas bituminosas en caliente realizadas con RCA es apropiada, y parecida a la de las mezclas convencionales cuando los porcentajes de reciclado son superiores al 20%. Para la mezcla con 30% de RCA la vida a fatiga es algo inferior a la de la mezcla de control.

### 2.3.3. Mezclas bituminosas en frío con AR de RCD

Por tratarse del único estudio realizado hasta la fecha, las características de las mezclas en frío que se presentan a continuación, están extraídas de la tesis de Gómez-Meijide (2015), así como de los artículos obtenidos a raíz de la misma (Gómez-Meijide et al.,

2015; Gómez-Meijide y Pérez, 2015; Gómez-Meijide et al., 2016). En la investigación realizada, se analiza el comportamiento de una grava-emulsión fabricada con un 100% de AR de tipo hormigón, frente al comportamiento de una grava-emulsión fabricada con un 100% de árido natural (mezcla de control).

#### 2.3.3.1. *Contenido de agua en las probetas*

En este tipo de mezclas el contenido de agua no proviene solo de la emulsión, sino que se aporta agua en el proceso de fabricación para garantizar un correcto mezclado del ligante y los áridos y para alcanzar la densidad máxima durante la compactación. Como es lógico, el contenido de agua varía tanto durante la compactación como durante el proceso de curado (3 días en estufa a 50°C).

El autor expone que la cantidad de agua remanente presente en las probetas depende en gran medida del árido empleado, ya que la absorción de los áridos reciclados es mucho mayor. La cantidad de ligante también determina el agua final de las probetas, debido a que este ayuda a sellar los poros de forma que no se produce una correcta evacuación del agua intersticial tras el curado.

#### 2.3.3.2. *Propiedades volumétricas*

El contenido de huecos en el árido mineral (VMA), de huecos rellenos de aire ( $V_a$ ) y de huecos rellenos de aire y agua ( $V_{aw}$ ), son mayores en las mezclas realizadas con árido reciclado que en la mezcla de control, debido a la gran porosidad de los AR. Además, en general, el VMA tiende a aumentar cuando lo hace el contenido de betún y es independiente del contenido de agua. Por el contrario,  $V_a$  y  $V_{aw}$  tienden a disminuir tanto con el aumento del contenido de ligante como del contenido de agua, aunque esta disminución es más pronunciada en el primer caso.  $V_a$  no bajó del 10% en las mezclas realizadas con RCD.

También se debe tener en cuenta que el contenido de huecos es distinto si se emplea un compactador giratorio o una prensa estática, siendo menores en el segundo caso. En las tablas 2.8 y 2.9, se muestran los resultados obtenidos por Gómez-Meijide et al. (2015).

Volumetric properties of samples compacted with gyratory compactor.

% Bitumen	% Water	Bulk specific gravity	V <sub>a</sub> (%)	% Water after compaction	% Water after curing
<i>Mixtures with 100% CDWA</i>					
5%	9%	1.897	19.7	8.4	0.7
6%	9%	1.932	17.2	8.6	1.5
7%	9%	1.946	16.3	8.2	2.0
8%	9%	1.956	15.9	8.8	1.9
7%	21%	1.893	17.8	9.2	1.8
7%	33%	1.932	18.1	9.3	2.1
<i>Mixtures with 100% NA</i>					
2%	3%	2.219	16.9	3.2	0.3
3%	3%	2.291	15.3	2.9	0.1
4%	3%	2.314	14.2	2.8	0.1
5%	3%	2.317	11.7	2.8	0.4
4%	9%	2.231	13.9	7.5	0.2
4%	15%	2.229	12.3	14.0	0.3

Tabla 2. 8. Propiedades volumétricas de las mezclas compactadas con compactador giratorio. Fuente: Gómez-Meijide et al. (2015).

Volumetric properties of samples compacted with static press.

% Bitumen	% Water	Bulk specific gravity	V <sub>a</sub> (%)	% Water after compaction	% Water after curing
<i>Mixtures with 100% CDWA</i>					
5%	9%	1.952	14.9	8.6	3.2
6%	9%	1.958	12.2	8.2	3.5
7%	9%	1.963	10.43	8.0	3.7
8%	9%	1.965	9.7	7.9	4.1
7%	21%	1.975	11.2	7.6	3.8
7%	33%	1.982	10.6	7.4	3.8
<i>Mixtures with 100% NA</i>					
2%	3%	2.342	12.5	3.2	0.1
3%	3%	2.360	11.5	2.2	0.1
4%	3%	2.397	7.6	1.4	0.2
5%	3%	2.398	5.7	1.3	0.4
4%	9%	2.390	8.0	1.8	0.2
4%	15%	2.410	7.9	1.9	0.4

Tabla 2. 9. Propiedades volumétricas de las mezclas compactadas con prensa estática. Fuente: Gómez-Meijide et al. (2015).

### 2.3.3.3. Sensibilidad al agua

Para la determinación de la sensibilidad al agua se utilizó el ensayo inmersión-compresión. Para cada porcentaje de betún y cada contenido de agua ensayados, se fabricaron grupos de 10 probetas, de las cuales 5 habían sido acondicionadas en cámara climática (grupo seco) y las otras 5 en un baño de agua a 49 °C durante 4 días (grupo acondicionado). Tras ello, las probetas fueron sometidas a un ensayo axial hasta rotura y

se obtuvo su resistencia conservada. Este ensayo se llevó a cabo tanto para la mezcla de control (100% árido natural) como para la mezcla con un 100% de árido reciclado.

Los resultados obtenidos para un contenido del 100% de AR muestran una disminución de los porcentajes de resistencia conservada a medida que aumenta la cantidad de ligante. Esto parece ser debido a la pérdida de adherencia entre el ligante y los áridos producida durante el acondicionamiento, y que es más evidente cuanto más betún contiene la mezcla.

El aumento del contenido de agua también tiene consecuencias negativas, ya que ocasiona un descenso de la resistencia conservada. Este fenómeno podría ser debido a que, en las mezclas con mayores contenidos de agua, también se generan una mayor cantidad de poros y capilares durante el curado por donde podrá circular el agua del acondicionamiento.

En la figura 2.18, se muestra la resistencia a compresión simple (con y sin acondicionamiento) y la resistencia conservada, para distintos porcentajes de betún y diferentes contenidos de agua durante el mezclado. Estos resultados se corresponden con un 100% de árido reciclado y como se puede apreciar superan el 60% de resistencia conservada que es valor mínimo impuesto por la normativa.

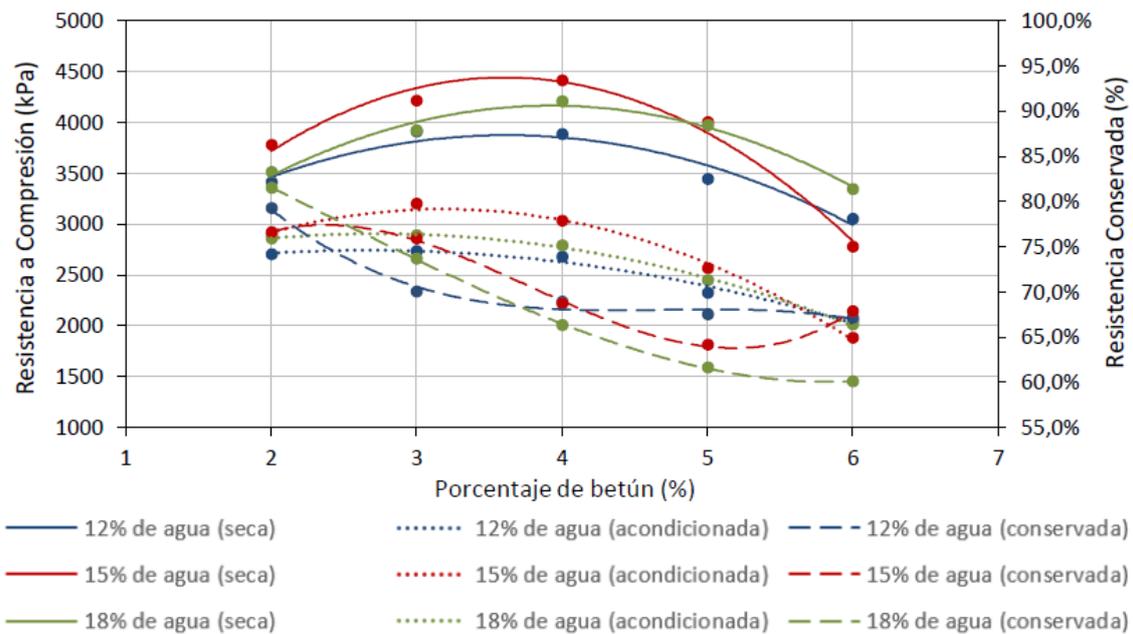


Figura 2. 18. Resistencias (con y sin acondicionamiento) para un 100% de AR y distintos contenidos de betún y agua. Fuente: Gómez-Meijide (2015).

#### 2.3.3.4. Rigidez

Gómez-Meijide (2015) estudió la rigidez de las mezclas bituminosas en frío con un 100% de árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición, mediante tres ensayos distintos: el de tracción indirecta, el de módulo resiliente a tracción indirecta (ITSM) y el de módulo dinámico.

Tras los ensayos realizados, el autor concluye primeramente, que el contenido de ligante influye más en la rigidez de la mezcla de lo que lo hace el contenido de agua. Además, al comparar los resultados obtenidos para el 100% de AR con los obtenidos para la mezcla de control (100% árido natural), obtiene que el hecho de emplear árido reciclado no afecta negativamente a la mezcla, sino que incluso puede llegar a mejorarla.

Otra conclusión interesante es la dependencia de la temperatura hallada en las mezclas en frío con AR, que pueden incluso llegar a cambiar el contenido óptimo de ligante y de agua, cosa que no sucede con las mezclas convencionales. Esto hace que las mezclas fabricadas con árido reciclado sean más difíciles de diseñar. Por otro lado, la mezcla de control tiene una mayor rigidez a bajas temperaturas y una mayor fluidez a altas temperaturas que la mezcla con AR, lo cual muestra una menor dependencia de los cambios térmicos de estas últimas.

Finalmente, este autor también analiza la influencia del empleo de reciclado en el tiempo de curado (figura 2.19), obteniendo que este es independiente del tipo de árido utilizado y que el crecimiento de la rigidez se produce de igual manera en ambas mezclas.

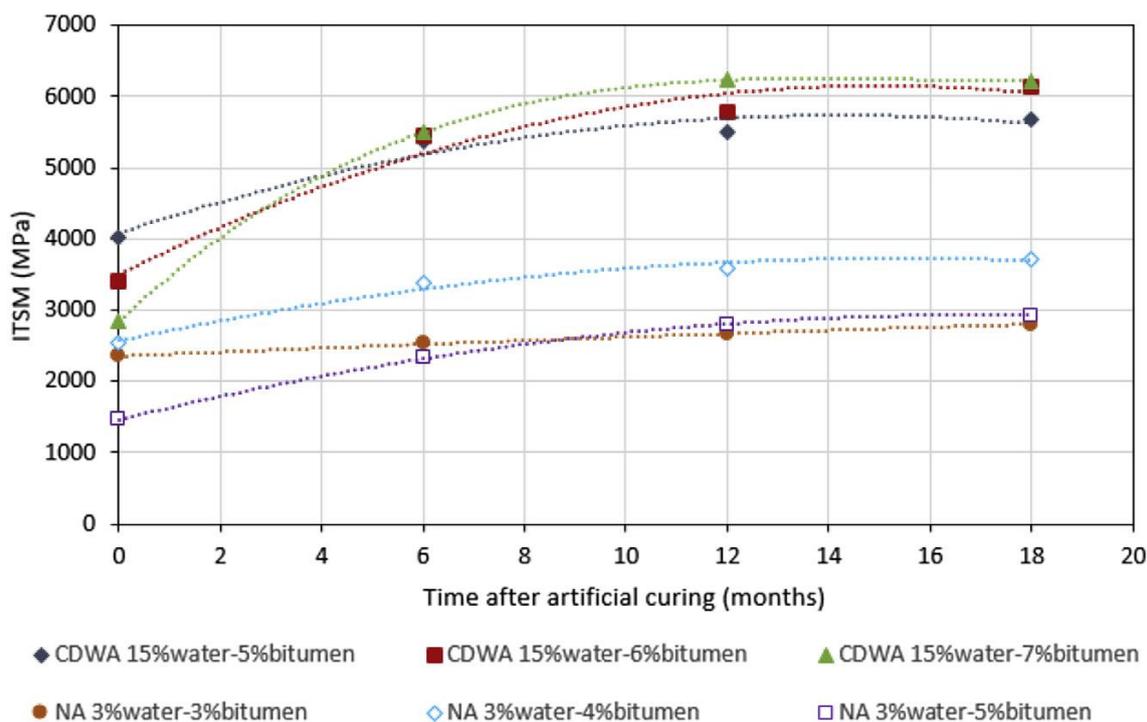


Figura 2. 19. Evolución del ITSM durante el tiempo de curado. Fuente: Gómez-Meijide et al. (2016).

### 2.3.3.5. Resistencia a la deformación permanente

Para el estudio de la deformación permanente, Gómez-Meijide (2015) emplea el ensayo de compresión axial bajo carga repetida (RLAT), una vez las mezclas hayan alcanzado su completa maduración.

Como conclusión, se extrae que la utilización de árido reciclado en las mezclas bituminosas en frío que han alcanzado una maduración completa, mejora su resistencia a la deformación permanente. Sin embargo, no se logra alcanzar el comportamiento de las mezclas en caliente.

### 2.3.4. Mezclas bituminosas a bajas temperaturas con árido reciclado

Hoy en día, con el fin de conseguir una mayor eficiencia medioambiental de las mezclas bituminosas, se han dirigido los esfuerzos hacia la fabricación de mezclas semicalientes y templadas. Estas mezclas tienen el fin de combinar las ventajas de las mezclas en caliente y en frío, aportando un mayor respeto ambiental (propio de las mezclas en frío) con una mayor durabilidad y mejor comportamiento (propio de las mezclas en caliente).

Sin embargo, debido a la gran novedad de este tipo de mezclas, todavía existen pocas referencias bibliográficas.

En este apartado, se mencionaran brevemente los principales artículos publicados relativos a mezclas tanto templadas (HWMA) como semicalientes (WMA) que contienen RAP, ya que no se ha encontrado bibliografía acerca de la utilización de áridos reciclados de RCD este tipo de mezclas.

#### 2.3.4.1. *Mezclas semicalientes con RAP*

Shu Wei Goh y Zhanping You (2011) realizaron un trabajo de investigación para caracterizar las propiedades mecánicas de mezclas semicalientes porosas realizadas con un 15% de RAP y un aditivo (Advera® WMA). Para ello se realizaron 4 tipos de mezclas: una mezcla porosa convencional en caliente (mezcla de control), una mezcla porosa en caliente con RAP, una mezcla porosa semicaliente con aditivo y una mezcla porosa semicaliente con RAP y con aditivo. Los resultados obtenidos para módulo dinámico, muestran un descenso significativo en el valor de  $E^*$  para las mezclas porosas semicalientes con aditivo con respecto a la mezcla de control. Sin embargo, en la mezcla semicaliente con RAP y aditivo solo se aprecia un leve descenso respecto de la de control. Para los resultados obtenidos para tracción indirecta, el valor de ITS para las mezclas semicalientes es menor que el de la mezcla de control debido a la menor temperatura del proceso. Además, en la mezcla semicaliente con RAP este valor es significativamente superior que en el caso de la mezcla en caliente con RAP.

Autores como Xiang Shu et al. (2012) obtuvieron que el RAP es beneficioso para las mezclas semicalientes desde el punto de vista de sensibilidad al agua. En este caso el estudio se realizó empleando betún espumado.

En la línea de mezclas semicalientes con betún espumado Sheng Zhao et al. (2012) realizaron estudios con porcentajes de RAP que varían entre el 0 y el 50% extrayendo como conclusión que las mezclas de WMA con altos contenidos de RAP exhiben un mejor comportamiento frente a fatiga, deformación permanente y sensibilidad al agua.

Mogawer et al. (2013) realizaron un estudio donde se centraron en evaluar características como la rigidez, el agrietamiento por fatiga, la deformación permanente,

la sensibilidad al agua y la trabajabilidad de mezclas semicalientes fabricadas con betún-caucho y con contenidos de RAP hasta el 40%. Finalmente concluyeron que la tecnología WMA mejora la trabajabilidad de las mezclas y que todas las mezclas tenían un buen comportamiento frente a la deformación permanente y la sensibilidad al agua. Sin embargo, los resultados de resistencia a la fatiga y rigidez muestran que estas propiedades disminuyen con el aumento de contenido de RAP.

#### 2.3.4.2. *Mezclas templadas con RAP*

Punith Veeralinga et al. (2012) estudiaron la sensibilidad al agua y la resistencia a la deformación permanente de las mezclas templadas fabricadas con betún espumado que contienen materiales reciclados como tejas o RAP. La conclusión a la que llegaron los autores fue que el empleo de estos materiales no reduce la vida a fatiga ni aumenta la sensibilidad al agua de las muestras con respecto a la de control.

Iwański y Mrugała (2015) realizaron un estudio sobre mezclas templadas con RAP empleando como ligante betún espumado. Los resultados obtenidos por estos investigadores fueron que las propiedades de estas mezclas (contenido de huecos, sensibilidad al agua y deformación permanente) son similares a los obtenidos a partir de mezclas convencionales en caliente.

Botella et al. (2016) llevaron a cabo una investigación con mezclas templadas introduciendo porcentajes de RAP que varían entre el 50 y el 100%. Como ligante utilizaron diferentes emulsiones (la primera procedente de un betún 35/50, la segunda procedente de un betún 50/70 y la última modificada con látex), la temperatura de mezclado de las mezclas oscilaba entre 90 y 100 °C y la de compactación entre 70 y 80 °C. Finalmente, concluyeron que los resultados obtenidos de resistencia a la fisuración y a la fatiga son similares a los obtenidos para mezclas en caliente convencionales y que apenas varían en función del tipo de emulsión utilizada. En las figuras 2.20 y 2.21, se muestran las gráficas tensión-desplazamiento obtenidas para cada tipo de emulsión, así como para una mezcla de control AC16S 50/70, a las temperaturas de 20 y -5°C.

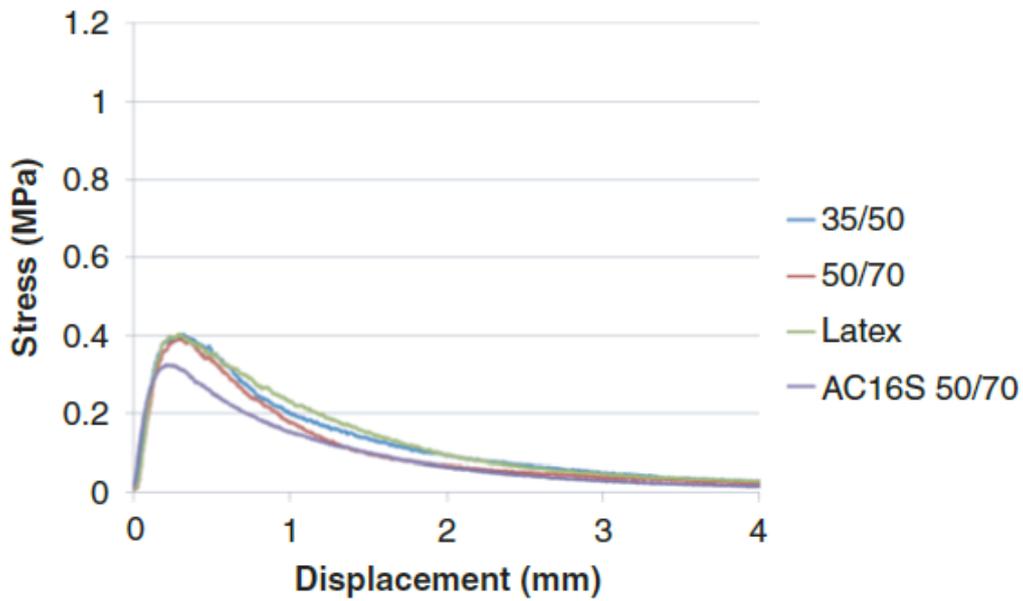


Figura 2. 20. Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo Fénix a la temperatura de 20°C.

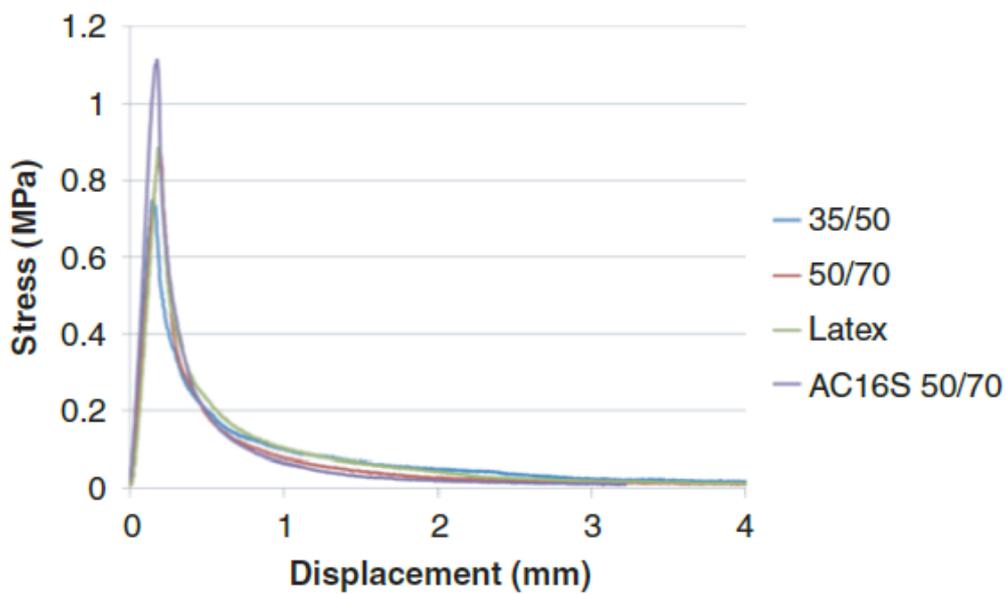


Figura 2. 21. Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo Fénix a la temperatura de -5°C.

Finalmente mencionar que, existen también publicaciones relativas a mezclas en frío que incluyen RAP (Behnood et al., 2015). Sin embargo, dado que el presente proyecto técnico utiliza áridos reciclados de tipo hormigón, no se ha considerado necesaria su incorporación.

*CAPÍTULO 3*

**CARACTERIZACIÓN DE  
MATERIALES BÁSICOS**

### 3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES BÁSICOS

#### 3.1. Introducción

En el presente proyecto técnico se analiza la posibilidad de utilizar árido reciclado de RCD en la fabricación de una mezcla templada de tipo AC 22 bin S. Para ello se utilizan dos tipos de árido: natural y reciclado. Ambos áridos son los mismos que Rodríguez Pasandín (2013) empleó en su tesis doctoral, por lo que las propiedades que se exponen en los apartados 3.1 y 3.2 han sido extraídas de este documento, exceptuando las densidades.

Con el fin de analizar el cumplimiento de las especificaciones relativas a los áridos, se ha seguido la Monografía titulada “Mezclas templadas con emulsión bituminosa” (ATEB, 2014). Esta monografía indica que los áridos deberán cumplir con las especificaciones indicadas en el PG-3 (2015) para este tipo de mezcla. Por ello, en los apartados 3.1 y 3.2, no solo se describen las propiedades fundamentales de los áridos empleados, sino que también se indica para que categoría de tráfico pesado (ver tabla 3.1) son aptos según el PG-3.

Así mismo, como ligante, se ha utilizado una emulsión bituminosa, cuyas principales propiedades se describen en el apartado 3.3.

<b>Categoría de tráfico pesado</b>	<b>T00</b>	<b>T0</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T31</b>	<b>T32</b>	<b>T41</b>	<b>T42</b>
<b>IMDp (Vehículos pesados/día)</b>	$\geq 4000$	$< 4000$ $\geq 2000$	$< 2000$ $\geq 800$	$< 800$ $\geq 200$	$< 200$ $\geq 100$	$< 100$ $\geq 50$	$< 50$ $\geq 25$	$< 25$

Tabla 3. 1. Categorías de tráfico pesado. Fuente: Norma 6.1 IC.

#### 3.2. Árido natural

El árido natural utilizado en este proyecto técnico es una corneana (figura 3.1) y se ha obtenido de una cantera de la Comunidad Autónoma gallega cuyos áridos se suelen emplear en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.



Figura 3. 1. Fracción 4/8 mm de la corneana utilizada.

### 3.2.1. Propiedades mecánicas y físicas

#### 3.2.1.1. Resistencia a la fragmentación

El valor del coeficiente de Los Ángeles (LA) se ha determinado según la norma UNE-EN 1097-2:1999/A1:2007. “Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación” (AENOR, 2007). El valor del LA obtenido es del 14,2% que, como podemos ver, es inferior al 25% que es el límite fijado por el PG-3 para la categoría de tráfico T00.

#### 3.2.1.2. Densidad de las partículas y absorción de agua

Para hallar la densidad del árido natural y la absorción de agua (figura 3.2), se utilizó la norma UNE-EN 1097-6:2014 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua” (AENOR 2014). A partir de este ensayo se obtienen los valores de densidad aparente de las partículas ( $\rho_a$ ), la densidad de partículas tras secado en estufa ( $\rho_{rd}$ ), la densidad de partículas saturadas con la superficie seca ( $\rho_{ssd}$ ) y la absorción de agua tras inmersión durante 24 horas ( $WA_{24}$ ) para cada una de las fracciones. Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 3.2:

Fracción	0/4	4/8	8/16	16/22,4
$\rho_a$ (mg/cm <sup>3</sup> )	2,78	2,78	2,77	2,77
$\rho_{rd}$ (mg/cm <sup>3</sup> )	2,76	2,73	2,74	2,74
$\rho_{ssd}$ (mg/cm <sup>3</sup> )	2,76	2,75	2,75	2,75
WA <sub>24</sub> (%)	0,30	0,67	0,47	0,51

Tabla 3. 2. Densidad y absorción del árido natural.



Figura 3. 2. Obtención de la densidad de la fracción 0/4 mm del árido natural.

### 3.2.2. Propiedades geométricas

#### 3.2.2.1. Índice de lajas

La determinación del índice de lajas se llevó a cabo según la norma UNE-EN 933-3 “Determinación de la forma de las partículas. Índice de Lajas” (AENOR, 1997 y 2004a). El índice de lajas ( $I_L$ ) global de la muestra es del 16%, correspondiéndose el mayor valor de este indicador con la fracción 5/6,3 mm que obtuvo un  $I_L$  del 24%.

De acuerdo con el PG-3, el valor máximo del índice de lajas para las categorías de tráfico pesado T0 y T3 es del 25%, por lo que la corneana cumple para estas categorías. Por otro lado, el suministrador del árido indica que puede emplearse para la categoría T00 a excepción de la fracción 2/6,3 que sería apta para las categorías de T0 a T2.

3.2.2.2. *Porcentaje de caras de fractura del árido grueso*

Para la obtención del porcentaje de caras de fractura del árido grueso se siguió la norma 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” (AENOR, 1999 y 2005). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.3:

<b>Fracción granulométrica:</b>	<b>4/6,3</b>	<b>6,3/12,5</b>	<b>10/16</b>	<b>16/31,5</b>
Porcentaje de partículas trituradas, Cc:	100,0	100,0	100,0	100,0
Porcentaje de partículas totalmente trituradas, Ctc:	62,8	39,7	0,0	28,9
Porcentaje de partículas redondeadas, Cr:	0,0	0,0	0,0	0,0
Porcentaje de partículas totalmente redondeadas, Ctr:	0,0	0,0	0,0	0,0

*Tabla 3. 3. Porcentaje de caras de fractura del árido grueso procedente del árido natural.*

Dado que según el PG-3, para una categoría de tráfico T00, el porcentaje de partículas trituradas debe ser igual al 100% y el porcentaje de partículas totalmente redondeadas igual al 0%, podemos observar que el árido natural utilizado cumple para dicha categoría.

3.2.2.3. *Equivalente de arena*

Para determinar la limpieza de la fracción 0/2 mm del árido natural, se ha utilizado el ensayo del equivalente de arena siguiendo la norma UNE-EN 933-8 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente del arena” (AENOR, 2000). El valor obtenido para este ensayo es del 61%, cumpliendo así el PG-3 que exige un valor superior al 50% en los áridos empleados en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

**3.3. Áridos reciclados**

Los áridos reciclados utilizados en este proyecto (figura 3.3) proceden de una planta de gestión y reciclado de RCD perteneciente a la empresa TEC REC (Tecnología y Reciclado, S.L.) y situada en el PK 0+700 de la carretera Valdemingómez en la Comunidad Autónoma de Madrid. Esta es una planta de primera generación, donde el

material es sometido a un conjunto de actuaciones (cribado, machaqueo y separación magnética) con el fin de obtener AR.

El árido fue suministrado por la planta en la fracción 0/40 mm, que es la granulometría propia de una zahorra artificial ZA25. Las propiedades de este se presentan en los apartados siguientes.



*Figura 3. 3. Fracción 8/16 mm del árido reciclado utilizado.*

### **3.3.1. Granulometría**

Para determinar la granulometría del AR de empleó la norma 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” (AENOR, 1998 y 2006b). En la figura 3.4 se muestra la granulometría obtenida, mediante el método de lavado y tamizado, para la fracción 0/40 mm.

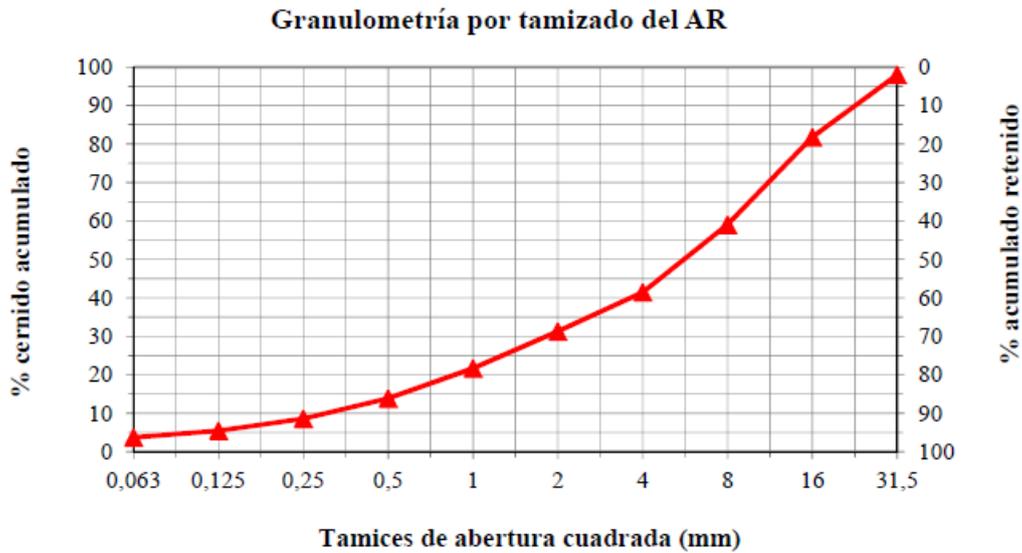


Figura 3. 4. Curva granulométrica de la fracción 0/40 mm del árido reciclado

Se puede observar que la fracción presenta una granulometría continua, lo que significa que todos los tamices retienen árido y, por lo tanto, se podrá disponer de cualquier fracción granulométrica para la fabricación de las mezclas. En este caso, se utilizarán los tamaños 0/0,063, 0,063/0,25, 0,25/0,5, 0,5/2, 2/4, 4/8, 8/16 y 16/22.

### 3.3.2. Propiedades mecánicas y físicas

#### 3.3.2.1. Resistencia a la fragmentación

El coeficiente de Los Ángeles obtenido para el AR es del 32%, por lo que solamente podrá ser utilizado para la categoría de tráfico pesado más baja, la categoría T4. Esta baja resistencia a la fragmentación es debida, fundamentalmente, por la presencia de mortero adherido su superficie, que se desprende fácilmente durante el proceso de realización del ensayo.

Sin embargo, hay que tener presente que en este proyecto técnico el AR se combinará con árido natural. Así, si combinamos el árido reciclado con el natural, la resistencia a la fragmentación mejoraría, lo cual permitirá fabricar mezclas para categorías de tráfico superiores. Como se ha visto anteriormente, la corneana utilizada como árido convencional posee un LA muy adecuado para combinar con el AR.

Una forma sencilla para la determinación aproximada del coeficiente de Los Ángeles resultante de la combinación de los dos tipos de árido, consiste en ponderar los valores

de los LA obtenidos para el 100% tanto del árido convencional como de reciclado, y adoptar como coeficientes de ponderación los porcentajes de cada clase de árido presentes en la mezcla. Por ejemplo, en el caso de este proyecto, se realizan mezclas con un contenido del 55% de AR, por lo que el coeficiente de resistencia a la fragmentación sería  $LA = (55/100) * 32 + (45/100) * 14,2 = 24\%$ , pudiéndose emplear este contenido para todas las categorías de tráfico pesado según el PG-3.

### 3.3.2.2. Densidad de las partículas y absorción de agua

Los resultados de densidad y absorción del árido reciclado se muestran a continuación (tabla 3.4), así como una imagen de la realización del ensayo (figura 3.5):

<b>Fracción</b>	<b>0/4</b>	<b>4/8</b>	<b>8/16</b>	<b>16/22,4</b>
$\rho_a$ (mg/cm <sup>3</sup> )	2,61	2,63	2,65	2,68
$\rho_{rd}$ (mg/cm <sup>3</sup> )	2,27	2,33	2,36	2,35
$\rho_{ssd}$ (mg/cm <sup>3</sup> )	2,42	2,45	2,46	2,45
WA <sub>24</sub> (%)	6,77	5,26	4,38	4,09

Tabla 3. 4. Densidad y absorción del árido reciclado.



Figura 3. 5. Obtención de las densidades del árido reciclado.

Comparando estos resultados con los obtenidos para el árido natural (tabla 3.2), podemos observar que la densidad del AR es menor mientras que la absorción es mucho más elevada. Esto es debido, al igual que en el caso de la resistencia a la fragmentación, al mortero adherido presente en los áridos reciclados. Como puede apreciarse en las tablas 3.4 y 3.2, la diferencia entre densidades y absorciones del AR y el natural es más acusada en las fracciones más finas (0/4 mm). Por este motivo, es más recomendable que la sustitución por AR sea realizada en las fracciones más gruesas de la mezcla bituminosa.

### 3.3.3. Propiedades geométricas

#### 3.3.3.1. Índice de lasjas

El índice de lasjas global obtenido para el AR es del 8% siendo la fracción de mayor índice la 25/31,5 mm con un 13%. A la vista de estos resultados, este árido podría ser utilizado para una categoría de tráfico pesado T00, ya que los valores de  $I_L$  obtenidos son inferiores al límite del 20% marcado por el PG-3.

#### 3.3.3.2. Porcentaje de caras de fractura del árido grueso

En la tabla 3.5 pueden verse los resultados extraídos, como ya se ha mencionado con anterioridad, del trabajo de investigación realizado por Rodríguez Pasandín (2013).

<b>Fracción granulométrica:</b>	<b>0/40</b>
Porcentaje de partículas trituradas, Cc:	85,48
Porcentaje de partículas totalmente trituradas, Ctc:	75,90
Porcentaje de partículas redondeadas, Cr:	14,46
Porcentaje de partículas totalmente redondeadas, Ctr:	2,41

Tabla 3. 5. Porcentaje de caras de fractura del árido grueso procedente del árido reciclado.

Según el PG-3, y observando los valores obtenidos, podría ser utilizado para una categoría de tráfico pesado T3 y para arcenes, ya que el pliego indica que el porcentaje de partículas total y parcialmente trituradas para este tipo de tráfico debe ser igual o superior al 70%, y el porcentaje de partículas totalmente redondeadas igual o inferior al 10%. Este resultado muestra la debilidad del mortero adherido que forma parte del AR,

que tras el proceso de machaqueo, da lugar a superficies romas (aunque rugosas) y no a aristas vivas.

### 3.3.3.3. *Equivalente de arena*

El valor obtenido para este ensayo fue del 67%, que es superior al 55% que marca el PG-3 como límite inferior para las mezclas bituminosas en caliente, por lo cual el AR tiene una limpieza suficiente.

### 3.3.3.4. *Componentes del árido reciclado*

Para la determinación de los componentes del AR se siguió la norma EN 933-11 “Test for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate” (CEN, 2009).

En el gráfico siguiente (figura 3.6) se muestran los distintos materiales que componen el AR así como sus porcentajes.

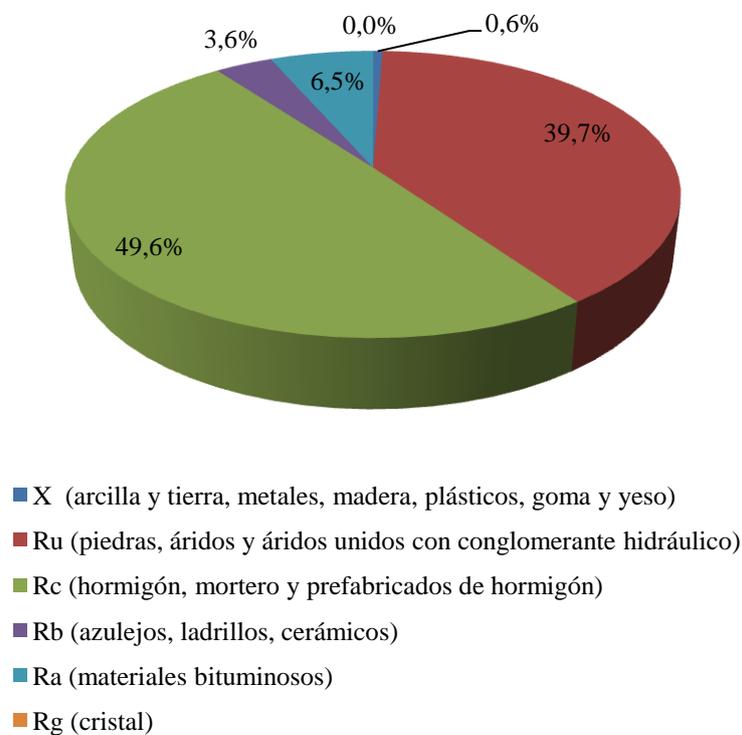


Figura 3. 6. Composición de los áridos reciclados.

Como puede verse, la mayor parte del gráfico circular (un 89,3%) se corresponde con prefabricados de hormigón, hormigones en masa, morteros, piedras y áridos con o sin mortero adherido. Un 6,5% de la composición total se corresponde con materiales bituminosos, un 3,6% con materiales cerámicos y el porcentaje restante con impurezas como gomas, yesos, metales, madera... A continuación, en la figura 3.7, puede verse una imagen de los componentes principales antes mencionados.



Figura 3. 7. Componentes principales de los áridos reciclados.

### 3.4. Emulsión bituminosa

La emulsión bituminosa empleada es una emulsión catiónica de tipo C60B4 cuyas características principales han sido aportadas por la empresa suministradora y se muestran en la tabla 3.6:

<b>DENOMINACIÓN UNE-EN 13808: C60B4</b>			
<b>Características</b>	<b>UNE-EN</b>	<b>Unidad</b>	<b>C60B4</b>
Índice de rotura	13075-1		135
Contenido de ligante (por contenido de agua)	1428	%	63
Contenido de fluidificante por destilación	1431	%	1,5
Tiempo de fluencia (2mm, 40 °C)	12846-1	s	90
Residuo de tamizado (por tamiz 0,5 mm)	1429	%	0,06
Tendencia a la sedimentación (7 d)	12847	%	8

Tabla 3. 6. Características de la emulsión bituminosa.

*CAPÍTULO 4*

**ANÁLISIS DE TEMPERATURA  
Y TIEMPO DE MEZCLADO**

## 4. ANÁLISIS DE TEMPERATURA Y TIEMPO DE MEZCLADO

### 4.1. Introducción

La monografía titulada “Mezclas templadas con emulsión bituminosa” (ATEB, 2014), recomienda temperaturas de calentamiento del árido entre 100 y 110°C y de la emulsión entre 60 y 80°C.

Con el fin de determinar la temperatura a la cual se deben fabricar las mezclas templadas para un correcto mezclado, se siguió el procedimiento descrito en la NLT-145/72. Dicho ensayo tiene la finalidad de determinar, mediante inspección visual, la idoneidad de una emulsión en cuanto a envuelta del árido escogido.

Puesto que la citada monografía recomienda seguir el procedimiento descrito en la NLT-145/172 con la granulometría escogida para la mezcla y el contenido mínimo de ligante, se incluye en el apartado 4.1 una descripción de la mezcla empleada, indicando tanto el tipo de mezcla, como su granulometría y su contenido mínimo de ligante.

La elección del tiempo de mezclado será tratada en el apartado 4.3.

### 4.2. Diseño de mezcla

#### 4.2.1. Tipo de mezcla

Es preciso señalar que, a pesar de que el presente proyecto técnico no está incluido dentro de la investigación “BC-WARM” (Proyecto BIA2013-47987-C3-2-R del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España), sí que sigue la misma línea de trabajo, por lo que se decidió emplear el mismo tipo de mezcla.

Teniendo en cuenta lo anterior, el análisis de la temperatura y tiempo de mezclado, así como la determinación de las propiedades volumétricas y mecánicas, se ha realizado para una mezcla **AC 22 bin S**.

Se trata de una mezcla de tipo hormigón bituminoso, con un tamaño máximo de árido de 22 mm, utilizada en capa intermedia de firmes de carreteras y de granulometría semidensa. En el caso que nos ocupa, será además, una **mezcla templada**, es decir fabricada y puesta en obra a temperatura inferior a 100°C.

Este tipo de mezcla, la AC 22 bin S, entre todas las disponibles en la Monografía sobre mezclas templadas con emulsión de la ATEB, es frecuentemente utilizada en capas intermedias de firmes de carreteras. Además, el tamaño máximo de árido que emplea, la hace adecuada para ser compactada utilizando los equipos disponibles en el Laboratorio de Caminos de la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la Universidade da Coruña (UDC).

#### 4.2.2. Granulometría

A continuación, en la figura 4.1 y en la tabla 4.1, se muestra la granulometría de la mezcla escogida. Se ha elegido de tal manera que coincida aproximadamente en la línea mitad del huso granulométrico marcado por la monografía sobre mezclas templadas con emulsión bituminosa de la ATEB (2014), independientemente del porcentaje de árido reciclado que se vaya a utilizar.

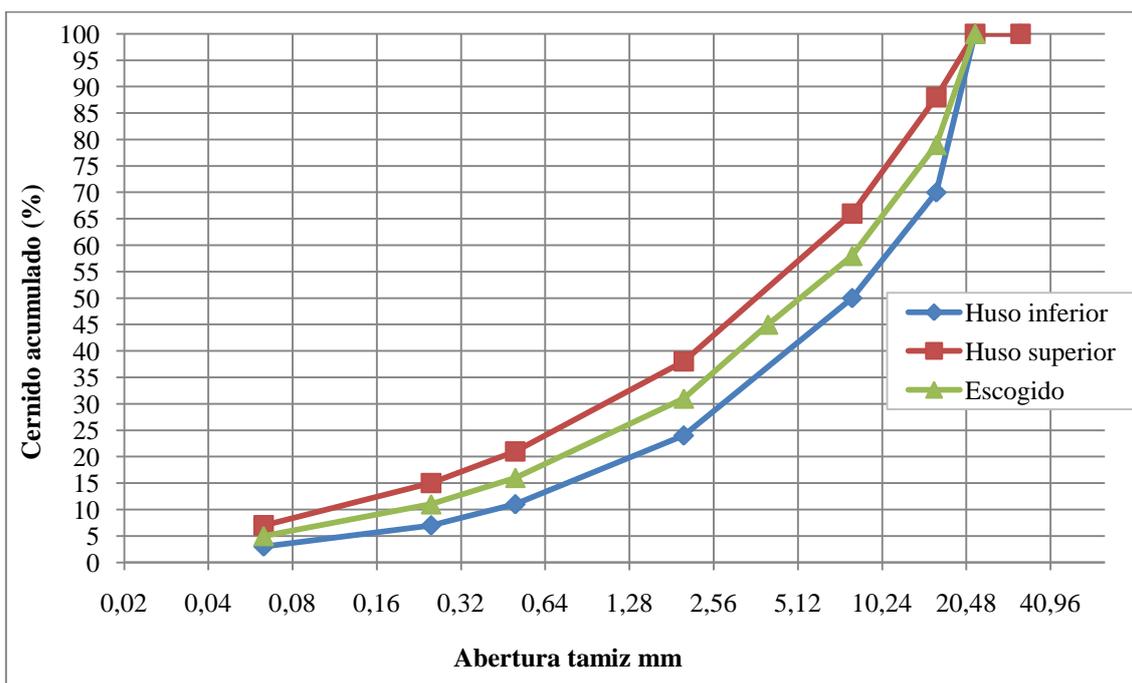


Figura 4. 1. Curva granulométrica escogida.

Tamiz (mm)	Huso inferior	Huso superior	Escogido	% Retenido acumulado	% Retenido parcial
32	100	100	100	0	0
22	90	100	100	0	0
16	70	88	79	21	21
8	50	66	58	42	21
4	-	-	45	55	13
2	24	38	31	69	14
0.5	11	21	16	84	15
0.25	7	15	11	89	5
0.063	3	7	5	95	6
Fondo	0	0	0	100	5

Tabla 4. 1. Porcentaje retenido acumulado y retenido parcial para la granulometría escogida.

#### 4.2.3. Sustitución del árido natural por AR

La sustitución de árido natural por reciclado se llevó a cabo en porcentajes del 0%, 55% y 100% sobre la masa de árido total. En el caso del porcentaje de sustitución del 55%, la sustitución se realizó en las fracciones 4/8, 8/16 y 16/22,4 mm. La sustitución de AR en las fracciones más finas supondría un incremento en la cantidad de ligante a emplear, ya que estas fracciones poseen una elevada absorción en comparación con el árido natural como ya se ha comentado en el capítulo 3. Además, desde el punto de vista de la sensibilidad al agua, también es más adecuado que el reemplazo sea realizado en los tamaños de AR más gruesos, ya que, como se ha visto en el estado del arte, la fracción fina posee una mayor dificultad para eliminar las impurezas, así como una mayor absorción, la cual reduce la capa de ligante que envuelve los áridos disminuyendo su resistencia a la acción del agua.

#### 4.2.4. Dotación mínima de ligante

La dotación mínima de ligante fijada por la ATEB depende del tipo de mezcla seleccionada (abierta o cerrada). En el caso de esta investigación, la mezcla escogida es cerrada, y el porcentaje mínimo de ligante se obtiene de la tabla 4.2. Como podemos ver este porcentaje depende de la capa del firme en la que se vaya a utilizar, y se da el valor

tanto respecto al peso total de la mezcla como respecto al peso total del árido combinado seco.

Tipo de capa	% en masa de dotación mínima de ligante	
	Respecto del peso total del árido combinado seco incluido el polvo mineral	Respecto del peso total de la mezcla incluido el polvo mineral
Rodadura*	≥ 4,70	≥ 4,50
Intermedia	≥ 4,20	≥ 4,00
Base	≥ 3,80	≥ 3,65

\* Para las mezclas tipo BBTM A, la dotación mínima de ligante hidrocarbonado residual de la emulsión, en masa sobre el total de mezcla, será de 5,2%

Tabla 4. 2. Dotación mínima de ligante. Fuente: Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB).

En este caso, dado que la mezcla con la que se trabajó es de utilización en capa intermedia, la **dotación mínima de ligante** se corresponde con un **4,00% s/mezcla (4,2% s/árido)**.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que este contenido mínimo es para un árido con una densidad de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, de modo que debe ser corregido según las densidades reales del árido que se vaya a utilizar.

La citada corrección se realiza multiplicando la dotación mínima de ligante obtenida anteriormente, por un factor  $\alpha$ . Dicho factor se calcula teniendo en cuenta la densidad conjunta de los áridos ( $P_d$ ), a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha = 2,65/P_d$$

Para determinar la densidad conjunta de los áridos ( $P_d$ ), fue preciso determinar las densidades de cada fracción (como se puede ver en el capítulo 3), tanto para el árido natural como para el AR y, posteriormente, combinarlas teniendo en cuenta los porcentajes en los que interviene cada fracción en la mezcla.

A continuación (tabla 4.3) se muestran los contenidos mínimos de ligante obtenidos tras la corrección, según el porcentaje de sustitución de AR.

<b>% de AR</b>	<b>P<sub>d</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>Dotación mínima (%)</b>
0	2,78	0,9544	3,82
55	2,69	0,9842	3,94
100	2,65	0,9994	4,00

Tabla 4. 3. Dotación mínima de ligante corregida para cada contenido de AR estudiado.

Estos son los contenidos con los que se realizaron las envueltas de la NLT-145/72, tal y como marca la ATEB.

### 4.3. Análisis de la temperatura de mezclado

#### 4.3.1. Determinación de las temperaturas de mezclado

En el caso del presente proyecto técnico, no se siguió literalmente el procedimiento explicado en la norma mencionada, sino que se adaptó teniendo en cuenta las especificaciones recogidas en la Monografía de la ATEB sobre mezclas templadas con emulsión bituminosa. De esta forma, los pasos efectuados se explican en los párrafos siguientes:

1. En primer lugar se pesan muestras de  $465 \pm 0,1$  gramos del árido lavado y seco. En este caso, se prepararon muestras con contenidos de AR del 0%, del 55% y del 100%. Además, estos 465 gramos se pesaron tanto de la fracción 6,3/20 mm (llevando a cabo el procedimiento propio de la NLT) como con la curva granulométrica escogida (siguiendo lo recogido en la ATEB).
2. A continuación se pesan los gramos de emulsión. La cantidad de emulsión será aquella que proporcione un contenido de ligante residual igual al contenido mínimo exigido por la ATEB, que en el caso que nos ocupa será el indicado en la tabla 4.3.
3. Una vez pesados el árido y la emulsión, se introducen en la estufa para su calentamiento. Las envueltas se realizaron de tal forma que los áridos se calentaron a 100°C, 105°C y 110°C. Para cada una de esas temperaturas, la emulsión se calentó a 60°C, 65°C, 70°C, 75°C y 80°C, resultando un total de 15 combinaciones de temperaturas. Se cumple así con los rangos de temperaturas recomendados por la ATEB para cada componente. En la figura 4.2 se muestra

una de las combinaciones de temperaturas árido-emulsión a las que se realizaron las envueltas.



Figura 4. 2. Medida de la temperatura en el árido (fotografía izquierda) y en la emulsión (fotografía derecha).

4. La amasada se realizó manualmente durante 3 minutos como se indica en la norma NLT-145/72 (figura 4.3), pero variando el momento de incorporación del polvo mineral en las muestras que empleen la granulometría a trabajar. En un primer caso, el filler fue añadido al inicio del tiempo de mezclado, y en un segundo caso, el filler se incorporó tras 2 minutos de amasada. Asimismo, se controló que la temperatura de las muestras tras la amasada tomara valores entre los 70 y 80°C, ya que estos son los rangos entre los que se debe encontrar la temperatura de compactación según las recomendaciones de la ATEB (figura 4.3).



Figura 4. 3. Amasada y control de la temperatura final de la muestra.

### 4.3.2. Resultados obtenidos

En general, para cada porcentaje de AR, se escogió la combinación de temperaturas árido-emulsión más baja que producía una buena envuelta, reduciendo así tanto el daño ambiental como el gasto energético producidos. Como regla general, se supone que una reducción de la temperatura de 10°C reduce las emisiones en un 50%. (EAPA 2005).

- **100% de AR de la fracción 6,3/20 mm**

Para las envueltas realizadas con la fracción 6,3/20 mm, se observó que la emulsión cubre perfectamente los áridos para todas las temperaturas (figura 4.4). Por ello, y teniendo en cuenta que la ATEB recomienda utilizar la granulometría de la mezcla, no se vio necesario realizar las envueltas empleando árido natural ni 55% de AR, ya que el árido natural presenta una absorción menor, con lo que su envuelta será más fácil.



**T<sup>a</sup> árido: 100°C / T<sup>a</sup> emulsión: 60°C**



**T<sup>a</sup> árido: 110°C / T<sup>a</sup> emulsión: 80°C**



**T<sup>a</sup> árido: 100°C / T<sup>a</sup> emulsión: 75°C**



**T<sup>a</sup> árido: 105°C / T<sup>a</sup> emulsión: 65°C**

*Figura 4. 4. Envueltas realizadas para la fracción 6,3/20 mm para distintas temperaturas.*

- **100% de árido natural con la granulometría escogida**

Para las mezclas compuestas con la granulometría elegida en el proyecto y con un 100% de árido natural (0% de AR) se observó que la envuelta era similar cuando el filler se añadía al principio o a los 2 minutos, lo cual sucede para todas las temperaturas, incluso para las más bajas (figura 4.5). Sin embargo, cuando se utiliza árido reciclado, el momento en el que se añada el filler cobra mayor importancia, por lo que, con el fin de estandarizar el proceso de fabricación, nos quedaremos con la opción en la que existe una envuelta previa antes de la incorporación del polvo mineral. Además, esto es lo habitual en la fabricación de mezclas en caliente y la ATEB menciona que se siga la normativa de este tipo de mezclas en lo referente al diseño.



**Filler inicio**



**Filler 2 min**

*Figura 4. 5. Comparación resultado obtenido con filler incorporado al inicio y con filler incorporado a los 2 minutos para un 100% de árido natural.  $T^{\circ}$  árido:  $100^{\circ}\text{C}$  /  $T^{\circ}$  emulsión  $60^{\circ}\text{C}$ .*

Tras realizar todas las amasadas, se decidió escoger una temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$  para el árido y de  $60^{\circ}\text{C}$  para la emulsión (figura 4.6). Con esta combinación se consigue que el árido quede bien cubierto y, además, que la temperatura de la emulsión sea la más baja (dentro del rango recomendado por la ATEB), por lo que la evaporación de los componentes volátiles del ligante es mínima. En general, todas las mezclas de natural quedaron bien envueltas por lo que ya se podrían haber elegido las temperaturas más bajas recomendadas. Sin embargo, como estas serán las temperaturas con las que se fabricará la mezcla de control, se decidió elevar un poco la temperatura del árido para que la envuelta fuera óptima, a pesar de tener un consumo energético mayor.



Figura 4. 6. Mezcla 100% árido natural con 105°C de temperatura de árido y 60°C de temperatura de emulsión.

- **100% de árido reciclado con la granulometría escogida**

En el caso de las mezclas con un 100% árido reciclado, se obtiene una mejor envuelta en el caso de añadir el filler a los 2 minutos de amasado, como ya se ha mencionado anteriormente. Esto es debido a que la gran absorción del polvo mineral reciclado produce la rotura de la emulsión y no se consigue una buena envuelta de los áridos. La diferencia de cobertura entre las mezclas que incorporan el filler al inicio y las que lo hacen a los 2 minutos es más pronunciado cuanto más baja es la temperatura de los materiales, y por tanto de la mezcla. Este fenómeno se ve reflejado en la figuras 4.7 y 4.8.



**Filler inicio**



**Filler 2 min**

Figura 4. 7. Comparación resultado obtenido con filler incorporado al inicio y con filler incorporado a los 2 minutos para un 100% de árido reciclado.  $T^{\circ}$  árido: 100°C /  $T^{\circ}$  emulsión 70 °C.



**Filler inicio**

**Filler 2 min**

*Figura 4. 8. Comparación resultado obtenido con filler incorporado al inicio y con filler incorporado a los 2 minutos para un 100% de árido reciclado.  $T^a$  árido:  $110^{\circ}\text{C}$  /  $T^a$  emulsión  $80^{\circ}\text{C}$ .*

Las temperaturas elegidas han sido de  $110^{\circ}\text{C}$  para el árido y de  $65^{\circ}\text{C}$  para la emulsión (figura 4.9). En este caso, debido a la gran rugosidad de los AR, la envuelta es más complicada, por lo que se optó por elevar la temperatura del árido al máximo. Además, se aumentaron  $5^{\circ}\text{C}$  a la emulsión para conseguir una mejor cobertura, ya que el resultado obtenido con  $60^{\circ}\text{C}$  no era del todo satisfactorio.



*Figura 4. 9. Mezcla 100% árido reciclado con  $110^{\circ}\text{C}$  de temperatura de árido y  $65^{\circ}\text{C}$  de temperatura de emulsión.*

- **55% de árido reciclado con la granulometría escogida**

Finalmente, para las amasadas realizadas con un 55% de RCD, se comprobó que, al igual que en el caso anterior, la envuelta es mejor incorporando el polvo mineral a los 2 minutos. La combinación de temperaturas más baja a la cual se consiguen buenos resultados de cobertura fue de 100°C para el árido y de 65°C para la emulsión. En el caso de aumentar esos 5°C al árido en lugar de a la emulsión los resultados obtenidos no eran tan buenos (figura 4.10).



**T<sup>a</sup> árido: 100°C / T<sup>a</sup> emulsión: 65°C / Filler inicio**



**T<sup>a</sup> árido: 100°C / T<sup>a</sup> emulsión: 65°C / Filler 2 min**



**T<sup>a</sup> árido: 105°C / T<sup>a</sup> emulsión: 60°C / Filler 2 min**

*Figura 4. 10. Comparación de los resultados obtenidos para un 55% de AR y para distintas combinaciones de temperaturas.*

#### 4.4. Análisis del tiempo de mezclado

La monografía sobre mezclas templadas con emulsión bituminosa de la ATEB (2014), recomienda tiempos de mezclado entre 60 y 120 segundos para la fabricación de las probetas.

Para determinar el tiempo óptimo de mezclado se hicieron varias pruebas en laboratorio, realizando amasadas con diferentes tiempos de mezclado. Se obtuvo como resultado que un minuto de mezclado en amasadora no es suficiente para conseguir una buena envuelta de los áridos. Por lo tanto, se decidió utilizar el tiempo de mezclado máximo recomendado por la ATEB (2 minutos).

Cabe comentar que, a pesar de que para las mezclas fabricadas con un 100% de árido natural el momento en el que se incorpora el filler durante el mezclado es irrelevante, no ocurre lo mismo cuando se utiliza AR, como se ha comentado anteriormente, en el apartado 4.2. Por tanto, con el fin de estandarizar el proceso de fabricación, nos quedaremos con la opción en la que existe una envuelta previa antes de la incorporación del polvo mineral. Por tanto, el filler se incorporará tras un minuto de mezclado. Además, esto es lo habitual en la fabricación de mezclas en caliente y la ATEB menciona que se siga la normativa de este tipo de mezclas en lo referente al diseño.

Es decir, **el filler** o polvo mineral **se añade tras un minuto de mezclado, dejando posteriormente un minuto más de mezclado**, con el fin de estandarizar el proceso y garantizar una adecuada envuelta de los áridos, sin que se produzca una rotura prematura de la emulsión.

Por último, cabe mencionar que esta recomendación de tiempos de mezclado no se vio aplicable al ensayo de la NLT-145/72, debido a que en ese caso la amasada fue manual (tal y como marca la norma), y con tiempos entre 1 y 2 minutos de mezclado los áridos no quedaban bien envueltos. Es por ello que, como pudo verse en el apartado 4.2, en el análisis de la temperatura de mezclado, se utilizaron tiempos de mezclado de 3 minutos.

*CAPÍTULO 5*

**PROPIEDADES  
VOLUMÉTRICAS DE MEZCLAS  
TEMPLADAS CON ÁRIDO  
RECICLADO DE RCD Y ÁRIDO  
CONVENCIONAL**

## 5. PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE MEZCLAS TEMPLADAS CON ÁRIDO RECICLADO DE RCD Y ÁRIDO CONVENCIONAL

### 5.1. Introducción

Para el diseño de una mezcla bituminosa es primordial determinar sus principales propiedades volumétricas. Es decir, se debe determinar tanto el contenido de huecos en mezcla o huecos de aire ( $V_m$ ), como el contenido de huecos en el árido mineral (VMA) y el contenido de huecos rellenos de ligante (VFA). Estas propiedades volumétricas, son de gran importancia de cara al posterior desempeño de la mezcla bituminosa.

Concretamente, la monografía de la ATEB titulada “Mezclas templadas con emulsión bituminosa”, especifica que las mezclas templadas con emulsión bituminosa, deben cumplir con un determinado valor de los huecos en mezcla.

En la tabla 5.1 adjunta, se muestran los rangos entre los cuales se debe encontrar el valor de  $V_m$  según esta monografía:

Características		Categoría de tráfico pesado		
		T1 y T2	T3 y arcenes	T4
% Huecos en mezcla	Rodadura	4 - 6	3 - 5	
	Intermedia	5 - 8	4 - 8	
	Base	6 - 9	5 - 9	-

Tabla 5. 1. Rango aceptable de huecos en mezcla (según el procedimiento de superficie saturada seca) según la ATEB.

No obstante, cabe señalar, que estos valores son los indicados para el caso en el que la compactación de las probetas se hubiera realizado mediante un compactador giratorio, que no estaba disponible en el Laboratorio de Caminos de la E.T.S.I.C.C.P. de la UDC durante la realización del presente proyecto técnico.

Por ello, para la compactación de las probetas, se empleó un compactador Marshall, con lo que también se tuvieron que tener en cuenta los valores de  $V_m$  especificados por el PG-3. Estos valores (tabla 5.2) son los indicados para la compactación Marshall, pero para mezclas bituminosas en caliente o semicaliente.

Características		Categoría de tráfico pesado			
		T00 y T0	T1 y T2	T3 y arcenes	T4
% Huecos en mezcla	Rodadura	4 - 6		3 - 6	
	Intermedia	4 - 6	4 - 7 (*)	4 - 7	4 - 7 (**)
	Base	4 - 7 (*)	4 - 8 (*)	4 - 8	-

(\*) En mezclas bituminosas de alto módulo: 4 - 6%. (\*\*) En vías de servicio

Tabla 5. 2. Porcentaje de huecos en mezcla por superficie saturada seca en probetas según el PG-3.

Dadas las diferencias de los valores recogidos en ambas tablas y dado que la mezcla escogida es templada, pero compactada con compactador Marshall, se decidió adoptar un contenido de huecos en mezcla que cumpliera con ambas normativas simultáneamente. Por ello, y dado que la mezcla es de tipo AC 22 bin S (es decir, se emplea en capa intermedia), los valores adoptados para los huecos en mezcla fueron los siguientes: entre el 5% y el 7% para una categoría de tráfico T1 y T2 y entre el 4% y el 7% para T3, T4 y arcenes. La ATEB no contempla la utilización de mezclas templadas en categorías T00 y T0, por lo que no se van a considerar.

## 5.2. Descripción de los ensayos realizados

La determinación del contenido de huecos se realizó conforme a la norma UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003a), por lo que fue necesario determinar tanto la densidad aparente como la densidad máxima de la mezcla. A continuación se describen los pasos seguidos para su obtención, así como la determinación del contenido de huecos.

### 5.2.1. Densidad aparente

La densidad aparente es la masa por unidad de volumen de una mezcla bituminosa, incluidos los huecos de aire y para una temperatura de ensayo conocida. Para la determinación de la densidad aparente se ha seguido la norma UNE-EN 12697-6 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas” (AENOR 2012b). El procedimiento utilizado se describe en las siguientes líneas:

1. En primer lugar se determina el peso de la probeta seca ( $m_1$ ).

2. Seguidamente, se mide la temperatura del agua a la que se realizará el ensayo y se determina su densidad ( $\rho_w$ ).
3. Se sumerge la probeta en el baño de agua, y se deja alrededor de 30 minutos (nunca más de 3 horas) para que el agua sature la probeta.
4. Una vez transcurrido este tiempo, se determina la masa de la probeta saturada sumergida ( $m_2$ ).
5. Posteriormente, se saca la probeta del agua y se secan con un paño la superficie de la misma.
6. Finalmente, se determina la masa de la probeta saturada con su superficie seca ( $m_3$ ).

En la figura 5.1 se muestra una fotografía de las probetas saturando, así como del procedimiento de pesado de las probetas saturadas sumergidas.

Con estos datos se determina la densidad aparente de la probeta ( $\rho_{bssd}$ ) mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

- $\rho_{bssd}$ : densidad aparente de la probeta ( $Mg/m^3$ ).
- $\rho_w$ : densidad del agua a la temperatura del ensayo ( $Mg/m^3$ ).
- $m_1$ : masa de la probeta seca (g).
- $m_2$ : masa de la probeta sumergida (g).
- $m_3$ : masa de la probeta con superficie saturada seca (g).



Figura 5. 1. Determinación de la densidad aparente de las probetas. Detalle de las probetas saturándose en el baño de agua y de la pesada sumergida.

### 5.2.2. Densidad máxima

La densidad máxima se define como la masa por unidad de volumen de una mezcla bituminosa, sin incluir los huecos de aire y a una temperatura de ensayo conocida. Dicha densidad se obtuvo mediante la norma UNE-EN 12697-5 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima” (AENOR 2010). El procedimiento seguido se explica a continuación:

1. Primeramente, se pesa el picnómetro vacío con la pieza de la cabeza ( $m_1$ ) y de volumen conocido ( $V_p$ ).
2. A continuación, se coloca la muestra seca en el picnómetro, se coloca la pieza de la cabeza y se vuelve a pesar ( $m_2$ ).
3. Se llena el picnómetro de agua hasta unos 30 mm por debajo de la junta de cabeza y se aplica un vacío parcial que produzca una presión de 4 kPa o menor durante  $15 \pm 1$  minutos.
4. Una vez finalizado este proceso, se coloca la pieza de cabeza y se rellena con agua hasta la marca de referencia de la marca de cabeza.

5. Luego, se coloca el picnómetro en un baño con agua a temperatura conocida entre 60 y 180 minutos, para que la muestra y el agua del interior del picnómetro se igualen con la del baño. El nivel del agua del baño debe situarse, por lo menos, 20 mm por debajo del borde del picnómetro.
6. Se rellena el picnómetro con agua hasta la marca de la pieza de cabeza.
7. Finalmente, se saca el picnómetro del baño, se seca su superficie y se pesa ( $m_3$ ).

En la figura 5.2 se muestra la medición de temperatura del baño y el pesado del picnómetro con la pieza de cabeza y la muestra (determinación de  $m_2$ ).



Figura 5. 2. Determinación de la densidad máxima de las muestras.

Con los datos obtenidos, se calcula la densidad máxima ( $\rho_{mv}$ ) del siguiente modo:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 * V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w}$$

- $\rho_{mv}$ : densidad máxima de la mezcla ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ).
- $\rho_w$ : densidad del agua a la temperatura del ensayo ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ).
- $V_p$ : volumen del picnómetro ( $\text{m}^3$ ).
- $m_1$ : masa del picnómetro con la pieza de cabeza (g).
- $m_2$ : masa del picnómetro con la pieza de cabeza y la muestra de ensayo (g).

- $m_3$ : masa del picnómetro con la pieza de cabeza, la muestra de ensayo y agua (g).

### 5.2.3. Determinación del contenido de huecos de las probetas

A partir de la densidad máxima de la mezcla suelta y de la densidad aparente de la probeta compactada, explicadas en los apartados anteriores, se puede determinar el contenido de huecos de aire en la mezcla ( $V_m$ ) mediante la siguiente expresión:

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_{bssd}}{\rho_{mv}} * 100\% \text{ (v/v)}$$

- $\rho_{mv}$ : densidad máxima de la mezcla ( $\text{kg/m}^3$ ).
- $\rho_{bssd}$ : densidad aparente de la probeta ( $\text{kg/m}^3$ ).
- $V_m$ : contenido de huecos en mezcla expresado como un porcentaje.

Por ser analizadas en apartados posteriores, también se recogen aquí las expresiones del contenido de huecos rellenos de ligante (VFB) y el contenido de huecos del árido mineral (VMA). Como se ha comentado, estas dos propiedades, junto con  $V_m$ , tienen una gran importancia en lo que a comportamiento de la mezcla se refiere.

$$VMA = V_m + B * \frac{\rho_{bssd}}{\rho_B} \% \text{ (v/v)}$$

$$VFB = \left( \frac{B * \frac{\rho_{bssd}}{\rho_B}}{VMA} \right) * 100\% \text{ (v/v)}$$

- $\rho_{bssd}$ : densidad aparente de la probeta ( $\text{kg/m}^3$ ).
- $\rho_B$ : densidad del ligante ( $\text{kg/m}^3$ ).
- B: contenido de ligante de la probeta expresado como un porcentaje.
- $V_m$ : contenido de huecos en mezcla expresado como un porcentaje.
- VMA: contenido de huecos en el árido mineral expresado como un porcentaje.
- VFB: porcentaje de huecos rellenos con ligante existentes en el árido mineral.

### **5.3. Dotación mínima de ligante**

La dotación mínima de ligante utilizada para un contenido de árido reciclado del 0% es del 3,82%. Para un contenido del 55% este mínimo asciende al 3,94%. Finalmente, para un 100% de AR la dotación mínima es del 4%.

Estos contenidos mínimos de ligante son los mismos que los utilizados para la determinación de la temperatura y el tiempo de mezclado, y se recogen en el apartado 4.1.4.

### **5.4. Fabricación de las probetas**

La fabricación de las probetas de mezcla bituminosa templada se ha realizado conforme a las normas UNE-EN 12697-35 “Mezclado en laboratorio” (AENOR, 2006c) y UNE-EN 12697-30 “Preparación de probetas mediante compactador de impactos” (AENOR, 2013).

El proceso seguido se muestra a continuación:

- **Composición de la probeta y pesaje de la emulsión**

En primer lugar, se pesan las diferentes fracciones de árido (previamente lavado y seco) que componen la granulometría de la muestra con una precisión del 0,1%, y se juntan en una bandeja metálica que será la que se introduzca en la estufa. El polvo mineral se pesa aparte y se introduce en unos vasos para añadir directamente durante el mezclado, sin necesidad de ser calentado (figura 5.3).

Por otro lado, se pesa la cantidad necesaria de emulsión bituminosa y se introduce en unos recipientes metálicos (figura 5.3).

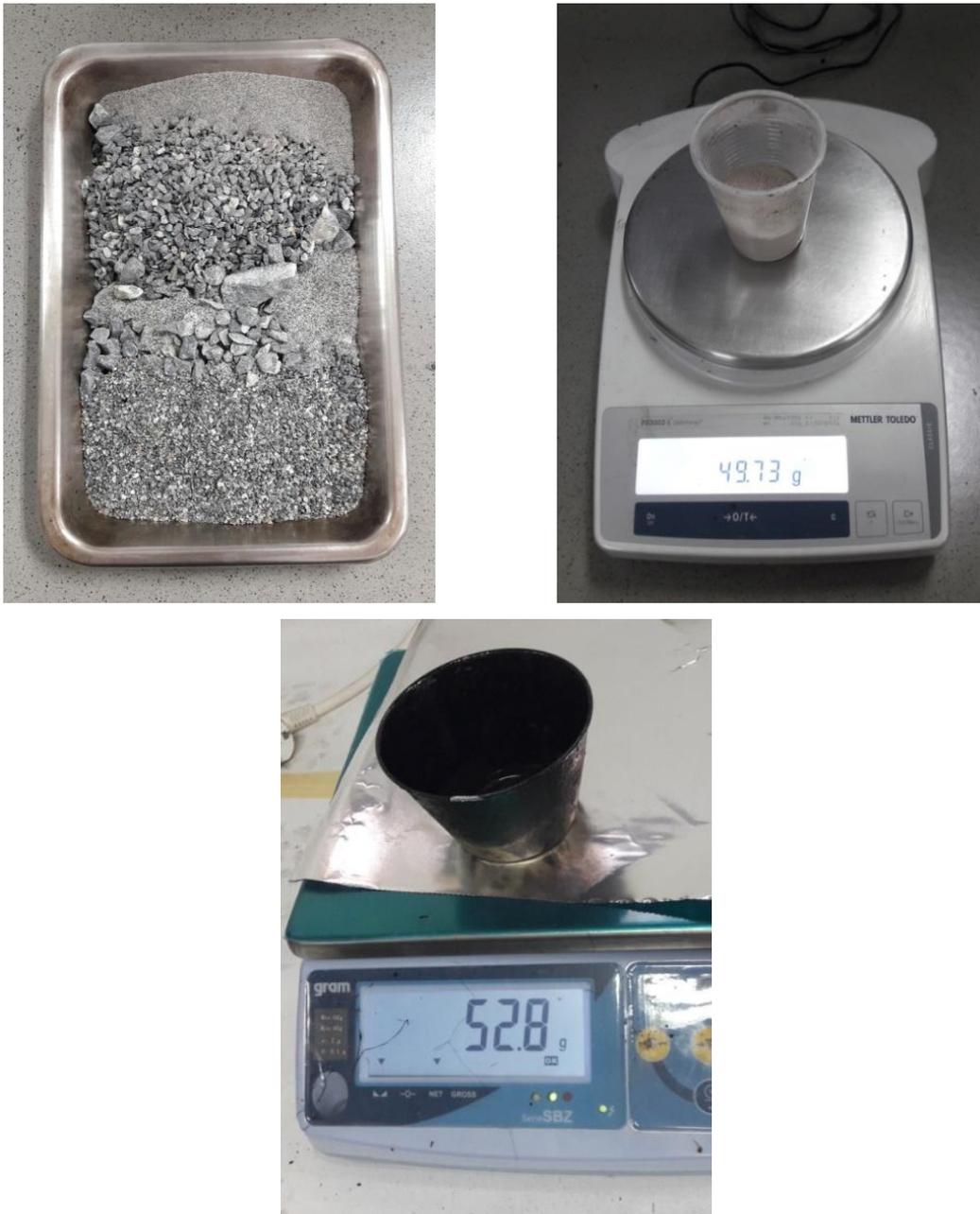


Figura 5. 3. Detalle de la bandeja con áridos y del pesaje del filler silicio y de la emulsión bituminosa.

- **Calentamiento**

Antes de proceder al mezclado y compactación, es necesario calentar los áridos (figura 5.4) y el ligante (figura 5.5) hasta que alcancen las temperaturas seleccionadas para la fabricación.



*Figura 5. 4. Calentamiento del árido.*



*Figura 5. 5. Calentamiento de la emulsión.*

Para ello se introducen en las correspondientes estufas, las bandejas que contienen las distintas fracciones del árido y los recipientes con la emulsión. Con el fin de reducir la evaporación de volátiles de la emulsión, se tapan los recipientes con papel de aluminio.

Los áridos han de permanecer en la estufa (previamente precalentada) un mínimo de 3 horas y la emulsión de 1 hora.

En el apartado 4.2.2 se explican las temperaturas a las que deben ser calentados tanto los áridos como la emulsión. En la tabla 5.3 se resumen dichas temperaturas.

	<b>0% AR</b>	<b>55% AR</b>	<b>100% AR</b>
<b>Temperatura árido (°C)</b>	105	100	110
<b>Temperatura emulsión (°C)</b>	60	65	65

Tabla 5. 3. Temperaturas de calentamiento de los áridos y de la emulsión para los distintos contenidos de AR.

Además de calentar áridos y ligante, también es preciso calentar los moldes, bases y collares de prolongación necesarios para la fabricación de las probetas, evitando así un posible enfriamiento de la mezcla durante la compactación. Los moldes, con sus bases y collares se han calentado a una temperatura similar a la de la emulsión bituminosa.

La cubeta de la amasadora también debe ser calentada previamente. En este caso, al ser una mezcla templada, se ha seleccionado una temperatura de aproximadamente 100 °C, con el fin de conseguir que la temperatura a la cual se llevará a cabo la compactación, esté comprendida entre los 70 y los 80 °C recomendados por la ATEB.

- **Mezclado**

El proceso de mezclado seguido para la obtención de la mezcla bituminosa se muestra en los siguientes puntos:

1. Primeramente, se vierten en la cubeta de la amasadora los áridos y la emulsión calentados previamente (figura 5.6a) y se mezclan durante 1 minuto.
2. Se para la amasadora y se añade el polvo mineral a temperatura ambiente (figura 5.6b).
3. Se vuelve a mezclar durante 1 minuto (figura 5.6c).
4. Se para la amasadora y se vierte la mezcla en una bandeja para facilitar su introducción en el molde en el que se llevará a cabo la compactación (figura 5.6d).



Figura 5. 6. Proceso de mezclado de la mezcla bituminosa.

Cabe mencionar, que el mezclado se ha realizado, tal y como indica la ATEB, con la tapa que cubre las palas encargadas del mezclado ligeramente abierta (figura 5.7), para facilitar la salida del vapor generado en el proceso y evitar el reflujó de agua condensada.



Figura 5. 7. Detalle de la apertura de la tapa de la amasadora durante la fabricación.

- **Compactación**

Para el proceso de compactación se ha seguido la norma UNE-EN 12697-30 (AENOR, 2013) mencionada anteriormente. Este proceso es el que sigue:

1. Se ensamblan la base, el molde y el collar de prolongación previamente calentados, y se vierte la cantidad de mezcla que dará lugar a probetas cilíndricas de  $101,6 \pm 0,1$  mm de diámetro y de  $63,5 \pm 2,5$  mm de altura. El collar es necesario dado que la muestra sin compactar ocupa un mayor volumen que la mezcla compactada. En la base del molde debe ser colocado previamente papel de filtro para evitar la adhesión de la mezcla a la base del molde durante el proceso de compactación.
2. Una vez rellenado el molde con la mezcla, se pica uniformemente sobre la superficie 25 veces para evitar la segregación y se dispone un segundo papel de filtro en la parte superior (figura 5.8 izquierda), que evitará que la mezcla quede adherida a la maza de compactación.
3. Se asegura el molde (con su base y collar de prolongación) al pedestal de compactación mediante unos dispositivos de sujeción, y se instala la maza para proceder a la compactación mediante el número de impactos requeridos (figura 5.8 derecha). En el caso de la densidad aparente, 75 golpes por cara.
4. Una vez compactada la primera cara, se retira el collar, se voltea el cuerpo del molde colocándolo sobre la base y se vuelve a colocar el collar. Seguidamente, se vuelve a instalar la maza, para aplicar el mismo número de golpes sobre la otra cara de la probeta.
5. Una vez terminada la compactación, se retiran la base y el collar del molde y la probeta y se deja enfriar a temperatura ambiente sobre una bandeja con una rejilla para facilitar la evaporación del agua contenida en la emulsión. También es necesario retirar el papel de filtro de ambas caras.
6. Al día siguiente se procede al desmoldado de las probetas.



*Figura 5. 8. Compactación de las probetas.*

Como es lógico, la compactación no se llevará a cabo en el caso de las muestras sueltas necesarias para la realización de las densidades máximas.

- **Curado**

La monografía sobre mezclas templadas con emulsión bituminosa de la ATEB, recomienda realizar un curado de la mezcla a 50 °C hasta masa constante y con una duración máxima de 3 días.

Este curado se ha llevado a cabo en estufa ventilada, y tanto para las probetas de mezcla compactada como para las de mezcla suelta, necesarias para la realización de las densidades. En la figura 5.9 se muestra el curado de las probetas.



Figura 5. 9. Curado en estufa de las probetas.

- **Cantidades de árido y emulsión empleadas**

Para finalizar este apartado, es preciso añadir que, para la realización de las probetas cilíndricas de  $101,6 \pm 0,1$  mm de diámetro y de  $63,5 \pm 2,5$  mm de altura, se han utilizado distintas cantidades de áridos, dependiendo del porcentaje de árido reciclado que incluyan las probetas (0%, 55% y 100%). Esto es debido a que el árido reciclado ocupa un mayor volumen que el árido natural, por lo que a medida que aumente su porcentaje en la mezcla, tendrá que disminuir la masa total de la probeta, con el fin de obtener probetas de la misma altura. Después de varias pruebas se obtuvieron las cantidades de árido especificadas en la tabla 5.4.

0% AR		55% AR		100% AR	
Fracción (mm)	Cantidad (g)	Fracción (mm)	Cantidad (g)	Fracción (mm)	Cantidad (g)
22/32	0,00	22/32	0,00	22/32	0,00
16/22	241,50	16/22	231,00	16/22	215,25
8/16	241,50	8/16	231,00	8/16	215,25
4/8	149,50	4/8	143,00	4/8	133,25
2/4	161,00	2/4	154,00	2/4	143,50
0,5/2	172,50	0,5/2	165,00	0,5/2	153,75
0,25/0,5	57,50	0,25/0,5	55,00	0,25/0,5	51,25
0,063/0,25	69,00	0,063/0,25	66,00	0,063/0,25	61,50
0/0,063 (filler)	57,50	0/0,063 (filler)	55,00	0/0,063 (filler)	51,25
<b>TOTAL</b>	<b>1150</b>	<b>TOTAL</b>	<b>1100</b>	<b>TOTAL</b>	<b>1025</b>

Tabla 5. 4. Cantidades de árido utilizadas en la fabricación de las probetas.

Los contenidos de ligante analizados fueron diferentes en función del porcentaje de árido reciclado a estudiar. En la tabla 5.5 se recogen las cantidades de emulsión correspondientes a cada contenido calculadas sobre el peso total de la mezcla incluido el polvo mineral.

0% AR		55% AR		100% AR	
%LIGANTE	Cantidad (g)	% LIGANTE	Cantidad (g)	%LIGANTE	Cantidad (g)
3,9	77,90	4,3	82,50	4,8	85,20
4,1	82,40	4,5	87,00	5,7	102,30
4,3	87,00	4,8	91,60	6,5	119,30
4,6	91,50	5,0	96,20	6,8	123,00
5,4	109,80	5,2	100,80	7,0	128,10
		5,4	105,40	7,2	132,30
		5,7	109,90	7,4	136,60
		6,5	128,30	7,6	140,90

Tabla 5. 5. Cantidades de emulsión utilizadas en la fabricación de las probetas.

Debido a que la dotación mínima de ligante es del 3,82% para el árido natural y a que existen experiencias anteriores con este tipo de árido, se ha decidido comenzar con un contenido del 3,9% e ir ajustándolo en función de los resultados obtenidos.

Para el 100% de AR se decidió comenzar con un contenido del 4,8% ya que según experiencias previas, en ningún caso el contenido óptimo de betún se sitúa en valores inferiores.

Finalmente, para el 55% de árido reciclado se decidió comenzar con un 4,3% dado que este tipo de mezclas presentan un comportamiento intermedio entre las del 0% y las del 100% de AR.

## 5.5. Resultados

Como se vio en el estado del arte, la durabilidad de las mezclas bituminosas, así como otras propiedades, depende en gran medida del contenido de huecos.

En los apartados posteriores, se mostrarán los resultados del estudio de las propiedades volumétricas para mezclas templadas con emulsión y distintos porcentajes de AR.

### 5.5.1. Densidad aparente

Siguiendo el procedimiento anteriormente descrito, para la determinación de la densidad aparente se ha fabricado una probeta por cada contenido de ligante recogido en la tabla 5.5 y tanto para el 0%, como para el 55% y el 100% de árido reciclado.

En la figura 5.10 se muestra el valor de la densidad aparente frente al porcentaje de ligante residual para mezclas templadas fabricadas con un 0% (mezcla de control), un 55% y un 100% de AR:

A la vista de este gráfico, se puede llegar a las conclusiones siguientes:

- La densidad aparente disminuye a medida que el porcentaje de árido reciclado aumenta. Esto sucede para cualquier contenido de ligante, y es debido a la alta porosidad del mortero adherido a los AR, que se caracteriza por su baja densidad y elevada absorción. Claramente, las menores cantidades de árido introducidas a medida que aumenta el porcentaje de AR presenta en la mezcla, también son responsables de este resultado.
- Otro aspecto importante, es que para cada contenido de árido reciclado, la densidad aparente crece a medida que aumenta el porcentaje de betún, ya que este último actúa como lubricante y favorece la acomodación de las partículas durante la compactación. Sin embargo, la densidad aparente no crece de forma indefinida, sino que alcanza un máximo a partir del cual el incremento de la cantidad de betún tiene un efecto desfavorable.
- En el caso del 100% de árido reciclado, la gráfica es bastante plana, en comparación con las del 0% y 55%, lo cual indica que el incremento de la cantidad de ligante no tiene tanta influencia sobre el crecimiento de la densidad aparente como en el caso de los otros porcentajes de AR. Esto se achaca a que la gran absorción que posee este árido, reduce la cantidad de ligante residual efectivo que funciona como lubricante entre las partículas.

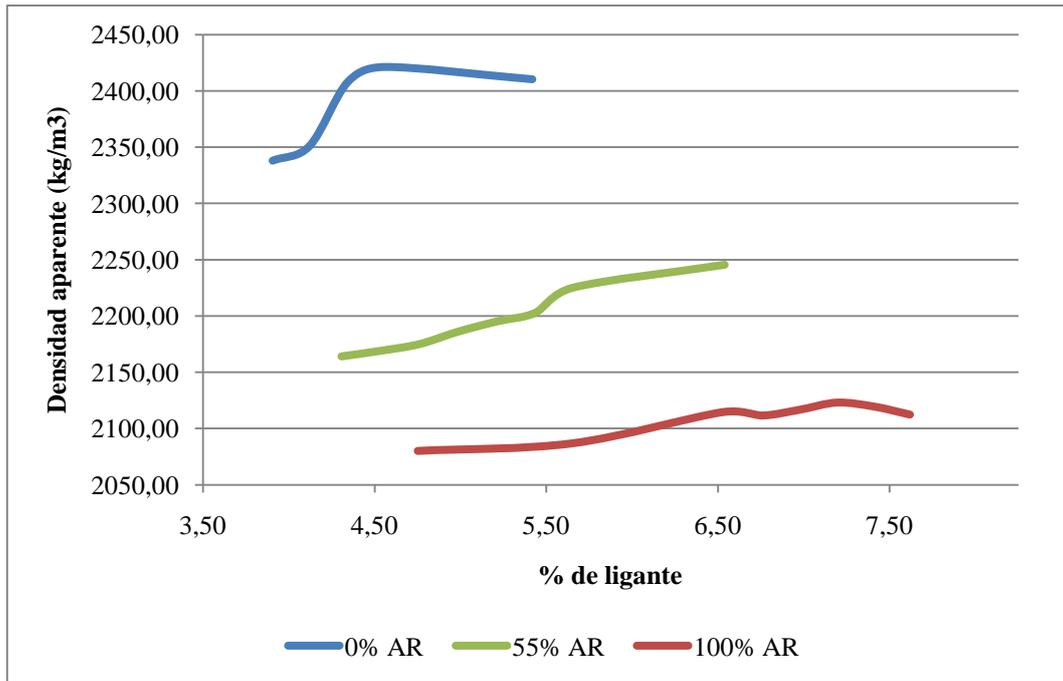


Figura 5. 10. Densidad aparente para distintos contenidos de ligante y árido reciclado.

### 5.5.2. Densidad máxima

Para la densidad máxima también se ha realizado una mezcla por cada contenido de ligante y porcentaje de árido reciclado recogidos en la tabla 5.5. El procedimiento aplicado para su determinación se describió anteriormente en el apartado 5.2.2, y los resultados obtenidos aparecen representados en la figura 5.11.

Así, la figura 5.11 muestra el valor de la densidad máxima frente al porcentaje de ligante residual para mezclas templadas sin compactar fabricadas con un 0% (mezcla de control), un 55% y un 100% de AR:

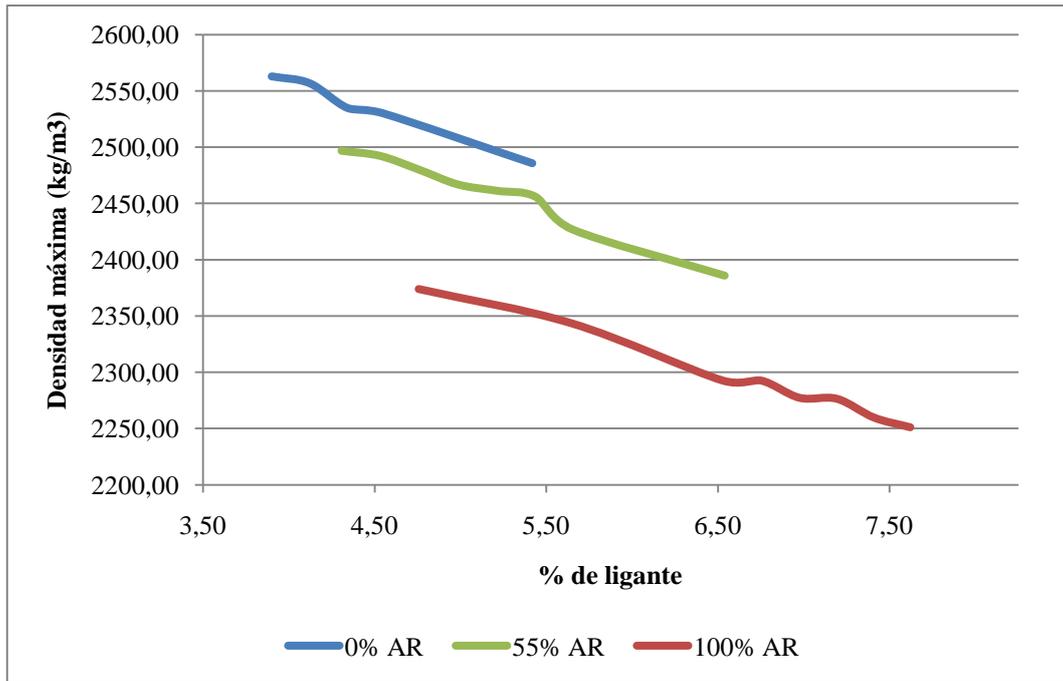


Figura 5. 11. Densidad máxima para distintos contenidos de ligante y árido reciclado.

Las principales conclusiones que podemos extraer de esta gráfica son las siguientes:

- A medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado presente en la muestra, disminuye la densidad máxima obtenida, de manera que las densidades máximas obtenidas para el 0% de reciclado serán superiores a las del 55%, y estas a su vez, superiores a las del 100% de AR. Esto es así para todos los contenidos de betún analizados, y es debido a la menor densidad que posee el árido reciclado frente al natural.
- Asimismo, dentro de un mismo porcentaje de árido reciclado, el incremento del contenido del contenido de betún, provoca una disminución en la densidad máxima obtenida, salvo pequeñas dispersiones, como consecuencia de la menor densidad del betún.
- A diferencia de lo que ocurría para la densidad aparente del 100% de árido reciclado, el contenido de ligante sí que tiene una gran importancia en la densidad máxima, existiendo una diferencia de 120 Kg/m<sup>3</sup> entre el 4,8% y el 7,6% de ligante.

### 5.5.3. Huecos en mezcla

El contenido de huecos de aire ( $V_m$ ) se define como el volumen que ocupan los huecos de aire en una probeta bituminosa, expresado en forma de porcentaje sobre el volumen total de la probeta, y es uno de los parámetros que utiliza la ATEB para evaluar las mezclas bituminosas.

Para la determinación del contenido de huecos en mezcla se utilizó la norma UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003a), como ya se mencionó al inicio de este capítulo (apartado 5.2). En el apartado 5.1 también se comentó que a la hora de evaluar  $V_m$  se va a tener en cuenta el PG-3 además de la monografía de la ATEB, ya que para la compactación de las probetas de mezcla templada se utilizó un compactador Marshall y no un compactador giratorio como recomienda la monografía mencionada.

En la gráfica siguiente (figura 5.12), se exponen los valores de  $V_m$  frente al contenido de ligante residual, obtenidos para cada porcentaje de AR (0%, 55% y 100%), así como la categoría de tráfico pesado en la que podrían ser utilizados teniendo en cuenta que se trata de una mezcla para capa intermedia y que el contenido de huecos ha de cumplir con ambas normativas (ATEB y PG-3).

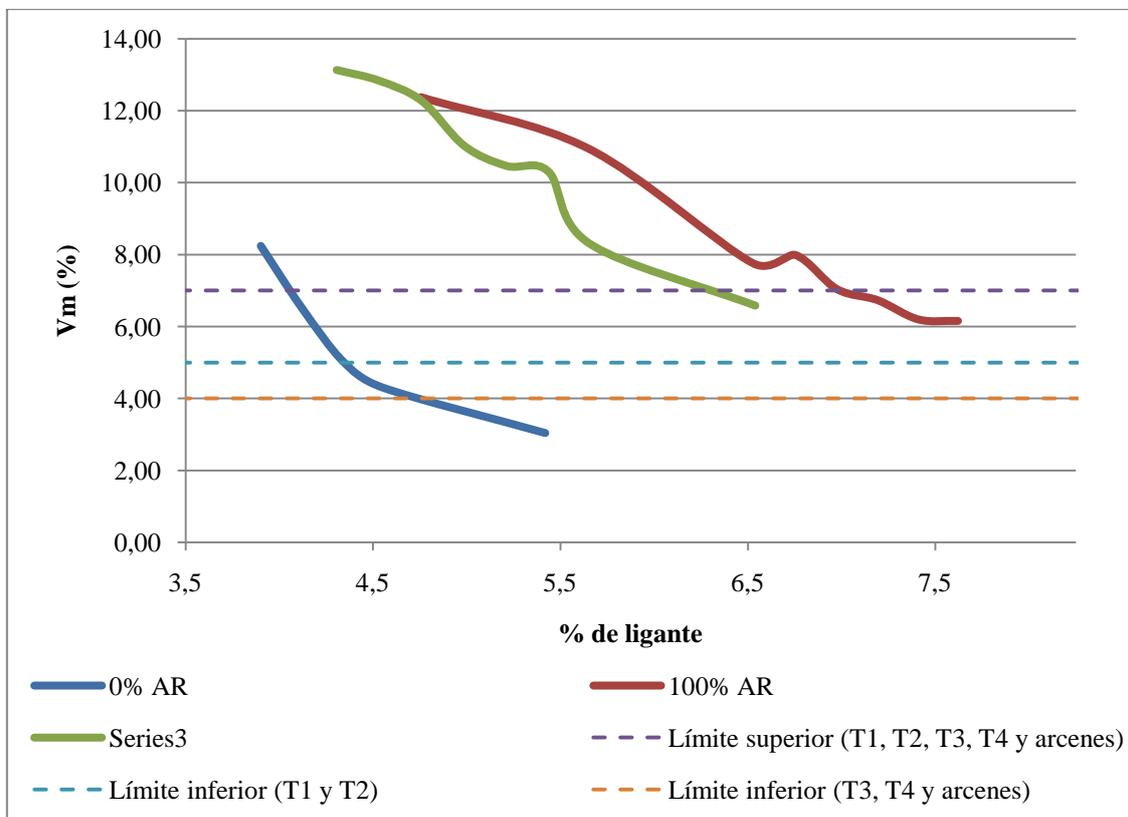


Figura 5. 12. Contenido de huecos en mezcla para distintos contenidos de ligante y de árido reciclado.

A continuación se comentan las tendencias principales que podemos extraer de la gráfica:

- Generalmente, para un contenido de betún determinado, el porcentaje de huecos en mezcla aumenta a medida que lo hace el contenido de AR. Esto es debido a que la rugosidad de los áridos reciclados hace más difícil la compactación de la mezcla. Además, la alta absorción de betún que presenta el AR reduce la cantidad de ligante efectivo y, por tanto, se produce un incremento en el contenido de huecos de aire. Además, el menor contenido de ligante efectivo, también dificulta la compactación, produciendo como consecuencia, un mayor porcentaje de huecos de aire. Esta conclusión coincide con la obtenida por Pasandín y Pérez (2013) para mezclas en caliente y por Gómez-Meijide (2015) para mezclas en frío.
- En el caso del 0% de AR, un porcentaje de betún entre el 4,1% y el 4,3%, podría ser utilizado en categorías de tráfico pesado T1 y T2, mientras que para categorías T3, T4 y arcenes, este rango es mayor (entre el 4,1% y el 4,6%).
- Para el 100% de AR, un contenido de ligante entre el 7% y el 7,6% cumple los requerimientos tanto del PG-3 como de la ATEB para ser empleado en capas intermedias de carreteras con categorías de tráfico pesado T1, T2, T3, T4 y arcenes. No se ha considerado oportuno ensayar mayores contenidos de ligante, ya que saldrían cantidades excesivas, que se alejarían del objetivo de sostenibilidad que se trata de alcanzar utilizando AR.
- Para un porcentaje de AR del 55%, el contenido de huecos en mezcla cumple para todas las categorías de tráfico mencionadas (T1, T2, T3, T4 y arcenes) para un contenido de ligante del 6,5%.
- En general, y como era de esperar, a medida que aumenta el contenido de ligante, disminuye el contenido de huecos de aire de la mezcla. Se pueden ver algunas excepciones a esta tendencia, probablemente debidas a la heterogeneidad característica del AR.

#### 5.5.4. Huecos en el árido mineral

El contenido de huecos en el árido mineral (VMA) se define como el espacio hueco intergranular que existe entre las partículas de una mezcla bituminosa previamente compactada. Incluye los huecos rellenos de aire y el volumen de ligante de la probeta y se expresa como un porcentaje del volumen total de la probeta. Como se ha comentado anteriormente, para determinarlo se ha seguido la norma UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003a).

La monografía sobre mezclas templadas de la ATEB, no hace referencia a este parámetro, por lo que no existen rangos que indiquen la adecuación o no, de los valores obtenidos. No obstante, el PG-3 marca que para mezclas en caliente, el contenido de huecos en el árido mineral deberá ser superior al 14%, por lo que este valor podría servir de referencia.

La figura 5.13 muestra el valor de VMA frente al porcentaje de ligante residual para mezclas templadas fabricadas con un 0% (mezcla de control), un 55% y un 100% de AR:

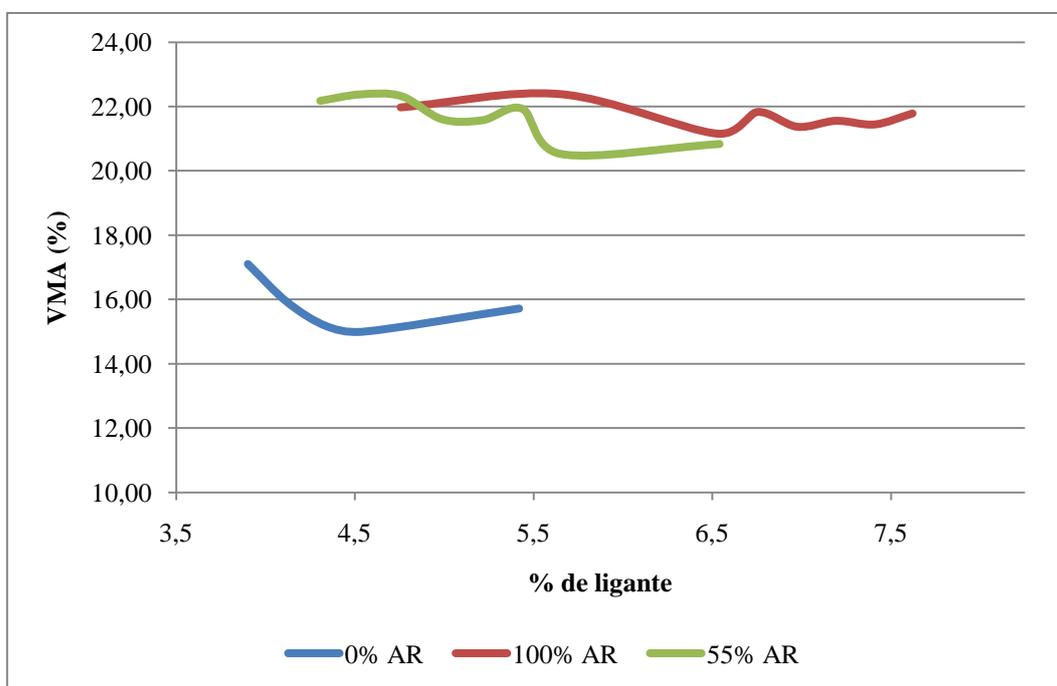


Figura 5. 13. Contenido de huecos en el árido mineral para distintos porcentajes de ligante y de árido reciclado.

A la vista de los resultados pueden destacarse los siguientes aspectos:

- Para todos los contenidos ensayados y cualquier % de AR, los valores obtenidos son superiores al 14% indicado por el PG-3. No obstante, se debe tener en cuenta que para el cálculo se ha considerado la totalidad del ligante como efectivo, lo cual no es cierto, ya que el árido (especialmente el reciclado) absorbe parte del betún. Por ello, es previsible, que si se tuviese en cuenta esta absorción de ligante, VMA fuese inferior a los valores indicados.
- Generalmente, VMA debe disminuir a medida que se incrementa el contenido de betún en la mezcla hasta alcanzar un cierto límite, a partir del cual VMA empieza a crecer. En el caso del 0% de AR este mínimo ronda el 4,5% de ligante, para el 55% de AR el valor asciende al 5,7% y para el 100% de reciclado se sitúa en torno al 6,5% de betún, aunque para este último caso no está tan claro. Las dispersiones observadas en el caso del 55% y del 100% de árido reciclado pueden ser debidas a la heterogeneidad de este tipo de árido.
- Como puede apreciarse, en general VMA es menor cuanto menor es el contenido de AR, lo cual es indicativo de la dificultad que entraña compactar el AR debido a las rugosidades de su superficie. Esta conclusión concuerda con la obtenida por Gómez-Meijide (2015) para mezclas en frío.

#### **5.5.5. Huecos rellenos de ligante**

Los huecos rellenos de ligante (VFB) se definen como el porcentaje de huecos rellenos de betún que existen en el árido mineral. Para su determinación, también se ha seguido la norma UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003a).

En el caso de este parámetro, ni la ATEB ni el PG-3 hacen referencia al rango de valores entre los que se debe situar, pero se incluyen en el presente proyecto técnico con el fin de profundizar en el conocimiento de las mezclas templadas fabricadas con AR.

La figura 5.14 muestra el valor de VFB frente al porcentaje de ligante residual para mezclas templadas fabricadas con un 0% (mezcla de control), un 55% y un 100% de AR.

Al igual que en el caso anterior, no se ha determinado el porcentaje de ligante efectivo (Pbe), sino que se ha supuesto que todo el ligante es efectivo, lo cual no es cierto. Dado

que una parte del betún es absorbido por el árido, los resultados mostrados en la gráfica no son estrictamente reales. Los valores reales serían menores.

Como se esperaba, la figura 5.14 muestra como con el incremento del contenido de betún se produce un incremento de los huecos rellenos de ligante. En los tres contenidos de árido reciclado puede observarse claramente esta tendencia, aunque con algunas dispersiones en los casos que incluyen AR, debido, como se ha comentado, a su heterogeneidad.

Una de las principales conclusiones que puede obtenerse es que, para cualquiera de los contenidos de betún ensayados, VFB es mayor, cuanto menor es el porcentaje de AR, debido a la mayor absorción de ligante por parte del AR. Esta conclusión concuerda con la obtenida por Mills-Beale y You (2010), Bushal et al. (2011), Pasandín y Pérez (2013) y Qasrawi y Asi (2016).

En la figura 5.14 puede además apreciarse que las diferencias entre las curvas de 55% de AR y 100% de AR son más acusadas a medida que aumenta el porcentaje de ligante. Esto se debe a que, como se ha explicado anteriormente, para los menores porcentajes de ligante residual la absorción de AR es tal, que apenas se percibe la diferencia entre ambas curvas.

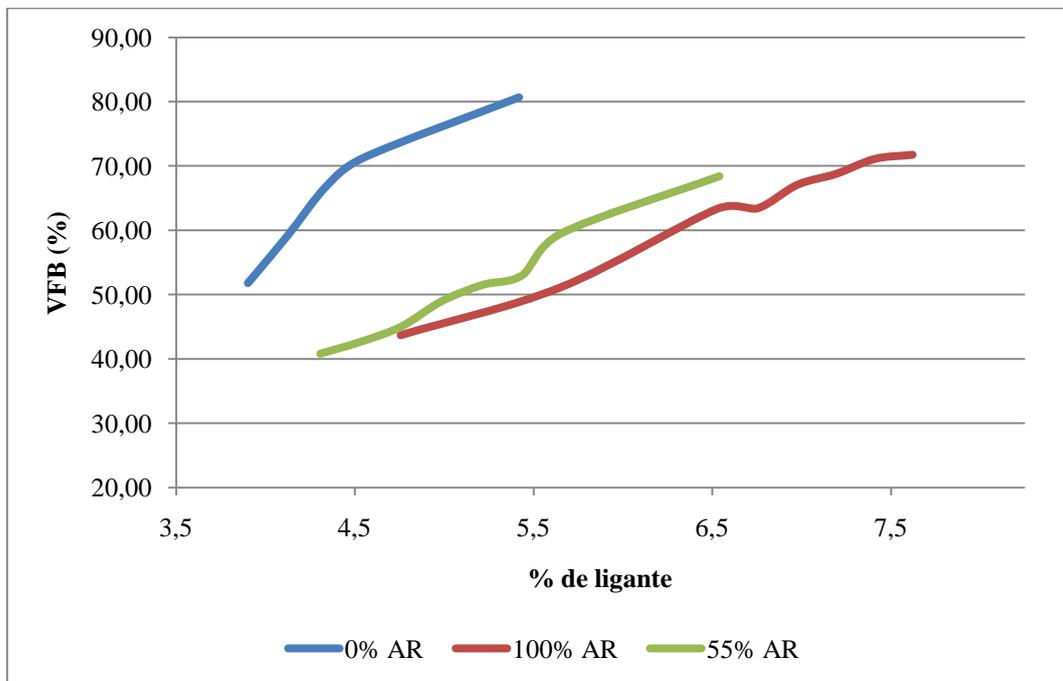


Figura 5. 14. Contenido de huecos rellenos de ligante para distintos porcentajes de ligante y de árido reciclado.

## *CAPÍTULO 6*

# **SENSIBILIDAD AL AGUA DE MEZCLAS TEMPLADAS CON ÁRIDO RECICLADO DE RCD Y ÁRIDO CONVENCIONAL**

## **6. SENSIBILIDAD AL AGUA DE MEZCLAS TEMPLADAS CON ÁRIDO RECICLADO DE RCD Y ÁRIDO CONVENCIONAL**

### **6.1. Introducción**

Como se ha visto en el capítulo 2, la sensibilidad al agua es la facilidad que presenta una mezcla a sufrir una degradación de sus propiedades como consecuencia de la presencia de agua. En general, la sensibilidad al agua es mayor cuanto mayor es el porcentaje de árido reciclado de tipo hormigón incluido en la mezcla.

La monografía titulada “Mezclas templadas con emulsión bituminosa” (ATEB, 2014), recomienda analizar la sensibilidad al agua, mediante el ensayo de tracción indirecta tras inmersión a 15°C según la norma UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009).

A partir del análisis de los resultados de este ensayo, podrá determinarse el contenido óptimo de ligante.

### **6.2. Descripción del ensayo**

Como se ha comentado, para la determinación de la sensibilidad al agua se ha utilizado el ensayo de **tracción indirecta tras inmersión a 15°C** siguiendo la norma UNE-EN 12697-12 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa” (AENOR, 2009).

En el presente proyecto técnico, se determinó la sensibilidad al agua para probetas fabricadas con un **0% de AR (mezcla de control)**, un **55% de AR** y un **100% de AR**. Para cada uno de estos porcentajes de AR se ensayaron varios contenidos de ligante.

La norma exige fabricar un mínimo de 6 probetas para cada caso que se quiera analizar. Sin embargo, se suelen fabricar algunas probetas adicionales con el fin de reducir las dispersiones en los resultados y por si fuera necesario realizar algún descarte. En la investigación que nos ocupa, se fabricaron 10 probetas para cada contenido de betón y para cada uno de los porcentajes de AR analizados (0%, 55% y 100%).

La temperatura de fabricación y tiempo de mezclado fueron los determinados en el capítulo 4.

Al igual que en el caso del contenido de huecos, la ATEB recomienda utilizar un compactador giratorio, sin embargo, debido a que no estaba disponible, se ha empleado un compactador de impactos. Así, la compactación de estas probetas se realizó mediante un compactador de impactos aplicando 50 golpes por cara.

Una vez fabricadas, compactadas y desmoldadas las probetas, el procedimiento a seguir es el que se resume en los siguientes puntos:

1. Se realiza la división de los dos subconjuntos, el “grupo seco” y el “grupo húmedo”, de tal forma que en cada uno tiene que haber 5 probetas. Para realizar esta agrupación es preciso tener en cuenta que las probetas de cada grupo han de tener una longitud y una densidad media aproximada. La diferencia de longitudes medias no será superior a 5 mm y la densidad media no superará los  $15 \text{ kg/m}^3$  de variación. Si no se cumplen estos requisitos, se reordenarán los grupos seco y húmedo, hasta encontrar una combinación que si los cumpla.
2. Las probetas del “grupo seco”, se depositan en una superficie plana al aire, a una temperatura de  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . El Laboratorio de Caminos cumple con esos requisitos de temperatura, por lo que no fue necesario utilizar una cámara climática.
3. Las probetas del “grupo húmedo” son sometidas al siguiente proceso:
  - a. Se disponen las 5 probetas en un recipiente de vacío lleno de agua destilada a  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta un nivel situado al menos 20 mm por encima de la cara superior de las probetas.
  - b. Se aplica vacío para obtener una presión absoluta (residual) de  $6,7 \pm 0,3 \text{ kPa}$  en  $10 \pm 1 \text{ min}$ . La presión se disminuye lentamente para evitar daños de expansión en las probetas. Se mantiene el vacío durante  $30 \pm 5 \text{ min}$  y luego se deja entrar la presión atmosférica en el recipiente del vacío lentamente. En la figura 6.1 se muestra el equipo utilizado en el proceso.
  - c. Las probetas se dejan sumergidas en agua otros  $30 \pm 5 \text{ min}$ .
  - d. Se calcula el volumen de las probetas de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-6 (AENOR, 2012) y se descarta cualquier probeta que haya incrementado su volumen en más de un 2%.

- e. Finalmente, se coloca el subconjunto de probetas húmedas en un baño de agua a  $40 \pm 1$  °C entre 68 y 72 horas (figura 6.2).



Figura 6. 1. Equipo de vacío. Consta, de izquierda a derecha, de un controlador del vacío, una bomba, un vaso Dewar y un recipiente de vacío.

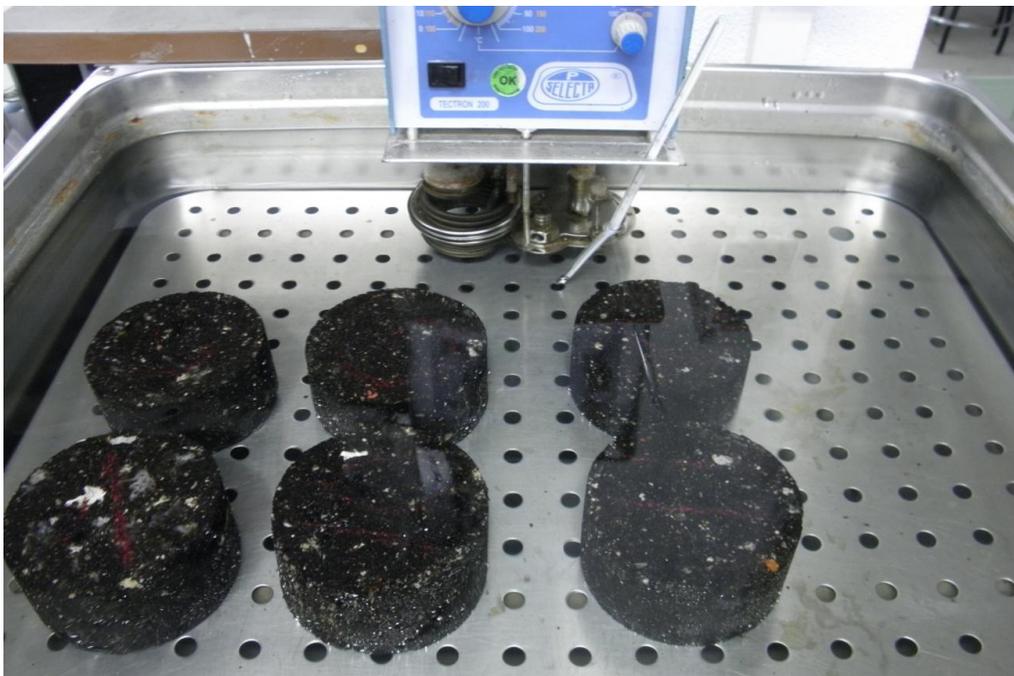


Figura 6. 2. Baño de agua a  $40 \pm 1$  °C para el acondicionamiento del grupo húmedo.

4. Se llevan las probetas, tanto las del “grupo seco” como las del “grupo húmedo” a la temperatura de ensayo 15 °C. Las probetas del “grupo seco” se colocan en una bandeja dentro de una cámara de aire controlada termoestáticamente, y las del “grupo húmedo”, en un baño dentro de la misma cámara (figura 6.3). Las probetas deben estar en la cámara durante al menos 2 horas.
5. Se secan las probetas húmedas con una toalla y se procede a la determinación de la resistencia a tracción indirecta mediante la norma UNE-EN 12697-23 (AENOR, 2004b) (figura 6.4). Este ensayo debe ser realizado dentro del minuto después de haber sacado las probetas del acondicionamiento.



Figura 6. 3. Cámara de aire controlada termoestáticamente.

6. Con los valores obtenidos se obtiene el índice de resistencia conservada a tracción indirecta (ITSR), de la siguiente forma:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100$$

donde:

ITSw = resistencia a tracción indirecta de las probetas del grupo húmedo, expresado en MPa. Es la media de la resistencia a tracción indirecta obtenida para cada una de las probetas del grupo húmedo.

ITSD = resistencia a tracción indirecta de las probetas del grupo seco, expresado en MPa. Es la media de la resistencia a tracción indirecta obtenida para cada una de las probetas del grupo seco.

Tanto el PG-3 como la ATEB (ATEB, 2014) indican que el ITSR para capa intermedia debe ser mayor o igual que 80% ( $ITSR \geq 80\%$ ).



*Figura 6. 4. Ensayo de tracción indirecta para la determinación del índice de resistencia conservada. Detalle de la rotura a tracción indirecta en la prensa estática del Laboratorio de Caminos de la ETSI Caminos, Canales y Puertos de la UDC.*

### 6.3. Resultados

A continuación se indican los resultados obtenidos para cada uno de los porcentajes de AR analizados (0%, 55% y 100%). En la presente investigación, primero se realizó el análisis de la sensibilidad al agua con el 0% de AR y luego con el 100% de AR. Al ver que este último porcentaje no cumplía con el mínimo ITSR exigido por las especificaciones, se decidió analizar un porcentaje de AR intermedio, del 55%. Por ello, los resultados se indican en este orden: 0%, 100% y 55% de AR.

- **0% árido reciclado**

En la tabla 6.1 se incluyen los resultados obtenidos para un 4,1% y un 4,3% de betún residual, ya que como se ha visto en el apartado 5.5.3, para contenidos de ligante residual inferiores no se cumple el contenido mínimo de huecos indicado por las especificaciones. Además, debido a experiencias previas con este tipo de árido se sabía que el óptimo estaría situado en torno a estos valores.

<b>% LIGANTE</b>	<b>ITSR (%)</b>	<b>ITSw (MPa)</b>	<b>ITSd (MPa)</b>
4,1	83,15	0,704	0,848
4,3	83,44	0,701	0,835

*Tabla 6. 1. Valores de resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSd), del húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 0%.*

Como puede verse, la resistencia a tracción indirecta del grupo seco (ITSd) para el 4,3% disminuye ligeramente con respecto a la del 4,1%, sin embargo ambos valores son muy parecidos y cercanos a los 0,85 MPa. Para el grupo húmedo, las resistencias a tracción indirecta (ITSw) de los dos contenidos son similares y rondan los 0,7 MPa.

En cuanto a la resistencia conservada (ITSR), se observa que es superior para el contenido de ligante más elevado, tal y como cabía esperar, ya que un mayor contenido de ligante supone un menor contenido de huecos por los que el agua pueda introducirse en la probeta.

A la vista de estos datos, se puede decir que para el 0% de árido reciclado el **contenido óptimo de betún** es del **4,1%**, ya que es el porcentaje de ligante residual más bajo que cumple huecos y sensibilidad al agua.

- **100% árido reciclado**

En este caso se ha tomado la decisión de comenzar a ensayar para un contenido de ligante residual del 6,5%, debido a experiencias anteriores con este tipo de árido y a que contenidos más bajos de ligante no cumplían los valores de contenido de huecos recogidos por las normativas (apartado 5.5.3).

En los resultados mostrados en la tabla 6.2 y en la figura 6.5 se puede apreciar que los valores de la resistencia a tracción indirecta del grupo seco para el 6,5% y el 6,8% son aproximadamente iguales, y que a partir de ahí comienzan a decrecer a medida que se aumenta el contenido de betún. Por su parte, la resistencia a tracción indirecta del grupo húmedo es más o menos constante para todos los contenidos de ligante.

<b>% LIGANTE</b>	<b>ITSR (%)</b>	<b>ITSw (MPa)</b>	<b>ITSd (MPa)</b>
6,5	55,71	0,476	0,855
6,8	57,58	0,488	0,847
7,0	60,97	0,484	0,793
7,2	70,87	0,539	0,760
7,4	68,59	0,502	0,732

*Tabla 6. 2. Valores de resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSd), del húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 100%.*

En este caso, **la resistencia conservada no llega a alcanzar el 80% mínimo** que marca el PG-3 y la ATEB **para ningún contenido de ligante**. Sin embargo, puede apreciarse un aumento del porcentaje de ITSR con el contenido de betún hasta alcanzar el 70,87% para un 7,2% de ligante. A partir de ahí el valor disminuye.

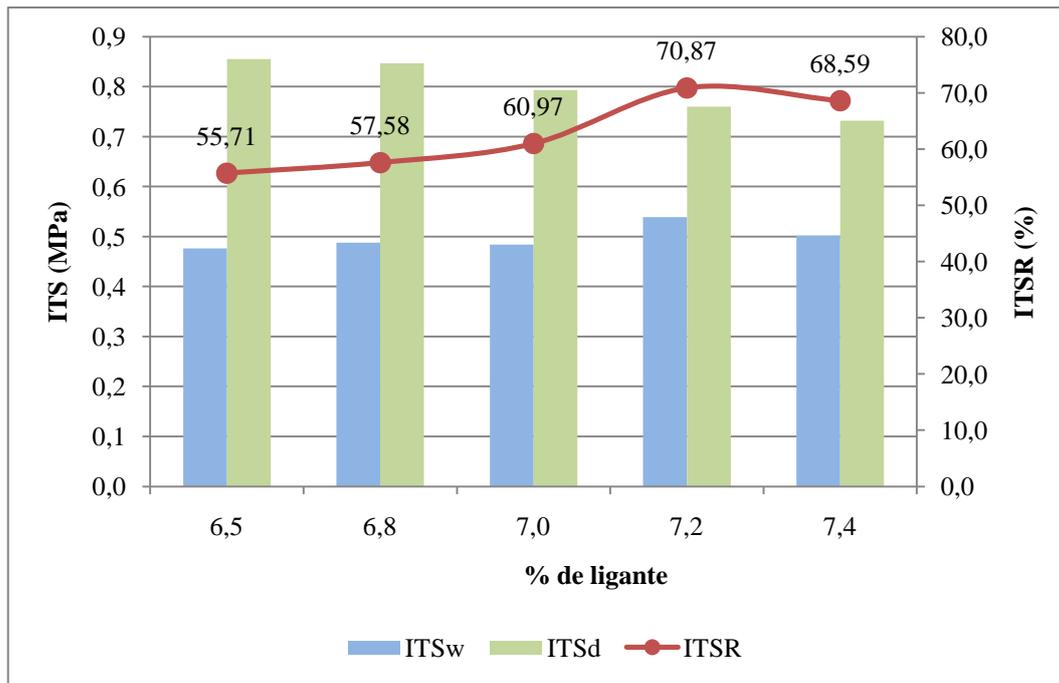


Figura 6. 5. Resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSd) y húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 100%.

- **55% de árido reciclado**

Los resultados obtenidos para un 55% de AR se muestran en la tabla 6.3 y en la figura 6.6. Cabe destacar que profundizar en el estudio de este contenido de AR, se decidieron analizar contenidos de ligante residual desde el 4,8%, a pesar de no cumplir con el contenido de huecos indicados por las normativas, con el fin de ver la tendencia general a medida que se aumenta el contenido de ligante.

% LIGANTE	ITSR (%)	ITSw (MPa)	ITSd (MPa)
4,8	65,93	0,48	0,73
5,0	66,73	0,50	0,74
5,2	84,06	0,60	0,71
5,4	92,41	0,76	0,82
5,7	82,18	0,53	0,64
6,5	89,57	0,48	0,54

Tabla 6. 3. Valores de resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSd), del húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 55%.

Se puede apreciar que para el 4,8% y el 5% de ligante los resultados de ITSw son similares. A partir de ese valor aumentan hasta alcanzar los 0.76 MPa para un contenido

de betún del 5,4% y posteriormente decrecen. En el caso del ITSD sucede algo similar, aunque con un leve descenso para el 5,2%.

El índice de resistencia conservada, por su parte, va incrementándose hasta alcanzar un 92,41% para un contenido del 5,4% de betún, posteriormente decrece y, finalmente, vuelve a aumentar hasta un 89,57%. Según esta tendencia, el contenido óptimo desde el punto de vista de la sensibilidad al agua sería el 5,4%. Sin embargo, este valor no cumple con el contenido de huecos mencionado en el apartado 5.1. Según lo analizado en el apartado 5.5.3 el primer contenido de ligante que cumpliría con el requisito de huecos en mezcla y con el requisito de sensibilidad al agua, sería el 6,5%. Por ello, como **óptimo** se tomó un contenido del **6,5%**.

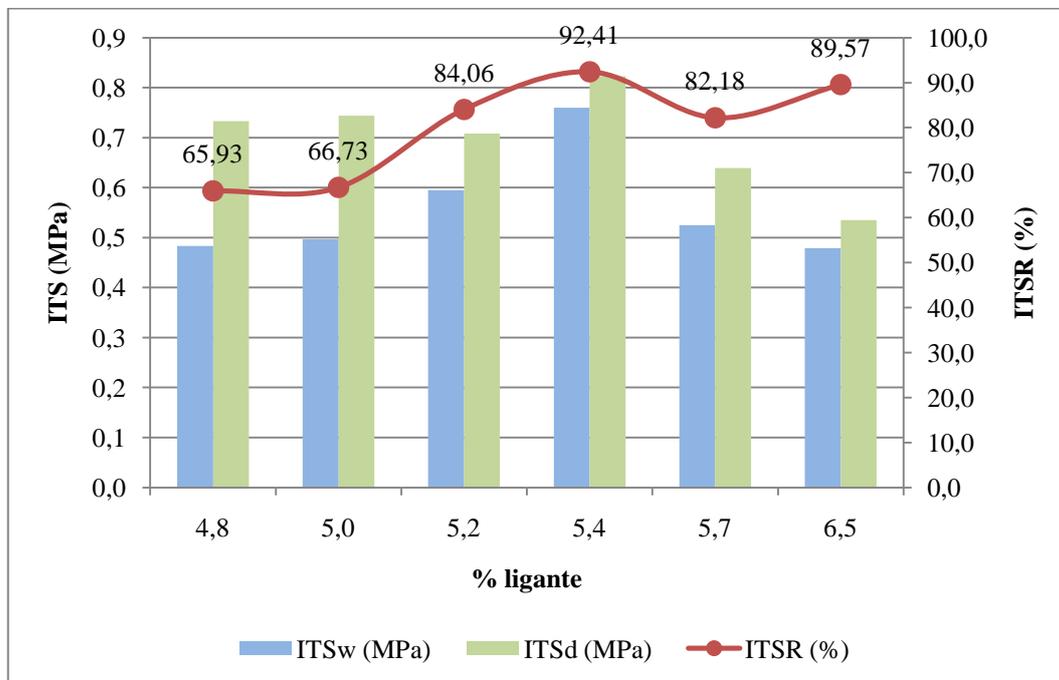


Figura 6. 6. Resistencia a tracción indirecta del subgrupo seco (ITSD) y húmedo (ITSw) y resistencia conservada (ITSR) para distintos contenidos de ligante y un porcentaje de AR del 55%.

A modo de resumen, podemos extraer las siguientes conclusiones de los datos anteriores:

- En general, los resultados de resistencia a tracción indirecta tanto para el grupo seco como para el grupo húmedo (ITSD e ITSw respectivamente), son menores a medida que aumenta el contenido de AR en la mezcla para el óptimo de betún en cada caso. Este fenómeno es más notable en el caso del ITSw. Pasandín y Pérez

(2013) llegaron en su investigación para mezclas en caliente a conclusiones similares.

- Los resultados obtenidos evidencian también, un peor comportamiento a la acción del agua de las mezclas que contienen un 100% de árido reciclado con respecto a las mezclas con un 100% árido natural.
- En el caso del 55% de árido reciclado, las resistencias conservadas son superiores al 80% marcado por la normativa a partir de un 5,2% de betún. Además, son del orden de los valores obtenidos para el 0% de AR, resultando llamativo el 92,41% obtenido para el 5,4% de ligante, que es significativamente superior a los valores de árido natural, aunque también es muy superior el contenido de ligante residual empleado.

*CAPÍTULO 7*

**PROPIEDADES MECÁNICAS  
DE MEZCLAS TEMPLADAS  
CON ÁRIDOS RECICLADOS DE  
RCD Y ÁRIDO  
CONVENCIONAL**

## **7. PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS TEMPLADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD Y ÁRIDO CONVENCIONAL**

### **7.1. Introducción**

En el presente capítulo se tratarán las diferentes propiedades mecánicas analizadas con el fin de caracterizar el comportamiento de las mezclas templadas con árido reciclado y árido convencional. Estas propiedades son el módulo resiliente y la deformación permanente.

En los siguientes apartados de este capítulo se mostrará el procedimiento seguido para la determinación de las propiedades mecánicas mencionadas y los resultados obtenidos para cada una de ellas.

### **7.2. Módulo resiliente**

Como se mencionó en el estado del arte, la rigidez es la relación que existe entre las tensiones y las deformaciones. Para el estudio de la rigidez pueden emplearse diferentes ensayos. Uno de los más utilizados es el módulo resiliente a tracción indirecta, ya que además de reproducir el comportamiento elástico de las mezclas, es el más adecuado para ser introducido en los modelos de cálculo basados en la teoría multicapa (Mamlouk y Sarofim, 1988).

El módulo resiliente se ha determinado para los dos porcentajes de AR para los cuales pudo obtenerse el contenido óptimo de ligante (apartado 6.3). Así, se determinó el módulo resiliente para un porcentaje del **0% de árido reciclado** y un contenido de ligante residual del **4,1%** (mezcla de control) y para un porcentaje del **55% de AR** y un contenido de ligante residual del **6,5%**. Se descartó analizar las mezclas fabricadas con un 100% de AR, ya que, como se vio en el apartado 6.3, no cumplían con las especificaciones relativas a la sensibilidad al agua.

### 7.2.1. Descripción del ensayo

El ensayo de módulo resiliente se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo C de la norma UNE-EN 12697-26 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez” (AENOR, 2012a), utilizando la máquina servo-neumática NU 14 de Cooper (figura 7.1).



*Figura 7. 1. Detalle de la máquina servo-neumática NU 14 de Cooper con el utillaje para la realización del ensayo de módulo resiliente.*

Para ello se fabricaron dos probetas para el contenido de AR del 0% y otras dos para el contenido del 55%. Las cantidades de ligante utilizadas en cada caso son las mencionadas en el inicio de este apartado. El diámetro de las probetas es de 101,5 mm y la altura de 64 mm para el 0% y de 67,5 mm para el 55%.

La compactación de las probetas se realizó mediante compactador de impactos y aplicando 75 golpes por cara.

Los pasos a seguir a partir de aquí se comentan brevemente a continuación:

1. Se mide el espesor de las probetas de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-29.
2. Se trazan dos diámetros sobre una de las caras planas de la probeta de manera que formaran un ángulo de  $(90 \pm 10)^\circ$  entre ellos (figura 7.2). Ambos diámetros deben ser adecuadamente identificados.



Figura 7. 2. Detalle del trazado de los dos diámetros perpendiculares.

3. Una vez llevada la probeta a la temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , se adapta la probeta al utillaje con uno de sus diámetros colocado en posición vertical tal y como se muestra en la figura 7.3. Seguidamente, se aplica una carga de onda de medio seno (figura 7.4) con un período de repetición de los impulsos de  $3 \pm 0,1$  segundos. La carga máxima utilizada ha de ser aquella que produzca una deformación transitoria máxima del  $0,005\%$ . El tiempo necesario para que la carga que se aplica aumente desde cero hasta el valor máximo se debe fijar en  $124 \pm 4$  ms.

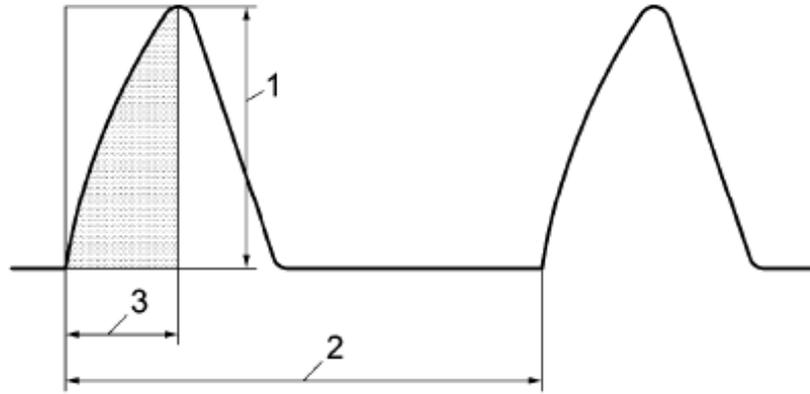
Se aplican 10 impulsos de acondicionamiento para permitir que el equipo se adapte a la magnitud y a la duración de la carga, seguidos de 5 impulsos de carga. Para cada uno de estos 5 impulsos se debe determinar el módulo de rigidez mediante la siguiente expresión:

$$E = \frac{F(v + 0,27)}{z \times h}$$

- $M_R$ : 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).
- $\nu$ : coeficiente de Poisson. Para todas las temperaturas se adoptó un valor de 0,35 (AENOR, 2012).



Figura 7. 3. Ensayo de rigidez (módulo resiliente) con un 55% de árido reciclado y un 6,5% de ligante.



1: Carga máxima / 2: Período de repetición de los impulsos / 3: Período ascendente

*Figura 7. 4. Forma del impulso de carga. Fuente: AENOR (2012a).*

4. Se ajusta el módulo de rigidez obtenido para cada uno de los 5 pulsos para tener en cuenta el factor de superficie de carga y se calcula la media de los 5 módulos ajustados.
5. Una vez obtenido el módulo para el primer diámetro, se esperan 20 minutos y se gira la probeta para poder hallar el módulo correspondiente al otro diámetro.
6. El resultado del ensayo vendrá dado por la media de los dos módulos obtenidos (uno para cada diámetro).

### 7.2.2. Resultados

Tras el ensayo, los módulos resilientes obtenidos a 20°C han sido de **6.325,5 Mpa** para el **0% de árido reciclado** y de **3.915,0 Mpa** para el **55% de árido reciclado**. Como puede observarse la sustitución parcial de árido reciclado en las fracciones más gruesas produce una reducción de la rigidez de un 40% aproximadamente. Esto coincide, según lo mencionado en el capítulo 2, con lo obtenido para mezclas en caliente por otros autores como Parnavithana y Mohajerani (2006), Mils-Beale y You (2009), Qasrawi y Asi (2016) y Radević et al. (2017). Para mezclas en frío sin embargo, Gómez-Meijide (2015) obtuvo que el hecho de utilizar árido reciclado no tiene un efecto negativo sobre la mezcla.

Para mezclas bituminosas en caliente de granulometría gruesa en España se suele tomar como referencia un valor de módulo resiliente de 5000 MPa a 20°C (Ruiz Rubio y Jofre Ibáñez, 2003). El valor obtenido para un 55% de reciclado es significativamente

inferior. No obstante, reduciendo el contenido de reciclado en mezcla se podrían llegar a obtener módulos que alcanzasen este valor medio, llegando así a un acuerdo entre calidad y sostenibilidad.

### **7.3. Deformación permanente**

Como se ha visto, la deformación permanente es sumamente importante para altas temperaturas y para bajas velocidades de aplicación de las cargas (Miro et al., 2002).

Para caracterizar el comportamiento de las mezclas bituminosas frente a la deformación permanente pueden realizarse varios ensayos, entre los que destacan el ensayo de rodadura y el ensayo cíclico de compresión uniaxial. Este último ha sido el empleado en el presente proyecto técnico.

Al igual que en el ensayo de módulo resiliente, la deformación permanente ha sido determinada para un contenido del 55% de AR y un porcentaje de betún del 6,5%, así como para un 0% de AR y un porcentaje del 4,1% de betún.

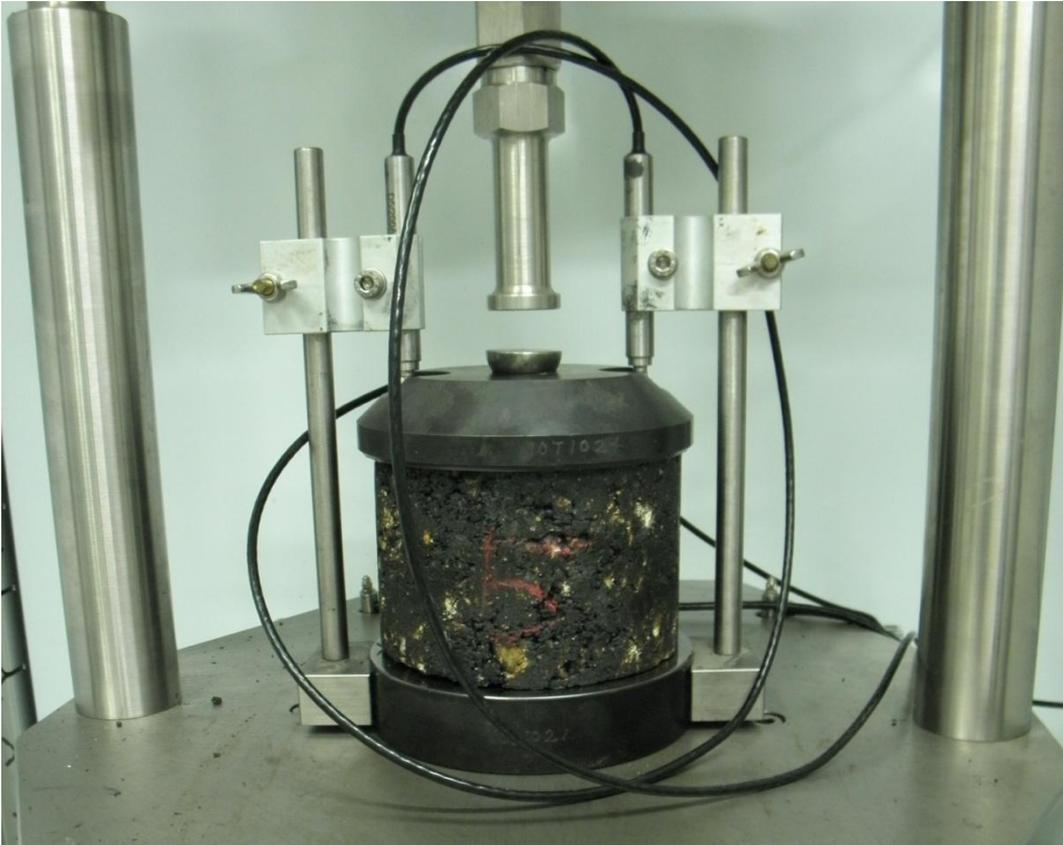
#### **7.3.1. Descripción del ensayo**

Dentro del tipo de ensayo mencionado, se ha realizado el ensayo de compresión uniaxial sin confinamiento bajo carga repetida, RLAT (“Repeated Load Axial Test” en la terminología anglosajona). El procedimiento seguido es el descrito en el documento británico DD 226:1996 (BSI, 1996).

Dado que el ensayo para obtener el módulo resiliente fue no destructivo debido a las bajas cargas aplicadas, se han utilizado las mismas probetas para determinar la resistencia a la deformación permanente. La temperatura de ensayo fue de 30°C y el proceso a seguir se describe a continuación:

1. Las probetas de 101,5 mm de diámetro y 64 o 67,5 mm de altura (en función de si sean del 0% o del 55% de árido reciclado), se colocan entre los dos platos de carga del utillaje para deformación permanente como puede verse en la figura 7.5. Con el fin de reducir el rozamiento existente entre los platos y las caras

planas de las probetas, estas fueron untadas con grasa de silicona y polvo de grafito.



*Figura 7. 5. Ensayo de compresión uniaxial sin confinamiento bajo carga repetida para un 55% de AR y un 6,5% de ligante.*

2. En primer lugar la probeta se somete a un acondicionamiento aplicando durante 600 segundos una precarga de 10 kPa.
3. Seguidamente, el documento DD 226:1996 (BSI, 1996) dice que se deben aplicar un total de 1.800 impulsos de carga axial de 100 kPa de 1 segundo de duración. Sin embargo, en este caso se aplicaron 5.400 pulsos para obtener una mejor definición de la curva de fluencia (curva que representa la evolución de la deformación permanente en función del número de pulsos de carga aplicados). Entre períodos de carga se hacen descansos de 1 segundo. La deformación de la probeta va aumentando a medida que se van aplicando los distintos impulsos de carga.
4. Para cada impulso de carga la deformación producida se divide en 4 componentes, distinguiéndose la deformación elástica ( $\epsilon_e$ ), la deformación plástica ( $\epsilon_p$ ), la deformación viscoelástica ( $\epsilon_{ve}$ ) y la deformación viscoplástica

( $\epsilon_{vp}$ ) (Lu y Wright, 1998). Esto puede ser observado con detalle en la figura 7.6. Durante el ensayo RLAT lo que se mide es la deformación no recuperable, es decir, las componentes plástica y viscoplástica.

Para el cálculo de la deformación axial se utilizó la siguiente expresión (BSI 1996):

$$\epsilon_{d,(n,T)} = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100$$

- $\epsilon_{d,(n,T)}$ : deformación axial permanente tras n aplicaciones de carga a la temperatura T en °C (%).
- $h_0$ : distancia original entre los platos de carga (mm).
- $\Delta h$ : deformación axial (mm).

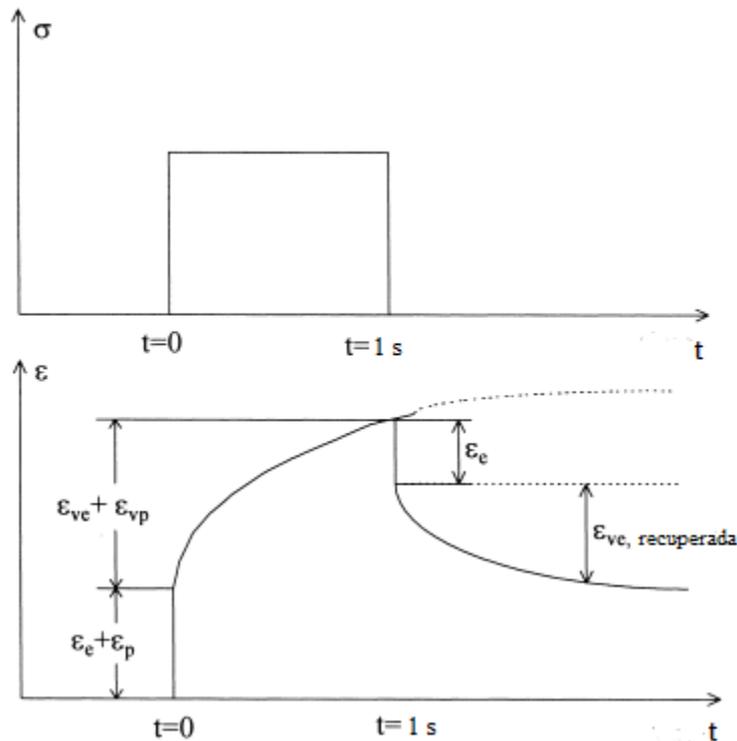


Figura 7. 6. Relación entre las tensiones ( $\sigma$ ), las deformaciones ( $\epsilon$ ) y el tiempo ( $t$ ) para un ciclo de carga. Fuente: Lu y Wright (1998).

Como se puede apreciar en la figura 7.7, en la curva de fluencia se distinguen 3 etapas, aunque en función de las condiciones de ensayo y de las características de la mezcla, podrían no aparecer alguna de las etapas (AENOR, 2006a).

- Etapa inicial o primaria: la pendiente de la curva de fluencia decrece a medida que aumenta el número de ciclos de carga.

- Etapa media o secundaria: la pendiente de la curva permanece prácticamente constante y aparece un punto de inflexión que convencionalmente se considera que representa un estado crítico del material. Una vez alcanzado este punto se produce el fallo de la mezcla.
- Etapa final o terciaria: la pendiente de la curva aumenta con el número de aplicaciones de carga.

La deformación permanente de las mezclas bituminosas se debe principalmente a dos factores: la densificación por la disminución del contenido de huecos de aire (lo cual implica una reducción de volumen) y el flujo plástico producido por el movimiento del ligante y de los áridos (sin que se produzca cambio de volumen). El flujo plástico se produce en la etapa terciaria y al número de ciclos en el que comienza se le denomina “Flow Number” (FN). El FN es un indicativo de la tendencia de la mezcla bituminosa para presentar roderas (NCHRP, 2002).

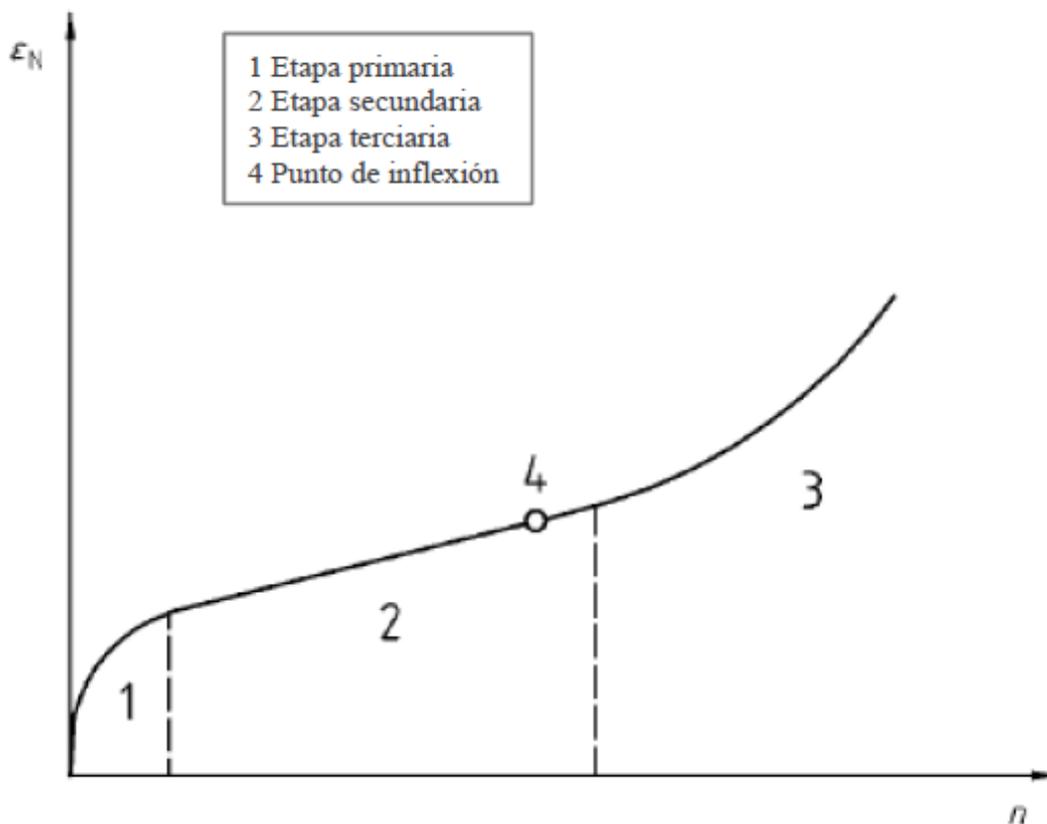


Figura 7. 7. Curva de fluencia típica. Fuente: AENOR (2006a).

### 7.3.2. Resultados

Dado que no se han encontrado especificaciones técnicas referentes a la deformación permanente de mezclas templadas, los resultados obtenidos servirán únicamente para comparar los dos tipos de mezclas entre sí. Los resultados a los que se llegó aparecen representados en el gráfico de la figura 7.8. En la figura 7.9 se muestra una media de los resultados de las dos probetas de cada contenido de AR.

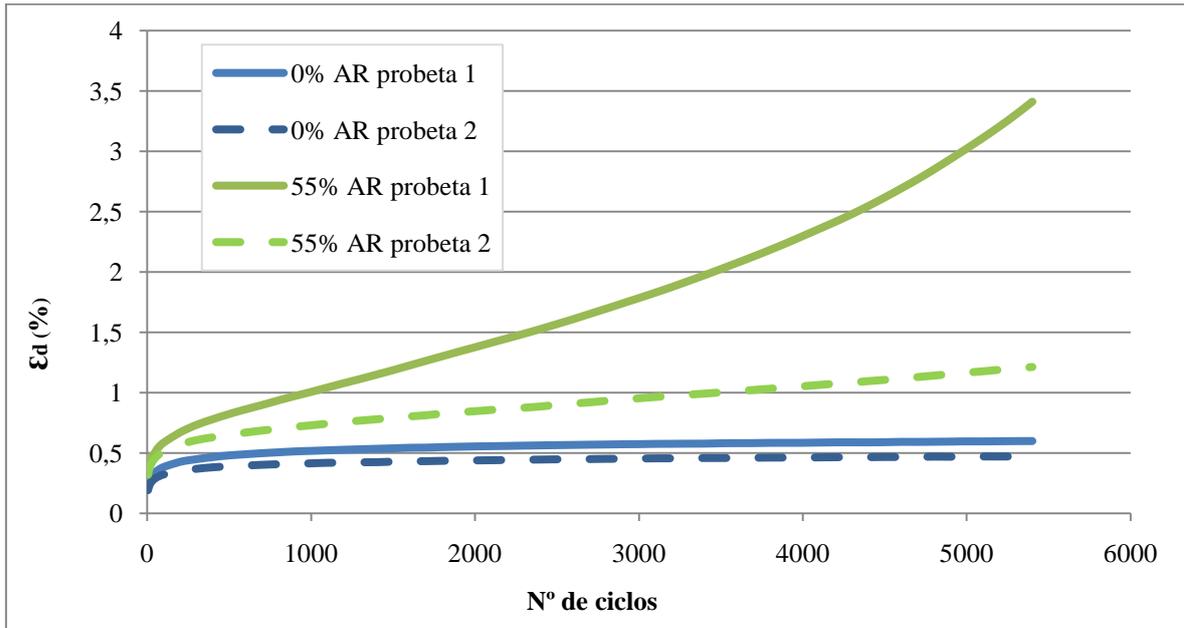


Figura 7. 8. Deformación axial permanente acumulada respecto del número de ciclos de carga para un 0% y un 55% de AR y sus contenidos óptimos de ligante.

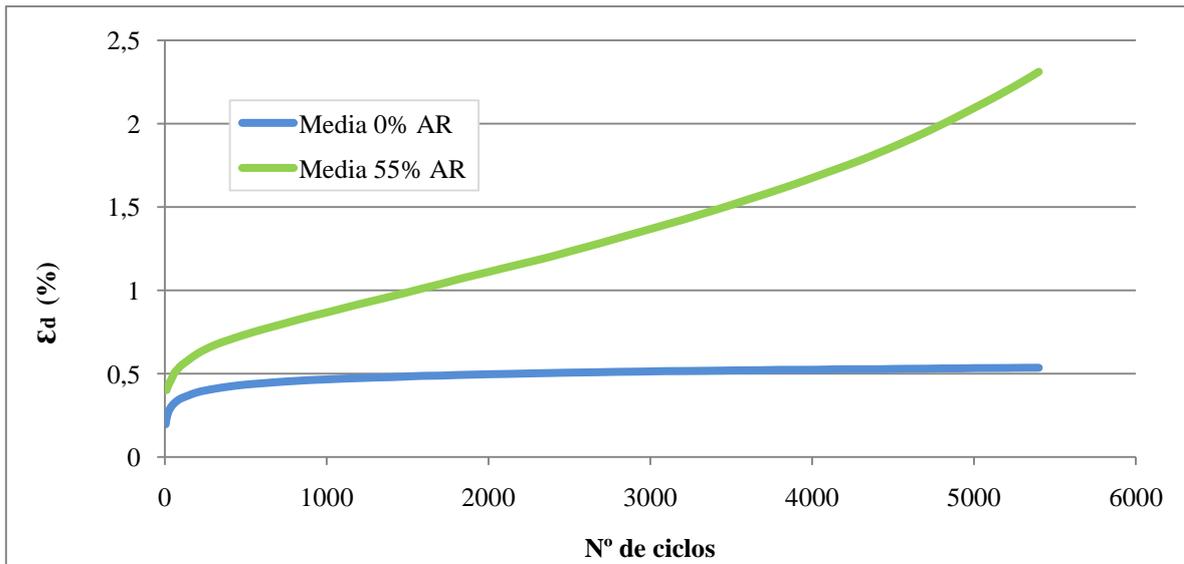


Figura 7. 9. Deformación axial permanente acumulada media de las dos probetas del 0% y del 55% de AR.

A la vista de estos datos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En el caso del 100% de árido natural, ambas probetas describen una curva de fluencia similar, existiendo como máximo, una diferencia entorno al 0,1% entre los valores de deformación axial permanente para un mismo número de ciclos. Sin embargo, para el caso del 55% de árido reciclado existe una gran dispersión en los resultados, de manera que a medida que se aumenta el número e ciclos, la separación entre las curvas de las probetas con contenidos de AR aumenta. Esto se debe probablemente a la heterogeneidad del árido reciclado.
- La deformación axial para un mismo número de ciclos es notablemente mayor en el caso de las probetas con un 55% de árido reciclado, alcanzando valores superiores al 3% en el caso de la probeta 2.
- Existe un primer tramo, entre los ciclos 0 y 600 aproximadamente, donde se produce un rápido incremento de la deformación con el número de ciclos. Esto se debe a una densificación inicial de la mezcla que, como se comentó anteriormente da lugar a un descenso del contenido de huecos y por lo tanto a una reducción de volumen. Esta densificación inicial es más notable en el caso de las probetas con árido reciclado debido a su mayor volumen de huecos de aire.
- Entre los ciclos 600 y 5.400 de las dos probetas de árido natural y de la probeta 2 del 55% de árido reciclado se produce una relación lineal entre el número de ciclos y la deformación permanente. Para la probeta 1 del 55% de AR esta relación se encuentra entre los ciclos 600 y 3.000-3.500. En este segundo tramo la densificación no se produce tan rápidamente como en el caso anterior. Además, es destacable la mayor pendiente de las probetas de reciclado frente a las del 100% de natural lo cual indica la velocidad de deformación de la mezcla una vez superada la densificación inicial. A mayor pendiente menor resistencia a la deformación permanente.
- Por último, entre los ciclos 3000 y 3500 de la probeta 1 fabricada con un 55% de reciclado, se puede apreciar un cambio en la curvatura de la curva de fluencia. El número de ciclos en el cual se produce ese punto de inflexión es el denominado

“Flow Number” y da lugar al inicio de la etapa terciaria y al flujo plástico, lo cual indica que en este caso si se llegó a producir el fallo de la probeta.

## *CAPÍTULO 8*

# **CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

## **8. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

### **8.1. Introducción**

En el presente proyecto técnico se ha analizado la viabilidad de fabricar **mezclas templadas** con un cierto porcentaje de **árido reciclado (AR)** de **residuos de construcción y demolición (RCD)**. Para ello, se ha estudiado una mezcla “**AC 22 bin S**” de utilización en **capa intermedia** de firmes de carreteras.

En primer lugar se fabricaron mezclas con un 100% de árido natural silicio (**mezcla de control**) y mezclas con un **100% de árido reciclado** para distintos contenidos de ligante, que se han ido reajustando en función de los resultados obtenidos (apartado 5.4). Dado que para un 100% de AR ningún contenido de betún cumplía los requerimientos de sensibilidad al agua de las normativas, se dosificaron mezclas con un **55% de árido reciclado** en las fracciones más gruesas.

Finalmente, para los contenidos de ligante óptimos del 0% y del 55% de árido reciclado, se analizó el módulo dinámico y el comportamiento a deformación permanente de las mezclas.

### **8.2. Conclusiones relativas a las propiedades volumétricas de la mezcla**

Se ha apreciado una disminución en la densidad aparente de la mezcla con el aumento del porcentaje de árido reciclado para todos los contenidos de ligante. Esto es debido a la elevada porosidad del mortero adherido a los AR.

Asimismo, para un contenido de AR determinado, la densidad aparente crece con la cantidad de ligante debido a que este favorece la acomodación de las partículas durante la compactación. Este crecimiento alcanza un máximo a partir del cual el aumento del porcentaje de betún tiene un efecto desfavorable.

En el caso de la densidad máxima, sucede lo contrario. A medida que aumenta el contenido de árido reciclado en la mezcla disminuye la densidad máxima, debido a la menor densidad que posee el árido reciclado frente al natural.

Para un mismo contenido de AR también se produce una reducción en la densidad máxima a medida que aumenta el contenido de betún en la mezcla, como consecuencia

de la menor densidad del betún.

También se comprobó que el porcentaje de huecos en mezcla o huecos de aire ( $V_m$ ) aumenta con el contenido de AR, lo cual es debido a que la rugosidad de los áridos reciclados dificulta la compactación de la mezcla. Además, la elevada absorción de betún por parte de este tipo de árido, reduce el ligante efectivo contribuyendo también a incrementar el contenido de huecos de aire.

No obstante, para las siguientes combinaciones estudiadas se ha logrado el cumplimiento de los rangos marcados tanto de la ATEB como por el PG-3 para el contenido de huecos de aire:

- Un 0% de AR con un porcentaje de betún entre el 4,1% y el 4,3%, podría ser empleado en categorías de tráfico pesado T1 y T2. Para categorías de tráfico T3, T4 y arcenes, el rango aumenta al 4,1% -4,6%.
- Un 100% de AR con un contenido de betún entre el 7% y el 7,6% podría ser empleado en carreteras con categorías de tráfico pesado T1, T2, T3, T4 y arcenes.
- Un 55% de AR, con un contenido de betún del 6,5% podría ser empleado para categorías de tráfico pesado T1, T2, T3, T4 y arcenes.

En cuanto al contenido de huecos en el árido mineral (VMA), todos los contenidos ensayados cumplen las exigencias del PG-3. Además, el VMA en general es menor cuanto menor es el contenido de árido reciclado, lo cual indica la difícil compactación del AR mencionada antes.

El contenido de huecos rellenos de ligante (VFB) también fue estudiado a pesar de que no existe ninguna referencia relativa al rango de valores entre los que se debe situar. La principal conclusión a la que se llegó es que VFB es mayor cuanto menor es el porcentaje de AR en mezcla, debido a la mayor absorción de ligante por parte del AR.

Es importante mencionar, que para el cálculo del VMA y del VFB se ha considerado como efectivo la totalidad del betún, es decir, no se ha tenido en cuenta el ligante realmente absorbido. Por ello, los valores de estos dos parámetros son superiores a los que se obtendrían si se hubiese tenido en cuenta la absorción de ligante.

### 8.3. Conclusiones relativas a la sensibilidad al agua

La sensibilidad al agua se ha evaluado mediante el ensayo de rotura a tracción indirecta tras inmersión.

De este ensayo se concluyó que, como cabría esperar, un contenido del 100% de AR en la mezcla, reduce considerablemente la resistencia a la acción del agua con respecto a las mezclas realizadas con un 100% de árido natural.

Además, para las mezclas fabricadas con un 100% de AR, el índice de resistencia conservada (ITSR) es inferior al 80% marcado tanto por el PG-3 como por la ATEB, para todos los contenidos de ligante analizados.

El valor de ITSR más alto conseguido para mezclas en las que el 100% del árido es reciclado es igual al 70,87% y se corresponde con un 7,2% de ligante.

En las mezclas con un 0% de AR se obtuvo un valor de ITSR del 83,15% para un contenido del 4,1% de betún y del 83,44% para un 4,3%.

Para un 55% de árido reciclado, el ITRS es superior al 80% para los contenidos de betún analizados situados entre el 5,2% y el 6,5%. Como óptimo de ligante para las mezclas fabricadas con un 55% de AR, se ha escogido un 6,5% ya que es el primero que cumple con los requisitos de huecos de aire y sensibilidad al agua.

Puede apreciarse claramente, como las mezclas fabricadas con un 55% de AR, demandan un mayor contenido de ligante que las mezclas fabricadas con un 0% de AR (mezcla de control), para alcanzar el cumplimiento de la sensibilidad al agua. Por tanto, puede concluirse que cuanto **mayores son los contenidos de AR, mayor será la demanda de ligante.**

De los resultados obtenidos también se puede comprobar que, para el contenido óptimo de betún de cada porcentaje de AR, las resistencias a tracción indirecta del grupo seco (ITSD) y del grupo húmedo (ITSw) son menores a medida que aumenta la cantidad de AR en mezcla. Por tanto, puede concluirse que con el **incremento del porcentaje de AR se reduce la resistencia a tracción indirecta de la mezcla.**

## **8.4. Conclusiones relativas a las propiedades mecánicas**

### **8.4.1. Rigidez**

Para el análisis de la rigidez se empleó el ensayo de módulo resiliente a tracción indirecta a 20°C, para los contenidos de 0% (mezcla de control) y 55% de árido reciclado, con el contenido óptimo de ligante.

Los resultados obtenidos muestran claramente que la **sustitución de árido reciclado en las fracciones más gruesas produce una reducción de la rigidez** del orden del 40%.

### **8.4.2. Deformación permanente**

Para examinar el comportamiento frente a la deformación permanente, se ha utilizado el ensayo de compresión uniaxial sin confinamiento bajo carga repetida a 30°C. El ensayo se llevó a cabo para 2 probetas fabricadas con un 55% de AR y otras 2 probetas fabricadas con un 0% de AR (mezcla de control). En todos los casos las probetas se fabricaron con el contenido óptimo de ligante.

Durante la realización del ensayo solo se produjo fallo, es decir, solo se produjo el cambio de curvatura en la curva de fluencia, en una de las probetas fabricadas con un contenido del 55% de AR. Para esta probeta se llegaron a alcanzar deformaciones superiores al 3% tras 5400 ciclos de carga.

Para las tres probetas restantes la deformación permanente solo llegó a producirse por densificación, sin que se produjera flujo plástico y, por lo tanto, sin que llegara a alcanzarse el punto de inflexión de la curva de fluencia. En todas estas probetas la deformación final, tras 5400 ciclos de carga, se sitúa dentro de unos límites aceptables, no siendo nunca superior al 1,5%.

Como era previsible, la variabilidad de los resultados es mayor en el caso de mezclas fabricadas con un 55% de AR, debido a la propia heterogeneidad del AR.

Además, las curvas correspondientes a las probetas con un 55% de AR presentan una mayor pendiente de deformación que las de árido natural una vez transcurrida la densificación inicial. Esto es indicativo de una mayor velocidad de deformación y de una menor resistencia a la deformación permanente de las mezclas con árido reciclado.

Dados los resultados, al **ser más susceptibles a la deformación plástica las mezclas fabricadas con un 55% de AR**, no se recomienda su empleo en climas excesivamente cálidos o en zonas en las que el tráfico de vehículos pesados pueda ser muy elevado y canalizado, como por ejemplo en carreteras de acceso a polígonos industriales, etc.

### **8.5. Recomendaciones**

Para el empleo de áridos reciclados en la fabricación de mezclas bituminosas templadas se proponen las siguientes recomendaciones:

- Debido a la gran heterogeneidad de los AR, es precisa una buena caracterización de los mismos cuando se pretendan utilizar en mezclas bituminosas templadas, ya que sus características pueden variar en función de su procedencia.
- Emplear AR en las fracciones gruesas de la mezcla, debido a que en estas fracciones es más sencillo eliminar las impurezas. Además, las fracciones finas presentan una mayor absorción tanto de agua como de ligante y son más sensibles a los fenómenos de sensibilidad al agua.
- Seleccionar de forma adecuada el árido natural a combinar con el AR, de manera que presente una buena resistencia a la fragmentación y a la acción del agua.
- Determinar cuidadosamente el tiempo de mezclado de este tipo de mezclas, debido a que la alta porosidad e irregularidad de los AR hacen más complicada su envuelta con el ligante.
- Utilizar emulsiones de rotura lenta, ya que las temperaturas de mezclado (cerca de los 100°C) favorecen la evaporación del fluidificante de la emulsión, dificultando la envuelta del árido con el betún resultante.
- Limitar el contenido de AR en las mezclas bituminosas templadas. Para mezclas tipo AC 22 bin S no sería recomendable superar el 55% de AR en ningún caso ya que, además de consumir una mayor cantidad de betún y producir fuertes dispersiones en los resultados, daría lugar a rigideces demasiado bajas y a deformaciones permanentes excesivas.
- Utilizar este tipo de mezclas en carreteras de tráfico medio/bajo, en climas no

excesivamente cálidos y en zonas donde el tráfico pesado no esté canalizado.

- Utilizar siempre 5 probetas para el grupo seco y otras 5 para el grupo húmedo en el ensayo de tracción indirecta, debido a la heterogeneidad del árido reciclado (en lugar de quedarse con las 3 indicadas en la norma)
- Crear una normativa técnica que regule la fabricación de mezclas templadas.

### **8.6. Futuras líneas de investigación**

Como líneas de investigación futuras se plantean las siguientes:

- Completar los ensayos realizados utilizando una mayor variedad de contenidos de AR. También sería adecuado, el análisis de otras propiedades, como la resistencia a la fatiga, para completar la caracterización del comportamiento de las mezclas templadas con árido reciclado.
- Realizar un estudio similar utilizando otro tipo de árido natural (como un árido calizo) y otros tipos de emulsión (emulsiones fabricadas con betunes de distintas durezas, con betunes modificados...).
- Analizar la posibilidad de utilizar AR en otro tipo de mezclas (por ejemplo, mezclas abiertas) o para otro tipo de capas (rodadura y base).
- Realizar algunos tramos de prueba para ver el comportamiento de este tipo de mezclas frente a las condiciones climáticas y a las cargas de tráfico reales.

*CAPÍTULO 9*  
**BIBLIOGRAFÍA**

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AENOR (1997). UNE-EN 933-3:1997. “Determinación de la forma de las partículas. Índice de Lajas”.
- [2] AENOR (1998). UNE-EN 933-1:1998. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”.
- [3] AENOR (1999). UNE-EN 933-5:1999. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso”.
- [4] AENOR (2000). UNE-EN 933-8:2000. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente del arena”.
- [5] AENOR (2003a). 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”.
- [6] AENOR (2003b). UNE-EN 12697-29 “Mezclas Bituminosas. Métodos De Ensayo Para Mezcla Bituminosa En Caliente. Parte 29: Determinación de las dimensiones de las probetas bituminosas”.
- [7] AENOR (2004a). Norma UNE-EN 933-3/A1:2004. “Determinación de la forma de las partículas. Índice de Lajas”.
- [8] AENOR (2004b). 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”.
- [9] AENOR (2005). UNE-EN 933-5:1999;/A1:2005. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso”.
- [10] AENOR (2006a). UNE-EN 12697-25. “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 25: Ensayo de compresión cíclico”.

- [11] AENOR (2006b). UNE-EN 933-1:1998/A1:2006. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”.
- [12] AENOR (2006c). UNE-EN 12697-35 “Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 35: Mezclado en laboratorio”.
- [13] AENOR (2007). UNE-EN 1097-2:1999/A1:2007. “Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación”.
- [14] AENOR (2009). 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”.
- [15] AENOR (2010). UNE-EN 12697-5 “Mezclas Bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima”.
- [16] AENOR (2012a). UNE-EN 12697-26 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez”.
- [17] 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”.
- [18] AENOR (2013). UNE-EN 12697-30 “Mezclas Bituminosas. métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de probetas mediante compactador de impactos”.
- [19] 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”.
- [20] 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.

- [21] 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.
- [22] ATEB. Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (2014). “Monografía sobre mezclas templadas con emulsión bituminosa”.
- [23] Bardesi, A.; Soto, J. A. (2010). “Mezclas bituminosas a baja temperatura: mezclas en frío, templadas y semicalientes”. *Ingeopres*, (191), 16-26.
- [24] Behnood, A.; Gharehveran, M. M.; Asl, F. G.; Ameri, M. (2015). “Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash”. *Construction and Building Materials*, 96, 172-180.
- [25] Bhusal, S.; Li, X.; Wen, H. (2011). “Evaluation of Effects of Recycled Concrete Aggregate on Volumetrics of Hot-Mix Asphalt”. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Record* 2205 (3), p. 36-39.
- [26] Botella, R.; Pérez-Jiménez, F.; Miró, R., Guisado-Mateo, F.; Ramírez Rodríguez, A. (2016). “Characterization of Half-Warm-Mix Asphalt with High Rates of Reclaimed Asphalt Pavement”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2575), 168-174.
- [27] BSI (1996). Draft for Development DD 226:1996. “Method for determining resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subject to unconfined dynamic loading”.
- [28] Caro, S.; Masad, E.; Bhasin, A.; Little, D.N. (2008). “Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms”. *International Journal of Pavement Engineering* 9 (2), p. 81-88.
- [29] CEDEX (2014). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. “Catálogo de residuos utilizables en construcción”.
- [30] CEN (2009). EN 933-11:2009/AC 2009. “Test for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate”.

- [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] Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Comunidad de Madrid. (2009) “Plan regional de residuos de construcción y demolición (2006-2016)”
- [33] Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestruturas. Xunta de Galicia. (2013). “Programa de gestión de residuos de construcción y demolición de Galicia 2013-2016”.
- [34] Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. (2005). “Programa de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición de Galicia 2005-2007”.
- [35] Di Benedetto, H.; De La Roche, C.; Baaj, H.; Pronk, A.; Lundström, R. (2004) “Fatigue of bituminous mixtures”. *Materials and Structures* 37, p.202-216.
- [36] EAPA. European Asphalt Pavement Association (2005). Low temperature asphalt.
- [37] European Commission (2011a). “Waste” [online]. Disponible en la web: [http://ec.europa.eu/commission/index\\_en](http://ec.europa.eu/commission/index_en). Acceso: 05/07/2017.
- [38] European Commission. Directorate-General Environment (2011b). “Management Plan 2011 DG Environment”.
- [39] Franesqui García, M. Á. (2009). “Tecnologías e investigación en mezclas asfálticas de baja temperatura”. *Ingeopres*, (185), 16-23.
- [40] Garba, R. (2002). “Permanent Deformation Properties of Asphalt Mixtures”. NVF conference, 28 June- 2 July, Reykjavik, Iceland.
- [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] Goh, S. W.; You, Z. (2011). “Mechanical properties of porous asphalt pavement materials with warm mix asphalt and RAP”. *Journal of Transportation Engineering*, 138(1), 90-97.
- [43] 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.
- [44] Gómez-Meijide, B.; Pérez, I. (2015). “Nonlinear elastic behavior of bitumen emulsion-stabilized materials with C&D waste aggregates”. *Construction and Building Materials*, 98, 853-863.
- [45] Gómez-Meijide, B.; Pérez, I.; Airey, G.; Thom, N. (2015). “Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste”. *Construction and Building Materials*, 77, 168-178.
- [46] Gómez-Meijide, B.; Pérez, I.; Pasandín, A. R. (2016). “Recycled construction and demolition waste in cold asphalt mixtures: evolutionary properties”. *Journal of Cleaner Production*, 112, 588-598.
- [47] Khandal, P.S.; Chakraborty, S. (1996). “Evaluation of voids in the mineral aggregate for HMA paving mixtures”. NCAT Report 96-4.
- [48] Lee, C.H.; Du, J.C.; Shen, D.H. (2012). “Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt”. *Construction and Building Materials* 28 (1), p. 66-71.
- [49] Lu, Y.; Wright, P.J. (1998). “Numerical approach of visco-elastoplastic analysis for asphalt mixtures”. *Computers and Structures* 69 (2), p. 139-147
- [50] Mamlouk, M.S.; Sarofim, R.T. (1988). “Modulus of Asphalt Mixtures – An Unresolved Dilemma”. En 67<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- [51] Martínez-Díaz, M.; Pérez, I.; Romera-Rodríguez, L. E. (2013). “Revisión de las nuevas tecnologías de fabricación de mezclas bituminosas a baja temperatura”. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 88(3).

- [52] Mills-Beale, J.; You, Z. (2010). “The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates”. *Construction and Building Materials* 24 (3), p. 230-235.
- [53] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015). *Plan Estatal Marco De Gestión De Residuos (PEMAR) 2016-2022*.
- [54] Ministerio de Fomento (2015). *Pliego De Prescripciones Técnicas Para Obras De Carreteras y Puentes (PG-3)*.
- [55] Ministerio de Medio Ambiente (2001). *Plan Nacional De Residuos De Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006*.
- [56] 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*.
- [57] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2008). *Plan Nacional Integrado De Residuos De España (PNIR) 2008-2015*.
- [58] Miró Recasens, J. R.; Pérez Jiménez, F. E.; Olivier, M.; Moutier, F. (2002). “Evaluación de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas formuladas a partir de la normativa española y francesa”.
- [59] Mogawer, W.; Austerman, A.; Mohammad, L.; Kutay, M. E. (2013). “Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixtures”. *Road Materials and Pavement Design*, 14 (sup2), 129-147.
- [60] Mrugała, J.; Iwański, M. M. (2015). “Resistance to permanent deformation of asphalt concrete with FT wax modified foamed bitumen”. *Procedia Engineering*, 108, 459-466.
- [61] Muniz de Farias, M.; Quiñones Sinisterra, F.; Gómez Jiménez, A.M.; Ribeiro e Souza, M.V.; Farias Falcão, P.R. (2012). “Influence of Asphalt Rubber on the Crushing of Recycled Aggregates Used in Dense HMA”. *Proceedings of Asphalt Rubber*.

- [62] 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.
- [63] NLT (1976). *Normas NLT (1976). Ensayos de carreteras*. Dirección General de Carreteras. Segunda Edición. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid, España
- [64] Ossa, A.; García, J. L.; Botero, E. (2016). "Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry". *Journal of Cleaner Production*, 135, 379-386.
- [65] Paravithana, S.; Mohajerani, A. (2006). "Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete" *Resources Conservation & Recycling* 48, p. 1-12.
- [66] Pasandín, A. R.; Pérez, I. (2013). "Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste". *Construction and Building Materials*, 43, 497-505.
- [67] Pasandín, A. R.; Pérez, I.; Oliveira, J. R.; Silva, H. M.; Pereira, P. A. (2015). "Influence of ageing on the properties of bitumen from asphalt mixtures with recycled concrete aggregates". *Journal of Cleaner Production*, 101, 165-173.
- [68] Pasetto, M.; Baldo, N. (2010). "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags". *Journal of Hazardous Materials* 181, p. 938-948
- [69] 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, p. 165-174.
- [70] Pérez, I.; R. Pasandín, A.; Gallego, J. (2012a) "Stripping in hot mix asphalt produced by aggregates from construction and demolition waste". *Waste Management and Research* 30 (1), p. 3-11.

- [71] Pérez, I.; R. Pasandín, A.; Medina, L. (2012b). "Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates". *Materials and Design* 36, p. 840-846.
- [72] Pérez, I.; Toledano, M.; Gallego, J.; Taibo, J. (2007). "Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris". *Materiales de Construcción* 57 (285), p. 17-29.
- [73] Qasrawi, H.; Asi, I. (2016). "Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared using recycled coarse concrete aggregate". *Construction and Building Materials*, 121, 18-24.
- [74] Radević, A.; Đureković, A.; Zakić, D.; Mladenović, G. (2017). "Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete". *Construction and Building Materials*, 136, 386-393.
- [75] Rafi, M.M.; Qadir, A.; Siddiqui, S.H. (2011). "Experimental Testing of Hot Mix Asphalt Mixture made of Recycled Aggregates". *Waste Management & Research* 29 (12), p. 1316-1326.
- [76] Máster Ingeniería Ambiental (Anónimo, 2006-2007). *Residuos de construcción y demolición*.
- [77] Rodríguez Pasandín, A. (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.
- [78] Ruiz Rubio, A.; Jofre Ibáñez, C. (2003). "Manual de firmes de capas tratadas con cemento. Ministerio de Fomento". CEDEX. IECA.
- [79] Shen, D.H.; Du, J.C. (2005). "Application of Gray Relational Analysis to Evaluate HMA with Reclaimed Building Materials". *Journal of materials in civil engineering* 17 (4), p. 400-406.
- [80] Shivaprasad, P. V.; Xiao, F.; Amirkhanian, S. N. (2011). "Moisture and rutting resistances of foamed asphalt mixtures containing recycled coal ash or shingles with moist aggregates". *Journal of ASTM International*, 9 (2), 1-11.

- [81] Shu, X., Huang, B.; Shrum, E. D.; Jia, X. (2012). “Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP”. *Construction and Building Materials*, 35, 125-130.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2017). Disponible en la web: <http://en.unesco.org/>. Acceso: 06/07/2017.
- [85] Uzan, J. (1996). “Asphalt Concrete Characterization for Pavement Performance Prediction”. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist* 65, p. 573- 607.
- [86] Wen, H.; Bhusal, S. (2011). “Evaluate recycled concrete as hot mix asphalt aggregate” (No. TNW2011-14).
- [87] Wong, Y.D.; Sun, D.; Lai, D. (2007). “Value-added utilisation of recycled concrete in hot –mix asphalt”. *Waste Management* 27 (2), p. 294-301
- [88] Wu, S.; Zhong, J.; Zhu, J.; Wang, D. (2013). “Influence of demolition waste used as recycled aggregate on performance of asphalt mixture”. *Road Materials and Pavement Design*, 14 (3), 679-688.
- [89] Zhao, S.; Huang, B.; Shu, X., Jia, X.; Woods, M. (2012). “Laboratory performance evaluation of warm-mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2294), 98-105.
- [90] Zhu, J.; Wu, S.; Zhong, J.; Wang, D. (2012). “Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings”. *Construction and Building Materials*, 29, 466-475.