

Tesis Doctoral  
para aspirar al grado de Doctor por la  
Universidad de Córdoba



***Evaluación del comportamiento de áridos reciclados  
de RCD y residuos de vidrio de TV. CRT en capas  
estructurales de carreteras***

(Evaluation of the behavior of recycled aggregates from  
CDW and TV glass waste, CRT, in structural road layers)

Autor:

**D. Pablo Pérez González**

Directores:

Dr. Francisco Agrela Sainz

Dr. Manuel Cabrera Montenegro

Dr. Bonifacio Javier Ordóñez García

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA RURAL.  
ÁREA INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN  
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Córdoba, 2020

TITULO: *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD Y RESIDUOS DE VIDRIO DE TELEVISORES CRT EN CAPAS ESTRUCTURALES DE CARRETERAS*

AUTOR: *Pablo Pérez González*

---

© Edita: UCOPress. 2020  
Campus de Rabanales  
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A  
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>  
[ucopress@uco.es](mailto:ucopress@uco.es)

---



## **TÍTULO DE LA TESIS: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD Y RESIDUOS DE VIDRIO DE TELEVISORES CRT EN CAPAS ESTRUCTURALES DE CARRETERAS.**

**DOCTORANDO:** Pablo Pérez González

### **INFORME RAZONADO DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS**

El uso de materiales reciclados procedentes de residuos industriales para la construcción es un movimiento sostenible en la industria de la construcción. Tiene numerosos beneficios que incluyen la limitación de la extracción de áridos naturales, la reducción del consumo de energía, la reducción de residuos que se dirigen al vertedero y la reducción de emisiones. No solo es una excelente opción para el medio ambiente, sino que el uso de subproductos industriales como material para la construcción conduce a ahorros económicos.

Este es el caso de los **Áridos Reciclados** procedentes de los **Residuos de Construcción y Demolición**. Debido, cada vez más, a la mejor conciencia medioambiental, así como al impulso de políticas ambientales integradas con el Medio Ambiente, como la que se está llevando a cabo en Andalucía, se considera fundamental poder llegar a la tasa de reciclado impuesta por la Unión Europea. Es por ello muy interesante poder establecer estudios de referencia donde las propiedades y características de estos nuevos materiales queden definidas y poder aumentar así la aplicación en obras de infraestructura civil.

El segundo aspecto abordado en la presente Tesis Doctoral parte de la evolución que han tenido las tecnologías de visionado en la última década, cambiando los antiguos televisores con tecnología de **Tubos de Rayos Catódicos (CRT)** por otro tipo de pantalla, generando con ello una gran cantidad de este residuo en vertedero.

Con esta finalidad la presente Tesis Doctoral se enmarca en el estudio de la viabilidad técnica para aplicar áridos reciclados de RCD y residuos de vidrio de televisores CRT en capas estructurales de carreteras.

Por lo tanto, el fundamento de esta Tesis queda acotado dentro del concepto “**Aplicaciones de Residuos para una Construcción Sostenible**”. Durante todo el proceso y desarrollo experimental se ha abordado desde el punto de vista ingenieril, incluyendo tres conceptos claves: Reutilización de recursos, viabilidad técnica y conservación del medioambiente.

De acuerdo con el estudio desarrollado y como muestra de los avances y hallazgos realizados, se citan los artículos en los que el doctorando ha participado de forma activa como indicio de calidad de la presente Tesis.

- **Pérez, P.**, Agrela, F., Herrador, R., & Ordoñez, J. (2013). Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain. *Construction and Building Materials*, 44, 593-599.

- Cabrera, M., **Pérez, P.**, Rosales, J., & Agrela, F. (2020). Feasible Use of Cathode Ray Tube Glass (CRT) and Recycled Aggregates as Unbound and Cement-Treated Granular Materials for Road Sub-Bases. *Materials*, 13(3), 748.

Por tanto, la presente Tesis Doctoral cubre de forma exhaustiva todos los objetivos establecidos a priori respecto a la caracterización del comportamiento de subproductos industriales (áridos reciclados y vidrio CRT), así como el análisis de sus posibles aplicaciones en ingeniería, estudiando su idoneidad en la conformación de capas estructurales de carretera.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la Tesis Doctoral " Evaluación del comportamiento de áridos reciclados de RCD y residuos de vidrio de televisores CRT en capas estructurales de carreteras"

**Córdoba, 18 de mayo de 2020**



**Fdo.: Dr. Francisco Agrela Sainz**



**Fdo.: Dr. Manuel Cabrera Montenegro**



**Fdo.: Dr. Bonifacio Javier Ordóñez García**



*Quiero dedicar esta Tesis a las personas más importantes de mi vida, por compartirla de forma incondicional, especialmente a*

*mis padres, Francisco y Mariluz, por ser el espejo donde mirarme y aprender cada día...*

*mis hermanos, Daniel y Víctor, porque andamos nuestro camino juntos ...  
mi mujer, Victoria, por convertir mis sueños en realidad, que son los  
nuestros...*

*y a mi abuela, Rosa, que siempre me acompaña...*





# AGRADECIMIENTOS

---

Quiero agradecer la ayuda de todas las personas y entidades que han hecho posible la realización de este trabajo.

Cabe destacar por su apoyo, personal y profesional, a mis directores, Francisco Agrela, Manuel Cabrera y Javier Ordóñez, que durante todos estos años han depositado su confianza en mi persona, y compartido su experiencia y trabajo, animándome en los momentos de dificultad. Del mismo modo, quiero agradecer la colaboración de Jesús Ayuso y José Ramón Jiménez, de la Universidad de Córdoba, por su apoyo personal y profesional en los numerosos trabajos desarrollados.

Es necesario mi reconocimiento a la Agencia de Obra Pública de la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía y, particularmente a María José Sierra, María del Lirio y Rosario Herrador, por su trabajo diario y profesionalidad. Sin su implicación no hubiera sido posible la realización de la tesis. Mi agradecimiento es extensible al Ayuntamiento de Málaga y, en particular, a Antonio Cabrero, Francisco Carmona, Ramsés Vidal, Pilar Vila y a nuestro alcalde, Francisco de la Torre, por su apuesta decidida por la investigación en el sector.

Manuel Salas, de Cemosá, cuenta con una mención expresa, por su generosidad a la hora de compartir su conocimiento, que es mucho, y su buen hacer en los distintos proyectos desarrollados. Extiendo mi reconocimiento a London Weee, Andrés Aguilera y Pedro Soldado, por su esfuerzo incansable y confianza, a Aristerra, Tecniobra, Hormigones y Minas y Arhisol, particularizado en Abdón Toca, por tenderme su mano. A Galain Ingeniería, por crecer conmigo.

Mi agradecimiento a Agreca, particularizados en todos y cada uno de sus socios y junta directiva, Pedro de Toro, José Portela y Fernando Fuentes, por permitirme trabajar y estudiar en aquello que tanto me gusta, y a Bernardo Mancera, Juan Ramírez y Juan Aguilera, mis “padres profesionales” más importantes, por apostar por mí, de los que tanto he aprendido y aprendo cada día.

¡A todos, gracias!

**Córdoba, 2020**



# RESUMEN

---

El ser humano ha reutilizado y reciclado los recursos naturales desde tiempos inmemoriales por razones eminentemente prácticas y económicas. Estos recursos finitos, en el caso de los minerales, son fundamentales en todo tipo de obras de construcción.

Desde hace años el concepto de economía circular, unido a la responsabilidad medioambiental y al consumo responsable, han originado una corriente imparable, así como un aumento en la conciencia social, que hacen del reciclaje una necesidad, contemplado en la legislación a distintos niveles.

En el caso de los residuos de construcción y demolición, RCD, el reciclaje de éstos en forma de áridos reciclados es un hecho consolidado en obras de escasa entidad constructiva. Es por ello que, en la presente tesis, se ha optado por estudiar el uso de áridos reciclados de RCD ligados con cemento, tanto en forma de gravacemento como de hormigón seco compactado, en capas estructurales de carreteras, incluyendo la construcción de un tramo en condiciones reales de tráfico, en cada caso, que permita evaluar su compartimiento.

Por otra parte, son conocidos los años que han estado en el mercado los televisores tipo CRT (tubo de rayos catódicos), aún existentes en muchos hogares. El vidrio del cono contiene metales, especialmente plomo, que hacen que, una vez convertido en residuo, no sea inerte. La falta de reciclaje conocido conlleva su depósito, en el mejor de los casos, en vertederos para residuos no peligrosos. Es por ello que se ha considerado interesante la aplicación de este residuo, tratado, con una mezcla de áridos reciclados mixtos, con objeto de ser empleado en capas estructurales de carreteras, tanto suelto como ligado con cemento.

En el caso del vidrio CRT ha sido necesario estudiar la lixiviación, como parte fundamental del trabajo, con objeto de incorporar, a los parámetros que definan su comportamiento mecánico, los valores de la potencial contaminación que pudiera producirse, para garantizar la inerticidad en su aplicación así como la seguridad desde el punto de vista medioambiental.

En todos los casos se ha partido del estudio pormenorizado de los materiales a emplear, siendo una constante la menor densidad, así como la mayor absorción de agua del árido reciclado con relación al natural. En este sentido, se ha observado la conveniencia de realizar el ensayo próctor tras la saturación húmeda del material.

La necesidad de controlar los parámetros químicos y físicos, tales como sulfatos solubles, originados por la existencia de yeso en las construcciones en la mayor parte de los casos, han determinado la importancia de controlar el proceso productivo y la trazabilidad, incidiendo especialmente en la limpieza de los residuos, desde su generación, realizando la demolición selectiva.

Se ha incluido un estudio de hormigones considerando la adición de un porcentaje fijo de cemento con la sustitución total del árido grueso natural por reciclado de hormigón, para la fabricación de hormigones no estructurales, así como del 20% de sustitución para los estructurales, concluyendo que los valores de resistencia son suficientes y adecuados para los usos previstos. De esta forma, se confirmó la viabilidad para iniciar el estudio de la fabricación de un hormigón seco para su uso en una capa estructural de firme de carretera.

En la fase de ejecución se observó que un parámetro importante era la dotación de la cantidad de agua necesaria a la mezcla, así como proporcionar un tiempo suficiente, de forma previa al compactado, para la homogenización de la misma, siendo interesante considerar la humectación previa en planta, antes de su transporte a la obra.

El comportamiento del tramo realizado con gravacemento con árido grueso reciclado de hormigón fue satisfactorio, habiendo comprobado su resistencia mediante el control de deflexiones. En este caso, además, se incluyó un tramo similar construido en su totalidad con gravacemento a partir de áridos naturales, con objeto de poder comparar sus propiedades a lo largo del tiempo.

Asimismo, el tramo realizado con hormigón seco compactado incluyendo áridos reciclados en la totalidad de la fracción gruesa ha tenido un comportamiento correcto, constatando un aumento de la resistencia con el paso del tiempo.

Ha sido posible concluir que el uso de áridos reciclados tratados con cemento es una posibilidad que puede ser considerada en la construcción de carreteras.

En el caso del vidrio CRT se realizó un estudio de contaminantes por lixiviación para los porcentajes de mezcla considerados: un 10% de vidrio CRT con áridos reciclados mixtos, en un 90%, de las cuales el 75% eran mixtos y el 25% restante asfálticos. Los resultados mostraron el carácter inerte del producto, por lo que su aplicación sería viable desde el punto de vista medioambiental y de seguridad.

Se comprobó la baja densidad el árido reciclado y una mayor absorción de agua con respecto al natural. Al haberse empleado áridos reciclados mixtos, es un hecho que el material cerámico condiciona de forma adicional estos valores.

El comportamiento mecánico fue satisfactorio en todos los ensayos realizados, por lo que su aplicación en capas estructurales de carreteras es aceptable desde el punto de vista técnico.



# ABSTRACT

---

Human beings have reused and recycled natural resources since time immemorial for eminently practical and economic reasons. These finite resources, in the case of minerals, are essential in all types of construction works.

For years, the concept of circular economy, together with environmental responsibility and responsible consumption, have caused an unstoppable trend, as well as an increase in social awareness, which makes recycling a necessity, contemplated in legislation at different levels.

In the case of construction and demolition waste, CDW, the recycling of these in the form of recycled aggregates is a consolidated fact in works of little constructive entity. In this thesis, it has been chosen to study the use of recycled aggregates of cement-bound RCD, both in the form of gravel and dry compacted concrete, in structural road layers, including the construction of a section in real traffic conditions, in each case, that allows evaluating your compartment.

On the other hand, the years that have been on the market for CRT (cathode ray tube) televisions, still existing in many homes, are known. The glass of the cone contains metals, especially lead, which make it, once converted into waste, not inert. The lack of known recycling leads to its deposit, in the best of cases, in landfills for non-hazardous waste. That is why the application of this waste, treated with a mixture of mixed recycled aggregates, has been considered interesting in order to be used in structural layers of roads, both loose and bonded with cement.

In the case of CRT glass, it has been necessary to study leaching, as a fundamental part of the work, in order to incorporate, into the parameters that define its mechanical behavior, the values of the potential contamination that may occur, to guarantee inertness in its application. as well as safety from an environmental point of view.

In all cases, the detailed study of the materials to be used has been used, the lowest density being a constant, as well as the greater water absorption of recycled aggregate in relation to the natural one. In this sense, the convenience



of carrying out the proctor test after wet saturation of the material has been observed.

The need to control chemical and physical parameters, such as soluble sulfates, caused by the existence of gypsum in buildings in most cases, have determined the importance of controlling the production process and traceability, with special emphasis on cleaning of the waste, since its generation, carrying out selective demolition.

A study of concretes has been included considering the addition of a fixed percentage of cement with the total substitution of natural coarse aggregate for recycled concrete, for the manufacture of non-structural concretes, as well as the 20% substitution for structural ones, concluding that resistance values are sufficient and appropriate for the intended uses. In this way, the feasibility of initiating the study of the manufacture of dry concrete for use in a structural roadbed layer was confirmed.

In the execution phase, it was observed that an important parameter was the provision of the amount of water necessary for the mixture, as well as providing a sufficient time, prior to compacting, for its homogenization, being interesting to consider the previous humidification in plant, before transport to the work.

The performance of the section made with gravel cement with recycled coarse aggregate of concrete was satisfactory, having proven its resistance by controlling deflections. In this case, in addition, a similar section was included, built entirely with gravel from natural aggregates, in order to be able to compare its properties over time.

Likewise, the section made with compacted dry concrete including recycled aggregates in all of the coarse fraction has had a correct behavior, confirming an increase in resistance over time.

It has been possible to conclude that the use of recycled aggregates treated with cement is a possibility that can be considered in road construction.

In the case of CRT glass, a study of contaminants was carried out by leaching for the percentages of mixture considered: 10% of CRT glass with mixed recycled aggregates, 90%, of which 75% were mixed and the remaining 25% asphalt. The results showed the inert nature of the product, so its application would be viable from an environmental and safety point of view.

The low density of the recycled aggregate and a greater absorption of water compared to the natural one were verified. As mixed recycled aggregates have been used, it is a fact that the ceramic material additionally conditions these values.

The mechanical behavior was satisfactory in all the tests carried out, therefore its application in road structural layers is technically acceptable.



# ABREVIATURAS

---

<b>AEE</b>	Aparatos eléctricos y electrónicos
<b>AN</b>	Árido natural
<b>AN-TC</b>	Árido natural tratado con cemento
<b>AR</b>	Áridos reciclados
<b>ARA</b>	Árido reciclado asfáltico
<b>ARC</b>	Árido reciclado cerámico
<b>ARH</b>	Árido reciclado de hormigón
<b>ARH-TC</b>	Árido reciclado de hormigón tratado con cemento
<b>ARM</b>	Árido reciclado mixto
<b>CRT</b>	Tubo de rayos catódicos
<b>HSC</b>	Hormigón seco compactado
<b>HSC-AR</b>	Hormigón seco compactado con áridos reciclados
<b>IMD</b>	Intensidad media diaria de vehículos, en vehículos / día.
<b>RAEE</b>	Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
<b>RCD</b>	Residuos de construcción y demolición
<b>ZA</b>	Zahorra artificial



# ÍNDICE

---

INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES.....	9
1.1.- ECONOMÍA CIRCULAR APLICADA A MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	9
1.2 - CONCEPTO DE RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS EN LA CONSTRUCCIÓN .....	11
1.3.- ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD .....	14
.....	14
1.3.1 – RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN - CONCEPTO Y TIPOLOGÍAS.....	14
1.3.2 – TRANSFORMACIÓN – TRATAMIENTO DE RCD – OBTENCIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS.....	15
1.3.3. – TIPOLOGÍAS DE ARIDOS RECICLADOS .....	18
1.3.4. - PROPIEDADES ARH Y ARM.....	19
1.4. – APLICACIONES DE ÁRIDOS RECICLADOS.....	22
1.4.1. ÁRIDOS RECICLADOS TRATADOS CON CEMENTO .....	23
1.4.2- APLICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN Y MIXTOS EN HORMIGONES.....	25
1.4.3.- APLICACIONES DE ÁRIDOS RECICLADOS EN CARRETERAS. ....	34
1.5.- RESIDUOS DE VIDRIO DE TUBOS DE RAYOS CATÓDICOS (CRT).....	39
1.5.1- CRT COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.....	40
1.5.1.1 - MORTERO DE CEMENTO CON CRT .....	40
1.5.1.2.- HORMIGON CON CRT .....	41
1.6.- NORMATIVA RELATIVA AL USO DE MATERIALES RECICLADOS Y RESIDUOS EN CONSTRUCCIÓN .....	42
1.7.- CONCLUSIONES PREVIAS.....	46
CAPÍTULO 2.- OBJETIVOS Y METODOLOGÍA .....	49
2.1.- OBJETIVOS GENERALES .....	49
2.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	49
2.2.1.- ÁRIDOS RECICLADOS TRATADOS CON CEMENTO .....	49
2.2.1.1.- HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS .....	50
2.2.1.2.- ÁRIDOS RECICLADOS TRATADOS CON CEMENTO .....	50
2.2.2. ÁRIDOS RECICLADOS CON RESIDUOS DE VIDRIO CRT .....	52
2.3. METOLODOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	53
CAPÍTULO 3.- HORMIGONES FABRICADOS CON ÁRIDOS RECICLADOS .....	59

3.1.- MATERIALES EMPLEADOS Y CARACTERIZACIÓN .....	59
3.1.1.- PROCESO PRODUCTIVO .....	59
3.1.2.- CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO RECICLADOS .....	60
3.1.3.- MATERIALES: CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO .....	62
3.1.4.- MATERIALES: CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO NATURAL .....	62
3.2.- DISEÑO DE DOSIFICACIONES .....	63
3.3.- DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA Y DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN. .....	65
3.4.- RESULTADOS .....	65
3.5.- EJECUCIÓN TRAMO DE PRUEBA- HORMIGÓN SECO COMPACTADO .....	67
3.5.1. MATERIALES EMPLEADOS .....	68
3.5.2. CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS .....	69
3.5.3. DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA .....	70
3.5.4. PUESTA EN OBRA .....	70
3.5.5. SEGUIMIENTO .....	71
3.6. CONCLUSIONES PREVIAS .....	73
CAPÍTULO 4.- APLICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS EN LA FABRICACIÓN DE GRAVACIMIENTO PARA USO EN CAPAS ESTRUCTURALES DE CARRETERAS .....	77
4.1.- INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	77
4.2.- MATERIALES EMPLEADOS Y CARACTERIZACIÓN .....	78
4.2.1.- CEMENTO .....	78
4.2.2.- ARENA Y GRAVA NATURAL .....	79
4.2.3.-GRAVA RECICLADA DE RESIDUOS DE HORMIGÓN .....	81
4.2.3.1.- PROCESO DE FABRICACIÓN .....	81
4.2.3.2.- CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS .....	82
4.3.- ESTUDIO PREVIO .....	84
4.3.2.- DISEÑO SECCIONES DE FIRME .....	90
4.4.- EJECUCIÓN DE TRAMO. RESULTADOS .....	91
4.4.1.- DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN DEL TRAMO .....	91
4.4.2.- SUMINISTRO A OBRA .....	92
4.4.3.- EJECUCIÓN DE LA OBRA .....	92
4.4.4. CONTROL Y ANÁLISIS .....	92
4.4.4.1. INTENSIDAD MEDIA DIARIA DE VEHÍCULOS .....	92
4.4.4.2.- COMPACTACIÓN .....	92
4.4.4.3. TENSION DE ROTURA .....	94
4.4.4.4. AUSCULTACIÓN DINÁMICA DE ALTO RENDIMIENTO. ADAR. ....	96

4.5.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES ESPECÍFICAS .....	101
CAPÍTULO 5.- USO DE VIDRIO DE RESIDUOS DE VIDRIO CRT Y ÁRIDOS RECICLADOS PARA SUB-BASES DE CARRETERAS.....	105
5.1. INTRODUCCIÓN.....	105
5.2 MATERIALES .....	108
5.2.1 MEZCLAS DE MATERIALES RECICLADOS Y P-CRT ESTUDIADOS .....	112
5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES EN FUNCIÓN DE SU POTENCIAL CONTAMINANTE .....	113
5.3.1. PRUEBA DE CONFORMIDAD .....	113
5.3.2. PRUEBA DE PERCOLACIÓN.....	115
5.4. MÉTODOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS .....	117
5.4.1. PROCTOR MODIFICADO.....	117
5.4.2. CAPACIDAD PORTANTE (CBR).....	118
5.4.3. MARTILLO VIBRANTE .....	120
5.4.4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN .....	121
5.5. CONCLUSIONES PREVIAS.....	124
Capítulo 6.- CONCLUSIONES .....	127
6.1.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133





# ÍNDICE DE FIGURAS:

---

Figura 1 Economía circular. Fuente: Red de intercambio de conoc. Agroalim.....	9
Figura 2 Concepto "Multi-R". Fundación para la economía circular (Fuente: FEC, 2020) .....	10
Figura 3 Demolición. Generación de RCD. ....	11
Figura 4 Neumáticos fuera de uso .....	12
Figura 5 Vidrio de Cono de TV. CRT .....	13
Figura 6 Generación de residuos en la UE. Eurostat. 2016.....	14
Figura 7 Residuos de hormigón .....	15
Figura 8 Residuos cerámicos.....	15
Figura 9 Residuos de mezclas bituminosas.....	16
Figura 10 Tratamiento previo del residuo con pinza demoledora .....	16
Figura 11 Electroimán .....	16
Figura 12 Pre-cribador .....	17
Figura 13 Planta tratamiento .....	17
Figura 14 Probeta colocada para ensayo a compresión. ....	30
Figura 15 Capas en infraestructura lineal. Carreteras. Fuente: CAT-FIRMES, 2016. ....	36
Figura 16 Conexión A-357 y A-367. Ardales, Málaga.....	38
Figura 17 Tubos de rayos catódicos.....	39
Figura 18 Metodología y diseño de la investigación.....	55
Figura 19 Árido grueso, 5-25 mm, ARH.....	60
Figura 20. AN 5/15 mm .....	62
Figura 21. AN 0/5 mm .....	62
Figura 22 Resistencia a la compresión a 7 y 28 días .....	66
Figura 23. Planta fabricación HSC-AR .....	67
Figura 24. Carga sobre camión de HSC-AR.....	67
Figura 25. Estado inicial de la vía .....	70
Figura 26. HSC-AR ya extendido con prefisuración.....	70
Figura 27. Vertido HSC-AR en la obra .....	71
Figura 28. Fabricación probetas testigo en obra. ....	71
Figura 29. Estado de calle Pascal el 13 de enero de 2012 .....	72
Figura 30. Probeta testigo con HSC-AR y dos capas de mezcla bituminosa .....	72
Figura 31 Granulometría arena natural .....	80

Figura 32 Granulometría grava natural.....	80
Figura 33 Planta donde se fabricaron los áridos reciclados.....	81
Figura 34 Granulometría grava reciclada.....	82
Figura 35 Granulometría de la mezcla .....	84
Figura 36 Próctor Modificado .....	86
Figura 37 Diseño secciones de firme.....	90
Figura 38 Tramos de prueba .....	91
Figura 39 Compactación de áridos tratados con cemento .....	93
Figura 40 Deflexiones tramo 2. AN-TC.....	97
Figura 41. Deflexiones tramo 2. Capa int. AN .....	98
Figura 42 Deflexiones tramo 1. AR-TC .....	98
Figura 43. Deflexiones tramo 2. AN. Capa rod.....	99
Figura 44 Deflexiones tramo 1. Capa Int. AR .....	99
Figura 45 Deflexiones tramo 1. AR. Capa Rod. ....	100
Figura 46 Proceso de fabricación de AR y CRT.....	105
Figura 47 Tubo de rayos catódicos de la parte delantera (CRT <sub>F</sub> ).....	108
Figura 48 Tubo de rayos catódicos de la parte trasera (CRTR ) .....	108
Figura 49 Distribución del tamaño de partícula.....	109
Figura 50 Difractograma de rayos X de p-CRT <sub>F</sub> .....	111
Figura 51 Difractograma de rayos X de p-CRT <sub>R</sub> .....	112
Figura 52 Proctor modificado .....	118
Figura 53 Valores de la relación de demora de California (CBR) (sin humedecer y empapados durante 4 días) .....	119
Figura 54 Tiempo de martillo vibrante .....	120
Figura 55 Resultados de resistencia a la compresión con 3% de cemento .....	122
Figura 56 Evolución de la resistencia a compresión. ....	123

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Clasificación de AR propuesta por Brito y col. (2019). Cap. 18. para aplicación en secciones de firme .....	20
Tabla 2 Requerimientos en relación con propiedades físicas y químicas en normas y guías internacionales. De Brito y col., 2018. ....	26
Tabla 3 Objetivos para RCD. 2016-2020. ....	43
Tabla 4 Códigos LER Residuos .....	44
Tabla 5. Requerimientos para el árido grueso reciclado y resultados previos – EHE 08 – anejo 15.....	61
Tabla 6 Componentes principales normalizados del cemento .....	62
Tabla 7 Especificaciones del cemento normalizado. ....	62
Tabla 8 Caracterización del árido natural .....	63
Tabla 9 Dosificación en distintas amasadas de hormigón .....	64
Tabla 10 Resultados consistencia y resistencia en distintas muestras .....	66
Tabla 11 Dosificación AR en HSR-AR.....	68
Tabla 12 Resistencia a compresión en HSC-AR.....	68
Tabla 13 Características del AR 7/25.....	69
Tabla 14 Dosificación HSC-AR .....	70
Tabla 15 Resistencia probetas. Control de recepción. HSC-AR.....	71
Tabla 16 Resistencia a compresión probetas. HSC-AR. ....	71
Tabla 17 Resistencia a compresión de probetas testigo HSC-AR. 13 de enero de 2012. ....	72
Tabla 18 Propiedades del cemento empleado en el tramo de prueba .....	78
Tabla 19 Propiedades físicas y químicas de AN usados en el tramo de prueba .	79
Tabla 20 Propiedades físicas y químicas del árido reciclado .....	82
Tabla 21 Proporciones de áridos aplicados en las mezclas .....	85
Tabla 22 Resistencia muestras de gravacemento.....	85
Tabla 23 Fórmula de trabajo gravacemento.....	86
Tabla 24 Valores de ensayo de Próctor .....	88
Tabla 25 Plazos de trabajabilidad gravacemento .....	88
Tabla 26 Valores próctor modificado en GRC-AR tras saturación húmeda .....	89
Tabla 27 Plazos de trabajabilidad ARH-TC con ensayo próctor habitual y tras saturación húmeda .....	89
Tabla 28 Ensayos compactación .....	93

Tabla 29 Resistencia a compresión .....	95
Tabla 30 Tensión de rotura en probetas.....	95
Tabla 31 Propiedades del cemento.....	108
Tabla 32 Propiedades físicas y químicas .....	110
Tabla 33 Composición .....	111
Tabla 34 Dosificación de las mezclas .....	113
Tabla 35 Concentraciones de lixiviados (mg / kg) obtenidos por la prueba de conformidad UNE EN 12457-4 .....	114
Tabla 36 Liberación obtenida según la prueba de percolación CEN / TS 14405. ....	115
Tabla 37 Densidad seca y resultados óptimos de humedad.....	118





# INTRODUCCIÓN

---

Es conocida la enorme importancia que poseen los recursos mineros en la sociedad en que vivimos pues son fundamentales en la construcción, tecnología, electricidad, productos de consumo diario, etc., proporcionando materias primas fundamentales para la fabricación de cemento, metales, plásticos, etc. **(Cohen, 1994)**

El reciclaje de muchos de estos recursos, especialmente los metales, es un hecho desde hace tiempo, por su alto valor económico, carestía y fácil reutilización, como es el caso del hierro, cobre, aluminio, etc.

En el sector de la construcción se emplean, además, como es sabido desde antaño, la arcilla para fabricación de cerámica, ladrillos, bovedillas, etc., los áridos para fabricación de hormigones, terrazos, cementos y mezclas bituminosas, el yeso para enfoscados, etc., Estos materiales, una vez demolidas las construcciones de las que han formado parte, han sido depositados tradicionalmente en vertederos o en rellenos localizados cuando no desalojados en parajes alejados u ocultos de forma ilegal. Este hecho diferencial, en relación con los residuos anteriormente citados, es debido al coste de su gestión, superior al del material natural.

En la Unión Europea se generan del orden de 850 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD) **(Sáez y Osmani, 2019)** al año, procedentes de las actividades de construcción y demolición. Desde hace unos años se han empezado a incorporar estos subproductos industriales en un segundo ciclo de vida, principalmente hormigón, material cerámico y mezclas bituminosas, dando lugar a distintos productos y áridos para la construcción, en forma de zahorras, arenas, gravas, suelos, etc.

Es evidente la importancia medioambiental que tiene el empleo de los áridos reciclados en aquellos usos donde su utilización es factible pues, además de reducir la colmatación de los vertederos autorizados existentes, prolonga la vida útil de las explotaciones mineras, fundamentales para el desarrollo de la sociedad.



Por otra parte, al tratarse los RCD de materiales inertes, se les pueden proporcionar nuevos usos a los residuos de forma indefinida, siempre que se le realice el proceso de reciclaje adecuado y de forma controlada, manteniendo un buen control de calidad (**Jiménez y col., 2.011, Guía de buenas prácticas, 2015**)

De esta forma, se hace fundamental la investigación de las distintas aplicaciones de los áridos reciclados de residuos de la construcción y demolición en sus diferentes variantes.

Otro material que cuenta con mucha importancia por sus enormes aplicaciones es el vidrio. Este proviene de la mezcla de diversos componentes tales como arenas silíceas ( $\text{SiO}_2$ ), caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y, en ocasiones, óxidos metálicos. Las botellas y envases de vidrio cuentan con valorización conocida, realizada a partir de la recogida selectiva de envases en los contenedores verdes que conocemos. En España se reciclan 68 envases de vidrio por habitante y año (**www.ecovidrio.es, 2020**).

Los vasos y copas cuentan con óxido de plomo en su composición, por lo que no son reciclados de forma habitual al no contar con un proceso técnicamente eficiente. Ocurre lo mismo con el vidrio procedente del cono de los televisores tipo CRT (Cathode Ray Tube), al contar con plomo en su composición, por lo que la gestión de estos residuos se ha convertido en un desafío medioambiental a nivel mundial (**Yao y col., 2.018**). Los mismos autores añaden que el residuo citado posee una resistencia aceptable, baja absorción de agua y un alto contenido en sílice lo que, a priori, podría proporcionar al residuo diversos usos en la construcción, una vez tratado el mismo.

Es por ello que se considera interesante investigar la aplicación de estos residuos en combinación con los áridos reciclados procedentes de RCD.

En el trabajo se estudiarán los áridos reciclados tratados con cemento, así como con la adición de vidrio procedente del reciclaje de los televisores CRT en los mismos, con objeto de ser aplicados en capas estructurales de firmes de carreteras.





# **CAPÍTULO 1**

---

## **ANTECEDENTES**



# CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES

Las carreteras y vías de comunicación han sido, y son, elementos fundamentales en el desarrollo de las distintas civilizaciones, al proporcionar la logística necesaria para el desarrollo de la actividad económica propia de cada comarca.

La calidad y características de cada vía establecen los tiempos de transporte, seguridad, confort, etc., y determinan el coste económico unitario de los productos en este sentido.

Del mismo modo, el reciclaje y la reutilización es un hecho que ha venido produciéndose en la historia de la humanidad de forma continuada, aprovechando, en el caso de los materiales de construcción, bloques ya tallados, o elementos de forjado, cubiertas, etc., de edificaciones existentes, para la construcción de nuevas estructuras. Este concepto alude, claramente, a la economía circular, tan presente e importante en la sociedad actual.

## 1.1.- ECONOMÍA CIRCULAR APLICADA A MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

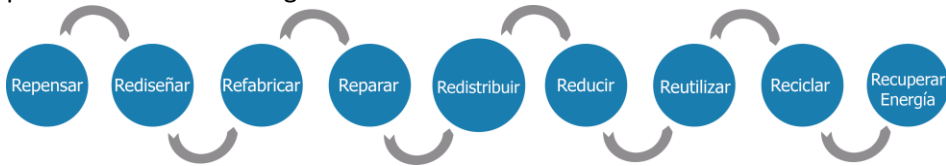
La economía circular es un concepto interrelacionado con la sostenibilidad que tiene por objetivo principal el que los materiales y recursos (minería, agua, energía, etc.) se mantengan en el sistema económico durante el mayor tiempo posible, con el fin de minimizar la producción de residuos y poder ser utilizados éstos como recursos (FEC, 2020).

De esta forma, la economía circular es la unión de los parámetros que deben ser considerados desde el punto de vista medioambiental, económico y social. Se puede observar el ciclo en la Figura 1.



Figura 1 Economía circular. Fuente: Red de intercambio de conoc. Agroalim.

Todos los productos deberían, desde su diseño, contar con el concepto citado, siguiendo las pautas denominadas “multi-R”. (FEC, 2020), tal como se puede observar en la Figura 2.



**Figura 2** Concepto "Multi-R". Fundación para la economía circular (Fuente: FEC, 2020)

En el año 2015 la Comisión Europea inició un plan de acción para agilizar la gestión europea hacia una economía circular. Se establecieron 54 medidas que permitían “cerrar el círculo”, y se aludía a cinco sectores prioritarios: plásticos, residuos alimentarios, materias primas críticas, biomasa y biomateriales y, como no podía ser de otra forma, residuos de construcción y demolición. Se indica la importancia del reciclado de éstos (Plan acción UE, 2015).

En el último informe del **Plan de Acción UE**, elaborado en el año **2019**, se incide en que los productos deben estar diseñados considerando su ciclo de vida, incluyendo su reciclabilidad, así como la necesidad de incluir nuevas obligaciones y normas que permitan la prevención y mejoren la gestión de desechos, incluyendo los RCD. De hecho, la valorización y reciclaje de los residuos de construcción y demolición es uno de los más claros ejemplos de economía circular, tal como se recoge en el **Protocolo de gestión de RCD**, elaborado en el año **2016**, donde se alude a la importancia del proceso completo en la gestión de residuos y a la valorización de los mismos con condiciones de calidad. Este protocolo, específico, manifiesta la gestión de calidad del producto como paso fundamental para aumentar la confianza en el proceso de reciclaje.

De esta forma, es evidente que, dado el volumen existente en la generación de residuos asociados a la construcción en Europa, y en España particularmente, la valorización y reciclaje de los mismos es una prioridad en el marco de la economía circular, por lo que numerosas investigaciones y trabajos consideran la aplicación de los subproductos obtenidos del reciclaje en distintos usos de la construcción.

## 1.2 - CONCEPTO DE RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS EN LA CONSTRUCCIÓN

Son numerosas las aplicaciones estudiadas para el empleo de residuos reciclados en obras de construcción.

Cabe destacar la plataforma desarrollada para el **Catálogo de residuos, 2015** donde se citan aplicaciones para residuos de la construcción y demolición, neumáticos fuera de uso, diversos tipos de escorias, residuos plásticos, vidrio reciclado, etc. En relación con los RCD en la ficha técnica se detallan las obras más importantes ejecutadas con áridos procedentes del reciclaje de éstos, entre las que se encuentra la conexión entre las carreteras A 357 y A 367 cuyo estudio, en la parte de áridos tratados con cemento, es objeto de la presente tesis doctoral, **(Pérez y col., 2013)**

Es habitual el empleo de los áridos reciclados (AR) en obras de pequeña envergadura y baja intensidad de tráfico, en condiciones de seguridad, **(Martín Morales y col., 2013)**, aunque existen tramos, como el anteriormente citado, que poseen una intensidad media diaria (IMD) considerable. El reciclaje de los residuos de construcción y demolición, siempre que se realice de forma adecuada, produce áridos reciclados que pueden ser empleados como capas de firme **(Jiménez y col., 2011)**, rellenos localizados, camas de tubería, materiales drenantes, etc.



Figura 3 Demolición. Generación de RCD.

Por otra parte, existen residuos procedentes de la minería, tales como los estériles que, en ocasiones, poseen aplicación como AR. Es el caso de los estériles del carbón, que han sido empleados en otros países para terraplenes, rellenos, materiales granulares, zahorras, así como estabilizados con cemento. **(Catálogo de Residuos, 2015)**



Los neumáticos fuera de uso, además de ser empleados para la valorización energética, han sido utilizados en obras de relleno y terraplenes, así como para la fabricación de mezclas bituminosas.

El catálogo citado recoge incluso trabajos donde el residuo ha sido incluido en hormigones, considerando distintos parámetros. Por último, se citan diversas aplicaciones, tales como sistemas de drenaje en vertederos, barreras de seguridad, césped artificial, atenuadores de oleaje, protección exterior de taludes, etc.



Figura 4 Neumáticos fuera de uso

**Fattuhi y col. (1996)** investigaron la inclusión de neumáticos de deshecho a la mezcla de AR, concluyendo que ésta ve reducida la resistencia a la compresión y la densidad, dependiendo de la cantidad añadida en valores próximos al 70% y al 20%, respectivamente.

Otro residuo incluido en el catálogo que ha sido estudiado con profundidad es la escoria procedente de altos hornos. Cabe destacar sus numerosas aplicaciones como integrante del aglomerado asfáltico, áridos para hormigón, materia prima para la fabricación de cemento, mejora del suelo en agricultura, capa base de carreteras, suelo cemento, etc. **Ebrahimi y col. (2012)** adicionaron cenizas volantes, como material cementante, incrementándose el módulo de la resistencia del AR sustancialmente.

En un estudio, se analizó la estabilización de suelos residuales con cemento y cáscaras de arroz, **(Basha y col.,2005)**. Los autores concluyeron que la inclusión de los elementos citados produce una reducción de la plasticidad de la mezcla, así como un aumento en el valor de la capacidad portante mediante el ensayo de CBR. Añadiendo residuos de cáscaras de arroz en un 5%, con el 4% de cemento, se multiplicó considerablemente este parámetro siendo, en general, para un 6-8% de cemento y un 15-20% de arroz, el punto óptimo de mezcla para mejorar las propiedades de los suelos residuales. Los residuos procedentes del cultivo del arroz pueden estabilizar los suelos residuales, solos o mezclados con cemento, siendo su utilización una alternativa para reducir los costes en la construcción, especialmente en las áreas rurales de los países en desarrollo.

Para los residuos de vidrio se cita la consolidación del reciclaje de los envases para la fundición de los mismos y fabricación de nuevos como un hecho habitual, a partir de la recogida selectiva en los contenedores y la concienciación ciudadana. En otros países, estos residuos de vidrio han sido triturados y cribados para su empleo en la construcción de carreteras, incluyéndose incluso como árido en las mezclas bituminosas (**Catálogo de residuos, 2015.**).

El resto de residuos de vidrio, tales como vasos, copas, conos de monitores de televisión, etc., son depositados en vertederos para su eliminación en numerosas ocasiones, por lo que se abre la puerta a la investigación de nuevos usos de los mismos.

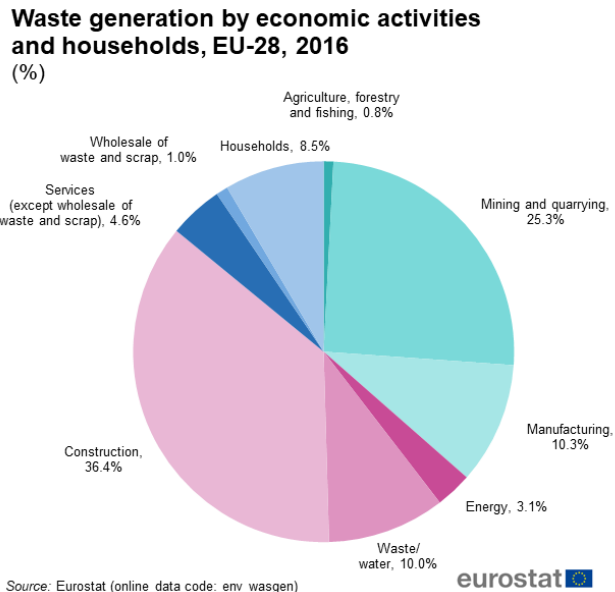


Figura 5 Vidrio de Cono de TV. CRT

En los últimos años, el vidrio procedente del cono del televisor tipo Cathode Ray Tube (CRT) ha sido incluido en la fabricación de diversos materiales cerámicos, previamente triturado, como parte integrante de los mismos (**Informe Layman, 2.017**).

## 1.3.- ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD

Los AR procedentes de RCD, obtenidos del proceso de valorización del residuo tienen una importancia fundamental en el ciclo de vida del producto, pues estos residuos suponen el 36.4% de los generados en la unión europea (Eurostat, 2016), tal como se puede observar en la Figura 6.



**Figura 6 Generación de residuos en la UE. Eurostat. 2016.**

### 1.3.1 – RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN - CONCEPTO Y TIPOLOGÍAS

El residuo de construcción y demolición se define, en líneas generales, como *“aquel generado en una obra de construcción, exceptuando las tierras y piedras limpias”*, siempre que sea considerado como residuo. Esta definición queda recogida en el artículo 2.a. del **RD 105/2008, 2008**.

La definición de residuo queda, del mismo modo, en España, recogida en el artículo 3.a, de la **Ley 22/2011, (2011)**, como *“cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar”*.

Los RCD constan de tres componentes básicos que los definen (**Jiménez y col., 2011**):

- Hormigón y mortero, compuestos por material pétreo, cemento y ciertos aditivos.
- Material cerámico, compuesto por arcilla.
- Aglomerado asfáltico, compuesto básicamente por material pétreo y betún.

Es habitual que estos componentes vayan asociados al yeso, en el caso del material cerámico, y puedan contener elementos ajenos al propio residuo, tales como envases, cartón, plástico, materiales textiles, etc.

### 1.3.2 – TRANSFORMACIÓN – TRATAMIENTO DE RCD – OBTENCIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS

El procesamiento de los RCD se inicia con la descarga en planta. Tras la primera inspección visual se realiza una clasificación primaria, atendiendo, además de al grado de limpieza, a la composición básica del residuo.

De esta forma, se distingue, atendiendo a su naturaleza, tal como ha sido referido anteriormente, entre:

- Residuos de hormigón. Figura 7.
- Residuos cerámicos. Figura 8.
- Residuos de mezclas bituminosas. Figura 9
- Residuos pétreos
- Residuos mixtos

Atendiendo al grado de limpieza se distinguirá entre el residuo constituido únicamente por residuos de naturaleza pétreo y el resto.



Figura 7 Residuos de hormigón



Figura 8 Residuos cerámicos

**Barbudo y col. (2018)** estudiaron el proceso de tratamiento de los RCD y realizaron la descripción del mismo. Una vez acopiados los residuos en el sitio adecuado, se realiza la primera limpieza manual, que permitirá la retirada de elementos ajenos al propio residuo, tanto de tipo peligroso como no peligroso. Es el caso de papel, cartón, plástico, envases, madera, fibrocemento, etc. El primer tratamiento consiste en la trituración o desmenuzamiento del residuo. Este proceso se realiza mediante una pinza demoledora hidráulica acoplada en una retroexcavadora, o bien mediante una machacadora de mandíbulas. El tratamiento mediante pinza hidráulica puede observarse en la Figura 10.

Si el tamaño es inferior a 50 centímetros podrá obviarse el tratamiento primario, como es el caso de los residuos de tipo mixto, en ciertas ocasiones.

Tras la trituración primaria, o tras la secundaria, se podrá incluir una cinta de triaje para limpieza manual de los residuos ajenos.

En este punto del proceso es habitual la existencia de un electroimán, Figura 11, que separará la fracción férrica del residuo pétreo. Este elemento podrá existir también, de forma complementaria, tras la molienda secundaria, a realizar mediante el equipo incluido con este fin, el de reducir la granulometría del material en el proceso.

El molino secundario trabaja por impactos, bien sea a partir de barras o martillos, produciendo un material de granulometría continua.

Por último, es fundamental la existencia de una criba, de dos o tres tamices, que permitirá la



**Figura 9** Residuos de mezclas bituminosas



**Figura 10** Tratamiento previo del residuo con pinza demoledora



**Figura 11** Electroimán

clasificación según la granulometría deseada. En la Figura 13 puede observarse una planta de tratamiento mecánico.

En el inicio del proceso, tanto si este se produce en el tratamiento primario como en el secundario, es importante la existencia de un precribador, Figura 12, especialmente en los áridos mixtos, que separará la fracción fina, considerando ésta como la inferior a 20-25 mm, permitiendo la trituración de la fracción gruesa únicamente.



Figura 12 Pre-cribador

Este elemento mecánico será el garante de la ausencia de plasticidad, así como la minimización de los compuestos de azufre en el material procesado, (Jiménez y col., 2011), cuando éste es introducido con tierras de excavación o labor. En el caso de ser alimentado con residuos constituidos exclusivamente por hormigón, se obtendrá un producto que podría ser directamente comercializable.

Para la limpieza del residuo existen diversos sistemas que separan ciertas fracciones de forma automática. Es el caso de los sopladores y los ciclones que, actuando sobre la fracción gruesa, permiten la separación de los materiales voluminosos de menor densidad, tales como plásticos, cartón, papel, etc. Para los materiales flotantes existen, también para la fracción gruesa del árido, sistemas de flotación, en contenedores o tornillos sin fin, que permiten la retirada de los elementos de menor densidad que el agua, como es el caso de la madera.

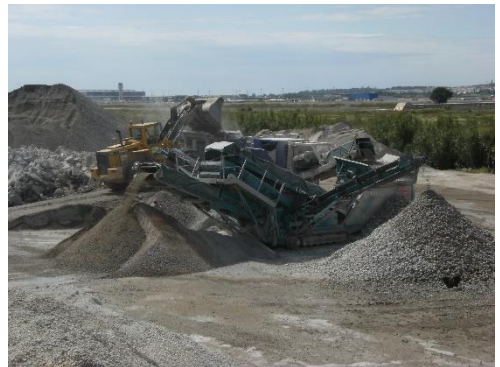


Figura 13 Planta tratamiento

Con un proceso adecuado de clasificación, limpieza y tratamiento se pueden obtener AR de distintas tipologías y calidades, tal como se recoge en la **guía de buenas prácticas, (2015)**.

Es fundamental que se realice la separación en origen, así como la realización de las demoliciones de forma selectiva, (Barbudo y col., 2018), con objeto de

permitir la mayor homogeneidad posible en el residuo generado y optimizar así el proceso de reciclaje y valorización posterior.

En esta línea, existe un estudio que analiza 236 publicaciones realizadas a lo largo de 38 años, desde 1977 hasta 2014, desarrollado por **Silva y col. (2014)**, que concluye, del mismo modo, con una reseña a la importancia de realizar la demolición de forma selectiva para garantizar el mínimo nivel de contaminación. Este factor es referido de forma continua en todas las investigaciones pues es la única forma posible de evitar totalmente la existencia de impurezas en la mezcla final.

### **1.3.3. – TIPOLOGÍAS DE ARIDOS RECICLADOS**

Los áridos reciclados se clasifican, considerando su composición, (**Brito y col., 2019 y Agrela y col., 2009**), en tres tipos básicos:

#### **- Áridos Reciclados de Hormigón, ARH.**

Son aquellos que contienen más del 90% en peso de hormigón y material pétreo. El hormigón es una mezcla de cemento, áridos, agua y aditivos, por lo que la trituración del mismo producirá, a su vez, una mezcla de estos elementos.

Generalmente existirá también mortero en la composición. El residuo de base para la fabricación de estos áridos será el procedente de estructuras de hormigón armado, cimentaciones, solerías, pavimentos, hormigones de limpieza, bloques y vigas prefabricadas, así como secciones de áridos naturales incluidos en la capa de firme inferior a los elementos de cimentación o capas de rodadura. Podrán existir hasta un 10% de elementos de naturaleza cerámica o asfáltica, ajenos al hormigón.

#### **- Áridos Reciclados Cerámicos, ARC.**

Se denomina así a los áridos con un contenido en material cerámico superior al 20%, así como menos del 70% de partículas de hormigón.

El bloque de ladrillo cerámico va acompañado, de forma habitual, de mortero, asimilable al hormigón, por lo que el peso de este elemento es muy importante en la mezcla.

#### **- Áridos Reciclados Mixtos, ARM**

Los áridos reciclados mixtos poseen una naturaleza, en relación con su composición, diversa, conteniendo menos del 20% de partículas cerámicas y entre el 70% y el 90% de hormigón, (**Agrela y col., 2009**)

**Brito y col., (2019) y Ayuso y col., (2015)**, propusieron una clasificación secundaria para los ARM y los ARH, considerando su procedencia del precibado, la trituración primaria con machacadora de mandíbulas o la molienda secundaria con molino de impactos, ambas con cribado posterior:

- **Árido reciclado mixto precibado o tipo III (ARM-III)**. Se obtiene en el precibado, es decir, en la clasificación mecánica realizada al material de origen, sin proceso de trituración (**Brito y col., 2019**).

- **Árido reciclado mixto II (ARM-II)**. Estos áridos son los obtenidos del proceso de molienda en machacadora de mandíbulas al material grueso previamente sometido al proceso de precibado. Le puede ser aplicado algún sistema de limpieza automática, habitualmente por soplado previo a la introducción en la caja de molienda. Es cribado para la obtención de una granulometría uniforme.

- **Árido reciclado mixto I (ARM-I)**. Son los obtenidos a partir de la trituración en molino de impactos, secundario por lo tanto, del material que ha sido previamente sometido al proceso de precibado, molienda primaria y cribado, por lo que han seguido el proceso completo de tratamiento existente de forma habitual en las plantas de RCD.

#### 1.3.4. - PROPIEDADES ARH Y ARM

Los áridos reciclados de hormigón poseen unas propiedades, reflejadas por **Brito y col., 2019**, según la clasificación realizada por los mismos autores, que incluyen una absorción de agua inferior al 6%, un desgaste de los ángeles inferior a 35, así como un contenido en sulfatos solubles en agua menor del 0.7%. En la clasificación propuesta se considera un contenido en partículas asfálticas inferior al 5% y al 10% en cerámicas. La densidad mínima es de 2.2 t / m<sup>3</sup>.

Se incluye la Tabla 1 con las propiedades reflejadas por los autores, según **UNE-EN 933-11. (2009)**, incluyendo dos tipos de ARH, dependiendo de sus propiedades y un ARA, siendo

Rc: Contenido en partículas de hormigón

Rb: Contenido en partículas cerámicas

Ra: Contenido en partículas asfálticas.



**Tabla 1 Clasificación de AR propuesta por Brito y col. (2019). Cap. 18. para aplicación en secciones de firme**

Tipo	Composición				Densidad mínima (t/m <sup>3</sup> )	Absorc. Agua (%)	Los Ángeles (%)	Sulfatos solubles agua (%)
	Rc+Ru (%)	Rb (%)	Ra (%)	Otros (%)				
ARH - I	>90	<10	<5	<1	2.2	<6	<35	<0.7
ARH-II	>85	<15	<10	<3	2.1	<8	<37	<0.8
ARM-I	>70	<30	<10	<5	1.9	<8	<40	<0.8
ARM-II	>60	<40	<20	<8	1.8	<12	<45	<1.0
ARM-III	>40	<60	<30	<15	1.65	<15	<50	<1.2
ARA	<50	<10	>50	<3	2.0	<8	<40	<0.8

Para los áridos reciclados mixtos la densidad oscilará, dependiendo del tipo, entre 1.9 y 1.65 t/m<sup>3</sup>, mientras que la absorción de agua oscilará entre el 8 y el 15%.

En los estudios realizados se analizaron las propiedades mecánicas de los áridos reciclados en relación con los áridos naturales (AN), incidiendo en los parámetros de compactación, humedad, densidad, composición, granulometría, etc.

Es un hecho importante que la densidad del árido reciclado es menor, en todos los casos que la del AN, (**Brito y col., 2019**) por causa del mortero adherido al AR, (**Bekir y col., 2004**).

En el análisis del comportamiento mecánico juega un papel fundamental la composición de los áridos. Al realizar la sustitución de ARH por ARC se produce un aumento del contenido óptimo de humedad y un descenso de la densidad. Si se sustituye el AN por ARH el valor del índice CBR desciende y si se incluye ARC, vuelve a acentuarse el descenso de la capacidad portante.

Además de la composición debe tenerse en cuenta la granulometría. En su fracción fina, los áridos cerámicos son menos sensibles a la variación de humedad que los de hormigón, (**Poon y col., 2006**). La determinación de la humedad óptima del AR se hace fundamental, por su diferenciación con el AN, tal como fue referido anteriormente. La mayor absorción de agua del AR es debida a la existencia de partículas de cemento procedentes de la trituración de los residuos de hormigón, reaccionando en diferente grado con el agua (**Tam y col., 2008**). Estas partículas

reaccionarán de diferente forma según el tipo de hormigón del que proceden. En general, la absorción de agua se incrementa en los áridos reciclados cuando el hormigón del que provienen posee mayor resistencia, decreciendo también con relación a la granulometría, según aumenta el tamaño nominal máximo del árido. De esta forma, se hace fundamental controlar la máxima cantidad de agua a incluir en la mezcla, en línea con lo expuesto anteriormente (**Padmini y col., 2009**).

Otro componente fundamental en la mezcla es el asfalto. Si un árido triturado procedente de hormigón es mezclado con partículas trituradas de asfalto en un 50% en peso, el contenido óptimo de humedad decrecerá y aumentará la densidad seca en relación con el primero (**Ayan y col., 2014**) por lo que se confirma la influencia de la composición en este parámetro.

Además del tipo de hormigón de procedencia de los áridos, existe otro parámetro con una influencia importante, como es la edad de los residuos de hormigón empleados para la fabricación del AR. En este sentido, **Amnon y col. (2003)** analizaron las propiedades granulométricas, de absorción y de densidad de diversos ARH, determinando que se mantienen durante los primeros tres años del hormigón desde su trituración. En cambio, la capacidad de cementación decrece rápidamente con la edad, debido a que los hormigones de menor edad aportan cemento que se encuentra parcialmente hidratado, por lo que aún poseen capacidad de reacción, aumentando la resistencia en el hormigón final, en relación con el ARH de mayor edad.

Con respecto a las propiedades químicas, el contenido en sulfatos solubles, en agua y ácido, se encuentra muy influenciado por la presencia del yeso, normalmente ligado al material cerámico, por la tradición constructiva existente en el país. Es por ello que el porcentaje del contenido de material cerámico triturado incrementa el valor del yeso. **Barbudo y col. (2012)** informaron que estos sulfatos aparecen cuando el material no ha sido convenientemente seleccionado en el origen o tratado en la planta.

## 1.4. – APLICACIONES DE ÁRIDOS RECICLADOS

---

Las aplicaciones de los AR se producen tanto en carreteras y obras de infraestructura lineal como en edificaciones. Cabe distinguir entre el material no ligado, suelto, y el ligado con cemento.

Dentro del primer grupo se incluyen las denominadas como zahorras, definidas en el artículo 510 del **PG-3** como *“aquel material granular, de granulometría continua, utilizado como capa de firme”*. Dependiendo de si están trituradas o no, se denominarán “artificiales” o “naturales”. Los materiales sueltos también pueden ser usados como drenes, lechos de tuberías o materiales de relleno para terraplenes.

La normativa tradicional de aplicación en España para la construcción de carreteras, **PG-3**, es muy restrictiva. **Martín Morales y col. (2013)**, caracterizaron diversas muestras de AR procedentes de RCD, observando que éstos podrían ser usados, atendiendo a la citada normativa, para la construcción de rellenos de escasa entidad estructural, siendo inadecuados para la construcción de drenes, zahorras, suelos estabilizados y pavimentos de hormigón. De esta forma, los AR han sido empleados tradicionalmente como capa de rodadura, sin compactar, en caminos y carriles rurales. **Jiménez y col. (2012)** realizaron una investigación sobre un tramo experimental, mostrando el deflectómetro un buen comportamiento mecánico para estos materiales, aún de tipo mixto. Desde el punto de vista químico, se determinó que el contenido en sulfatos no afecta sustancialmente a la calidad del mismo. En el caso de carreteras, para la base y subbase de las mismas, **da Conceição Leite y col. (2011)** determinaron que pueden ser usados, del mismo modo, en vías de baja densidad de tráfico.

En el caso del trabajo realizado por **Herrador y col. (2012)** con ARM, constituido por hormigón, aglomerado asfáltico y materiales cerámicos, empleado como capa de base en una carretera en condiciones reales de tráfico, donde se concluyó que éste posee un comportamiento adecuado, tras el análisis de deflexiones en el tiempo. Se determinan, como parte fundamental, las variables diferenciales en relación con el AN, incluyendo el aporte de mayor cantidad de agua, requerida para la compactación, recomendando los autores para ello la humectación previa y la espera de un tiempo, tras el extendido y de forma previa al compactado, que permita la homogenización de humedad en la mezcla.

### 1.4.1. ÁRIDOS RECICLADOS TRATADOS CON CEMENTO

En relación con los áridos tratados con cemento, la adición del cemento a la mezcla es un factor a tener en cuenta desde el inicio del estudio de los materiales reciclados, por los usos y la homogenización, entre otros factores, de las propiedades, debido a la variabilidad y diversidad en el origen de la materia prima. Esta adición provoca que materiales de difícil aplicación puedan ser usados con garantía.

Se define como material tratado con cemento a *“la mezcla homogénea, en las proporciones adecuadas, de material granular, cemento, agua y, eventualmente aditivos, realizada en central”*, que convenientemente compactada, se utiliza como capa estructural en firmes de carretera. Dependiendo del material granular utilizado se distinguen, en España, dos tipos de materiales tratados con cemento: suelocemento y gravacemento, según **OFOM-2523 (2014)**, dependiendo de si se trata de un material de base con granulometría continua o con mezcla de varias.

Las propiedades mecánicas de los AR tratados con cemento se ven modificadas dependiendo de la composición, grado de compactación y humedad, tiempo de fraguado, cantidad y tipo de cemento, existiendo una relación lineal entre la resistencia a compresión y el contenido en cemento. **Xuan y col. (2011)** destacan la importancia del grado de humedad en la mezcla, ya que la resistencia a compresión aumenta con éste, hasta alcanzar un umbral, a partir del cual la citada resistencia decrece. La adición de cemento a la mezcla influye en numerosos parámetros. La densidad seca más alta se produce con la adición de 10% de cemento, según este autor.

La composición, al igual que con el AR suelto, juega un papel fundamental también. **Melbouci y col. (2009)** incorporaron material cerámico, descendiendo el índice CBR, a pesar de la existencia del cemento.

Del mismo modo, la adición de material cerámico es estudiada por **Xuan y col. (2012)**, resultando una disminución en la resistencia, por lo que para mantener el nivel fijo sería necesario aumentar el contenido en cemento.

Ya ha sido citado que los AR poseen menor densidad que los AN y mayor absorción de agua, aumentado este descenso de densidad en el Próctor Modificado, aún más, por el elevado contenido en partículas cerámicas.

El control de los parámetros químicos es analizado en el trabajo desarrollado por **Agrela y col. (2012)**, estableciendo un límite del 0,8% en sulfatos solubles en ácido para el uso de AR en capas de firme de carreteras. Por otra parte, es interesante considerar la aplicación de retardantes en el cemento, para aumentar el tiempo de trabajabilidad del AR, en relación con el AN. Es factible usar AR tratados con cemento en la construcción de capas de firme en carreteras, mostrando buenas propiedades mecánicas en la resistencia a compresión, así como bajas deflexiones.

**Pérez y col. (2013)**, concluyeron que la adición de cemento mejora las propiedades mecánicas del AR, presentando una mejor resistencia al deflectómetro de impacto que el AN, en la vía ejecutada. Esto es debido, entre otros factores, a la reestructuración del AR durante la compactación, produciéndose una redistribución de la granulometría. La rotura parcial del grano de la capa de AR provoca una mejora en la capacidad resistente y de soporte, así como en la resistencia a la deformación permanente, tal como se cita en la investigación desarrollada por **Da Conceição Leite y col. (2011)**.

Se han llevado a cabo estudios de estabilización de suelos residuales con cemento y cáscara de arroz, **Basha y col. (2005)**, Los autores concluyen que la inclusión de los elementos citados produce una reducción en la plasticidad de la mezcla, así como un aumento en el valor del índice CBR. Añadiendo residuos de cáscaras de arroz en un 5% con un 4% de cemento, se mejoran las propiedades siendo, en general, para un 6-8% de cemento y un 15-20% de arroz, el punto óptimo de mezcla para los suelos residuales. Los residuos de arroz pueden estabilizar los suelos residuales, solos o mezclados con cemento, siendo su utilización una alternativa para reducir los costes en la construcción, especialmente en las áreas rurales de los países en desarrollo.

Es evidente que los AR, sueltos o tratados con cemento, poseen un uso fundamental como material para construcción de capas de firme en obras de infraestructuras lineales.

## 1.4.2- APLICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN Y MIXTOS EN HORMIGONES

Existe otro campo fundamental a analizar, al estudiar los áridos reciclados en relación con la dotación en la mezcla de cierta cantidad de cemento: la fabricación de hormigones, por su importancia en las distintas fases de las obras de construcción.

Hace más de una década, se llevó a cabo un estudio realizado **Etxeberría y col. (2007)**, en el cual, informaron que la incorporación en la fabricación de hormigones de un 25% de árido grueso reciclado es factible, al no disminuir sustancialmente la resistencia. Otros autores, **Mas y col. (2012)**, incrementaron el límite, para hormigones no estructurales, hasta el 40%, concluyendo que no se reducen sustancialmente las propiedades mecánicas de los mismos. Un incremento mayor redundaría en una disminución de las citadas propiedades.

En España, en el año 2008, se publicó la instrucción de hormigón estructural, EHE-08, que contempla el uso de ARH en su fracción gruesa. En esta instrucción se admite la inclusión hasta de un 20% de árido grueso reciclado cuando se trata de hormigones estructurales y hasta un 100% de la misma granulometría cuando son no estructurales y establece una cantidad mínima de cemento en la mezcla, independientemente de la resistencia final, en el caso de hormigones no estructurales. Este último aspecto es una novedad frente a la instrucción de hormigón estructural anterior a la fecha. Los requerimientos en relación con las propiedades exigibles son variables dependiendo del país de uso (De Brito y col., 2018), tal como se observa en la Tabla 2.

Atendiendo a la composición de los residuos de entrada, y dependiendo del origen, puede existir un elevado porcentaje de sulfatos y cloruros, tal como expresan **Martín y col., 2010**. El yeso debe ser extraído de forma manual antes de ser introducido en la planta de tratamiento, mientras que la eliminación de cloruros se puede realizar mediante la inmersión en agua. Mediante estas medidas podrían fabricarse áridos que pudieran ser empleados en la fabricación de hormigones, con objeto de cumplir la instrucción, **EHE-08**.

**Tabla 2** Requerimientos en relación con propiedades físicas y químicas en normas y guías internacionales. De Brito y col., 2018.

Propiedades	Tipo de AR	Límites (%)	Normas más restrictivas	Normas menos restrictivas
Sulfatos solubles en ácido	ARM/ ARH	0.8 / 1.0	LNEC-E471; DIN4226; PG-3	NBR-15116; BS8500-2
Sulfatos solubles en agua	ARH	0.2 / 1.0	LNEC-E471	WBTC 12; NBR-15116
Cloruros solubles en agua	ARH	0.03 / 0.25	EHE-08	NBR-15116
Partículas ligeras	ARM/ ARH	0.1 / 1.0	NB-26; LNEC- E471	EHE-08; NBR-15116
Materia orgánica	ARM/ ARH	0.1 / 2.0	NEN-5905; PTV 406	NBR-15116; LNEC-E471

En general, los hormigones realizados con AR poseen menor resistencia a la compresión que los fabricados con AN, exceptuando el caso en que se adiciona ARC en su fracción fina, en que esta resistencia aumenta. En cualquier caso, el AR grueso tiene mayor influencia en la resistencia a compresión que el fino, según citan **Bezerra y col. (2010)**, en su investigación. El módulo elástico se ve disminuido con la adición de todos los tipos de AR, mostrando mayor influencia el árido grueso reciclado, con excepción de la fracción fina del cerámico, ya citada anteriormente, y confirmado por **López-Gayarre y col. (2009)**. De esta forma, sería factible sustituir también el árido fino natural para la fabricación de hormigón estructural. La resistencia a compresión no se vería afectada por sustituciones hasta del 30%. El módulo de elasticidad y la resistencia disminuyen con la sustitución del árido, aunque sus valores son aceptables hasta porcentajes como el referido. Esta reducción en la resistencia a compresión se puede ver limitada si se incorporan en la mezcla cenizas volantes, tal y como establecen **Poon y col. (2006)**.

El grado de humedad inicial de los áridos reciclados debe ser considerado en todos los casos, ya que está relacionado con las variaciones de volumen en los hormigones jóvenes, provocando el exceso de agua un descenso en la resistencia a compresión del hormigón, de acuerdo con **Poon y col. (2004)**.

**Evangelista y col. (2007)** determinan que la resistencia a la abrasión aumenta al sustituir el AN por reciclado, en su fracción fina.

En cualquier caso, pueden fabricarse hormigones con AR, en porcentajes elevados, para aplicaciones de baja entidad, hecho confirmado por **Rao y col., 2007**. Existen otros autores que estiman como aconsejable la sustitución del AN por reciclado cerámico hasta un 25% para la fracción gruesa y un 50% para la fina, aconsejando limitarse a usos tales como bloques de pavimento o piezas hechas a mano. Es el caso de la investigación desarrollada por **Debied y col. (2008)**.

El aumento en la inclusión de AR, en porcentajes mayores del 50% podría provocar, además, problemas de trabajabilidad, tal como determinan **Bekir y col. (2004)**, aconsejando no superar el 30%. Este hecho, provocado por la alta absorción de agua del AR podría ser compensada por la presaturación húmeda del mismo, tal como reflejan en su estudio **Ettxeberria y col. (2007)**.

Por otra parte, la baja densidad del ARC reduce la densidad del hormigón fabricado con ARM. En la normativa española el contenido en sulfatos solubles en los AR está limitado al 0,8%, encontrándose el contenido en yeso directamente relacionado con esta propiedad, tal como concluyen **Agrela y col. (2011)**. Los AR con un contenido en yeso superior al 1.67% presentan un contenido en sulfatos mayor del 0.8% en la mayoría de los casos. En base a establecer un límite del contenido en yeso de los AR en las plantas, se aconseja marcar el 1.5% como máximo. Es importante hacer un ensayo de composición del AR para determinar el contenido en cerámico y yeso, de forma previa a su inclusión en el hormigón.

Ya ha sido referido que la resistencia del hormigón decrece al aumentar el contenido en ARC, en relación con el AN, siendo esta disminución mayor en la resistencia a compresión que en la resistencia a flexión. En cambio, la resistencia a la abrasión es mayor según aumenta el porcentaje de AR incluidos en la fabricación de hormigón, según establecen **De Brito y col. (2005)**.

**Ettxeberria y col. (2007)** realizaron una investigación donde, adicionando 325 kg de cemento por metro cúbico, el hormigón fabricado con un 100% de árido grueso reciclado redujo su resistencia a compresión en un 20-25%. De esta forma,



para un mismo nivel de resistencia, la cantidad de cemento debería ser aumentada, por lo que se aconseja el uso de árido grueso reciclado para la fabricación de hormigones de baja y media resistencia (20-45 MPa), considerando especialmente el coste, pues un aumento importante de la cantidad de cemento haría inviable su comercialización. En los hormigones de mediana resistencia, 30-45 MPa, la sustitución del 25% del AN por AR mantendría las mismas propiedades mecánicas empleando la misma cantidad de cemento e idéntica relación agua/cemento. Por último, determinan que los hormigones fabricados con un 50-100% de árido grueso reciclado necesitan disminuir la relación agua/cemento un 4-10% y aumentar un 5-10% la cantidad de cemento para obtener la misma resistencia a compresión a 28 días.

Además de la resistencia se hace necesario analizar la durabilidad, en relación con la inclusión de árido fino reciclado. Es lo que hacen **Evangelista y col. (2010)** concluyendo que la absorción de agua aumenta hasta un 46% al incluir AR fino, en sustitución del AN. La resistencia a la carbonatación del hormigón se reduce al incluir AR fino en la mezcla, incrementándose hasta un 40% la penetración del CO<sub>2</sub> con un 30% de AR fino y hasta un 110% con la totalidad del citado AR. De esta forma, en relación con la durabilidad, la sustitución de la totalidad del árido fino por reciclado puede presentar dificultades por lo que se aconseja su inclusión hasta en un 30% como máximo. Aun así, considerando el buen comportamiento mecánico, **Evangelista, y col. (2007)** concluyen que, entendiéndose que existen numerosas estructuras que no se ven afectadas por factores de durabilidad, al encontrarse protegidas de agentes agresivos, pueden fabricarse hormigones con AR finos, considerando el ambiente en el que serán implementados.

La durabilidad ha sido estudiada también al introducir AR contaminados por cloruros junto con las propiedades mecánicas. Además de la inferior densidad y mayor absorción del AR con el AN, así como la presencia de una cantidad significativa de mortero antiguo en la mezcla, los AR contaminados por cloruros lixivian si son sumergidos en agua, según determinan **Martín y col. (2010)**, desapareciendo del árido si se mantienen durante dos semanas por lo que, una vez lavados, podrían ser usados en la fabricación de hormigones sin riesgo de corrosión. Las propiedades mecánicas, a los 28 días, no se ven afectadas por el factor de la contaminación por cloruros. Por otra parte, la durabilidad se puede ver seriamente afectada por la porosidad y el aumento en la absorción de agua de los AR, independientemente del tipo de contaminación, por lo que es

necesario controlar o eliminar el contenido en cloruros, con objeto de minimizar el riesgo de corrosión, según confirman **Debieb y col. (2010)**.

Con respecto a la absorción de agua, no se detecta influencia en la penetración de la misma bajo presión en el hormigón. La calidad del AR es la que determina el aumento en la absorción de agua y el aire que queda retenido, según establecen **López-Gayarre y col. (2009)**. Aun así, si se mantiene constante la relación agua/cemento y se compensa la pérdida de trabajabilidad con la adición de aditivos, las propiedades mecánicas se mantendrían estables. Si el AN es sustituido en un porcentaje inferior al 50% el módulo de elasticidad solo variará ligeramente.

**Padmini y col. (2009)**, determinaron que un hormigón realizado con AR requiere menor relación agua/ cemento y mayor contenido en el segundo para mantener la misma resistencia a compresión que uno realizado con AN. En los tamaños del árido menores, tanto la tensión de compresión como los módulos de elasticidad son menores que los que tenían el hormigón del que provienen.

En la fabricación de hormigones, además de las características mecánicas y químicas, se hace fundamental estudiar la fluencia y retracciones que pudiesen producirse por causa de la adición de AR en la mezcla. En este sentido **Domingo-Cabo y col. (2009)** determinan que la retracción en los hormigones fabricados con un 20% de árido grueso reciclado, después de 28 días, es similar a la de los hormigones fabricados con AN. A los seis meses, la retracción es un 4% superior. En este mismo periodo, con una sustitución del 50%, la retracción aumentaría en un 12%. Al sustituir el 100% del AN por AR, tanto la retracción como la fluencia experimentan un aumento muy significativo, del 70 y del 51%, respectivamente, para un periodo de 180 días. De esta forma, se puede trabajar en condiciones parecidas a las obtenidas del empleo de los hormigones convencionales, en relación con la retracción y fluencia, con una sustitución del árido grueso natural por reciclado hasta del 20%.

Ya ha sido citado que el módulo elástico disminuye con el incremento de la sustitución del árido grueso natural por AR. Este hecho es debido, según **Gómez-Soberón y col. (2002)**, al aumento de la porosidad. Las dos diferencias más significativas versan en el incremento del radio de los poros de mayor tamaño al sustituir el AN por AR, así como por el incremento del volumen en poros con radio inferior a 30 nm.

El grado de humedad ambiental tiene relación con la temperatura ambiente, por lo que a su vez, ésta influirá en la trabajabilidad de un mortero. Para tres condiciones climáticas específicas: calor, frío y estándar de referencia, incluyendo unas condiciones específicas de humedad relativa en el entorno, los resultados del trabajo realizado por **Ortiz y col. (2009)**, muestran que la trabajabilidad del mortero es función de la temperatura de los áridos y de sus propiedades físicas, como la absorción y fricción. Los mejores resultados se obtuvieron para las condiciones de referencia. Los coeficientes de absorción son mayores a altas temperaturas.

El estudio del comportamiento de los morteros con inclusión de árido fino reciclado de distintos tipos muestra menor resistencia mecánica cuando se sustituyen los áridos naturales por reciclados, especialmente si estos son cerámicos. **Corinaldesi y col. (2009)**, determinan una mejora en la adherencia entre las partículas de cemento y las cerámicas, siendo este parámetro de mayor entidad que el primero.

Para entender la disminución en las propiedades mecánicas de los hormigones fabricados con AR se hace necesario estudiar éstos a nivel microestructural. El estudio de los mecanismos que originan el fallo en los hormigones fabricados con AR en relación con los realizados con AN determinan un incremento en la adherencia y una disminución en la resistencia del hormigón al sustituir el

AN por AR, por lo que se modifica la relación entre los áridos y el mortero, provocando un cambio en el proceso de fractura. **Casuccio y col. (2008)** concluyen que se produce una reducción en las ramificaciones de las grietas en las superficies de fractura, por lo que aumenta la fragilidad. El estudio de este hecho es fundamental, pues explica las diferencias del comportamiento mecánico entre hormigones realizados con áridos naturales y reciclados.



Figura 14 Probeta colocada para ensayo a compresión.

Con objeto de estudiar el comportamiento mecánico en hormigones fabricados con AR, existen otros estudios que profundizan en el análisis de la microestructura. Es el caso del trabajo realizado por **Poon y col. (2004)**, que comprueban la resistencia a compresión, relacionando ésta con la microestructura a partir de áridos procedentes de un hormigón de alta resistencia y áridos obtenidos del reciclaje de hormigones de resistencia normal. La resistencia a compresión de un hormigón fabricado con áridos del primer tipo siempre es mayor que si se realiza con el segundo. Este hecho es debido a la resistencia de los áridos y a las propiedades microestructurales en las zonas de transición entre las partículas, aumentando la porosidad en los hormigones fabricados con áridos procedentes del segundo tipo y disminuyendo la resistencia de los enlaces. De esta forma, la superficie porosa de los áridos determina de manera fundamental las propiedades del hormigón a fabricar con éstos.

En el análisis a nivel microestructural es posible analizar el fallo a compresión en un hormigón mediante emisión acústica, siendo fundamental la vibración del hormigón después de la mezcla, pues aumenta la resistencia al existir AR, debido a la reducción de numerosas microgrietas. Este hecho es observado para ciclos de carga estáticos y dinámicos por **Watanabe y col. (2007)**. La vibración, por tanto, es un parámetro fundamental a la hora de aplicar los AR en la fabricación de hormigón

En relación con el comportamiento mecánico de hormigones fabricados con AR ante cargas específicas cabe destacar el análisis del comportamiento sísmico de los marcos de estructuras realizadas con hormigones fabricados con AR. Aunque el comportamiento del marco es inferior según aumenta la sustitución del AN por AR, la resistencia ante el ataque de un terremoto es aceptable, por lo que este tipo de acciones no son condicionantes para decidir el uso de un AR. Los valores son analizados según lo estipulado en la normativa china de aplicación por **Xiao y col. (2006)**.

Ya fue citada con anterioridad la posibilidad de realizar la presaturación húmeda del AR para controlar el aumento de absorción en relación con los AN. Existen otros métodos estudiados con profundidad, como es el caso de **Bairagi y col. (1990)**. Algunos de estos métodos relacionan el hecho referenciado con el comportamiento mecánico a nivel microestructural. Es el caso del método de dos etapas: la peor calidad del hormigón fabricado con AR viene determinada por la mayor absorción de agua requerida, la más alta porosidad, así como la mayor

debilidad de los enlaces entre el cemento y los AR. El método propuesto basa su efectividad en el relleno de huecos intersticiales y grietas mejorando la resistencia a compresión y otras propiedades mecánicas. El método consiste en mezclar, en primer lugar, los áridos finos y gruesos, tanto reciclados como naturales, para incluir a los 60 segundos la mitad del agua prevista. Tras otros 60 segundos de mezcla se añade el cemento y, tras 30 segundos, la otra mitad del agua. Tras 120 segundos se obtiene el producto final. Este método es comparado con el tradicional realizando la mezcla completa y mezclando ésta durante 120 segundos, según citan **Tam y col. (2005)**. Con el método descrito, de mezcla en dos etapas, es factible determinar la proporción óptima de inclusión de áridos reciclados, hecho confirmado por **Tam y col. (2007)**, con posterioridad. La naturaleza porosa del ARH reduce las propiedades mecánicas de los hormigones fabricados con el mismo. La sustitución de entre un 0% y un 100% el AN por ARH, con una incorporación de entre un 25-40% puede optimizarse mediante el uso del método de mezcla en dos etapas. En mayores porcentajes de sustitución el uso del método propuesto también produce una mejora en las propiedades, en relación con el método tradicional.

**Agrela y col. (2019)** establecen el ensayo de composición, referido a las partículas cerámicas y al yeso, como determinante para aceptar los ARM en la fabricación de hormigón, al proporcionar la información necesaria y suficiente sobre los sulfatos solubles y la absorción de agua, fundamental de cara a su inclusión.

Una de las particularidades de los AR es la variabilidad condicionada por su origen, por lo que pueden contener elementos contaminantes de muy distinta naturaleza, lo que redundaría en la heterogeneidad de su composición. Es un hecho que la limpieza en el proceso productivo es clave a la hora de fabricar AR. En este sentido se hace necesario determinar la influencia de elementos contaminantes tales como madera, vidrio, y distintos porcentajes de materiales de construcción distintos de los habituales. Es concluyente el efecto de los contaminantes citados en las propiedades de adoquines de hormigón fabricados con ARH. **Poon y col. (2007)** realizan la comparación de un bloque fabricado exclusivamente con ARH con otros donde se ha incluido ladrillo triturado, azulejos, vidrio y virutas de madera, sustituyendo un 10% del ARH por estos contaminantes, observándose, en primer lugar, un decrecimiento del 5% de la densidad. La resistencia a compresión es de entre un 71.5% y un 82.3% de la original, aumentando según se reduce la relación agua / cemento. Tanto el material cerámico como la madera

aumentan la absorción de agua. De esta forma, sería factible la incorporación hasta de un 10% de estos elementos en la fabricación de adoquines.

Existen otros residuos cuya valorización podría llegar a ser muy interesante, por la cantidad generada a nivel mundial y las dificultades en su reciclaje, cuya aplicación ha sido estudiada también en los materiales tratados con cemento y en los hormigones. Es el caso de los neumáticos. Tras la realización de una serie de mezclas se concluye que la adición de neumático triturado en los materiales basados en el cemento, tales como hormigón, morteros, etc., reduce la densidad y la resistencia a compresión en un 20% y 70% respectivamente, comparada con la mezcla tradicional, según informaron **Fattuhi y col. (1996)**. Es esperable un aumento en el ancho de las grietas, viéndose la inflamabilidad del neumático muy reducida por la presencia del cemento. Es factible incorporar neumáticos triturados en las mezclas pues, a pesar de reducirse la resistencia a compresión, mejora la resistencia a la fractura, al proporcionar a la mezcla mayor capacidad de deformación, según citan **Turatsinze y col. (2007)**. **Ganjian y col. (2009)** determinan, en este sentido, que el aumento del módulo de elasticidad de la mezcla es causa del aumento de la resistencia a la fractura.

Existe una aplicación del hormigón para la construcción de bases de carreteras, conocida como hormigón seco compactado (HSC), en España. En la comunidad internacional se denomina hormigón compactado con rodillo (RCC: Roller compacted concrete). El uso de ARH en la fabricación de HSC es factible, presentando muy buenas características para este fin: bajo contenido en finos, buena densidad, coeficiente de absorción y desgaste de los ángulos, por lo que su uso es factible, según citan **Courard y col. (2009)**.

El HSC con AR ha sido estudiado también en relación con diversos elementos contaminantes, observando la influencia del mortero adherido como principal causa de diferencia del AR con el AN. Los AR provenientes de un hormigón contaminado contienen cloruros y sulfatos en porcentajes excesivos por lo que podría existir riesgo de corrosión. Es aconsejable sumergir estos áridos en agua durante al menos dos semanas, con objeto de provocar la lixiviación de los citados cloruros y sulfatos y eliminar así el riesgo, según determinan **Debieb y col. (2009)**, en línea con lo anteriormente expuesto por otros autores. El comportamiento en el tiempo de un hormigón fabricado con AR es aceptable para su uso como material de construcción en obras de infraestructura civil, por ejemplo, una subbase. Los cloruros y sulfatos aludidos no tienen influencia en las propiedades

mecánicas del hormigón seco compactado, aunque es fundamental su control, pues es un hecho que podría inducir la degradación química y, por lo tanto, mermar la durabilidad del hormigón considerablemente.

Los investigadores han trabajado sobre todos los tipos de hormigón existentes, en líneas generales, estudiando la inclusión de AR de RCD en su fabricación. En esta línea se han analizado también las propiedades del hormigón autocompactante fabricado con árido grueso reciclado de hormigón. Se vuelve a comprobar la mayor absorción de agua requerida por la existencia del cemento residual al incluir AR en la mezcla, aconsejando la saturación húmeda previa, (**Grdic y col., 2010**), en línea con otros trabajos anteriores. La adición de AR provoca, además, en línea con los trabajos realizados por diversos autores, un aumento en la porosidad, que a su vez provoca una disminución en la densidad. Se obtiene un descenso de la resistencia a compresión del 3.88% al sustituir el 50% del árido grueso natural por AR, ascendiendo al 8.55% al realizar la sustitución total del citado árido grueso.

Del mismo modo, la resistencia a la tracción disminuye desde el 2.49% al 13.95% al sustituir desde el 50% al 100% el árido grueso natural por AR. En estos porcentajes la absorción de agua aumenta entre el 0.15% y el 0.37%. Se concluye que el hormigón autocompactante puede ser fabricado empleando árido grueso reciclado de hormigón eligiendo los materiales convenientemente, así como el método de mezcla a emplear.

### **1.4.3.- APLICACIONES DE ÁRIDOS RECICLADOS EN CARRETERAS.**

En relación con el empleo de AR de RCD es preceptivo el cumplimiento del **PG-3**, incorporando el ensayo de estabilidad de sulfatos.

Los valores establecidos en el **PG-3** hacen inviable la aplicación de una gran parte de los AR producidos en España, especialmente en los parámetros referentes a sulfatos, sales solubles, materia orgánica o desgaste de los ángeles, para la construcción de carreteras en su capa de firme.

En **OFOM-1382, (2002)**, se definen distintos conceptos que conforman las distintas unidades de una carretera o vía de comunicación.

El terraplén tiene por destino conformar una plataforma sobre la que se asentará el firme de una carretera, siendo el elemento inferior, y constando de las zonas siguientes, pudiendo observarse en la Figura 15:

- *Coronación*: Es la parte superior, sobre la que se apoya el firme, y será superior a 50 centímetros.
- *Núcleo*: Es la parte del terraplén comprendida entre el cimientado y la coronación.
- *Espaldón*: Es la parte exterior del relleno que podrá constituir o formar parte de los taludes del terraplén.
- *Cimiento*: Es la parte inferior del terraplén y estará en contacto con la superficie de apoyo. Tendrá un espesor mínimo de un metro.

Para la ejecución de las distintas partes de los terraplenes podrá hacerse uso de uno o varios de los materiales siguientes, clasificados según sus características físicas y químicas, y en orden de mayor a menor calidad:

- Suelo seleccionado
- Suelo adecuado
- Suelo tolerable
- Suelo marginal

En líneas generales, para la coronación se utilizarán suelos adecuados o seleccionados, para el cimientado tolerables, adecuados o seleccionados, igual que para el núcleo. Para los espaldones se podrán usar otros tipos, con las características definidas en el proyecto.

La parte superior de la carretera será la capa de firme, constituida en su nivel superficial por mezcla bituminosa o hormigón de firme. La parte inferior será ejecutada mediante hormigón magro vibrado, gravacemento, suelocemento o zahorra artificial.

Atendiendo a estos parámetros, los AR podrán adaptarse a una de las categorías citadas pudiendo contrastarse sus propiedades, así como la viabilidad de aplicación de los mismos.

En relación con las propiedades mecánicas, el análisis de deflexiones es objeto de estudio en numerosos trabajos, siendo el comportamiento mecánico del ARM adecuado para la construcción de capas de firme en carreteras, según informaron **Arulrajah y col. (2013)**, que realizaron una investigación incluyendo



la adición de asfalto y material cerámico, en proporciones del 20% y 5% respectivamente, al hormigón reciclado, manteniendo unas buenas propiedades de la mezcla. Los autores determinaron que los AR poseen menor tensión permanente y mayor módulo resistente que los naturales.

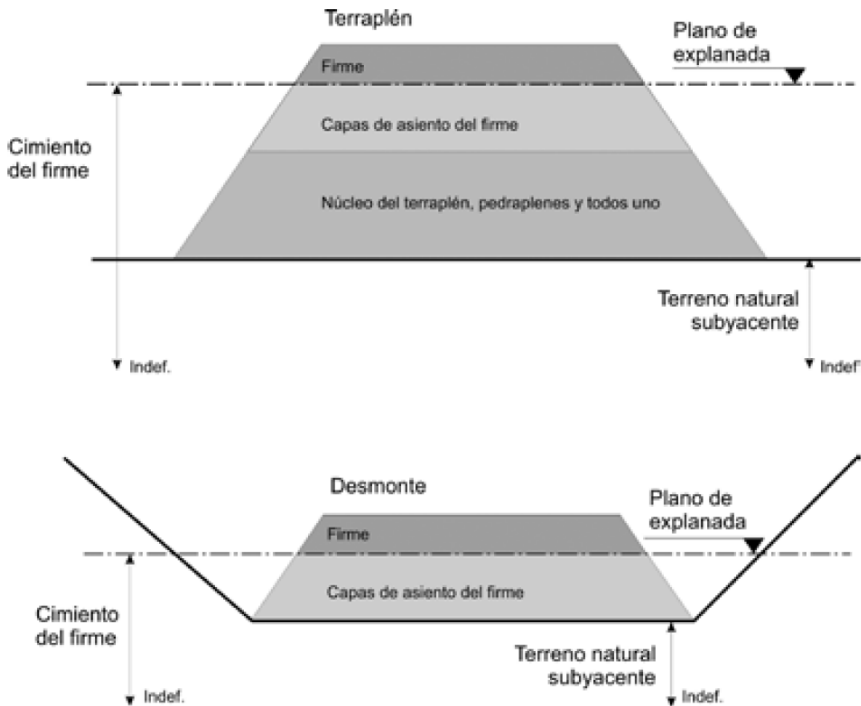


Figura 15 Capas en infraestructura lineal. Carreteras. Fuente: CAT-FIRMES, 2016.

Los parámetros de compactación, composición y granulometría, a tener en cuenta en la ejecución de capas de firme fueron ordenados, según importancia por su influencia en el comportamiento mecánico, en el trabajo realizado por **Molenaar y col. (2002)**, que estudiaron los efectos de la granulometría, composición y grado de compactación, directamente relacionado con la aportación de humedad, de los ARH y ARC. Los resultados muestran una buena calidad en la construcción de bases de carreteras. Ya ha sido referida la

importancia que tiene un contenido elevado en la fracción fina del árido, lo cual permite que la capa tenga una mayor cohesión. Del mismo modo, es fundamental el grado de compactación del material, siendo éste el parámetro más importante en la resistencia a la compresión, seguido de la composición y, finalmente, de la granulometría.

Dada la diversidad del residuo de origen deben ser considerados los análisis de posibles contaminantes, que determinen la inerticidad del árido. Para ello **Wahlström y col. (2000)** realizaron el ensayo de lixiviación por el método de columna, mostrando la existencia de sulfatos y cromo, en cantidades aceptables desde el punto de vista medioambiental, partiendo del análisis del contenido en cadmio y cobre también. El contenido de materia orgánica fue muy bajo. El estudio concluye que el empleo de los materiales reciclados en la construcción de carreteras es factible desde el punto de vista medioambiental.

Químicamente las sales solubles son uno de los principales factores a analizar, por su inexistencia en los AN. En la investigación realizada por **Jiménez y col. (2012)**, se determinó que el contenido en sales solubles puede ser incrementado hasta un 1.3% sin reducir la calidad de los áridos en aplicaciones rurales.

Ha sido referido anteriormente el descenso en el índice CBR al incrementar la adición de AR, en relación con los AN, así como la influencia de la composición de los mismos, dependiendo de los porcentajes de material cerámico, hormigón, asfalto, etc., y la edad, tipos y mezclas de origen.

Con la incorporación de **OFOM-2523, 2014**, se han considerado de forma particular los AR en zahorras, gravacemento y suelocemento, incorporado la posibilidad de uso de los mismos para las categorías de tráfico pesado T2 a T4. Frente a los parámetros tradicionalmente exigidos se incorpora el de la pérdida de masa en el ensayo de estabilidad de sulfato de magnesio, mediante la norma **UNE EN 1367-2**, que deberá ser menor o igual al 18%.

Con respecto a la composición química se establece que el contenido ponderal en azufre, según la norma **UNE-EN 1744-1**, será inferior al 5 por mil, cuando la capa esté en contacto con materiales tratados con cemento y menor al uno por ciento en los otros casos. El resto de los parámetros se mantienen similares en relación con los incluidos a la edición del año 2004.

Existen diversas carreteras ejecutadas con AR, entre las que cabe destacar:

- Anillo verde ciclista de Madrid, en el año 2006. Se trata de una vía circular que circunvala el casco urbano de Madrid. En su segunda fase, de 15 kilómetros se utilizó ARH.

- Conexión de A-357 con A-367, en Málaga, año 2008. Se trata de la conexión entre las carreteras de paso habitual entre las ciudades de Málaga y Ronda. Se construyeron los ramales de salida con ARH y ARM, frente al ramal ejecutado con AN. De forma paralela se hicieron los dos ramales restantes con grava cemento con árido grueso reciclado de hormigón y grava cemento con áridos naturales.



**Figura 16** Conexión A-357 y A-367. Ardales, Málaga.

Se puede observar en la Figura 16.

- Autovía Murcia- Albacete, en el año 2000. Se utilizaron áridos procedentes del reciclaje de residuos de hormigón directamente en la capa de firme.

- Tramo de hiper-ronda, en Málaga. Ejecutado con suelo cemento, a partir de ARC en su totalidad.

- Tramo experimental en el corredor de Txorierrri, dentro del aumento de capacidad de la carretera BI631, Bilbao A8-Bermeo, en su enlace de Galbarriatu. Se incluyó ARM en un tramo de 85 metros.

## 1.5.- RESIDUOS DE VIDRIO DE TUBOS DE RAYOS CATÓDICOS (CRT)

La cantidad de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) o desechos electrónicos generados en el mundo está creciendo rápidamente. El contenido de componentes peligrosos en los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) es una preocupación importante durante la fase de gestión de residuos. Lo ideal sería que los materiales de los productos electrónicos pudiesen reutilizarse cuando los productos lleguen al final de su vida útil (**Directiva de la UE, 2003**). En la Unión Europea (UE), los RAEE representan aproximadamente 7.5 millones de toneladas cada año (**Marshall y Henderson, 2001**), donde los monitores de equipos informáticos y los televisores que contienen CRT representan aproximadamente el 80% del total de desechos electrónicos (**Andreola y col., 2005**). En Estados Unidos se estima que 300.000 toneladas de desechos electrónicos terminaron en vertederos en el año 2000 (**Gable y Shireman, 2001**) y, según lo informado por **Musson y col. (2000)**, los CRT representan aproximadamente un tercio del total de residuos electrónicos, en peso.



Figura 17 Tubos de rayos catódicos

Los tres tipos de vidrio que constituyen el CRT del monitor contienen elementos peligrosos y pesados (plomo, estroncio, antimonio, bario, europio, selenio, etc.) y pesan entre el 50% y el 85% del peso total de un monitor de ordenador o un televisor (**Desgeorges, 1992, Palm, 1995, Andreola y col., 2005**). Actualmente, los monitores recolectados son desmantelados y tratados, y el vidrio CRT generalmente termina en un vertedero de residuos. Por lo tanto, en Europa, casi el 90% de los productos electrónicos al final de su vida útil se eliminan en vertederos. Como el contenido de plomo en estos productos de desecho representa hasta el 80% de los metales tóxicos en la electrónica de descarte, los CRT representan un claro peligro potencial de contaminación para el medio ambiente (**Musson y col., 2000**).

## 1.5.1- CRT COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

El vidrio CRT posee una resistencia intrínseca razonable, baja absorción de agua y es rico en sílice, lo que lo hace adecuado para su uso como arena o puzolana en materiales de construcción. En consecuencia, se han emprendido varios proyectos para utilizar el vidrio CRT como sustitutivo del AN en la fabricación de cemento y hormigón. Ha habido considerables investigaciones centradas en la viabilidad de aplicar estos desechos de CRT reciclados en el campo de la construcción, sin embargo, en la actualidad, hay pocas revisiones exhaustivas sobre este importante tema, excepto el trabajo de **Rashad, (2015), Iniaghe y Adie, (2015)**.

Es muy importante analizar diferentes aspectos y factores críticos en el rendimiento de los productos resultantes fabricados con CRT, los mecanismos de preparación, el comportamiento de lixiviación, el destino del plomo y la seguridad ambiental y humana.

### 1.5.1.1 - MORTERO DE CEMENTO CON CRT

La arena de río natural se usa comúnmente como árido fino en la producción de mortero de cemento. Sin embargo, la excavación excesiva de arena causa serios problemas ambientales (**Sua-iam y Makul, 2013**). La reutilización del vidrio CRT para reemplazar arena de río y cemento en mortero es factible debido a su similar estructura química. **Zhao y col. (2013)**, y **Zhao y Wei (2011)**, informaron de la sustitución parcial de vidrio CRT no tratado y tratado con ácido nítrico por arena natural en mezclas de mortero.

Algunos estudios informaron que los morteros con vidrio CRT podrían aumentar ligeramente la resistencia. **Zhao y col. (2013)**, relataron que la mayor resistencia se debió a la mejora del empaque del árido en el sistema de mortero. Además, las partículas de vidrio CRT muy finas pueden reaccionar como relleno o puzolana para acelerar la hidratación del cemento. **Maschio y col. (2013)**, prepararon mortero de alta resistencia con el uso de vidrio CRT molido y superplastificante. Las muestras que contenían vidrio CRT mostraron un aumento más rápido en la resistencia con respecto a las composiciones de referencia. **Moncea y col. (2013)**, utilizó paneles y vidrio de embudo (más del 95% de vidrio embudo) como material cementoso suplementario en morteros a base

de cemento Portland y cemento de escoria , así como para el reemplazo parcial del componente sólido en ligantes de escoria/cenizas volantes activadas con álcali. Las resistencias a la compresión de los morteros estudiados fueron casi idénticas a las del mortero de referencia.

**Ling y Poon (2012)**, estudiaron las características de lixiviación del mortero de cemento que contenía vidrio CRT y descubrieron que la lixiviación de plomo de las muestras de mortero preparadas con vidrio CRT tratado con ácido cumplían con los límites reglamentarios

### 1.5.1.2.- HORMIGON CON CRT

Como se ha comentado anteriormente, el vidrio CRT es rico en sílice y posee naturaleza puzolánica, lo que lo convierte en un posible sustituto de la arena de río en el hormigón. **Romero y col. (2013)**, usaron vidrio CRT reemplazando el árido fino en el hormigón. Se realizaron pruebas de durabilidad, resistencia y lixiviación para investigar el rendimiento integral del hormigón CRT. Los resultados indicaron que la resistencia del hormigón CRT excedía de la de la muestra de control. Sin embargo, el hormigón CRT era susceptible a la expansión.

**Walczak y col. (2015)**, también revelaron que el uso de vidrio CRT concluyó con un aumento del 16% en la resistencia a la compresión, y un aumento del 14% en la resistencia a la flexión. **Sua-iam y Makul (2013)**, reemplazaron parcialmente la arena natural en mezclas de hormigón autocompactante con vidrio CRT. Se observó una reducción en el flujo de asentamiento y los tiempos de fraguado inicial y final aumentaron con un aumento en el contenido de vidrio CRT.

**Ling y Poon (2014)**, utilizaron vidrio del embudo tratado con ácido para reemplazar el árido fino en bloques de hormigón. Todos los bloques demostraron una resistencia a compresión y una expansión aceptables, pero también mejoraron la resistencia a la absorción de agua y la retracción por secado. Para limitar la posible lixiviación de plomo, se recomendó limitar la inclusión de vidrio CRT en bloques de hormigón por debajo del 25%.

## 1.6.- NORMATIVA RELATIVA AL USO DE MATERIALES RECICLADOS Y RESIDUOS EN CONSTRUCCIÓN

---

Tal como ha sido referido anteriormente, la normativa estatal de referencia para la aplicación en carreteras y vías de comunicación es la **OFOM-2523 (2014)**, actualización del **PG-3**. Se contempla de forma específica el uso de los AR. Esta normativa hace que en numerosas ocasiones éstos no puedan ser utilizados por sus particularidades en relación con los AN. Es el caso específico de diversos parámetros, tales como el desgaste de los ángeles, el contenido en materia orgánica cuando existen residuos de aglomerado asfáltico, el contenido en sales o sulfatos, etc.

Existe otro documento que se considera interesante pues incluye los resultados obtenidos en diversas obras realizadas con áridos reciclados, **PR-GEAR (2012)**.

Otro trabajo a tener en cuenta es la investigación **INV-IHOBE (2011)**, que es un referente desde hace años al aportar el análisis de numerosas muestras realizadas con AR.

El **CAT-FIRMES (2016)** es un documento que establece límites claramente definidos para cada tipo de vía y de materia a aplicar.

Con objeto de garantizar la ausencia de elementos contaminantes en los residuos, que les pudieran hacer perder su carácter como inertes, se está a los dispuesto en la **Orden AAA (2013)**. Los áridos deben ser clasificados, en todos los casos, como inertes.

Este trabajo se realiza de acuerdo con las pautas y objetivos establecidas en **DIR2008CE (2008)**, donde se cita, en su *artículo 11.*, que los estados pertenecientes a la Unión Europea fomentarán el reciclaje con niveles altos de calidad, alcanzando un mínimo del 70% en peso para la reutilización, reciclado y valorización. Este porcentaje queda reflejado, del mismo modo, en el **PEMAR-16, 2016**. Los objetivos pueden observarse en Tabla 3.

**Tabla 3 Objetivos para RCD. 2016-2020.**

	2016	2018	2020
% RCD no peligrosos destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otras operaciones de valorización (con exclusión de las tierras y piedras limpias) (mínimo)	60	65	70
% Eliminación de RCD no peligrosos en vertedero (máximo)	40	35	30
% de tierras y piedras limpias (LER 17 05 04) utilizadas en obras de tierra y en obras de restauración, acondicionamiento o relleno (mínimo)	75	85	90
% Eliminación de tierras y piedras limpias (LER 17 05 04) en vertedero respecto del volumen total de materiales naturales excavados. (máximo)	25	15	10

El **RD 105/08 (2008)**, establece, en su artículo 15, que la administración deberá contemplar desde la fase de proyecto en las obras públicas aquellas alternativas que reduzcan el empleo de recursos naturales, haciendo uso para ello de los productos obtenidos del reciclaje de residuos. En el mismo sentido, se contempla este aspecto, en el **D73/2012 (2012)**, artículo 87, para la comunidad autónoma de Andalucía.

La **EHE-08 (2008)**, facilita la entrada del árido grueso reciclado, procedente de la trituración de residuos de hormigón, en los hormigones, hasta un 20% en los estructurales y un 100% en los no estructurales.

Los residuos de construcción y demolición son catalogados, según tipología enumerada en **OMAM-02 (2002)**, según se recoge en la Tabla 4:



Tabla 4 Códigos LER Residuos

CÓDIGO LER	DESCRIPCIÓN
<u>17 01</u>	<u>Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.</u>
<b>17 01 01 (*)<sub>1</sub></b>	<b>Hormigón.</b>
<b>17 01 02 (*)<sub>1</sub></b>	<b>Ladrillos.</b>
<b>17 01 03 (*)<sub>1</sub></b>	<b>Tejas y materiales cerámicos.</b>
17 01 06*	Mezclas, o fracciones separadas, de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos que contienen sustancias peligrosas.
<b>17 01 07 (*)<sub>1</sub></b>	<b>Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos distintas de las especificadas en el código 17 01 06.</b>
<u>17 02</u>	<u>Madera, vidrio y plástico.</u>
17 02 01	Madera.
17 02 02	Vidrio.
17 02 03	Plástico.
17 02 04*	Vidrio, plástico y madera con sustancias peligrosas
<u>17 03</u>	<u>Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.</u>
17 03 01*	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla.
<b>17 03 02 (*)<sub>1</sub></b>	<b>Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 17 03 01.</b>
17 03 03*	Alquitrán de hulla y productos alquitranados.
<u>17 04</u>	<u>Metales (incluidas sus aleaciones).</u>
17 04 01	Cobre, bronce, latón.
17 04 02	Aluminio.
17 04 03	Plomo.
17 04 04	Zinc.
17 04 05	Hierro y acero.
17 04 06	Estaño.

17 04 07	Metales mezclados.
17 04 09*	Residuos metálicos contaminados con sustancias peligrosas.
17 04 10*	Cables que contienen hidrocarburos, alquitrán de hulla, etc.
17 04 11	Cables distintos de los especificados en el código 17 04 10.
<u>17 06</u>	<u>Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.</u>
17 06 01*	Materiales de aislamiento que contienen amianto.
17 06 03*	Otros materiales de aislamiento que contienen sustancias peligrosas.
17 06 04	Materiales aislamiento distintos de los especificados en códigos 17 06 01 y 17 06 03.
17 06 05*	Materiales de construcción que contienen amianto.
<u>17 08</u>	<u>Materiales de construcción a partir de yeso.</u>
17 08 01*	Materiales de construcción a partir de yeso contaminados con sustancias peligrosas.
17 08 02	Materiales de construcción a partir de yeso distintos de código 17 08 01.
<u>17 09</u>	<u>Otros residuos de construcción y demolición.</u>
17 09 01*	Residuos de construcción y demolición que contienen mercurio.
17 09 02*	Residuos de construcción y demolición que contienen PCB
17 09 03*	Otros residuos de construcción y demolición (incluidos los residuos mezclados) que contienen sustancias peligrosas.
<b>17 09 04 (*)<sub>1</sub></b>	<b>Residuos mezclados de construcción y demolición distintos de los especificados en los códigos 17 09 01, 17 09 02 y 17 09 03.</b>

(\*) Residuos peligrosos.

**(\*)<sub>1</sub> Residuos considerados para su valorización en el estudio.**

En la orden citada, se incluyen una serie de operaciones de valorización. En el caso que nos ocupa, se considerará la denominada como "R5: Reciclado o recuperación de otras materias inorgánicas".

## **1.7.- CONCLUSIONES PREVIAS**

---

Una vez analizados los antecedentes existentes, así como la gran cantidad de aplicaciones realizadas con materiales sueltos, se consideró interesante investigar la aplicación de los áridos reciclados mezclados con cemento en la fabricación de hormigones, suelocemento, o gravacemento. Se optó por estudiar la aplicación de gravacemento, al observar que el estudio de una capa de firme realizada con este material, con árido grueso reciclado incluido en una vía de gran tráfico, en condiciones reales, podía aportar nuevas conclusiones al estado actual existente. Asimismo, se consideró interesante realizar un hormigón con árido grueso reciclado, y ejecutar una vía incluyendo éste como capa de firme.

Del mismo modo, al analizar la aplicación de distintos residuos mezclados en los áridos reciclados, tales como cenizas, escorias, etc., teniendo conocimiento de la complejidad en la aplicación del vidrio obtenido del reciclaje de los televisores tipo CRT, y con objeto de evitar la eliminación en vertederos de residuos no peligrosos, se optó por complementar la presente tesis con su inclusión en capas de firme de carreteras, mezclado con áridos reciclados tratados con cemento.

# **CAPÍTULO 2 –**

---

## **OBJETIVOS Y METODOLOGÍA**



# CAPÍTULO 2.- OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

---

El presente trabajo tiene un objetivo general, así como diversos objetivos específicos, que serán detallados para su consecución final tras la investigación desarrollada.

## 2.1.- OBJETIVOS GENERALES

---

El objetivo general del presente trabajo es evaluar desde el punto de vista físico, químico y mecánico el comportamiento de distintos tipos de áridos reciclados de residuos de la construcción y demolición tratados con cemento para su uso en capas estructurales de carreteras, en condiciones reales de tráfico.

Para ello se ha dividido el trabajo en dos grandes bloques:

- Áridos reciclados tratados con cemento (AR-TC). Esta línea de investigación consta a su vez de un estudio de aplicación de AR en hormigones, uno de AR-TC, así como la aplicación de ambos, a escala real, en carreteras.
- Áridos reciclados tratados con cemento con residuos de vidrio CRT.

## 2.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

---

Para la consecución del objetivo general, se establecen diferentes objetivos específicos en relación con cada uno de los bloques considerados

### 2.2.1.- ÁRIDOS RECICLADOS TRATADOS CON CEMENTO

Los áridos reciclados ligados con cemento han sido estudiados con objeto de determinar tanto el comportamiento de un hormigón reciclado, incorporando AR por árido grueso natural, como de una gravacemento, para su uso en una capa de firme de una vía de comunicación, a escala real, por lo que los objetivos específicos serán incluidos en cada uno de los apartados.

### **2.2.1.1.- HORMIGONES CON ÁRIDOS RECICLADOS**

Se plantean los siguientes objetivos específicos:

OBJ. 1- Caracterización de los AR. Se analizará un árido grueso reciclado procedente de residuos de hormigón, en relación con los requerimientos existentes para ser sustituido en la fabricación de un hormigón convencional, de acuerdo con las especificaciones técnicas impuestas por la **EHE (2008)**.

OBJ. 2- Dosificación y fabricación de probetas. Se considerarán y estudiarán diversas mezclas, variando el porcentaje de cemento a adicionar e incluyendo ARH y AN, con objeto de poder establecer una comparación exhaustiva.

OBJ. 3- Estudiar el comportamiento mecánico de las probetas fabricadas. Se determinará la resistencia a compresión de cada una de las probetas previamente diseñadas a diferentes edades de curado para evaluar su evolución en el tiempo.

OBJ. 4- Diseñar el tramo de prueba. Se diseñará un tramo de prueba considerando la incorporación del AR en el hormigón a incluir en la capa de firme

OBJ. 5- Realizar la ejecución de un tramo experimental para analizar su comportamiento. Se construirá una vía urbana incluyendo una capa de firme realizada con hormigón donde el AN ha sido sustituido por ARH en su fracción gruesa.

OBJ. 6 – Analizar el comportamiento del tramo de prueba. A partir de los valores obtenidos anteriormente será posible determinar la resistencia y el cumplimiento de la normativa vigente en relación con los parámetros exigibles. De esta forma, se podrá determinar la viabilidad de uso a escala real.

OBJ. 7- Analizar los resultados. Con la información obtenida será posible determinar la viabilidad de uso de hormigones fabricados con ARH.

### **2.2.1.2.- ÁRIDOS RECICLADOS TRATADOS CON CEMENTO**

Los objetivos específicos son los siguientes:

OBJ. 1 – Analizar las propiedades de los AR. En primer lugar, será necesario realizar un estudio de laboratorio que permita analizar las propiedades de los áridos reciclados con el objetivo de caracterizar y evaluar las propiedades físicas y químicas del material objeto de estudio. Una vez contrastada la posibilidad de

uso será necesario realizar ensayos de tipo estructural para el análisis de la capacidad portante de los AR-TC en capas de firme.

OBJ.2- Diseñar el tramo de prueba y las capas de firme. Tomando los valores anteriormente obtenidos se diseñarán cada una de las capas, tanto la que se realizará con AR, como la que se ejecutará con AN, determinando las características de las mismas.

OBJ. 3- Realizar la ejecución de un tramo experimental y estudiar su comportamiento. Se pretende ejecutar un tramo real en una carretera autonómica con tráfico tipo T2 o T3, considerando para ello la inclusión de una capa estructural de firme realizada con AR-TC, en forma de gravacemento. Del mismo modo se construirá un tramo similar haciendo uso de AN tratados con cemento.

OBJ. 4. – Analizar el tramo de prueba. En el inicio de los trabajos se realizará el control de los materiales en obra, con objeto de contrastar los valores obtenidos con los reflejados por los ensayos de laboratorio. Del mismo modo, se realizará un control exhaustivo durante el extendido y la compactación, mediante el ensayo Próctor Modificado, incidiendo en la humectación previa del material. Una vez ejecutada la capa de firme se tomarán testigos con objeto de obtener los valores de resistencia, además de realizar el análisis de deflexiones mediante placas.

OBJ. 5.- Control periódico del tramo de prueba. Se realizará un control periódico una vez puesto en servicio el tramo, especialmente en lo referente a la durabilidad del material, con objeto de determinar la resistencia de la capa ejecutada a lo largo del tiempo

OBJ. 6.- Analizar los resultados. Una vez ejecutado el tramo de prueba será posible proceder al análisis de resultados, comparando el tramo realizado con AR con el construido con AN.



### **2.2.2. ÁRIDOS RECICLADOS CON RESIDUOS DE VIDRIO CRT**

Se han establecido una serie de objetivos específicos:

OBJ. 1- Analizar las muestras. Se pretende realizar el análisis de un ARM, solo y mezclado con ARA, así como los residuos de vidrio CRT, distinguiendo entre la parte frontal y la trasera. Se determinarán tanto las propiedades físicas como las químicas.

OBJ. 2- Diseñar las mezclas. Considerando los parámetros obtenidos con anterioridad se diseñarán las mezclas a emplear, atendiendo tanto al comportamiento mecánico como el potencial contaminante que pudiera producir la incorporación de esta tipología de residuo industrial.

OBJ. 3- Análisis de impacto ambiental mediante lixiviados. Se estudiará la lixiviación de las muestras con el objetivo de determinar los componentes potencialmente contaminantes y garantizar la seguridad de utilización.

OBJ. 4- Estudio de las propiedades físico- químicas y mecánicas. Se ensayarán los parámetros de compactación, resistencia y composición con objeto de determinar su posible uso estructural.

OBJ. 5 – Análisis de los resultados. Con los datos obtenidos será posible analizar la viabilidad del uso de la mezcla de AR y vidrio CRT en aplicaciones a escala real.

## 2.3. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

---

En primer lugar, se ha realizado un estudio exhaustivo de los antecedentes existentes en relación con el reciclaje de residuos aplicados en obras de construcción, en sus distintas variantes, haciendo hincapié en los de construcción y demolición.

Las publicaciones consultadas se componen básicamente de artículos científicos, libros, actas de congresos, tesis doctorales y normativa de aplicación, así como distintas páginas web de entidades públicas, asociaciones y fundaciones relacionadas con el sector del reciclaje y la economía circular.

De esta forma, se ha pretendido conocer el estado del arte, en la fecha de la realización de la presente tesis, con el objeto de tener una visión amplia y global sobre el fin a conseguir en las investigaciones desarrolladas.

En relación con las materias específicas en estudio, se han analizado especialmente los trabajos existentes relacionados con los AR precedentes de RCD, para su aplicación en vías de comunicación y en fabricación de hormigones.

Del mismo modo, se ha distinguido entre los ligados con cemento y los materiales sueltos.

Para el desarrollo del trabajo se ha partido de la consideración de dos grandes bloques, anteriormente referidos: áridos reciclados tratados con cemento, material granular suelto y mezclados con vidrio CRT.

En el primero, a su vez, se perseguía ejecutar dos tramos de prueba, uno con hormigón fabricado con AR y otro con AR-TC, conocido como gravacemento.

Es por ello que el primer paso, en todos los casos, consistió en analizar los materiales a emplear en cada investigación, para tener unos datos de partida fidedignos que permitieran tomar las decisiones necesarias en función de sus propiedades ingenieriles.

Conocidos los materiales de partida se diseñaron y analizaron las mezclas, en cada caso, incidiendo en sus propiedades físicas y químicas, con cantidades variables de cemento. La adición de vidrio CRT contó, además, con un estudio exhaustivo de contaminantes, con objeto de garantizar la seguridad medioambiental del mismo en aplicaciones reales.

El diseño de cada tramo de prueba, con la sección de la capa de firme, fue el paso a desarrollar a continuación, así como la ejecución posterior de cada uno de ellos, en distintos momentos.

Una vez ejecutados se procedió al análisis de éstos, incluyendo pruebas de resistencia a distintos niveles. En el caso de la mezcla con vidrio CRT se realizó, del mismo modo, la caracterización.

Por último, tras el análisis se pudieron realizar las conclusiones, así como establecer futuras líneas de investigación.

Se incluye un esquema de la metodología seguida en la Figura 18.

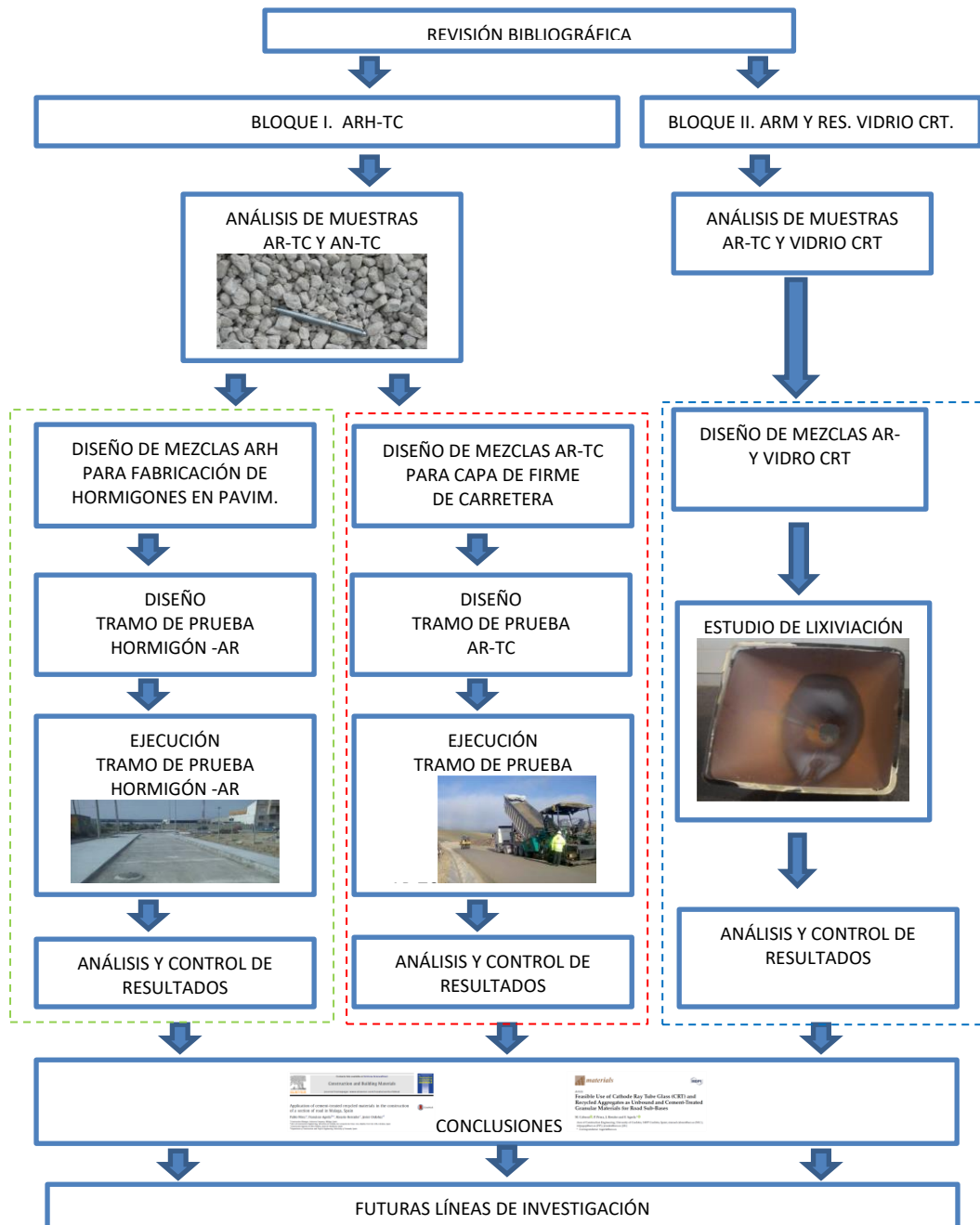


Figura 18 Metodología y diseño de la investigación



## **CAPÍTULO 3**

---

### **HORMIGONES FABRICADOS CON ÁRIDOS RECICLADOS**



# CAPÍTULO 3.- HORMIGONES FABRICADOS CON ÁRIDOS RECICLADOS

---

Se ha realizado una investigación sobre la aplicación de AR en la fabricación de hormigones, iniciada en junio de 2010, cuyos parámetros fundamentales se exponen a continuación.

Del mismo modo, se ha estudiado la inclusión de una capa de HSC, fabricado con ARH, en una vía, en condiciones reales de tráfico, ejecutada en marzo de 2011.

El objetivo del trabajo pretende determinar la influencia de la sustitución del árido grueso natural por ARH, tanto en hormigones estructurales como para usos no estructurales.

De esta forma, en una primera etapa se estudiará el comportamiento mecánico (resistencia a compresión) de un hormigón con un 20% y un 100% de árido grueso reciclado, respectivamente, con las especificaciones referidas en la ya EHE-08 y establecer la comparación en el segundo caso con el hormigón no estructural de limpieza tradicional recogido en la antigua instrucción de hormigón estructural EHE-98. En segundo lugar, se estudiará el comportamiento de un HSC, fabricado con ARH, incluido en una capa de firme en condiciones reales de tráfico.

## **3.1.- MATERIALES EMPLEADOS Y CARACTERIZACIÓN**

---

### **3.1.1.- PROCESO PRODUCTIVO.**

Los áridos reciclados se produjeron en una planta existente en el término municipal de Málaga, cuya titularidad pertenecía a la empresa Aristerra. Para la fabricación del hormigón se utilizó el precedente de la planta dosificadora existente en el polígono industrial Villa Rosa, en Málaga, cuyo titular era la empresa Áridos y Hormigones del Sol.



El proceso productivo en la planta de reciclaje se inició tomando como base los residuos de hormigón, con distintos orígenes. Éstos fueron sometidos a un proceso de triaje y limpieza, para ser posteriormente introducidos en el grupo móvil de molienda, contando con un precribador a la entrada, y garantizando de esta forma la ausencia de elementos ajenos al propio hormigón. El molino de impactos redujo el tamaño del residuo, siendo desalojado en una cinta transportadora sobre la que un electroimán separó el hierro que pudiese haber quedado.

Tras la molienda se realizó el cribado del árido, obteniendo el árido grueso previsto para la fabricación del hormigón, de granulometría 5-25 milímetros.

Una vez producidos los áridos fueron transportados hasta la planta de hormigón para la fabricación de las muestras proyectadas.

### 3.1.2.- CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO RECICLADOS.

Para la fabricación de los hormigones se hizo uso de un árido grueso reciclado procedente exclusivamente de la trituración de residuos de hormigón, Figura 19.

La granulometría se encontraba en el intervalo 5-25 mm. Los requerimientos específicos establecidos para ARH (**EHE-08, 2008**) para la fabricación de hormigones reciclados son los recogidos en la Tabla 5.



Figura 19 Árido grueso, 5-25 mm, ARH

Se observa que los valores obtenidos están dentro de los límites establecidos en la normativa. En relación con la granulometría se observa la superación del tamaño mínimo, así como del porcentaje que pasa por el tamiz 4. Del mismo modo, se comprueba la ausencia de arcilla, encontrándose las impurezas cerámicas, ligeras, de asfalto y de otros materiales ajenos al propio hormigón en cantidades ínfimas, por debajo de los límites establecidos.

**Tabla 5. Requerimientos para el árido grueso reciclado y resultados previos – EHE 08 – anejo 15**

<b>REQUERIMIENTOS PARA EL ÁRIDO GRUESO RECICLADO – EHE08 – ANEJO 15</b>			
	<b>Hormigón con 20% árido grueso reciclado</b>	<b>Hormigón con 100% árido grueso reciclado</b>	<b>Análisis de la muestra. Resultados previos</b>
<b>Tamaño mínimo (mm)</b>	4	4	5
<b>Contenido en desclasificados (%)</b>	<10	<10	6
<b>Contenido en partículas que pasan por tamiz 4 (%)</b>	<5	<5	3
<b>Terrones arcilla (%)</b>	<0.6	<0.25	0.0
<b>Absorción de agua (%)</b>	7	5	4.55
<b>Desgaste de los ángeles (%)</b>	40	40	38
<b>Impureza, material cerámico (%)</b>	5	5	0.1
<b>Impureza, partículas ligeras (%)</b>	1	1	0.03
<b>Impureza, asfalto (%)</b>	1	1	0.3
<b>Impureza, otros materiales (vidrio, plásticos, metales, etc.) (%)</b>	1	1	0.002

La absorción de agua es adecuada. El desgaste de los ángeles, encontrándose próximo al límite de 40, es inferior en dos unidades.

Por otra parte, el análisis de caracterización de la muestra arrojó los resultados referidos a continuación:

- Partículas trituradas: 97 %
- Densidad aparente: 2.73
- Índice de Lajas: 7
- Coeficiente de forma: 0.25
- Reactiv. Alcal: No reactivo
- SO<sub>3</sub> (Azufre total) 0.325 %

### 3.1.3.- MATERIALES: CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO.

El tipo empleado fue CEM II/A-V 42,5 R. Los componentes principales normalizados han sido los incluidos en la Tabla 6

<b>Clinker (K)</b>	80-94 %
<b>Cenizas volantes silíceas (V)</b>	6-20 %
<b>Componentes minoritarios</b>	0-5 %

, mientras que las especificaciones del cemento normalizado se han recogido en la

Tabla 7. La totalidad de los valores se encuentran en los intervalos aplicables legalmente (EHE-08,2008).

Tabla 6 Componentes principales normalizados del cemento

<b>Clinker (K)</b>	80-94 %
<b>Cenizas volantes silíceas (V)</b>	6-20 %
<b>Componentes minoritarios</b>	0-5 %

Tabla 7 Especificaciones del cemento normalizado.

<b>Cloruros</b>	$\leq 0,10 \%$
<b>Sulfatos</b>	$\leq 4 \%$
<b>Inicio Fraguado</b>	$\geq 60$ min.
<b>Final Fraguado</b>	$\leq 720$ min.
<b>Expansión</b>	$\leq 10$ mm
<b>Resistencia a 2 días</b>	$\geq 20$ MPa
<b>Resistencia a 28 días</b>	$42,5 \leq R \leq 62,5$ MPa

### 3.1.4.- MATERIALES: CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO NATURAL.

Para la fabricación de los hormigones se usaron distintos tipos de AN, cuyas características principales son definidas en la Tabla 8.

Se observa una absorción de agua muy inferior a la del AR, siendo idéntico el desgaste de los ángeles para la fracción del árido grueso. Se pueden



Figura 20. AN 5/15 mm



Figura 21. AN 0/5 mm

observar los materiales naturales de inferior granulometría en la Figura 20 y en la Figura 21.

**Tabla 8 Caracterización del árido natural**

Descrip.	C.D.LA	Peso esp. Real	Abs. (%)	Lajas (%)	Coef. Forma	React. Alkali	Cont %SO3	Terr arcill	Cont Fin.
<b>Arena 0/5</b>		2.855	0.46			nc	0.28		9.71
<b>Árido 5/15</b>	38	2.829	0.89	6	0.24	No react	0.14	nc	-
<b>Árido 15/25</b>	38	2.847	0.41	3	0.29	No react	0.14	nc	-

### **3.2.- DISEÑO DE DOSIFICACIONES.**

Para analizar la resistencia de las distintas muestras se realizaron cuatro amasadas de hormigón de 50 litros cada una, en la forma que se detalla en la Tabla 9.

- Muestra 1. Hormigón estructural con 100% AN y 270 kg./m<sup>3</sup> de cemento. En esta primera muestra se dosificó el árido y el cemento con idea de fabricar un hormigón HA-25 de control. Se trataba, de esta forma de un hormigón estructural convencional.

- Muestra 2. Hormigón estructural con 20% árido grueso reciclado y 270 kg./m<sup>3</sup> de cemento. En línea con lo referido en el anexo 15 de la **EHE - 08, (2008)**, se sustituyó un 20% del árido grueso natural (fracciones 5-15 y 15-25) por ARH, con objeto de establecer el grado de resistencia alcanzado, así como evaluar la pérdida producida en relación con la primera muestra, para una misma cantidad de cemento.

- Muestra 3. Hormigón no estructural con 100% de AN y 150 kg/m<sup>3</sup> de cemento. En esta tercera muestra se pretendía evaluar un hormigón no estructural, de limpieza, con la cantidad mínima de cemento exigida en el anejo 18 de la **EHE -08, (2008)**, 150 kg/m<sup>3</sup>, para éstos. Según el referido anejo, el único hormigón utilizable como de limpieza sería el caracterizado como HL-150/C/TM.

**Tabla 9 Dosificación en distintas amasadas de hormigón**

	HA25 – Control	HA25 ARH	HM15 – Control	HM15 - ARH
	Kg / m <sup>3</sup>			
<b>CEM II/A-V 42,5 R</b>	270	270	150	150
<b>Arena 0/5</b>	980	980	1160	1160
<b>Grava 5/15</b>	250	200	250	0
<b>Grava 15/25</b>	770	616	770	0
<b>Árido reciclado de</b>	0	204	0	1020
<b>Hormigón 5/25</b>				
<b>Agua</b>	145	152.6	182.6	270.4
	% spc / m3			
<b>Aditivo plastificante</b>	0.09	0.09	0.09	0.09

- Muestra 4. Hormigón no estructural con 100% árido grueso reciclado y 150 kg./m<sup>3</sup> de cemento. En este caso, se sustituyó el 100% del árido grueso natural por árido grueso reciclado procedente de la trituración de residuos de hormigón, manteniendo, al igual que en el caso anterior, la cantidad mínima de cemento exigida en la referida **EHE-08, 2008**, para un hormigón no estructural de limpieza, y poder evaluar, de esta forma, la disminución de resistencia a compresión producida.

- Muestra 5. Hormigón no estructural con 100% árido de cantera y 90 kg/m<sup>3</sup> de cemento. En último lugar se evaluó un hormigón no estructural, de limpieza, tradicional, fabricado según los requisitos establecidos en la antigua Instrucción, **EHE -98 (1998)**, y establecer la comparación así entre el comportamiento de los hormigones de limpieza fabricados con el 100% del árido grueso reciclado, según los requisitos establecidos en la Instrucción vigente y el hormigón de limpieza convencional, fabricado con 90 kg/m<sup>3</sup> de cemento. Esta muestra fue tomada

directamente de la planta, al tratarse de un hormigón fabricado comercialmente de manera habitual.

### **3.3.- DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA Y DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN.**

---

Sobre las muestras obtenidas a partir de las amasadas reflejadas anteriormente, se realizaron dos ensayos de laboratorio.

El primer ensayo consistió en la determinación de la consistencia, mediante el cono de Abrams, realizado según norma **UNE 83313**.

Para determinar la resistencia a compresión, se hizo uso de las normas **UNE 83300, 83301, 83303 y 83304**, sobre 5 probetas de 150 x 300 milímetros, que se ensayaron a 7 y 28 días de edad.

### **3.4.- RESULTADOS**

---

Al analizar los resultados obtenidos para las muestras 1 y 2, se observa que al sustituir el 20% del AN por ARH se produce una merma en la resistencia a compresión a 7 días de un 14.33% que se reduce hasta un 5.97% en la resistencia a 28 días. Esta recuperación en el tiempo, mayor en el hormigón con árido grueso reciclado, podría ser debida al cemento activo aún existente en el reciclado.

En relación con el análisis de los resultados obtenidos para las muestras 3 y 4, es evidente que al sustituir el 100% del árido grueso por reciclado se produce una bajada en la resistencia muy considerable, del 67.9%, en la resistencia a compresión a 7 días. Al calcular la resistencia a 28 días la recuperación es de un 5.6%. La cantidad de cemento fue la mínima exigida en la **EHE-08 (2008)**, para hormigones no estructurales.

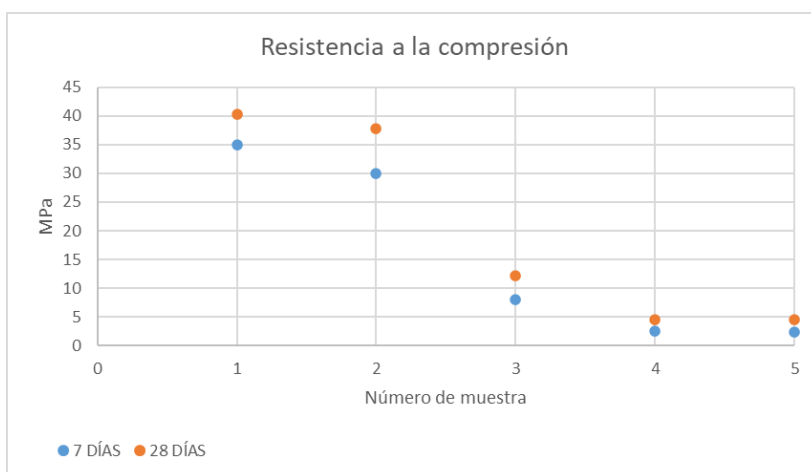
En la Tabla 10 y en la Figura 22, se reflejan los resultados obtenidos.

La consistencia, medida en el cono de Abrams, reflejó que, en las dos muestras amasadas con árido grueso reciclado, el asentamiento fue 0.5 cm superior al medido en las muestras con AN.

En los términos establecidos en el **PG-3 (2004)**, el tipo de consistencia sería blanda.

**Tabla 10 Resultados consistencia y resistencia en distintas muestras**

MUEST.	Cemento (kg/ m <sup>3</sup> )	Tipo cemento	ÁRIDOS	CONO DE ABRAMS (cm)	A/C	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	
						7 DÍAS	28 DÍAS
1	270	CEM II/A- V 42.5R	100 % ÁRIDO NATURAL	8.5	0.54	34.9	40.2
2	270	CEM II/A- V 42.5R	20% ÁRIDO GRUESO RECIC.	9.0	0.56	29.9	37.8
3	150	CEM II/A- V 42.5R	100 % ÁRIDO NATURAL	6.5	1.17	8.1	12.2
4	150	CEM II/A- V 42.5R	100 % ÁRIDO GRUESO RECIC.	7.0	1.17	2.6	4.6
5	90	CEM II/A- V 42.5R	100% ÁRIDO NATURAL	6.5	1.94	2.4	4.5



**Figura 22 Resistencia a la compresión a 7 y 28 días**

### 3.5.- EJECUCIÓN TRAMO DE PRUEBA- HORMIGÓN SECO COMPACTADO

Se realizó un tramo de vía urbana, ubicado en la calle Pascal, en el término municipal de Málaga, sometida a un intenso tráfico pesado, al encontrarse en el polígono industrial Villa Rosa.

El proyecto parte de un convenio entre el Ayuntamiento de Málaga, Hormigones y Minas (fabricante de HSC-AR, Figura 23), Tecniobra (constructora), Cemosa (laboratorio y control) y Aristerra (planta producción AR) en el año 2011 , realizándose el tramo en el mes de marzo.

Las capas incluidas fueron las siguientes:

- Capa de zahorra artificial reciclada de hormigón. ARH, 0-32 mm.
- Capa de hormigón seco compactado con ARH. (HSC-AR)
- Dos capas de Mezclas Bituminosas en caliente:
  - Capa base tipo AC 22 Base 40/50 G.
  - Capa de rodadura AC 16 Surf 40/50 S.

En cuanto al árido grueso reciclado para la fabricación del hormigón de pavimentación, al tratarse de una obra municipal, no hubo que realizar modificaciones ya que se solicitaba que cumpliese lo indicado en la **EHE-08 (2008)**.

Se emplearon 999,14 toneladas de zahorra reciclada de hormigón, ARH, 0-32 mm, y 211,58 toneladas de árido grueso de hormigón, ARH, 7-25 mm.



Figura 23. Planta fabricación HSC-AR



Figura 24. Carga sobre camión de HSC-AR



### 3.5.1. MATERIALES EMPLEADOS

En las tablas incluidas a continuación, Tabla 11 y Tabla 12 se incluyen las dosificaciones y resistencias a compresión, en laboratorio, del HSC-AR.

Se observa que la resistencia a compresión es suficiente y adecuada.

**Tabla 11 Dosificación AR en HSR-AR**

Material tipo	Esqueleto mineral			(% dotación cemento sobre áridos	(% Dotación de agua sobre áridos más cemento
	Árido tipo mm	Procedencia	(%) Esqueleto mineral		
HSC-AR	Árido 7/25	AR	55	4.0	8.1
	Árido 2/8	AN	20		
	Árido 0/4		25		

**Tabla 12 Resistencia a compresión en HSC-AR**

Material tipo	Cemento (%)	Aditivo retardante	Resistencia a compresión. 7 días (Mpa)
HSC-AR	3.5	Sin aditivo	5.0
		Con aditivo	5.2

### 3.5.2. CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS

Las características físicas, químicas y mecánicas cumplen lo exigido en el anejo 15, tal como puede observarse en

Tabla 13, de la **EHE-08 (2008)**, para su empleo en la confección de hormigones reciclados. El cemento utilizado fue del tipo CEM II A-V 42.5R

PARÁMETRO		UNIDAD	RESULTADO OBTENIDO
Desgaste los Ángeles		-	32
Terrones de arcilla		(%)	NC
Partículas blandas		(%)	NC
Partículas ligeras		(%)	NC
Densidad	Densidad aparente seca	(g/cm <sup>3</sup> )	2.573
	Densidad aparente	(g/cm <sup>3</sup> )	2.670
	Densidad real	(g/cm <sup>3</sup> )	2.851
Absorción de agua		(%)	3.79
Índice de lasjas		(%)	10
Compuestos de azufre	Sulfatos solubles en ácido	(% SO <sub>3</sub> )	0.05
	Compuestos totales de azufre	(% SO <sub>3</sub> )	0.10
Cloruros solubles en agua		(% Cl)	0.001
Contenido en humus		-	Más claro que la disolución patrón
Reactividad	CaO/MgO	-	1.80
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	0.53
	Calificación	-	No Reactivo

Tabla 13 Características del AR 7/25.

### 3.5.3. DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA

El porcentaje de áridos, tanto reciclados como naturales, ha sido anteriormente indicado. Para la determinación de la humedad óptima del HSC-AR se hizo uso del ensayo próctor, habiendo humedecido previamente los áridos, obteniendo una densidad máxima de  $2.29 \text{ g/cm}^3$ , con una humedad del 8.00 %.

El porcentaje óptimo de cemento se determinó en laboratorio, estableciendo el 4.00 %.

La fórmula de dosificación final del HSC-AR fue la recogida en la Tabla 14

**Tabla 14 Dosificación HSC-AR**

<b>MATERIAL</b>	<b>(%)</b>
Árido reciclado 7/25	53
Árido natural 2/8	24
Árido natural 0/4	19
Cemento CEM II/A-V 42.5R	4

Tal como ha sido referido con anterioridad se incluyó un 8% de agua sobre la mezcla citada.

### 3.5.4. PUESTA EN OBRA

Se extendió la capa de HSC-AR mediante motoniveladora procediendo a continuación a la compactación mediante rodillo de 15 t. Una vez compactado se procedió al corte de juntas cada 4 metros, con objeto de evitar fisuraciones en el mismo. En la Figura 25 se puede observar el estado de la vía antes del inicio de las obras, mientras que en la Figura 26 se puede observar el estado una vez vertido el HSC-AR.

Se realizó un control de recepción del HSC-AR, fabricando y ensayando tres series de cuatro probetas cada una, mediante compactación con martillo vibrante, ensayando las mismas a los 7 y 28 días. Se recoge la fabricación en la Figura 28.



**Figura 25. Estado inicial de la vía**



**Figura 26. HSC-AR ya extendido con prefisuración.**

Los valores obtenidos de la fabricación de las probetas se reflejan en la Tabla 15.

**Tabla 15 Resistencia probetas. Control de recepción. HSC-AR**

FECHA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	
	7 DÍAS	28 DÍAS
21/03/11	11.9	16.5
21/03/11	11.8	13.6
23/03/11	11.2	13.8



**Figura 27. Vertido HSC-AR en la obra**

El día 31 de marzo se extrajeron para su ensayo tres probetas testigo, en distintos puntos de la vía, siendo los resultados los mostrados en la Tabla 16.

**Tabla 16 Resistencia a compresión probetas. HSC-AR.**

UBICACIÓN	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	
		PROBETA	CORREGIDA
I	2.50	18.8	20.7
II	2.22	11.3	12.4
III	2.38	12.9	14.2



**Figura 28. Fabricación probetas testigo en obra.**

### 3.5.5. SEGUIMIENTO

El día 5 de septiembre de 2011 se realizó una visita de inspección visual, no encontrando fisuras ni anomalías. El día 13 de enero de 2012 se realizó una nueva visita de inspección visual no encontrando, del mismo modo, fisuras ni anomalías. Se incluye estado de la calle en la Figura 29.

Se decide la extracción de dos probetas testigo para determinar la evolución de las características mecánicas del HSC-AR realizándose ésta el día 13 de enero de 2012, es decir, a los 10 meses de su fabricación y puesta en obra. En la Figura 30 se puede observar una de las probetas extraídas, incluyendo las dos capas de mezcla bituminosa.



**Tabla 17 Resistencia a compresión de probetas testigo HSC-AR. 13 de enero de 2012.**

**Figura 29. Estado de calle Pascal el 13 de enero de 2012**

UBICACIÓN	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	
		PROBETA	CORREGIDA
I	2.24	18.0	19.8
II	2.30	14.9	16.4

El valor medio obtenido de resistencia, calculado a partir de los datos reflejados en la Tabla 17, en el momento de ejecución de la obra fue de 13.3 MPa, la resistencia media a los 10 meses fue de 18.1 MPa, por lo que ha existido un aumento del 36%.

El HSC-AR, tras un año colocado en obra, no solo no ha mermado su resistencia, sino que ésta se ha incrementado en un porcentaje superior al habitual en los hormigones fabricados exclusivamente con AN.



**Figura 30. Probeta testigo con HSC-AR y dos capas de mezcla bituminosa**

### 3.6. CONCLUSIONES PREVIAS

---

Una vez analizados los resultados obtenidos se obtuvieron las siguientes conclusiones.

En relación con la resistencia a la compresión es posible determinar que se considera viable la sustitución del 20% del árido grueso natural por ARH, para la misma cantidad de cemento, atendiendo únicamente a los parámetros de resistencia mínimos exigidos en la normativa. Existen otros factores que deben ser estudiados de forma complementaria, especialmente los producidos por la variabilidad de los residuos de hormigón que entran en las plantas.

Si se observan los resultados obtenidos para la muestra 5, un hormigón no estructural de limpieza convencional, según los requerimientos de la **EHE-98**, se comprueba que la resistencia de la muestra 4 es similar a la de los hormigones de limpieza convencionales, por lo que es posible concluir que con los valores actuales de contenido mínimo en cemento ( $150 \text{ kg/m}^3$ ) para un hormigón no estructural, y 100% de árido grueso reciclado de hormigón, se mantienen los parámetros de resistencia del antiguo hormigón fabricado con  $90 \text{ kg. /m}^3$  de cemento. Tras los análisis previos de laboratorio, una vez diseñada la mezcla y construido el tramo con los AR, en forma de hormigón seco compactado, en relación con la consistencia, se considera que no existe diferencia significativa entre el hormigón fabricado con AN y con ARH.

Se puede observar, del mismo modo, que el comportamiento, tanto en el momento de la ejecución como a los 10 meses de su ejecución, ha sido satisfactorio, produciéndose incluso un aumento en la resistencia.

De esta forma, se puede considerar que la sustitución de la totalidad del árido grueso natural por reciclado para la fabricación de un hormigón, previamente amasado, es técnicamente viable.



## **CAPÍTULO 4.**

---

### **APLICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS EN LA FABRICACIÓN DE GRAVACIMIENTO PARA USO EN CAPAS ESTRUCTURALES DE CARRETERAS**





# **CAPÍTULO 4.- APLICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS EN LA FABRICACIÓN DE GRAVACEMENTO PARA USO EN CAPAS ESTRUCTURALES DE CARRETERAS**

---

Ya ha sido citada anteriormente la importancia de los AR ligados con cemento en la construcción de infraestructuras lineales, por lo que se ha optado por estudiar la aplicación directa de éstos en una carretera en condiciones reales de tráfico, con objeto de poder analizar el comportamiento a lo largo del tiempo.

## **4.1.- INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN**

---

En el año 2008 se firmó un convenio entre la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía, AOPJA, anteriormente GIASA, y las empresas CEMOSA, HORMIGONES Y MINAS, SANDO, y ARISTERRA, con objeto de ejecutar sendos tramos con áridos reciclados de RCD: uno con materiales sueltos y otro con tratados con cemento, realizando simultáneamente un tramo similar con AN.

En lugar elegido fue la conexión de las carreteras A 357 y A367, en Ardales, Málaga.

A partir de este convenio se inició la investigación que nos ocupa, considerando las fases recogidas a continuación para el tramo a realizar con gravacemento con ARH:

- 1.- Análisis de los materiales a emplear.

- 2.- Estudio previo de materiales en relación con las capas de firme a ejecutar.
- 3.- Diseño de capas de firme.
- 4.- Ejecución de los tramos de prueba
- 5.- Control y seguimiento del comportamiento
- 6.- Conclusiones

## 4.2.- MATERIALES EMPLEADOS Y CARACTERIZACIÓN

En el presente trabajo, tal como ha sido referido anteriormente, se pretenden realizar dos tramos de carretera con gravacemento, incluyendo en uno de ellos el ARH, y AN en el segundo, el primero en su fracción gruesa, pues la totalidad del árido fino será natural, procedente de explotación minera.

### 4.2.1.- CEMENTO

Se ha utilizado un cemento tipo CEM II/A-V 42,5R, que presenta un porcentaje del orden del 15% de cenizas volantes. Las características del cemento se incluyen en la Tabla 18.

Tabla 18 Propiedades del cemento empleado en el tramo de prueba

SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	LOI (%)	Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	Sup. específica Area Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
22.61	3.48	7.55	55.81	1.93	3.23	3.73	3.02	4030

Además de la caracterización citada, al cemento se le realizaron diversos ensayos físicos, para la determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen, según **UNE EN 196-3**, así como los ensayos mecánicos para determinación de las resistencias mecánicas, según **UNE EN 196-1**.

#### 4.2.2.- ARENA Y GRAVA NATURAL

Se utilizaron materiales naturales de tipo calizo. Las propiedades granulométricas de estos materiales se incluyen en la Figura 31 y en la Figura 32. Se puede observar que los tamaños nominales son 0/4 y 2/5 mm en el caso de las arenas, y 5/15 y 15/25 mm en el caso de las gravas. Las propiedades físicas y químicas se incluyen en la Tabla 19. Se puede observar que todos los parámetros cumplen los parámetros establecidos en el artículo 513 del **PG-3**, con excepción del desgaste de los ángeles, cuyo valor límite se establece en 30. Cabe destacar el bajo contenido en sulfatos con relación al documento citado donde se detalla que debe ser inferior al 1%, encontrándose por debajo de este límite con un margen considerable.

**Tabla 19 Propiedades físicas y químicas de AN usados en el tramo de prueba**

	AN 2/5	AN 5/15	AN 15/25	AN 0/4
<b>Densidad saturada superficie seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.73	2.78	2.83	2.83
<b>% absorción</b>	1.56	0.89	0.41	0.46
<b>Coefficiente de forma total</b>	0.06	0.24	0.29	0.00
<b>Índice de Lajas</b>	6.00	3.00	6,00	-
<b>Desgaste de los Ángeles</b>	0.00	38.00	38.00	0.00
<b>CaO/MgO</b>	1.73	1.73	1.73	1.26
<b>% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.075	0.075	0.075	0.070
<b>Sulfatos Solubles en ácido (SO<sub>3</sub>%)</b>	0.05	0.05	0.05	0.15



### 4.2.3.-GRAVA RECICLADA DE RESIDUOS DE HORMIGÓN

Se ha empleado grava reciclada procedente de la trituración de residuos de hormigón, los cuales fueron procesados en la planta de tratamiento, cuyo titular era la empresa Aristerra situada en Málaga, España, Figura 33.

#### 4.2.3.1.- PROCESO DE FABRICACIÓN

Los residuos de hormigón se sometieron a un proceso previo de limpieza, triaje manual y mecánico, donde se separaron maderas, plásticos, hierro, etc., Posteriormente el material se introdujo en la cadena de tratamiento, comenzando con un precibado con tamiz de 25mm, que eliminó las partículas de granulometría inferior a este tamaño, con objeto de garantizar la ausencia de elementos distintos del propio residuo de hormigón, especialmente tierras de excavación.

El producto de tamaño superior a 25 mm fue triturado en un molino de impactos, para posteriormente separar los elementos metálicos con un electroimán. Finalmente se tamizaron las partículas con tamaño superior a 25mm e inferior a 5mm mediante un equipo de cribado. Con el objetivo de garantizar la ausencia de las partículas de tamaño inferior a 5 mm que pudiesen existir adheridas a las partículas más gruesas por causa de la humedad existente en la mezcla. Se extendió el material para su secado, durante una semana, siendo éste cribado



Figura 33 Planta donde se fabricaron los áridos reciclados

nuevamente en su totalidad con la malla de 5 mm únicamente, obteniéndose el producto final en condiciones óptimas de aplicación. El control de producción en fábrica fue realizado según lo estipulado en la norma **UNE-EN:13242:2003**.

### 4.2.3.2.- CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS

Se obtuvo finalmente el material denominado ARH-5/25. La granulometría de este material se incluye en Figura 34, que se caracteriza por tamaños nominales de árido entre 5 y 25 mm. Las propiedades físicas y químicas se resumen en la Tabla 20.

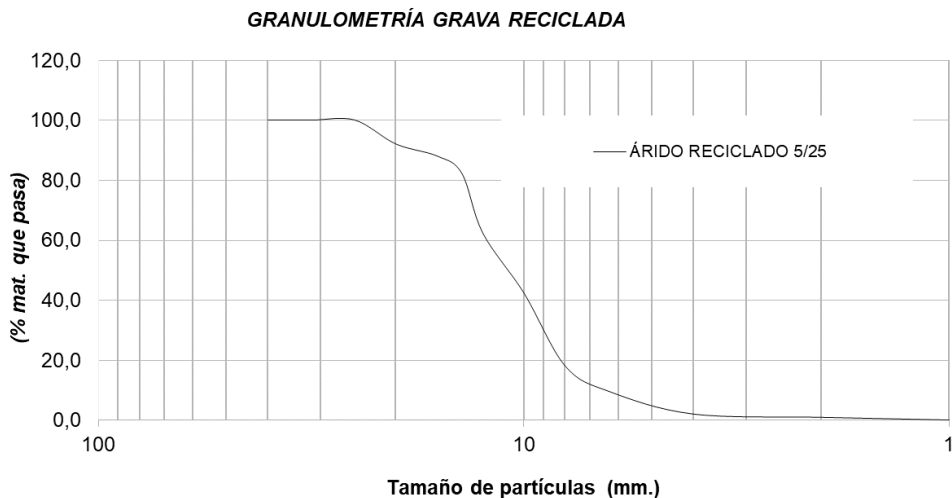


Figura 34 Granulometría grava reciclada

Tabla 20 Propiedades físicas y químicas del árido reciclado

	Densidad saturada superf. seca (g/cm <sup>3</sup> )	% absorc.	Coefic. de forma total	Índice de Lajas	Desgaste de los Ángeles	CaO/MgO	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sulfatos Solubles en ácido (SO <sub>3</sub> %)
<b>ARH 5/25</b>	2.531	4.72	0.25	3.00	38.00	1.60	0.070	0.07

Además de los ensayos prescritos por el **PG-3** para el árido grueso utilizado en la fabricación de gravacemento, se realizaron, además, por interés científico, aquellos ensayos específicos para áridos de **EHE-98 (1998)** (según su versión

vigente en el momento de la ejecución del tramo de prueba), y que se consideraron relevantes, dada la naturaleza tan heterogénea de los materiales que entraban a formar parte de la composición de estos AR.

Se realizó el ensayo para la determinación de partículas blandas en áridos gruesos para hormigones según **UNE 7134:58**, donde se comprobó que cumplía con las limitaciones indicadas en el artículo 28.3.1. de la Instrucción **EHE-98**. Realizado el ensayo para determinación de partículas de bajo peso específico que puede contener el árido utilizado en hormigones, según **UNE 7244:71**, se obtuvo que todas las muestras ensayadas estaban libres de impurezas de bajo peso específico con las limitaciones indicadas en el artículo 28.3.1. de la Instrucción **EHE-98**. Este ensayo garantizó que el proceso de doble cribado realizado al árido grueso reciclado de hormigón fue correcto.

Se observa que la absorción de agua es superior en los AR. Este hecho se pone de manifiesto en los datos incluidos en la Tabla 19 y Tabla 20, donde se analiza la absorción de agua para cada granulometría de material, manteniéndose esta constante en los ensayos de compactación posteriores para la mezcla.

En el caso de la densidad, es inferior la del AR, según se determina tanto en los ensayos previos por granulometría, Tabla 19 y Tabla 20, como en los ensayos de compactación posteriores.

En los ensayos de caracterización física, exceptuando el de absorción, así como en los de caracterización química, se observa que los valores obtenidos son similares para los AN y los ARH.



### 4.3.- ESTUDIO PREVIO

Se va a distinguir entre dos materiales de base. En el tramo 1 se hizo uso de un material con árido grueso reciclado de hormigón tratado con cemento, en adelante denominado ARH-TC. En el tramo 2 se empleó un material natural procedente de explotación minera, en su totalidad, tratado con cemento, en adelante AN-TC. En la *Figura 35* se puede observar el análisis de granulometría de la mezcla realizada. Tal como ha sido referido anteriormente, esta mezcla es conocida como gravacemento.

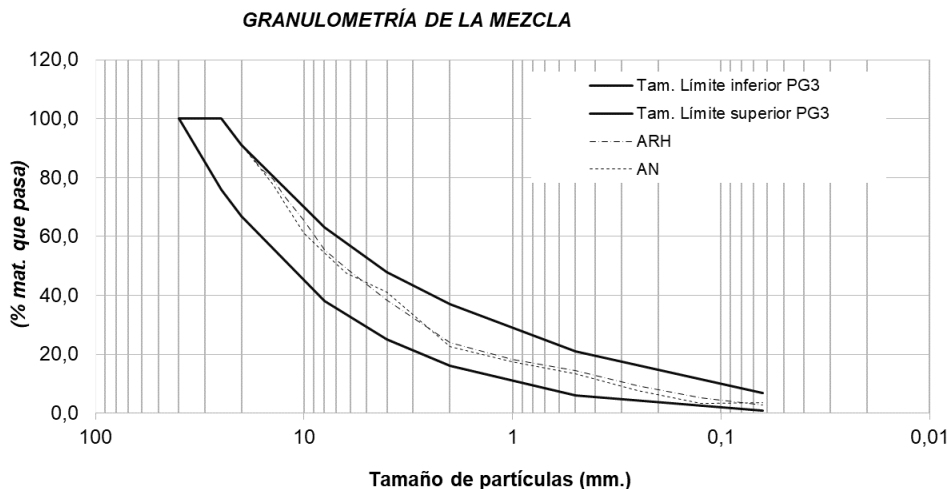


Figura 35 Granulometría de la mezcla

#### 4.3.1.- ANÁLISIS DE MATERIALES

Se fabricaron dos mezclas para su aplicación en los distintos tramos de subbase de la carretera. Se hizo uso de distintos tipos de áridos. Las dosificaciones de las mezclas se incluyen en la Tabla 21.

En el laboratorio se prepararon muestras de los gravacementos con distintos porcentajes de ligante o aditivo retardante. A estas muestras se le determinó la

resistencia a compresión simple de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos de acuerdo con la norma **(NLT 305)**.

**Tabla 21 Proporciones de áridos aplicados en las mezclas**

TIPO MATERIAL	Granulometría (mm)	Procedencia	(%) peso en mezcla
ARH-TC	5/25	RECICLADO	55
	2/5	NATURAL	20
	0/4		25
AN-TC	5/15	NATURAL	20
	2/5		25
	0/4		26
	15/25		29

En la Tabla 22 se resumen las resistencias obtenidas.

**Tabla 22 Resistencia muestras de gravacemento**

Material tipo	Cemento (%)	Aditivo retardante	Resistencia a compresión. 7 días (MPa)
ARH-TC	3.5	Sin aditivo	5.0
		Con aditivo	5.2
AN-TC	2.5	Sin aditivo	6.6
	3.5		8.7

Se observa que la resistencia a compresión es inferior para la gravacemento fabricada con AR. En base a los resultados obtenidos, las fórmulas de trabajo de los dos tipos de gravacemento se resumen en la Tabla 23.

Se aportó un 3.5% cemento para la fabricación de ambos materiales, y se aplicaron unas cantidades de agua del 8.1% en ARH-TC, y un 5.6% en AN-TC. La capacidad de compactación de los materiales se determinó con el ensayo Próctor Modificado.

Tabla 23 Fórmula de trabajo gravacemento

Material tipo	Esqueleto mineral			(%) dotación de cemento sobre áridos	(%) Dotación de agua sobre áridos más cemento
	Árido tipo	Procedencia	(%) Esqueleto mineral		
ARH-TC	Árido 7/25	Planta de reciclaje	55	3.5	8.1
	Árido 2/8	Explotación minera	20		
	Árido 0/4		25		
AN-TC	Árido 11/22	Explotación minera	29	3.5	5.6
	Árido 5/16		20		
	Árido 2/8		25		
	Árido 0/4		26		

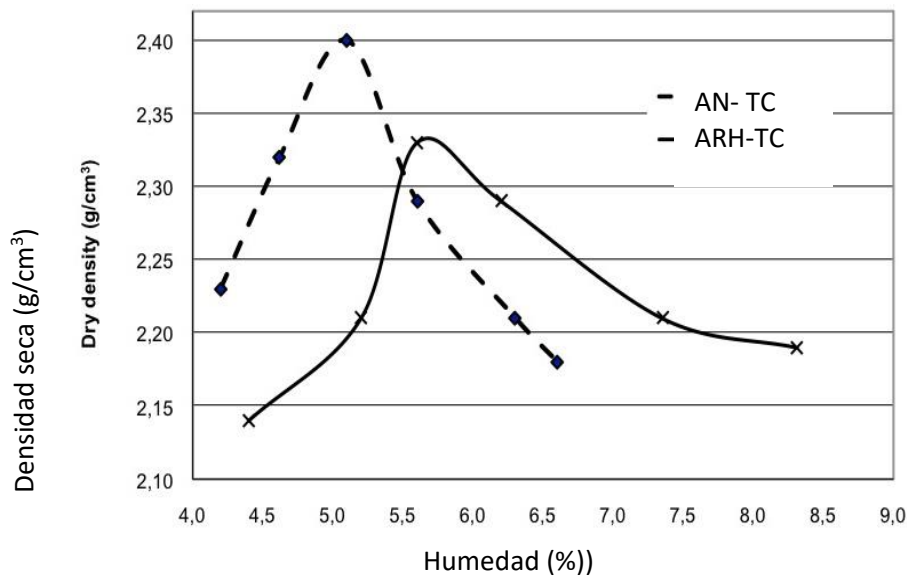


Figura 36 Próctor Modificado

Este ensayo se realizó en el material reciclado aplicándolo en dos fases, la primera en la forma habitual y la segunda tras la saturación previa de agua del material y el transcurso de un tiempo de 20 minutos con objeto de permitir la homogenización de la mezcla. Se observó que en el segundo caso los valores eran superiores, por lo que se optó por realizar los ensayos con este sistema, para garantizar la fiabilidad de los datos. Para la capa AN-TC se obtuvo una densidad máxima, al 100% del ensayo Próctor Modificado, de  $2.4 \text{ g/cm}^3$ , para una humedad del 5.10%. Para la capa con grava reciclada de hormigón se obtuvo una densidad máxima de  $2.33 \text{ g/cm}^3$ , con una humedad óptima del 5.6%.

Los resultados del ensayo Próctor, la densidad máxima y la humedad óptima para una determinada energía de compactación, normal o modificado, son valores utilizados para distintos fines en suelos y materiales granulares tratados o no con cemento.

El ensayo Próctor Normal es el habitual de los suelos empleados en el núcleo del terraplén, mientras que el modificado es el solicitado para los suelos de coronación del terraplén, para los suelos estabilizados y para los materiales granulares, tratados o no con conglomerantes, empleados en las capas del terraplén o firme de la carretera.

En el caso de las zavorras y de las gravacimientos, además de los criterios de compactación, refleja la dotación de agua para el amasado y puesta en obra de estos productos.

El ensayo Próctor se realiza en el laboratorio preparando porciones de la muestra de ensayo con distintos grados de humedad, que posteriormente serán compactadas, con una determinada energía, según el procedimiento normalizado.

Las humectaciones y compactaciones de estas porciones de muestras, de acuerdo con el procedimiento mencionado, se hacen sin ningún “tiempo de maduración”, de tal manera que una vez amasada la porción de ensayo con la dotación de agua calculada se procede a su compactación.

En los tramos experimentales de las zavorras se observó que:

Para la zavorra artificial (ZA) fabricada con AN, la humedad óptima, obtenida en el ensayo Próctor, era la adecuada para su puesta en obra y compactación, sin embargo, para las zavorras procedentes del reciclado de RCD, humectadas, y

habiendo sido comprobadas las dotaciones de agua obtenidas en sus respectivos ensayos Proctor, presentaban un aspecto seco, siendo muy difícil su puesta en obra y compactación. Fue con los estudios de dosificación en el laboratorio de las gravacimientos, en relación con la determinación de los plazos de trabajabilidad, donde se analizaron con más detalle los diferentes comportamientos de los AR respecto a la humedad óptima de trabajo.

Se determinaron los plazos de trabajabilidad de las gravacimientos según lo indicado en la norma **UNE 41240**. Para ello, de forma previa, se fijó la humedad óptima de trabajo del ensayo Proctor modificado “habitual”. En nuestro caso los valores Próctor obtenidos fueron los incluidos en la Tabla 24.

**Tabla 24 Valores de ensayo de Próctor**

MATERIAL	VALORES PROCTOR MODIFICADO	
	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)
AN-TC	2.47	5.6
ARH-TC	2.21	6.8

Con estas condiciones de densidad máxima seca y humedad óptima, se determinaron los plazos de trabajabilidad de las gravacimientos, estos plazos resultaron ser los indicados en la Tabla 25.

**Tabla 25 Plazos de trabajabilidad gravacimento**

MATERIAL	PLAZOS DE TRABAJABILIDAD (min.)
AN-TC	180
ARH-TC	90

Esta disminución de los plazos de trabajabilidad de la gravacimento fabricada con AR frente a la constituida con AN no puede ser debida a un diferente fraguado del cemento pues, en ambos casos, tanto el tipo como la dotación son los mismos y no existe, a priori, ningún componente en estos materiales que afecte al mismo.

Se observó, al igual que en el caso de las ahorras, que el ARH-TC iba presentando un aspecto de más sequedad que el AN-TC en el tiempo, sin que disminuyera su humedad.

De esta forma, se dedujo que, además de presentar una mayor absorción de agua que la constituida exclusivamente por AN, esta absorción es más lenta, de tal manera que, si ejecutamos el ensayo Próctor, en los plazos de tiempo desde el amasado de la porción de muestra de ensayo y su compactación, no damos tiempo a que se complete la absorción de agua por los áridos, obteniendo una humedad de trabajo inferior a la necesaria tras dicha absorción.

Por ello, los ensayos Proctor para estos materiales hay que realizarlos tras una saturación previa, lo que se conoce como ensayo Proctor “tras saturación húmeda”. Con estas condiciones, el AN-TC presenta la misma humedad óptima. Sin embargo, para los AN-TC los valores Próctor se modificaron según se observa en la Tabla 26.

**Tabla 26 Valores próctor modificado en GRC-AR tras saturación húmeda**

MATERIAL	VALORES PROCTOR MODIFICADO	
	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)
ARH-TC. Ensayo Proctor	2.21	6.8
ARH-TC. Ensayo Proctor “tras saturación húmeda”	2.30	8.1

Con estos criterios se repitieron los cálculos para la determinación de los plazos de trabajabilidad. En este caso, los AR-TC, fueron saturados previamente a su amasado con cemento y, con posterioridad, la humedad del producto final se ajustó a la del ensayo Proctor “tras saturación húmeda”. La variación de los plazos de trabajabilidad son los que se indican en la Tabla 27.

**Tabla 27 Plazos de trabajabilidad ARH-TC con ensayo próctor habitual y tras saturación húmeda**

MATERIAL	PLAZOS DE TRABAJABILIDAD (min.)
ARH-TC. Plazos de trabajabilidad sin saturación previa y con la humedad del ensayo Proctor	90
ARH-TC. Plazos de trabajabilidad con saturación previa y con la humedad del ensayo Proctor “tras saturación húmeda”	180

Por tanto, para los materiales procedentes del reciclado de RCD, zahorras, áridos tratados con cemento, etc., los ensayos Próctor han de ser ejecutados tras una saturación previa de estos áridos. Este requisito sería, del mismo modo, aconsejable para su puesta en obra, debiendo ser humectados en planta antes de su transporte.

### 4.3.2.- DISEÑO SECCIONES DE FIRME

Las secciones de firme, mostradas en la Figura 37 fueron diseñadas de acuerdo con la guía técnica para el diseño de firmes en carreteras andaluzas. El software empleado fue **ICAFIR-06, 2006**.

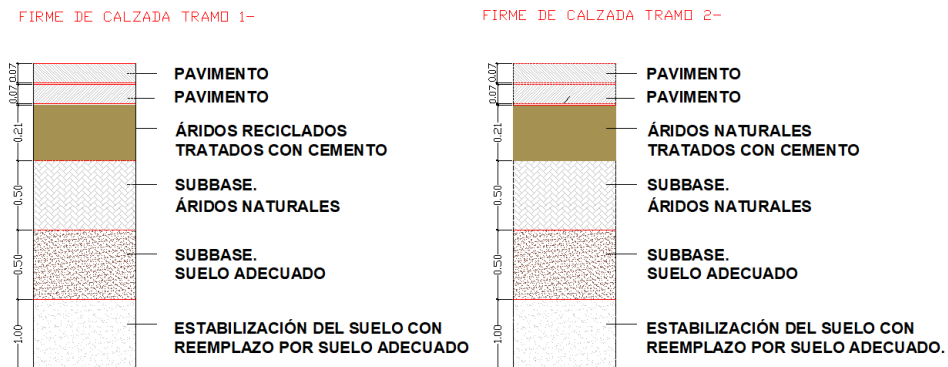


Figura 37 Diseño secciones de firme

Se optó por diseñar dos secciones de firme idénticas donde, en la capa inferior al pavimento se incluirían AR o AN, dependiendo del tramo. Con este fin, se reemplazó la parte inferior por suelo adecuado, incluyendo a continuación 50 cm de esta misma tipología de suelo, y proseguir con una subbase constituida por AN, del mismo espesor a la anterior.

La capa de firme se diseñó de 21 cm, culminando con la mezcla bituminosa del pavimento, a realizar en dos partes de 7 cm cada una.

## 4.4.- EJECUCIÓN DE TRAMO. RESULTADOS

### 4.4.1.- DESCRIPCIÓN Y UBICACIÓN DEL TRAMO

El tramo de prueba se ejecutó en la conexión entre las carreteras autonómicas A357 y A367, en el término municipal de Ardales, Málaga, en España. El ramal de salida realizado con AR es el que comunica las vías en sentido Ronda a Málaga y el construido con AN de Campillos a Ronda. En la Figura 38 Tramos de prueba, se pueden observar los tramos citados.

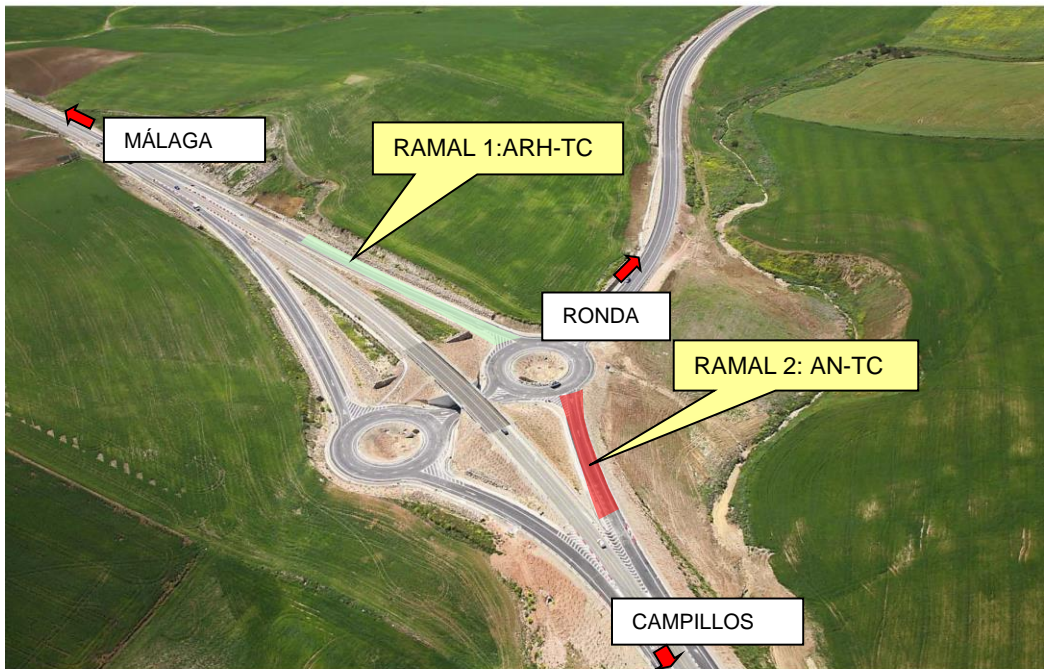


Figura 38 Tramos de prueba



#### **4.4.2.- SUMINISTRO A OBRA**

Una vez estudiadas las propiedades de los materiales, y teniendo en cuenta que el ARH-TC presentaba propiedades adecuadas, se decidió ejecutar la aplicación real. La carretera elegida para el trabajo fue la anteriormente citada. La primera conecta con Campillos y la segunda con Ronda, ambos municipios de la provincia de Málaga. El material fue transportado a la obra, siendo extendido y compactado en diciembre de 2008.

#### **4.4.3.- EJECUCIÓN DE LA OBRA**

La obra fue realizada por la Agencia de Obra Pública de la Consejería de Obras Públicas y Vivienda de la Junta de Andalucía. Se realizaron dos tramos con áridos tratados con cemento, el primero con árido grueso reciclado y el segundo con áridos naturales, tal como se observa en la Figura 38 Tramos de prueba. Se ejecutaron 150 metros para el tramo 1 y 70 metros para el tramo 2. Se realizó una pre-fisuración en los dos tramos, cada cinco metros.

#### **4.4.4. CONTROL Y ANÁLISIS**

Para el análisis de las propiedades de la obra se tuvieron en cuenta diversos parámetros.

##### **4.4.4.1. INTENSIDAD MEDIA DIARIA DE VEHÍCULOS**

El material natural fue empleado en la capa de firme del tramo 2, de cara a poder comparar y contrastar los resultados con la capa ejecutada con AR. Las capas de firme fueron diseñadas siguiendo los mismos parámetros para los dos tipos de áridos. De acuerdo con las especificaciones técnicas para vehículos pesados, recogidas en **IDF -07 (2007)**, la intensidad media diaria fue de 100-199 vehículos por día.

##### **4.4.4.2.- COMPACTACIÓN**

La compactación exigida para el tramo fue del 98.00% sobre el valor del Próctor modificado de referencia. En el tramo ejecutado con AR se obtuvo una

compactación media del 99.6%, mientras que en el tramo ejecutado con AN se obtuvo una compactación media del 99.8%, sobre el Próctor de referencia anteriormente citado. Se pueden observar los trabajos de compactación en la Figura 39.



Figura 39 Compactación de áridos tratados con cemento

En la Tabla 28 se pueden observar los valores de compactación obtenidos, siendo estos adecuados.

Tabla 28 Ensayos compactación

**COMPACTACIÓN**

**TRAMO 2**

Punto	AN-TC								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densidad in situ (g/cm <sup>3</sup> )	2.41	2.38	2.4	2.44	2.36	2.41	2.37	2.36	2.42
Humedad (%)	3.9	4.6	5	4.6	4.6	4.6	4	4.4	5
% Compactación autocontrol	100.4	99.2	100.0	101.7	98.3	100.4	98.8	98.3	100.8

**COMPACTACIÓN** p.k.0+000 al  
**TRAMO 1** p.k. 0+110

Punto	ARH-TC							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Densidad in situ (g/cm <sup>3</sup> )	2.29	2.28	2.24	2.26	2.27	2.25	2.28	2.27
Humedad (%)	5.5	5.3	6.1	5.2	5.40	6.10	6.20	5.70
% Compactación autocontrol	100.4	100.0	98.2	99.1	99.6	98.7	100.0	99.6
% Compactación Recepción	98.3	97.9	96.1	97.0	97.4	96.6	97.9	97.4

**COMPACTACIÓN** p.k.0+110 al  
**TRAMO 1** p.k. 0+160

Punto	ARH-TC							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Densidad in situ (g/cm <sup>3</sup> )	2.3	2.31	2.29	2.33	2.29	2.32	2.31	2.29
Humedad (%)	5.4	5.5	6	5.8	6.20	5.60	5.70	6.30
% Compactación autocontrol	98.7	99.1	98.3	100.0	98.3	99.6	99.1	98.3
% Compactación Recepción	98.7	99.1	98.3	100.0	98.3	99.6	99.1	98.3

#### 4.4.4.3. TENSIÓN DE ROTURA

Para la realización de los ensayos de autocontrol de las gravacemtos (ARH-TC Y AN-TC) se han fabricado una serie de probetas para la determinación de la resistencia a compresión. En la Tabla 29 se resumen los valores obtenidos.

Del mismo modo, se tomaron una serie de testigos, tanto en el tramo 1, como en el tramo 2. En la Tabla 30 se resumen los resultados obtenidos de la rotura de probetas de AN-TC Y ARC-TC, respectivamente

Tabla 29 Resistencia a compresión

Material tipo	Resistencia a compresión (MPa)	
	Valores individuales	Valores medios
AN-TC	11.6	11.1
	11.2	
	10.5	
	12.9	12.2
	11.1	
	12.5	
ARH-TC	9.2	9.4
	9.2	
	9.9	
	8.8	9.7
	10.3	
	9.9	

Tabla 30 Tensión de rotura en probetas

Probeta	AN-TC- TRAMO 2			
	LABORATORIO DE AUTOCONTROL		LABORATORIO DE RECEPCIÓN	
	1	2	1	2
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2.49	2.41	2.3	2.4
Tensión de rotura testigos (MPa)	17.8	16.4	9.4	9.8
Tensión de probetas de muestras (MPa)	11.2	8.7	13.4	

TENSIÓN DE ROTURA PROBETAS AN-TC EN TRAMO 2

Probeta	ARH-TC- TRAMO 1			
	LABORATORIO DE AUTOCONTROL		LABORATORIO DE RECEPCIÓN	
	1	2	1	2
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2.21	2.17	2.1	2.0
Tensión de rotura (MPa)	9.5	7.2	7.2	5.9
Tensión de probetas de muestras (MPa)	9.7	9.4	14.9	

TENSIÓN DE ROTURA PROBETAS ARH-TC EN TRAMO 1

Se ha considerado la tensión de rotura como la tensión a la cual se rompen los testigos extraídos del paquete de firme, mientras que la tensión de probetas sería la tensión a la cual rompen los testigos fabricados en el laboratorio con las muestras tomadas.

Se puede observar que se tomaron diversas probetas en obra, obteniéndose una tensión unitaria media de rotura, a 7 días, de 10,15 MPa para el tramo 1 (ARH-TC) y de 10,95 MPa para el tramo 2 (AN-TC), por lo que, aun tratándose de valores del mismo orden, la resistencia fue superior para el material fabricado con AN.

#### **4.4.4.4. AUSCULTACIÓN DINÁMICA DE ALTO RENDIMIENTO. ADAR.**

Con el fin de obtener datos sobre la capacidad portante del paquete de firme, incluyendo la capa de rodadura, se realizó el control a partir de la monitorización de alto rendimiento dinámico (auscultación dinámica de alto rendimiento, ADAR).

Esta prueba define la capacidad de soporte de carga de las distintas capas de firme de la carretera. De esta forma, es posible comprobar si este parámetro cumple con los especificados en proyecto, de acuerdo con los cálculos realizados en el mismo

Las desviaciones se midieron con un deflectómetro de impacto, haciendo uso de la norma **NLT-338/07 (2007)**. El equipo empleado fue un DYNATEST HWD-8081, que está diseñado para medir las deflexiones en pavimentos tanto rígidos como flexibles. Sería viable calcular los módulos elásticos de todas las capas del firme, así como del suelo adyacente. Este equipo estaba equipado con siete geófonos, situados en el eje longitudinal del vehículo, encontrándose al menos uno por debajo, en todo momento, del punto de aplicación de la carga en el centro del plato.

Tal como ha sido referido, el deflectómetro de impacto sigue la norma NLT-338/07 para la configuración de los geófonos, sin embargo, para la aplicación de cargas en las distintas capas de firme, se hizo uso del **PPTGAU-04, (2004)**. La presión que se empleó sobre la capa fue de 431.33 KPa con una carga de 7 toneladas y un plato de 450 milímetros.

El control de las deflexiones en las distintas capas ejecutadas durante la obra se llevó a cabo en la capa de áridos tratados con cemento, la capa intermedia de

aglomerado y la capa de rodadura. De forma posterior, y con periodicidad semestral, se realizaron tres nuevos controles de deflexiones para estudiar el comportamiento de los tramos.

La deflexión, desplazamiento vertical del firme, bajo una carga conocida, nos proporciona información sobre la capacidad estructural del mismo. Es interesante obtener, mediante el cálculo inverso, los valores de los módulos de elasticidad de las capas, conociendo los espesores, los valores de la deflexión en el punto de la carga, así como otros alejados del mismo.

Tras la realización del cálculo inverso, se han obtenido módulos de elasticidad de 46959 MPa para el tramo 2 (AN-TC), y de 32911 MPa para el tramo 1 (ARH-TC).

Se observa, de esta forma, que el árido natural tratado con cemento posee una mayor resistencia que el natural, encontrándose aun así en niveles aceptables.

Del análisis de deflexiones se obtuvieron los resultados incluidos entre la Figura 40 y la Figura 45. Se realizaron las pruebas en la capa de árido tratado con cemento, en la capa intermedia de aglomerado asfáltico y en la capa de rodadura. En la última capa se realizaron tres controles posteriores, con carácter semestral.

#### DEFLEXIONES TRAMO 2 - ÁRIDO NATURAL CAPA DE ÁRIDO TRATADO CON CEMENTO

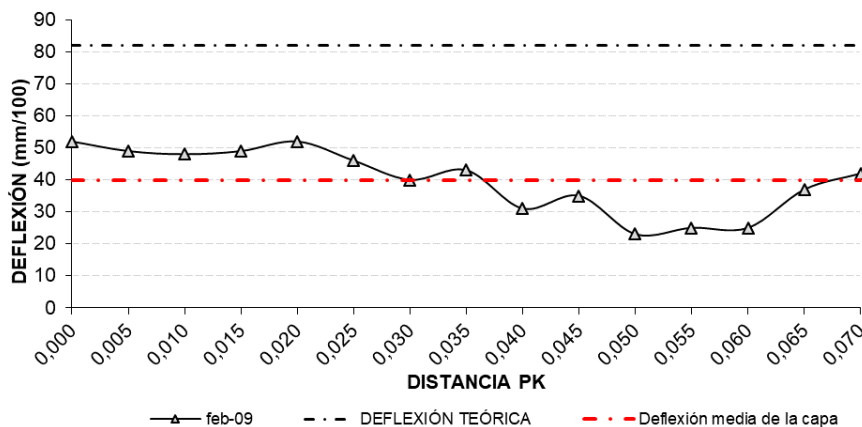


Figura 40 Deflexiones tramo 2. AN-TC

**DEFLEXIONES TRAMO 1 - ÁRIDO RECICLADO  
CAPA DE ÁRIDO TRATADO CON CEMENTO**

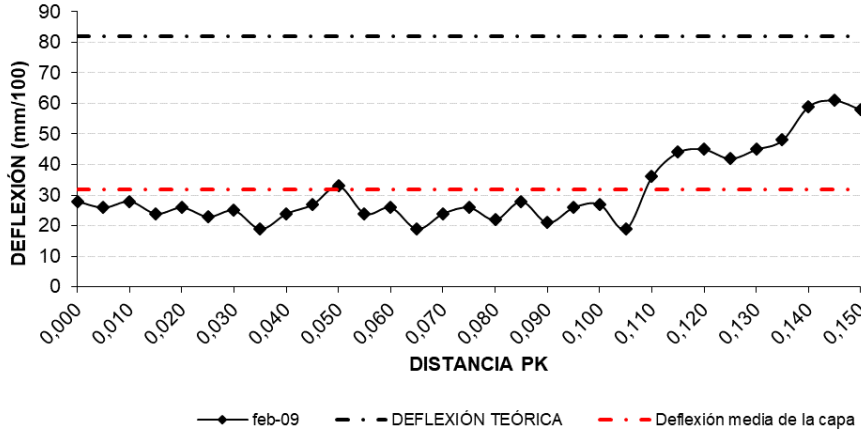


Figura 42 Deflexiones tramo 1. AR-TC

**DEFLEXIONES TRAMO 2 - ÁRIDO NATURAL  
CAPA INTERMEDIA DE AGLOMERADO**

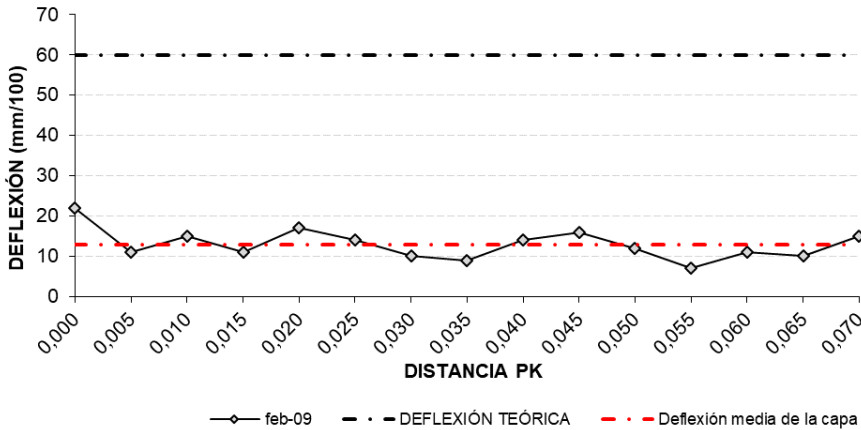


Figura 41. Deflexiones tramo 2. Capa int. AN

### DEFLEXIONES TRAMO 1 - ÁRIDO RECICLADO CAPA INTERMEDIA DE AGLOMERADO

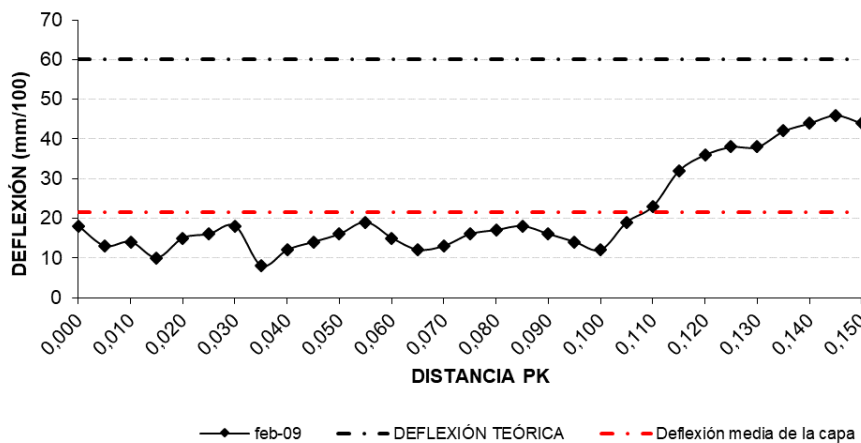


Figura 44 Deflexiones tramo 1. Capa Int. AR

### DEFLEXIONES TRAMO 2 - ÁRIDO NATURAL CAPA RODADURA

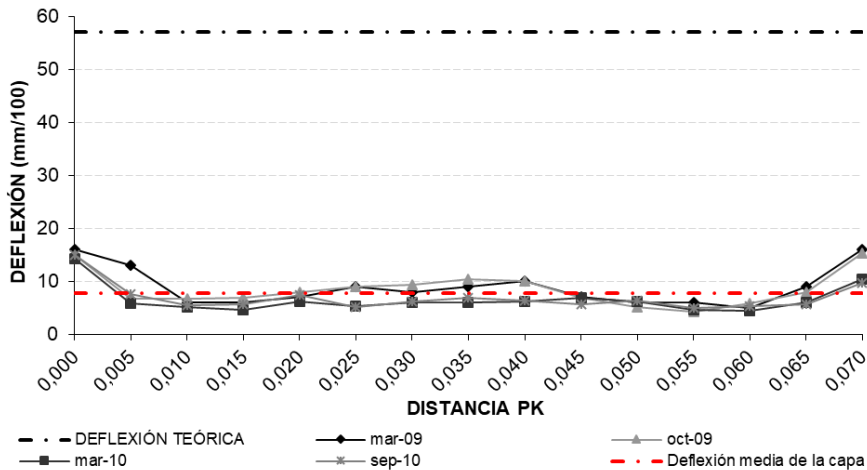


Figura 43. Deflexiones tramo 2. AN. Capa rod.



### DEFLEXIONES TRAMO 1 - ÁRIDO RECICLADO CAPA RODADURA

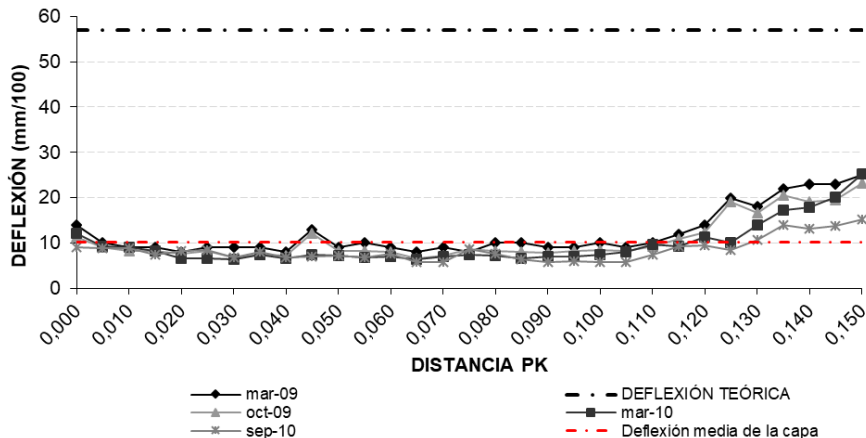


Figura 45 Deflexiones tramo 1. AR. Capa Rod.

Se observa en la Figura 40 y en la Figura 42 , los resultados de las deflexiones, correspondientes a los valores obtenidos en las capas de áridos tratados con cemento, que el comportamiento fue sustancialmente mejor para el tramo 1, ejecutado con AR-TC. Al extender las dos capas de aglomerado superiores, las deflexiones (Figura 41 y Figura 44) son mejores para el tramo 2, realizado con AN.

En la Figura 43 y la Figura 45, ya sobre la capa de rodadura, se observa que no ha habido una variación sustancial del comportamiento del firme de ambos tramos de carretera, lo que supone que tras 19 meses, tiempo en el que circuló tráfico, no se produjeron reducciones en las propiedades de capacidad portante en las superficies de los tramos. Del mismo modo, se observa que los valores son muy similares para la capa de firme ARH-TC Y AN-TC.

## 4.5.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

---

Una vez analizados los resultados anteriormente expuestos es posible obtener diversas conclusiones.

Al realizar aplicaciones con áridos reciclados, se debe realizar un control exhaustivo de la producción, ajustando tanto la composición como la distribución de los tamaños de partículas.

Es importante a la hora de aplicar un árido reciclado en capas de subbase tratadas con cemento, que éste presente unas propiedades adecuadas, incluyendo la capacidad de absorción de agua, así como humedecerlo previamente. Del mismo modo, en la determinación de la humedad debe considerarse la saturación previa del mismo.

Los ARH-TC presentaron una capacidad de compactación similar a la de AN-TC, así como una mayor demanda de agua en el caso del ARH-TC.

La capa de material tratado con cemento donde se aplicó ARH-TC presentó un mejor comportamiento de respuesta al deflectómetro de impacto, que en la que se aplicó AN-TC. Esto podría ser debido a que los áridos reciclados de hormigón tiene una menor resistencia al desgaste que los naturales, y por tanto, en el proceso de compactación in situ, se modifica en parte su granulometría, mejorando su capacidad portante, tal como afirman **Da Conceiçao Leite, F. y col. (2011)**.

Los ARH-TC presentaron también un adecuado comportamiento en la resistencia a compresión, siendo sus valores medios algo inferiores a los obtenidos en los AN-TC.

Se constata la importancia de la dotación de agua, superior en los áridos reciclados, así como su menor densidad. Éste último factor hace que se reduzca el coste de transporte, al ser éste directamente proporcional a su peso, para un mismo volumen.

Por tanto, a la vista de los resultados obtenidos en este trabajo, se puede comprobar que la aplicación de áridos reciclados de hormigón en la fabricación de áridos tratados con cemento es factible, siempre que se realice un control exhaustivo de la producción de los mismos, y una adecuada puesta en obra.



## **CAPITULO 5.-**

---

### **USO DE VIDRIO DE RESIDUOS DE VIDRIO CRT Y ÁRIDOS RECICLADOS PARA SUB-BASES DE CARRETERAS**



# CAPÍTULO 5.- USO DE VIDRIO DE RESIDUOS DE VIDRIO CRT Y ÁRIDOS RECICLADOS PARA SUBBASES DE CARRETERAS

## 5.1. INTRODUCCIÓN



Figura 46 Proceso de fabricación de AR y CRT

El uso de áridos reciclados en la construcción de carreteras se ha estudiado en los últimos años, y este tipo de aplicación debería ser una prioridad en el futuro (Agrela y col., 2011). Es posible aplicar varios tipos de áridos reciclados en carreteras de tráfico de baja intensidad. Una carretera convencional de este tipo se construye aplicando una capa de hormigón o asfalto en la parte superior de otras capas, como la base, la subbase y la subrasante.

Tradicionalmente, se utilizan materiales naturales como roca triturada, grava seleccionada y materiales estabilizados en la base y subbase de una carretera. En la última década, se han llevado a cabo varios estudios para investigar la posibilidad de usar áridos de hormigón reciclado, ARH, (Dhir y col. 2011; Poon y col., 2002; Contrafatto y col., 2018) y áridos reciclados mixtos (ARM) en bases y

sub-bases para proporcionar una opción viable para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición **(Jiménez y col., 2011)**.

La aplicación de áridos reciclados en la construcción de carreteras se puede realizar mediante capas unidas o no unidas **(Molenaar y Van Niekerk, 2002; Xuan y col., 2010)**. Actualmente, los ARM, que incluyen diferentes componentes de partículas (hormigón, cerámica, asfalto, mampostería, natural, etc.), son los áridos reciclados más comunes producidos en diferentes países como España, Portugal, Italia, etc. **(De Brito y col., 2018)**. Algunos autores han estudiado la posibilidad de utilizar estos materiales en aplicaciones con mayor valor añadido, como la construcción de capas estructurales granulares no unidas, **(Jiménez y col., 2011; Vegas y col., 2008; Herrador y col., 2011)** y en capas tratadas con cemento **(Xuan y col., 2012; Agrela y col., 2011)**. El principal problema del ARM es que pueden tener altas cantidades de sulfatos, que causan cambios dimensionales debido a la formación de ettringita **(Agrela y col., 2014)**.

Diferentes autores han estudiado el comportamiento mecánico del ARH y ARM, y demostraron que los materiales reciclados tratados con cemento presentaron una resistencia mecánica aceptable hasta 7 y 28 días al aplicar una tasa de reemplazo del 100% de materiales convencionales (suelo o grava) por ARM o ARH **(Xuan y col., 2010)**.

Se han realizado ensayos a escala real en los que se aplicaron ARH y ARM en aplicaciones tratadas con cemento en carreteras **(Agrela y col., 2011; Pérez y col., 2013)** en Málaga, España. En estos estudios, se demostró que el comportamiento de las secciones donde se aplicaron ARH y ARM tratados con cemento presentaban propiedades similares a las de los materiales convencionales. En el trabajo de **Agrela y col. (2011)**, se observó que al aplicar un reemplazo del 100% de AN por ARM con un 3% de cemento, se logró un comportamiento mecánico y de deformación apropiado a largo plazo.

Otro desecho industrial que podría usarse en la subbase de las capas de la carretera son los residuos de televisores y pantallas de tubos de rayos catódicos (desechos de CRT). Aunque estos tipos de residuos están disminuyendo cada año, todavía hay miles de toneladas de equipos CRT que aún no se han reciclado. Se estima que, en todo el mundo, solo se recicla alrededor del 26% de los desechos de CRT, y el 59% restante se deposita en vertederos sin recuperación **(Rashad, 2014)**.

La composición principal de los desechos de CRT está formada por bario, estroncio y silicato de plomo (**Yuan y col., 2012; Tian y Wu, 2016**). Estos desechos también son ricos en sílice, lo que hace que su uso como material de construcción sea interesante. Sin embargo, otras experiencias demuestran que un contenido demasiado alto de silicatos puede degradar la resistencia mecánica (**Contrafatto, 2017**). Se han llevado a cabo diferentes investigaciones para un segundo ciclo de vida de los desechos de CRT en el campo de la construcción. **Hui y Sun (2011)**, estudiaron las propiedades de los desechos de CRT como un reemplazo para el árido natural fino para la fabricación de morteros. **Ling y col. (2012)**, utilizaron mortero de cemento residual CRT para aplicaciones de blindaje de radiación de rayos X. **Romero y col. (2013)**, estudiaron las propiedades mecánicas del hormigón fabricado con diferentes protocolos de residuos de CRT como un sustituto de los AN, y **Abdallah y Fan, (2014)**, estudiaron las características del hormigón con vidrio residual.

El principal problema de los desechos de CRT es su contenido de plomo, y su potencial de contaminación ha sido estudiado por diferentes autores. **Ling y Poon (2020)**, observaron que la parte posterior del equipo CRT tenía un mayor contenido de plomo que el frontal, por lo que su uso en aplicaciones de construcción podría causar problemas con el medio ambiente y problemas de salud pública. Sin embargo, en el AR, particularmente en el ARM, el contenido de sulfato de los áridos reciclados (principalmente yeso), es una de las propiedades de calidad más importantes para el reciclaje y la clasificación.

El objetivo de este estudio es investigar las posibilidades de aplicar ARM con desechos de CRT de manera combinada, incluido un porcentaje reducido de CRT para evitar la posibilidad de lixiviación de elementos contaminantes. Con este fin, se llevarán a cabo varios estudios sobre mezclas de desechos de ARM y CRT en diferentes proporciones, estudiando tanto su comportamiento mecánico como la posible contaminación que podrían presentar. Se aplicaron diferentes mezclas utilizando principalmente los desechos de CRT provenientes de la parte frontal del equipo con cantidades muy pequeñas de la parte posterior del equipo, debido a su potencial contaminante.



## 5.2 MATERIALES

Cemento: El cemento utilizado en este estudio fue CEM II / BL 32.5 N (denominado CEM-II). Las principales propiedades del cemento se muestran en la Tabla 31. Este cemento es el material más utilizado en este tipo de aplicación debido a su calor de hidratación medio y alta resistencia al ataque químico.

**Tabla 31 Propiedades del cemento**

CEMENTO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Loss on ignition (975°C)
CEM II (%)	26.24	8.7	3.36	54.06	1.34	3.32	1.44	1.3

Áridos reciclados mixtos (ARM): provienen del tratamiento de RCD de una planta ubicada en Málaga (España). La composición de los ARM, determinada según las normas **UNE-EN 13242** y **UNE-EN 933-11**, debe superar el 70% en peso en hormigón, productos de hormigón, morteros, piezas para la fabricación de mampostería de hormigón, áridos y piedras naturales, así como materiales tratados con aglomerantes hidráulicos. No puede superar el 2% en peso de vidrio. El resto debe estar formado por materiales de mampostería cerámicos hechos de arcilla (ladrillos y azulejos) o silicato de calcio.

Áridos reciclados de asfalto (ARA): este material proviene del tratamiento y la trituración de los pavimentos de asfalto, y generalmente se usa en la construcción de capas de aglomerado de nuevas carreteras. A veces, son desechos que llegan a las plantas de tratamiento de RCD, y se mezclan para obtener ARM. Este material proviene de la misma planta que el anterior

Vidrio de tubo de rayos catódicos (CRT): el material proveniente del reciclaje de dispositivos electrónicos, televisiones en concreto. Fue recibido en el laboratorio de



**Figura 47 Tubo de rayos catódicos de la parte delantera (CRTf)**



**Figura 48 Tubo de rayos catódicos de la parte trasera (CRTR)**

Ingeniería de Construcción de la Universidad de Córdoba una planta de reciclaje de Málaga. Los bloques de estos desechos eran grandes, por lo que se decidió triturarlos previamente. El CRT se divide en dos tipos. Un lado proviene de la parte frontal, tal como se muestra en la imagen, llamada p-CRT<sub>F</sub> (CRT frontal procesada), y el otro lado se obtiene de la parte posterior compuesta por la campana o el tubo de rayos catódicos, y se llama p-CRT<sub>R</sub> (CRT trasero procesado). La Figura 47 y la Figura 48 muestran ambas partes de las cuales provienen estos tipos de CRT.

ARM<sub>a</sub>: se preparó una mezcla de ARM y ARA procesada en el laboratorio mezclando 75% de ARM y 25% de ARA en peso seco. La mezcla se llamó ARM<sub>a</sub>.

La Figura 49 muestra la distribución del tamaño de partícula de los materiales. Se observó que el ARA contiene una distribución de tamaño de partícula con un menor porcentaje de partículas finas en comparación con el resto de los materiales analizados. Esto se debe a la existencia del betún en su proceso de trituración. El resto de los materiales presentaron una distribución continua del tamaño de partícula.

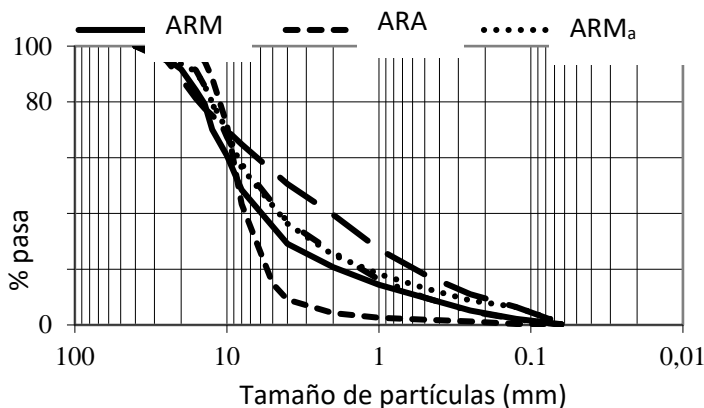


Figura 49 Distribución del tamaño de partícula

En la Tabla 32 se muestran los datos de las propiedades físicas y químicas de los materiales ensayados en el laboratorio. El ARM presentó una menor densidad de superficie saturada y una mayor absorción de agua debido al contenido de partículas cerámicas (Agrela y col., 2011; Barbudo y col., 2012). La fracción gruesa del p-CRT presenta una absorción cercana a cero. El contenido de sulfato en todos los materiales no supera la normativa española. Los CRT están hechos con dos formulaciones de vidrio diferentes, una para la parte delantera, p-

CRT<sub>F</sub> (panel) y otra para la parte posterior, p-CRT<sub>R</sub> (cono). p-CRT<sub>R</sub> contiene vidrio de silicato de plomo con una composición de SiO<sub>2</sub> de 51.20% en peso, PbO 23.14% en peso y otros óxidos 25.66% en peso. El p-CRT<sub>F</sub> contiene vidrio de silicato de bario-estroncio con un 58.13% en peso de SiO<sub>2</sub>, BaO con el 10.50% en peso, SrO 9.46% en peso y otros óxidos con 21.91% en peso.

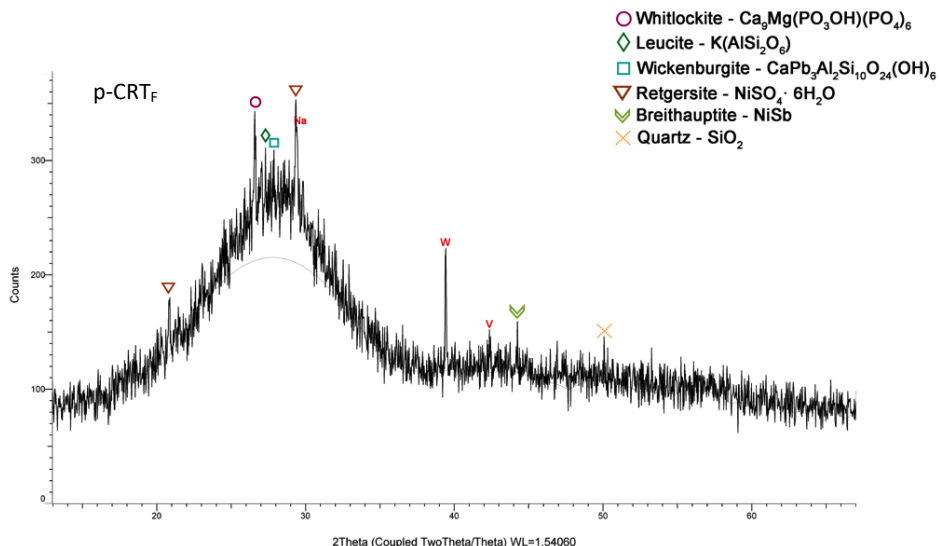
**Tabla 32 Propiedades físicas y químicas**

Propiedades	ARM	ARA	ARM <sub>a</sub>	p-CRT <sub>R</sub>	p-CRT <sub>F</sub>	Método de ensayo
Sulfatos solubles en ácido (%SO <sub>3</sub> )	0.7	0.3	0.39	0.05	0.03	UNE-EN 1744-1
Materia orgánica (%)	1.37	1.13	1.21	-	-	UNE 103204
<b>Contenido en óxidos (%)</b>						
SiO <sub>2</sub>	53.12	-	50.75	51.2	58.13	UNE 196-2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.15	-	10.6	4.15	2.71	-
TiO <sub>2</sub>	1.74	-	0.98	0.10	0.50	-
CaO	10.12	-	16.56	3.56	2.40	-
MgO	5.15	-	2.28	2.45	0.80	-
Na <sub>2</sub> O	2.80	-	1.97	7.30	8.10	-
K <sub>2</sub> O	1.70	-	2.31	8.10	7.30	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.40	-	3.55	-	0.10	-
BaO	-	-	-	-	10.50	-
SrO	-	-	-	-	9.46	-
PbO	-	-	-	23.14	-	-
Otros	<4	-	<11	-	-	-
<b>Densidad (kg / m<sup>3</sup>)</b>						
0-4 mm.	2.01	2.42	2.24	2.2	2.25	UNE-EN 1097-6
4-31,5 mm	2.08	2.26	2.12	2.49	2.51	
<b>Absorción de agua (%)</b>						
0-4 mm.	10.27	5.1	9.41	6.27	5.76	UNE-EN 1097-6
4-31,5 mm	8.31	2.36	7.75	0.25	0.21	
Plasticidad	NO PLÁSTICO	NO PLÁSTICO	NO PLÁSTICO	NO PLÁSTICO	NO PLÁSTICO	UNE-EN-ISO 17892-12
Desgaste de los ángulos	36	32	35	-	-	UNE-EN 1097-2
Radio friabilidad	27	21	24	31	33	UNE 146404

Se realizó una prueba de clasificación para los componentes de los áridos gruesos reciclados de acuerdo con la norma UNE-EN 933-11: 2009. La separación manual de los componentes agregados reciclados se realizó en partículas de más de 4 mm de tamaño para obtener los resultados mostrados en la Tabla 33.

**Tabla 33 Composición**

	Hormigón (Rc)	Árido Natural (Rc)	Cerámico (Rb)	Bituminoso (Ra)	Vidrio (Rg)	Otros (X)
<b>ARM (%)</b>	27.68	37.28	21.16	13.67	0.04	0.17
<b>ARA (%)</b>	-	-	-	100	-	-
<b>ARM<sub>a</sub> (%)</b>	22.61	31.31	19.73	26.72	0.03	0.11
<b>p-CRT (%)</b>	-	-	-	-	100	-



**Figura 50 Difractograma de rayos X de p-CRT<sub>F</sub>**

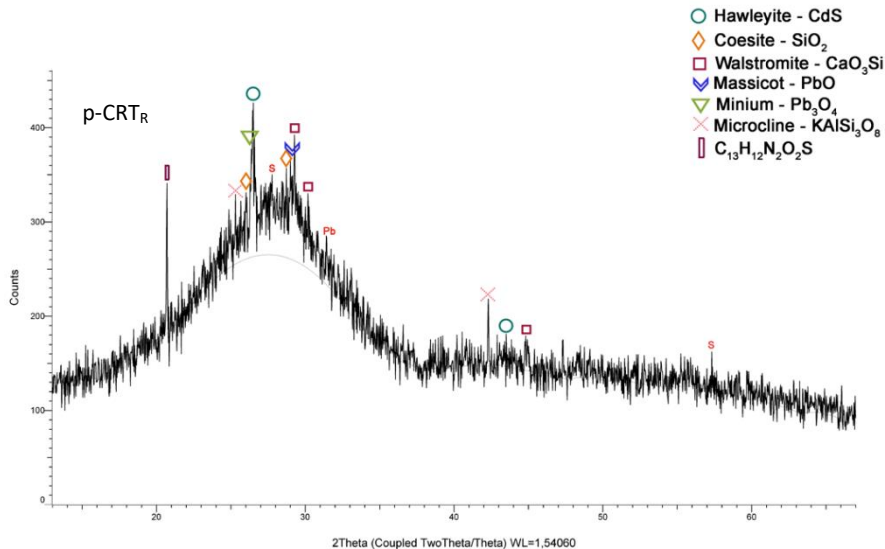


Figura 51 Difractograma de rayos X de p-CRT<sub>R</sub>

La difracción de rayos X se utilizó para estudiar ambos tipos de p-CRT. La Figura 50 y la Figura 51 muestran el patrón XRD de las muestras analizadas. El patrón obtenido en ambos materiales muestra un material principalmente cristalino. El p-CRT<sub>F</sub> muestra principalmente altos contenidos de Cd, Mg, Si y Ni; sin embargo, el p-CRT<sub>R</sub> está formado principalmente por Pb y Si, que son elementos presentes en ambas materias primas preliminares.

### 5.2.1 MEZCLAS DE MATERIALES RECICLADOS Y P-CRT ESTUDIADOS

Se realizaron diferentes mezclas para estudiar la posibilidad de uso como material granular y como material granular tratado con cemento. La p-CRT utilizada para el estudio fue una combinación de la parte frontal y posterior. La proporción utilizada fue 2/3 p-CRT<sub>F</sub> y 1/3 p-CRT<sub>R</sub>. El porcentaje de p-CRT que se agregó a las mezclas fue de 10% de masa seca. La Tabla 34 muestra las mezclas y proporciones utilizadas en el estudio.

**Tabla 34 Dosificación de las mezclas**

Mezcla	Materiales (kg)		
	ARM	ARA	p-CRT
ARM	1000	-	-
ARM <sub>a</sub>	750	250	-
ARM+p-CRT	900	-	100
ARM <sub>a</sub> +p-CRT	675	225	100

## 5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES EN FUNCIÓN DE SU POTENCIAL CONTAMINANTE

### 5.3.1. PRUEBA DE CONFORMIDAD

Se realizaron pruebas de cumplimiento para verificar si los cinco materiales cumplían con las regulaciones europeas. Para clasificar estos materiales de acuerdo con la Directiva de Vertederos de la UE, se midieron no solo metales pesados, sino también aniones inorgánicos (sulfato, cloruro y fluoruro). El procedimiento UNE-EN 12457-4 consiste en una prueba de lixiviación por lotes en un paso y se realiza en materiales con dimensiones de partículas menores a 10 mm. La relación líquido / sólido es 1:10. Se agita continuamente (10-12 rpm) durante 24 horas a una temperatura controlada igual a  $20 \pm 5$  ° C. Al final de las 24 h, las muestras se dejan decantar y se miden el pH, la conductividad y la temperatura. La solución se filtra usando un filtro de membrana (0,45 µm), y se toma una submuestra del lixiviado para cada material.

La Directiva 2033/33 / CE establece los límites para ser admitidos en vertederos en tres categorías (desechos inertes, no peligrosos y peligrosos) en función de la concentración de metales pesados obtenida en la prueba de cumplimiento UNE 12457-4. Las concentraciones medidas en el lixiviado (mg / kg) se muestran en la Tabla 35 (los datos en **negrita** indican que el valor excede el límite para desechos inertes).

Al comparar las concentraciones medidas de especies liberadas con los criterios ambientales europeos en una relación líquido-sólido de 10 L / kg (ver Tabla 35), los valores de admisión calculados para el ARM y el p-CRT mostraron algunos parámetros críticos para su uso: Cr y Pb.

El ARM se clasificó como residuo no peligroso debido al hecho de que se excedió el límite de residuo inerte para Cr. Según otros estudios (**Galvín y col., 2018; Del Rey y col., 2015**) la presencia de Cr se debió al contenido de partículas cerámicas.

**Tabla 35 Concentraciones de lixiviados (mg / kg) obtenidos por la prueba de conformidad UNE EN 12457-4**

Elemento	ARM	ARM + p-CRT	p-CRT <sub>F</sub>	p-CRT <sub>R</sub>	p-CRT	ARM <sub>a</sub> + p-CRT	Valores límite (mg/kg) Inerte	Valores límite (mg/kg) No peligroso
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)		
Cr	<b>0.52496</b>	0.43146	0.03208	0.00524	0.02291	0.470579	<0.5	0.5-10
Ni	0.00817	0.010147	0.00635	0.02166	0.01133	0.016748	<0.4	0.4-10
Cu	0.06137	0.036868	0.01116	0.09846	0.04015	0.036969	<2	2-50
Zn	0.04186	0.053005	0.16044	0.40719	0.24241	0.031649	<4	4-50
As	0.01705	0.019116	0.00822	0.00518	0.00074	0.020214	<0.5	0.5-2
Se	0.00143	0.01233	0.00275	0.00491	0.00394	0.010007	<0.1	0.1-0.5
Mo	0.07182	0.032939	0.02103	0.00604	0.01519	0.036853	<0.5	0.5-10
Cd	0.00016	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	<0.04	0.04-1
Sb	0.04046	0.041975	0.28803	0.24131	0.26973	0.042393	<0.06	0.06-0.7
Ba	0.16046	0.288945	16.4451	8.26438	13.6741	0.281764	<20	20-100
Hg	0.00018	0.000921	0.00001	0.00000	0.00000	0.001562	<0.01	0.01-0.2
Pb	0.00048	0.00374	0.48885	<b>2.47351</b>	<b>1.5493</b>	0.00001	<0.5	0.5-10
Cl <sup>-</sup>	21.5	50	300	40	197	18.5	800	15000
F <sup>-</sup>	<2	<2	<2	<2	<2	<2	10	150
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	1150	1280	127	138	129	1240	1500	20000

El p-CRT contiene 20-25% de PbO y está clasificado como residuo peligroso (**Lee y col., 2004**). El contenido de Pb en la lixiviación es un factor muy importante para su aplicación como material de construcción porque puede representar una amenaza para el medio ambiente y la salud humana. La muestra analizada de p-CRT<sub>R</sub> se clasifica como un residuo no peligroso. La mezcla de ARM con p-CRT se

clasifica como material inerte, y su uso es adecuado desde el punto de vista ambiental.

### 5.3.2. PRUEBA DE PERCOLACIÓN

La Prueba de lixiviación en columna realiza un procedimiento para determinar la capacidad de lixiviación de componentes inorgánicos a partir de materiales y desechos sólidos, terrosos y pedregosos en función del valor de L / S. El método implica pasar agua desmineralizada hacia arriba a través de una columna vertical de material. Se recogen las fracciones de lixiviados consecutivas, correspondientes a un rango de relación líquido a sólido de 0.1 L / kg (v / m).

**Tabla 36 Liberación obtenida según la prueba de percolación CEN / TS 14405.**

Element	ARM	ARM + p-CRT	p-CRT <sub>F</sub>	p-CRT <sub>R</sub>	p-CRT	ARM <sub>a</sub> + p-CRT	Valores límite Directiva 2003/33/EC (mg/l)	
	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	Inert	Non hazardous
Cr	0.0052	0.0412	0.0087	0.0023	0.0065	0.0513	<0.1	0.1 - 2.5
Ni	0.0006	0.0052	0.0043	0.0020	0.0035	0.0057	<0.12	0.12 - 3
Cu	0.0010	0.0144	0.0219	0.0047	0.0160	0.0176	<0.6	0.6 - 30
Zn	0.0016	0.0079	0.0142	0.0160	0.0146	0.0097	<1.2	1.2 - 15
As	0.0006	0.0043	0.0030	0.0027	0.0028	0.0072	<0.06	0.06 - 0.3
Se	0.0016	0.0057	0.0011	0.0014	0.0012	0.0090	<0.04	0.04 - 0.2
Mo	0.0210	0.0811	0.0044	0.0038	0.0042	0.0820	<0.2	0.2 - 3.5
Cd	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	<0.02	0.02 - 0.3
Sb	0.0016	0.0077	0.0116	0.040	0.0208	0.0047	<0.1	0.1 - 0.15
Ba	0.0557	0.0615	0.2327	0.7725	0.4085	0.0972	<4	4 - 20
Hg	< 0.0001	< 0.0001	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	<0.002	0.002 - 0.03
Pb	0.0004	0.0018	0.0908	<b>0.1608</b>	0.1130	0.0028	<0.15	0.15 - 3

Después de la caracterización básica de la liberación de contaminantes mediante la prueba de cumplimiento mediante la cual se identifican los



elementos más conflictivos, la prueba de filtración se realizó de acuerdo con el procedimiento CEN / TS 14405 para evaluar la liberación de componentes con un líquido / sólido relación = 0.1 (**Roussat y col., 2008**).

La Tabla 36 muestra las concentraciones de lixiviados obtenidos de acuerdo con la prueba de percolación. Se observa que las mezclas con p-CRT se comportan como un material inerte, corroborando los datos obtenidos en la prueba de cumplimiento. Solo el p-CRT<sub>R</sub> excede (en negrita) los límites de un material inerte.

Teóricamente, los resultados de Pb de la prueba de lixiviación por filtración de muestras de ARM + p-CRT deberían ser de 0.0118 mg / L, pero los resultados tienen un valor mucho más bajo, lo que sugiere que los áridos reciclados absorben parte del poder contaminante del vidrio de p-CRT.

## 5.4. MÉTODOS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS

---

### 5.4.1. PROCTOR MODIFICADO

La prueba de Proctor Modificado (**UNE 130501, 1994**) es un método de prueba geotécnica de laboratorio utilizado para determinar las propiedades de compactación del suelo, específicamente, para determinar el contenido óptimo de agua en el cual el suelo puede alcanzar su máxima densidad en seco.

El Proctor Modificado tiene una importancia real en la industria de la construcción. Las estructuras necesitan una base resistente para apoyarse, y un suelo mal compactado podría significar el colapso de una estructura bien diseñada. En algunos casos, como en carreteras con poco tráfico o áreas rurales, el suelo constituye la capa de apoyo, por lo que la importancia de la compactación se hace evidente.

Como se muestra en la Figura 52, todos los materiales tienen curvas que no son muy sensibles a los cambios en el contenido de humedad. **Arulrajah y col. (2013)**, informaron que los materiales con curvas de compactación planas pueden tolerar una mayor cantidad de variación en el contenido de humedad sin comprometer gran parte de la densidad obtenida de la compactación.

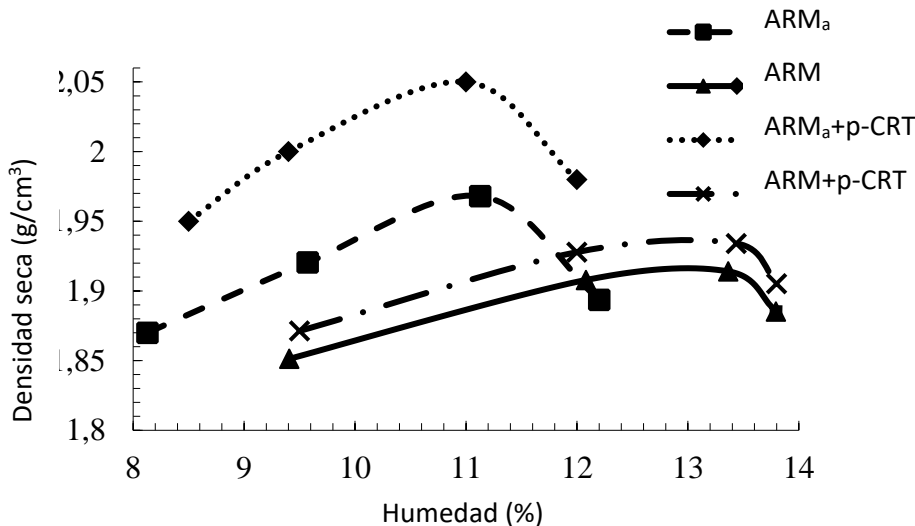


Figura 52 Proctor modificado

El material con la humedad más alta y la densidad más baja es el ARM (Tabla 37), debido a su contenido de partículas cerámicas. Este contenido de partículas aumenta la porosidad y, por lo tanto, produce una menor densidad del material y una mayor absorción. Las mezclas de ARM y ARM<sub>a</sub> con p-CRT aumentan la densidad seca máxima.

Tabla 37 Densidad seca y resultados óptimos de humedad

	ARM	ARM+p-CRT	ARM <sub>a</sub>	ARM <sub>a</sub> +p-CRT
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.92	1.94	1.97	2.05
Humedad (%)	13.29	13.19	11.1	11.01

### 5.4.2. CAPACIDAD PORTANTE (CBR)

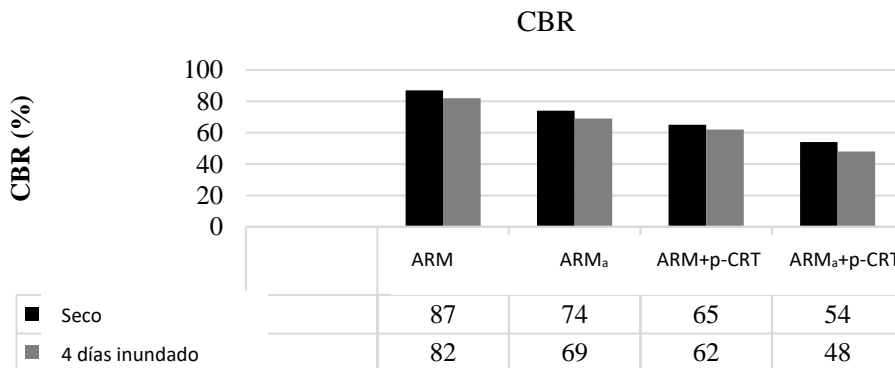
La prueba de *California Bearing Ratio (CBR)* es una prueba de resistencia que compara la capacidad de carga de un material con la de una piedra triturada bien graduada (por lo tanto, un material de piedra triturada de alta calidad debe tener un CBR del 100%). Está destinado principalmente, entre otros, a evaluar la resistencia de los materiales cohesivos que tienen tamaños de partícula máximos inferiores a 20 mm (UNE 103502-95).

La prueba CBR consiste en comparar la aplicación de una relación de fuerza por unidad de área requerida para penetrar una masa de suelo con un pistón circular estándar a una velocidad de 1.25 mm / min con la requerida para la penetración correspondiente de un material estándar.

**Das y González (2001)**, afirmaron que la capacidad de carga del suelo es la capacidad que tiene el material para soportar las cargas aplicadas sobre él, sin la falla que ocurre por corte o una gran deformación.

Las cargas que una capa estructural de una carretera transmite al suelo producen tensiones y deformaciones. La deformación dependerá de la tensión y las propiedades físico-mecánicas del terreno. En los pavimentos, la carga transmitida es móvil, pues experimenta ciclos de carga y descarga, donde se recupera una parte de la capa deformada y otra no. Cabe señalar que la prueba CBR indica la calidad de soporte que tendrá un suelo. Autores como **Crespo (2004)**, clasifican el suelo basándose únicamente en el índice CBR.

La prueba de CBR se realizó en las muestras compactadas con el contenido de humedad óptimo, para lo cual se usó la prueba de compactación de Próctor modificado. Las pruebas de CBR se llevaron a cabo en condiciones secas y tras 4 días inundado, los resultados se resumen en la Figura 53.



**Figura 53** Valores de la relación de demora de California (CBR) (sin humedecer y empapados durante 4 días)

De acuerdo con otros estudios (**Poon y Chan, 2006**), en condición seca, los materiales mostraron el mayor valor de CBR. El valor de CBR disminuyó con el

contenido de p-CRT en ambas condiciones. Una posible razón fue la menor resistencia intrínseca a las partículas trituradas de p-CRT.

### 5.4.3. MARTILLO VIBRANTE

Los materiales se compactaron en un molde CBR utilizando un martillo vibratorio de acuerdo con **NLT-310/90**. Se rellenaron en tres capas, cada una formada con un grosor de un tercio de la longitud del molde para producir la gráfica de densidad / tiempo. El valor de compactación requerido para cada muestra debe ser superior al 98%, de acuerdo con el valor de referencia del Proctor Modificado. Se fabricaron tres muestras utilizando diferentes tiempos de vibración de 5, 12 y 20 s.

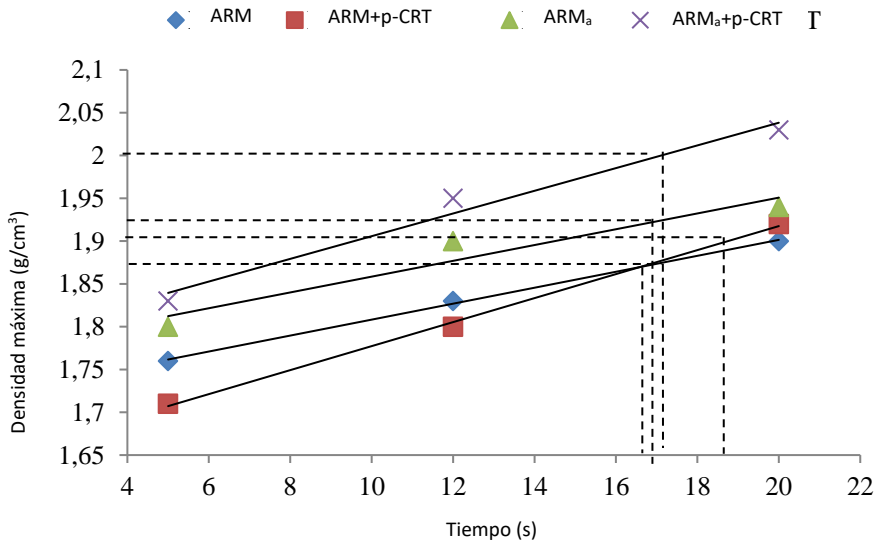


Figura 54 Tiempo de martillo vibrante

Los tiempos de compactación del martillo vibrante fueron diferentes en todas las mezclas. Los materiales no mezclados con p-CRT mostraron tiempos de compactación elevados. La Figura 54 muestra el tiempo requerido para obtener

un martillo de vibración de 98% de densidad Proctor. Los tiempos de compactación del martillo vibratorio varían de 17 a 19 s.

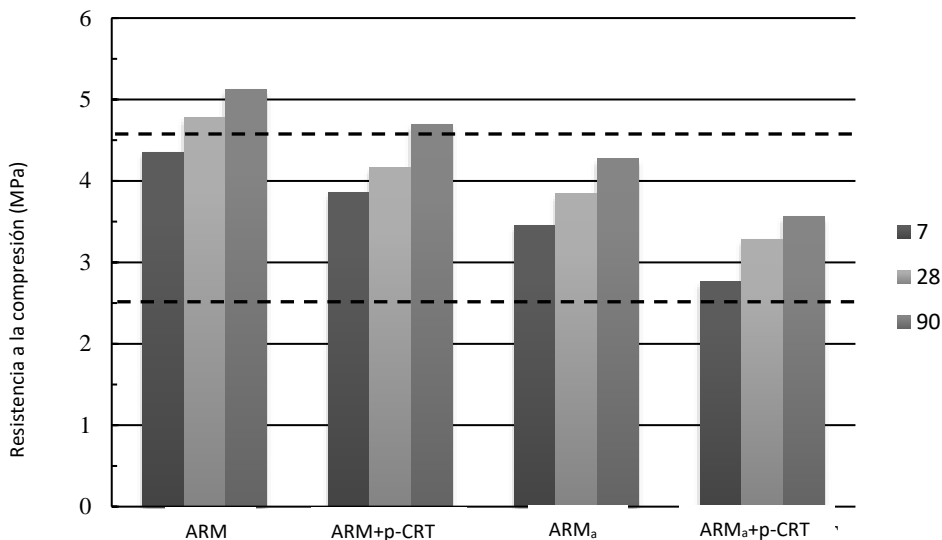
#### 5.4.4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El propósito de esta prueba es la determinación de la resistencia a la compresión simple de los materiales tratados con conglomerantes hidráulicos. Esta prueba se ha llevado a cabo según la metodología indicada por **NLT-305/90**.

La resistencia a la compresión simple en mezclas tratadas con cemento es un indicador del grado de reacción del suelo con cemento y agua y la velocidad de endurecimiento con respecto al tiempo. Los valores obtenidos dependen de muchos factores: el contenido y el tipo de cemento, el tipo de suelo, la energía de compactación aplicada, la eficiencia lograda en la mezcla, la cantidad de materia orgánica, el tamaño y la forma de la muestra de prueba, etc. Particularmente, debido a la morfología y la baja absorción de agua que muestra el CRT, la interacción entre las partículas y el cemento no se materializa como con un árido natural o reciclado, obteniendo una pérdida de resistencia en las mezclas que incorporan el CRT.

En el caso de estructuras de pavimento, se sugieren valores de resistencia a la compresión según el tipo de pavimento y el tipo de capa a construir. En España, la regulación requiere una resistencia mínima de 2.5 MPa a 7 días, con un porcentaje de cemento no inferior al 3%.

La Figura 55 muestra los resultados obtenidos en todas las mezclas producidas a los 7, 28 y 90 días. También se muestran unas líneas discontinuas que indican la resistencia a la compresión mínima que debe obtenerse después de 7 días (2.5 MPa), así como la resistencia máxima a 28 días (4.5 MPa) de acuerdo con las especificaciones técnicas españolas.



**Figura 55 Resultados de resistencia a la compresión con 3% de cemento**

Se observa que todas las mezclas exceden el límite requerido a los 7 días. Los valores más altos de resistencia a compresión se obtuvieron en las mezclas MRA, con resultados similares obtenidos por otros autores (Agrela y col., 2014).

La Figura 56 muestra la evolución de la fuerza. A los 28 días, se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de aproximadamente el 90% en comparación con los valores de resistencia obtenidos a los 90 días. A los 7 días, los resultados fueron aproximadamente del 80% en comparación con los resultados medidos a los 90 días. La adición de p-CRT disminuye la resistencia en ambas mezclas. Si comparamos la MRA con MRA + p-CRT y MRA<sub>a</sub> con MRA<sub>a</sub> + p-CRT, hay una disminución en la resistencia a los 28 días de 12.97% y 14.58%, respectivamente. La resistencia a la compresión de todas las mezclas excede el valor mínimo de 2.5 MPa, corroborando el uso de p-CRT en mezclas tratadas con cemento.

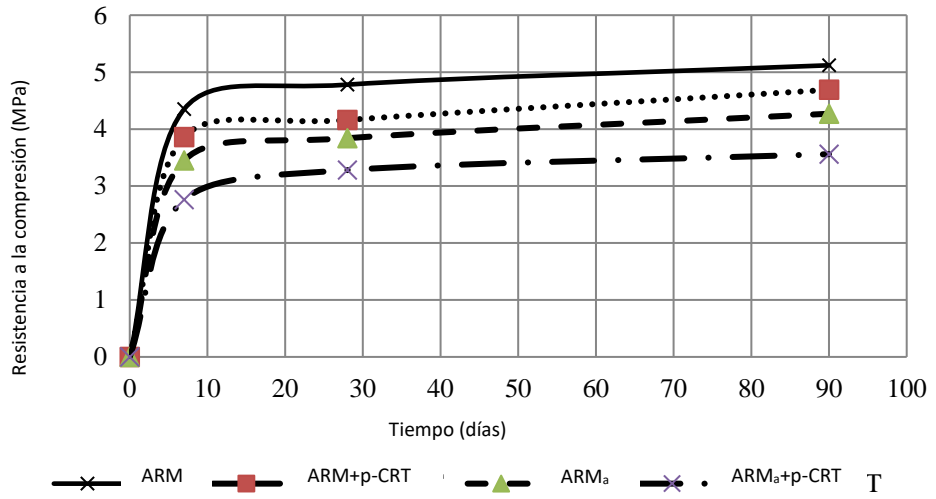


Figura 56 Evolución de la resistencia a compresión.



## 5.5. CONCLUSIONES PREVIAS

---

Este apartado proporciona los resultados de la investigación sobre vidrio de tubo de rayos catódicos en combinación con áridos reciclados mixtos (p-CRT y ARM) con diferentes composiciones, para ser utilizados como sub-bases y bases de pavimentos de carreteras, obteniendo las siguientes conclusiones:

- En cuanto a las propiedades físicas y químicas de los materiales, los áridos mixtos reciclados presentaron una menor densidad y una mayor absorción de agua debido a su contenido de partículas cerámicas (21.16% de partículas cerámicas). Las pruebas de abrasión de Los Ángeles indican una buena calidad de todos los áridos de acuerdo con la normativa vigente ( $> 40$ ).
- La contaminación potencial por lixiviación se estudió mediante dos métodos diferentes, pruebas de cumplimiento (**UNE-12457-4**) y pruebas de filtración (**CEN / TS-14405**). Los datos de la prueba de cumplimiento revelaron un posible contaminante en la parte trasera (p-CRT<sub>R</sub>) de las muestras analizadas, debido al alto contenido de Pb, lo que confirma que son un material inapropiado para la aplicación como árido aislado en cualquier aplicación de ingeniería civil.
- El presente estudio demuestra indirectamente la capacidad neutralizante de los áridos reciclados mezclados desde un punto de vista ambiental, reduciendo la concentración de metales pesados cuando se mezclan con vidrio de tubo de rayos catódicos (ver Tabla 36).
- Los resultados muestran que el uso de vidrio de tubo de rayos catódicos como árido, al 10%, no solo tenía niveles satisfactorios de resistencia a la compresión y capacidad de carga, sino que tampoco excede los límites establecidos por la directiva, pues todas las mezclas se clasifican como inertes.
- Se ha demostrado la viabilidad de usar vidrio de tubo de rayos catódicos y áridos reciclados mixtos como árido para la producción de capas de carreteras estructurales (base y subbase).
- Por lo tanto, el presente trabajo propone una solución que implica un beneficio ambiental para estos agentes, además de verificar las muestras (como material suelto y como mezclas de materiales granulares tratados con cemento) con potencial para ser aplicados como materiales de construcción durante un segundo ciclo de vida.

# **CAPÍTULO 6**

---

## **CONCLUSIONES**



## CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES

---

Como se ha visto en los tres estudios que se incluyen en esta Tesis Doctoral, la aplicación de áridos reciclados de hormigón y mixtos y la posible combinación de los áridos reciclados mixtos con residuos de vidrio CRT son idóneos para su aplicación en la construcción de carreteras. Es muy significativo observar que los áridos reciclados de hormigón se comportan de manera muy adecuada combinados con cemento, y los áridos reciclados mixtos a pesar de presentar en ocasiones cierto contenido en sulfatos, presentan un comportamiento adecuado muy relevante.

A continuación se incluye una serie de conclusiones específicas relativas a cada uno de los cuatro temas que se han abordado.

1 - En relación con el empleo de los "Áridos Reciclados de Hormigón" en la fabricación de hormigones para su uso como capa de firme en carreteras se puede concluir que:

- Los ARH absorben mayor cantidad de agua que el AN, mostrando menor densidad, lo cual se debe tener en cuenta de cara a su uso en aplicaciones ligadas con cemento. Por tanto, se debe proporcionar un tiempo adicional de humectación, durante la ejecución de la obra, tras el extendido del material, para la homogeneización de la humedad en la mezcla, de forma previa al compactado.

- Se ha comprobado que, para una cantidad fija de cemento, la sustitución de la totalidad del árido grueso natural por reciclado de hormigón para usos no estructurales, así como la sustitución del 20% para los usos estructurales, presenta un comportamiento adecuado, reduciéndose de manera poco significativa su resistencia a compresión.

- La resistencia a compresión del hormigón fabricado con ARH aumentó a los 10 meses de su puesta en obra.

2 - En relación con los ARH para su uso en la fabricación de gravacemento en capas de base tratadas con cemento de carreteras se puede concluir que:

- Cuando se aplican los ARH se debe realizar un control exhaustivo de la producción para ajustar adecuadamente tanto la composición como la distribución del tamaño de las partículas.

- Al aplicar ARH tratados con cemento en capas de subbase, estos materiales deben presentar propiedades adecuadas, principalmente en lo que respecta al contenido de sulfatos solubles en ácido y la capacidad de absorción de agua que, por su composición, puede limitar el uso ingenieril.

- Las mezclas de gravacemento fabricadas con ARH presentaron valores de compactación similares a los de las mezclas convencionales, así como un valor de humedad de compactación más elevado, como consecuencia del mortero adherido y la porosidad que presentan en general los AR.

- Se hace necesaria la aplicación de una cantidad adicional de humectación previa, así como proporcionar un tiempo suficiente tras el extendido para la homogeneización de la humedad en la mezcla.

- Se ha comprobado que los resultados obtenidos en ensayo próctor, tras la saturación húmeda, muestran unos valores más adecuados que si se realiza por el método tradicional.

- La capa tratada con cemento donde se usó ARH presentó una mejor respuesta al deflectómetro de impacto que aquella donde se usó AN-TC. Este resultado podría deberse a que en el ARH su granulometría se modifica parcialmente durante el proceso de compresión, mejorando su capacidad de carga.

- Las mezclas de gravacemento recicladas con ARH presentaron resultados de resistencia a la compresión adecuados, siendo sus valores promedio un poco más bajos que los obtenidos usando materiales naturales convencionales o de cantera.

- En general, el comportamiento mecánico obtenido en las mezclas de gravacemento recicladas con ARH las hacen adecuados para su uso en capas de subbase granulares tratadas, de acuerdo con la instrucción de carreteras (PG3).

3 - En relación con el uso de Áridos Reciclados mixtos (ARM) combinados con residuos de vidrio de pantallas de tubos catódicos (CRT) para la conformación de bases y subbases de carreteras se puede concluir que:

- Respecto a las propiedades físicas y químicas de los materiales, los ARM presentaron una menor densidad y una mayor absorción de agua debido a su contenido de partículas cerámicas (21.16% de partículas cerámicas).

- Las pruebas de abrasión de Los Ángeles indican una buena calidad de todos los áridos de acuerdo con la normativa vigente, obteniéndose valores en torno al 40%.

- Se hace factible el uso de vidrio de tubo de rayos catódicos como árido, al combinarlo con ARM en un 10% de su composición en peso, para su empleo en subbases granulares no ligadas de carreteras y vías de baja intensidad de tráfico.

- Las mezclas ensayadas del 90% - ARM y 10% - CRT presentaron un comportamiento adecuado tanto en soluciones no ligadas como tratadas con cemento, evidenciado en los valores obtenidos de resistencia a la compresión y capacidad de carga, con reducciones poco significativas en relación con las mezclas convencionales estudiadas.

4 - Respecto a los estudios de impacto ambiental por lixiviación de ARM+CRT, podemos concluir con que:

- Aunque los residuos de CRT presentaron valores de lixiviados en Plomo superiores a los que marca la normativa actual para materiales inertes, y los ARM en lo relativo a contenidos en sulfatos, las mezclas ensayadas de 90% - ARM y 10% - CRT no presentaron excesos ni en Plomo ni en sulfatos, pudiendo clasificarse como inertes.

- Los valores de los resultados de lixiviación de los residuos de CRT de las muestras analizadas se clasificaron como peligrosos, debido al alto contenido de Pb, lo que confirma que son un material inapropiado para el uso como material aislado o individual en cualquier aplicación de ingeniería civil, siendo necesaria su combinación con otros materiales para reducir el potencial contaminante y cumplir con los valores estipulados para un material inerte.

De esta forma, en base a la investigación desarrollada podemos establecer unas conclusiones generales:

- Es posible usar ARH en la producción de materiales tratados con cemento tipo hormigón o gravacemento, pero solo si existe un control exhaustivo de la producción de ARH, así como una buena ejecución de la carretera. No se puede ignorar la evidencia de que la aplicación de estos ARH es amigable con el medio ambiente, ya que reduce el acopio en vertedero y la apertura de nuevos préstamos para la extracción de AN.

- El comportamiento mecánico de las mezclas tratadas con cemento de ARH fue satisfactorio, mostrando patrones similares a los obtenidos con AN, por lo que se demuestra que el ARH es totalmente viable, como el árido de cantera natural, siempre que el ARH esté libre de impurezas y se obtenga de un procesamiento adecuado.

- Por último, la combinación adecuada de ARM con residuos de vidrio CRT ha resultado ser una solución viable para la construcción de subbases de carreteras, que producirá un beneficio ambiental muy positivo, siempre que se controle su impacto ambiental por lixiviados para que puedan ser aplicados como materiales de construcción en posteriores ciclos de vida.

Como conclusión final quisiera mencionar que se hace necesaria la aplicación de áridos reciclados en capas estructurales de carreteras e infraestructuras viarias, ya que se ha demostrado que son materiales técnicamente viables y sostenibles. Desde hace décadas se ha estudiado y demostrado que son perfectamente válidos, siendo su uso no solo una posibilidad, sino una obligación real, ya que repercutirán en una construcción sostenible que favorecerá la reducción de la huella ambiental que se produce al ejecutar este tipo de construcciones.

## **6.1.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

---

Ya ha sido descrito el resultado de la investigación desarrollada para la aplicación del AR mezclados con residuos de vidrio CRT, siendo factible su utilización tanto desde el punto de vista medioambiental como estructural. En esta línea se considera muy interesante realizar un tramo de una vía de comunicación incluyendo los residuos de vidrio CRT mezclados con AR, que permita ensayar en condiciones reales de tráfico el comportamiento del mismo.

Asimismo, dada la diversidad de residuos de entrada en las instalaciones que, en ocasiones contienen yeso y, por lo tanto, sulfatos, se considera apropiado estudiar la construcción de capas de firme, rellenos o núcleos de terraplén, con niveles más elevados de yeso, y determinar su comportamiento tanto a nivel estructural como medioambiental.





# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

Abdallah, S.; Fan, M. Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement. *Int. J. of Eng. Tech. Res.* 2014, 2, 11–17.

Agrela, F, Geraldés, V.L., Jiménez, J.R., Ayuso, J.M. Mixed recycled aggregates characterization for application in manufacture of non structural concrete: correlations between physical and chemical properties. 2nd International Rilem Conference: Progress of Recycling in the Build Environment. Sao Paulo. Brasil. 2009.

Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M.D., Jiménez, J.R. Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling.* 2012. 58. 98-106.

Agrela, F., Sánchez de Juan, M., Ayuso, J., Geraldés, V.L., Jiménez, J.R. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials.* 2011. 25, 3950-3955.

Agrela, F.; Barbudo, A.; Ramírez, A.; Ayuso, J.; Carvajal, M.D.; Jiménez, J.R. Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resour. Conserv. Recycl.* 2011, 58, 98–106.

Agrela, F.; Cabrera, M.; Galvín, A.; Barbudo, A.; Ramirez, A. Influence of the sulphate content of recycled aggregates on the properties of cement-treated granular materials using Sulphate-Resistant Portland Cement. *Constr. Build. Mater.* 2014, 68, 127–134.

Agrela, F.; De Juan, M.S.; Ayuso, J.; Geraldés, V.; Jiménez, J.R. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 3950–3955.

Akash Rao, Kumar N. Jha, Sudhir Misra. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling.* 50, 2007, 71-81.

Ali Ebrahimi, Brian R. Kootstra, Tuncer B. Edil and Craig H. Benson. Practical approach for designing flexible pavements using recycled roadway materials as base course. *Road Materials and Pavement*.2012. Desig. Vol 13. 731-748. ISSN 1468-0629.

Andreola, F., Barbieri, L., Corradi, A., Lancellotti, I., Falcone, R., & Hreglich, S. Glass-ceramics obtained by the recycling of end of life cathode ray tubes glasses. *Waste Management*, 2005. 25 (2), 183-189.

Arulrajah, A. Piratheepan, J. Disfani, M.M. Bo, M.W. Resilient Moduli Response of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications. *Journal of Materials in civil Engineering*. 2013. 25:1920-1928.

Arulrajah, A.; Rahman, M.A.; Piratheepan, J.; Bo, M.W.; Imteaz, M.A. Evaluation of interface shear strength properties of geogrid-reinforced construction and demolition materials using a modified large-scale direct shear testing apparatus. *J. Mater. Civ. Eng.* 2013, 26, 974–982.

Ayan, V, C. Limbachiya, M.C., R. Omer, J., Azadani, S,M.N. Compactation Assessment of Recycled Aggregates for Use In Unbound Subbase Application. *Journal Of Civil Engineering and Management*. 2014. Volume 20(2). 169-174.

Ayuso, J., Barbudo, A, Jiménez, J.R., Agrela, F. y otros. Guía de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) de Andalucía central. 2015.

Bairagi, N.K., Vidyadhara H.S., Ravande, K. Mix design procedure for recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 1990. 4, 4. 188-193.

Barbudo, A., Ayuso, J., Lozano, A., Cabrera, M., López-Uceda, A. Recommendations for the management of construction and demolition waste in treatment plants. *Environment, Green Technolgy and Engineering International Conference (EGTEIC)*. Cáceres. España. 18-20 junio 2018.

Barbudo, A., F. Agrela, J. Ayuso, J.R. Jiménez, C.S. Poon. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*.2012, 28, 129-138.

Basha, E.A., Hashim, R, Mahmud, H.B. Muntohar, A.S. Stabilization of residual soil with rice husk and cement. *Construction and Building Materials*. 2005, 19, 448-453.

Bezerra, A.E, Schalch, V., Carpena, D, Duarte, J.L.. Mechanical properties modeling of recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials*. 2010, 24, 421-430.

Casuccio, M., Torrijos, M.C., Giaccio, G., Zerbino, R. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2008. 22. 1500-1506.

Catálogo Residuos. Catálogo de residuos utilizables en la construcción. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2015.

CAT-FIRMES. Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de residuos de la construcción y demolición, desarrollado por la Agencia de Obra Pública de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía, en colaboración con la Universidad de Córdoba, Agreca y Cemosá. 2016.

CEN-EN 14405: Characterization of Waste-Leaching Behaviour Test-Upflow Percolation Test (Under Specified Conditions); European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2017.

Cohen, M. Societal Issues in Materials Science and Technology. *MRS Bulletin*, 1994. 19(9), 3-8.

Contrafatto, L. Recycled Etna volcanic ash for cement, mortar and concrete manufacturing. *Constr. Build. Mater*. 2017, 151, 704–713.

Contrafatto, L.; Cosenza, R.; Barbagallo, R.; Ognibene, S. Use of recycled aggregates in road sub-base construction and concrete manufacturing. *Ann. Geophys*. 2018, 61, 223.

Corinaldesi V., Moriconi, G. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*. 2009. 23, 289-294.

Courard, L., Michel, F., Delhez, P. Use of concrete Road recycled aggregates for roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*. 24. 2009. 390-395.

Crespo, C. *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*; Limusa: Mexico City, Mexico. 2004. ISBN: 968-18-6489-1

D73/12. DECRETO 73/2012, de 20 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. 2012.

Da Conceicao Leite, F., Sos Santos Motta, R., Vasconcelos, K., Bernucci, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*. 2001. 25. 2972-2979.

Das, B.M.; González, S.R.C. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*; Thomson Learning: Madrid, Spain, 2001; pp. 445–494.

De Brito, J., Agrela, F., Vasco Silva, R. *New Trends in Eco. Eficiente and Recycled concrete*. Elsevier. 2019.

De Brito, J., Pereira, A.S., Correia, J.R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2005. 27. 429-433.

De Brito, J.; Silva, R.V.; Agrela, F. *New Trends in Eco-Eficient and Recycled Concrete*; Woodhead Publishing: Duxford, UK, 2018.

Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2010. 32. 421-426.

Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 2009. 23. 3382-3387.

Debieb, F., Kenai, S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*. 2008. 22. 886-893.

Del Rey, I.; Ayuso, J.; Galvín, A.; Jiménez, J.R.; López, M.; García-Garrido, M. Analysis of chromium and sulphate origins in construction recycled materials based on leaching test results. *Waste Manag.* 2015, 46, 278–286.

Desgeorges, J. P. *Rapport de mission sur la valorisation des produits électriques et électroniques*. 1992.

Dhir, R.K.; Limbachiya, M.C.; Leelawat, T.; BS 5328; BS 882. Suitability of Recycled Concrete Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes. *Proc. Inst. Civ. Eng.* 1999, 134, 257–274.

DIR2008CE. 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 directrices. Diario Oficial de la Unión Europea. 22/11/08. 2008.

Domingo - Cabo, C. Lázaro, F. López-Gayarre, M.A. Serrano-López, P. Serna, J.O. Castaño-Tabares. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials.2009. 23. 2545-2553.

Ecovidrio. [www.ecovidrio.es](http://www.ecovidrio.es). Datos del reciclaje. 2020.

EHE-08 -Instrucción de Hormigón Estructural EHE 08. Ministerio de Obras Públicas de España. 2008.

EHE-98. Instrucción de Hormigón Estructural EHE 98. Real Decreto 2661/1998, de 11 de diciembre por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural EHE y Real Decreto 996/1999, de 11 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 2661/1998, de 11 de diciembre, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural.

Ettxeberria, M., Vázquez, E., Marí A., Barra, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. Cement and Concrete Research. 2007. 37, 735-743.

EU Directive, 2003. Directive 2003108EC of the European parliament and of the council of 8 December 2003 amending Directive 200296 EC on waste electrical and electronic equipment . In: Official Journal of the European Communities, L 345, 31122003, pp. 10610

Eurostat. <https://ec.europa.eu/>, 2019.

Evangelista, L., De Brito, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites. 2007. 29-397-401.

Evangelista, L., De Brito, J., Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites. 2010. 32. 9-14.

Fattuhi, N.I., Clark, L.A. Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. Construction and Building Materials. 1996. 10, 4, 229-236.

FEC. Fundación para la economía circular. [www.economicircular.org](http://www.economicircular.org). 2020.

Final report from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions on the implementation of the Circular Economy Action Plan. Brussels, 4.3.2019 COM. 2019.

Galvín, A.P.; Ayuso, J.; Barbudo, A.; Cabrera, M.; López-Uceda, A.; Rosales, J. Upscaling the pollutant emission from mixed recycled aggregates under compaction for civil applications. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018, 25, 36014–36023.

Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A. Scrap-tyre rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials.* 2009. 23, 1828-1836.

Gómez- Soberón, J.M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study. *Cement and Concrete Research.* 2002. 32. 1301-1311.

Guía de buenas prácticas. Gestión y tratamiento de residuos de la construcción y demolición (RCD). Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Vivienda, Universidad de Córdoba, Cemos, Agreca y Federación de asociaciones gestoras de RCD. 2015.

Han, J., Thakur, J. K. Sustainable roadway construction using recycled aggregates with geosynthetics. *Sustainable cities and Society.* 2015.14, 342-350.

Herrador R., Pérez P., Garach, L., Ordóñez, J. Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. *Journal of Transportation Engineering. Asce.* 2011. 138, 182-190.

Hui, Z., Poon, C. S., & Ling, T. C. Properties of mortar prepared with recycled cathode ray tube funnel glass sand at different mineral admixture. *Construction and Building Materials.* 2013. 40, 951-960.

Hui, Z., Sun, W. Study of properties of mortar containing cathode ray tubes (CRT) glass as replacement for river sand fine aggregate. *Construction and Building Materials.* 2011. 25 (10), 4059-4064.

ICAFIR-06. Software ICAFIR, versión 2006 [ICAFIR 2006].

IDF-07. Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes, 2007.

Iniaghe, P. O., Adie, G. U. Management practices for end-of-life cathode ray tube glass: Review of advances in recycling and best available technologies. *Waste Management & Research*. 2015. 33 (11), 947-961.

INV-IHOBE. Investigación prenormativa denominada “Uso de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de la construcción y demolición”, desarrollada por Ihobe, en colaboración con el Gobierno Vasco, Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino y CEDEX. 2011.

Jiménez, J. R., Agrela, F., Ayuso, J., & López, M. A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. *Materiales de Construcción*. 2011. 61, 289-302.

Jiménez, J. R., Ayuso, J. Galvín, A.P. López, M. Agrela, F. Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*. 2012. 34. 34-43.

Jiménez, J.R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., Pérez, A. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. 58. 88-97.

Katz, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*. 33. 2003. 703-711.

Layman, Informe. Adaptación al cambio climático de la industria cerámica estructural mediante el uso de vidrio reciclado como fundente. *Life Clayglass-Life12/ENV/ES/000156*. 2017.

Lee, C.H., Chang, C. T.; Fan, K.-S.; Chang, T.-C. An overview of recycling and treatment of scrap computers. *J. Hazard. Mater*. 2004, 114, 93–100.

Ley 22 /2011. Ley 22 /2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. 2011. Jefatura del Estado «BOE» núm. 181, de 29 de julio de 2011 Referencia: BOE-A-2011-13046.

Ling, T. C., Poon, C. S. A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar. *Journal of cleaner production*, 2012. 29, 46-52.



Ling, T. C., Poon, C. S. Development of a method for recycling of CRT funnel glass. *Environmental technology*, 2012. 33, 2531-2537.

Ling, T. C., Poon, C. S. Feasible use of recycled CRT funnel glass as heavyweight fine aggregate in barite concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2012. 33, 42-49.

Ling, T. C., Poon, C. S. Use of recycled CRT funnel glass as fine aggregate in dry-mixed concrete paving blocks. *Journal of cleaner production*. 2014. 68, 209-215.

Ling, T. C.; Poon, C. S. Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar. *J. Hazard. Mater.* 2011, 192, 451–456. *Materials* 2020, 13, 748 13 of 13

Ling, T.-C.; Poon, C.-S.; Lam, W.-S.; Chan, T.-P.; Fung, K.K.-L. Utilization of recycled cathode ray tubes glass in cement mortar for X-ray radiation-shielding applications. *J. Hazard. Mater.* 2012, 199, 321–327.

López- Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A. Serrano-Lopez, M.A., López-Colina, C. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste management*. 2009. 29, 3022-3028.

Marshall, M., Henderson, J. New approaches to the challenge of CRT recycling. In *Recycling and reuse of glass cullet* . Thomas Telford Publishing. 2001. 75-83.

Martín – Morales, M, Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., Valverde- Espinosa, I. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*. 2011. 25, 742-748.

Martín- Morales, M., Cuenca Moyano, M., Zamorano, M., Valverde, I.. Recycled aggregate in road construction following the Spanish General Technical Specifications for Roads and Bridge Works (PG-3): A case study. *Informes de la Construcción*. 2013. Vol 65, 529, 107-119.

Mas, B., Cladera, A., del Olmo, T., Pitarch, F. Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Construction and Building Materials*. 2012. 27. 612-622.

Maschio, S., Tonello, G., Furlani, E. Recycling glass cullet from waste CRTs for the production of high strength mortars. *Journal of Waste Management*, 2013. 102519.

Melbouci, B. Compactation and shearing behaviour study of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 2009. 23-2723-2730.

Molenaar, A.A.A, Van Niekerk, A.A. Effects of Gradation, composition, and degree of compactation on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. *Transportation Research Record* 2002, 1787, 73–82.

Moncea, A. M., Badanoiu, A., Georgescu, M., Stoleriu, S. Cementitious composites with glass waste from recycling of cathode ray tubes. *Materials and structures*, 2013. 46. 12, 2135-2144.

Musson, S. E., Jang, Y. C., Townsend, T. G., & Chung, I. H. Characterization of lead leachability from cathode ray tubes using the toxicity characteristic leaching procedure. *Environmental science & technology*, 2000. 34(20), 4376-4381.

NLT 310/90: Vibrating Hammer Compaction of Granular Materials Treated; CEDEX: Madrid, Spain, 1990.

NLT-305/90 Resistencia a compresión simple de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos. Cedex. Ministerio de Obras Públicas. 1990.

NLT-338/07 Medida de deflexiones en firmes y pavimentos con deflectómetro de impacto. 2007.

OFOM-1382. Orden FOM/1382/02, de 16 de mayo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes relativos a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones. Ministerio de Fomento. 2002.

OFOM-2523. Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos. Ministerio de Fomento. 2014.

OMAM-02. 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. 2002.

Orden AAA. Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2013.

Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, L., García, T., Zermeño, M. Influence of environmental temperature and moisture content of aggregates on the workability of cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2009. 23. 1808-1814.

Padmini, A.K. K. Ramamurthy, M.S. Mathews. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2009. 23. 829-836.

Palm, V. Environmental hazards connected to the composition of cathode-ray tubes and cabinets. Swedish Environmental Research Institute, Stockholm. 1995.

PEMAR-16. El Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, redactado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2015.

Pérez, P., Agrela, F., Herrador, R., Javier Ordóñez; J. Application of cemente – treated recycled materiales in the construction of a section of road in Malaga, Spain. *Construction and Building Materials*. 2013. 44, 593-599.

PG-3. Dirección General de Carreteras (DGC). "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3. Ministerio de Fomento. 2004.

Plan acción UE. Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Bruselas. 2.12.2015.

Poon, C. S., Chan D. Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. 2007. 21 , 164-175.

Poon, C.S. Chan D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*.2006. 20 578-585.

Poon, C.S. Shui, Z.H. Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*. 2004.18, 461-468

Poon, C.S., Chan. D. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*.2006. 20, 569-577.

Poon, C.S., Shui, Z.H. Lam, L. Fok, H. Kou S.C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*.2004, 34. 31-36.

Poon, C.S.; Chan, D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Constr. Build. Mater*. 2006, 20, 578–585.

Poon, C.S; Kou, S.; Lam, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Constr. Build. Mater*. 2002, 16, 281–289.

PPTGAU-04.Pliego de prescripciones técnicas generales para los controles de auscultación dinámica de alto rendimiento, 2004. Gestión de Infraestructuras de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía.

PR-GEAR. Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD, elaborada en el marco del proyecto GEAR, con la participación del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2012.

Protocolo de gestión de RCD. “Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE”, desarrollado por la Comisión Europea. Dirección General de Mercado Interior, Industria, Emprendimiento y Pymes, en septiembre de 2016

Rahman, M.A., Arulrajah, A. Piratheepan, J. Bo, M.W., Asce, M. Imteaz, M.A. Resilient Modulus and Permanent Deformation Responses of Geogrid-

Reinforced Construction And Demolition Materials. *Jornal of Materials In Civil Engineering*. 2014. 26, 512-519.

Rashad, A. M. Recycled cathode ray tube and liquid crystal display glass as fine aggregate replacement in cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2015. 93, 1236-1248.

Rashad, A.M. Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement. *Constr. Build. Mater*. 2014, 72, 340–357.

RD 105/08. Real Decreto 105 / 2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. 2008.

Recomendaciones para la redacción de pliegos de especificaciones técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de la construcción y demolición. *Gestión de Infraestructuras de Andalucía*. Consejería de obras públicas de la Junta de Andalucía. Edición 1. 2010.

Romero, D., James, J., Mora, R., Hays, C. D. Study on the mechanical and environmental properties of concrete containing cathode ray tube glass aggregate. *Waste management*. 2013. 33(7), 1659-1666.

Roussat, N.; Méhu, J.; Abdelghafour, M.; Brula, P. Leaching behaviour of hazardous demolition waste. *Waste Manag*. 2008, 28, 2032–2040.

Sáez, P. V., & Osmani, M. A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 2019. 241, 118400.

Silva, R.V., de Brito, J. Dhir, R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and Demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*. 2014. 65, 201-217.

Sua-iam, G., Makul, N. Use of limestone powder during incorporation of Pb-containing cathode ray tube waste in self-compacting concrete. *Journal of environmental management*. 2013. 128, 931-940.

Tian, X.;Wu, Y. Recent development of recycling lead from scrap CRTs: A technological review. *Waste Manag*. 2016, 57, 176–186.

Topçu, I.B., Sengel, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. 2004. 34. 1307-1312.

Turatsinze, A., S. Bonnet, J.-L. Granju. Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: Improvement in cracking shrinkage resistance. *Construction and Building Materials*. 2007, 21, 176-181.

UNE 103204:2019: Organic Matter Content of a Soil by the Potassium Permanganate Method; Asociación Española de Normalización (AENOR): Madrid, Spain, 2019.

UNE 103501:1994: Geotechnic Compactation Test. Modified Proctor; Asociación Española de Normalización (AENOR): Madrid, Spain, 2004.

UNE 103502:1995: Test Laboratory Method for Determining in a Soil the C.B.R. Index; Asociación Española de Normalización (AENOR): Madrid, Spain, 1995.

UNE 146404:2018: Determination of the Coefficient of Friability of the Sands; Asociación Española de Normalización (AENOR): Madrid, Spain, 2018.

UNE 83300:1984. Normas UNE 83300:1984. Toma de muestras de hormigón fresco. UNE 83301:1984 Fabricación y conservación de probetas. 1984. Asociación española de normalización. 1984.

UNE 83303:1984 Refrentado de probetas con mortero de azufre. UNE 83304:1984 Resistencia a compresión. 1984.

UNE 83306:1985 Resistencia a tracción indirecta. 1985.

UNE 83313 Medida de la consistencia del hormigón fresco por el método del cono de Abrams. 1990.

UNE EN 196-1. Determinación de las resistencias mecánicas. 2018.

UNE EN 196-3. Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen. 2017.

UNE-EN 1097-2:2010: Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates-Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation; Asociación Española de Normalización (AENOR): Madrid, Spain, 2010.

UNE-EN 1097-6:2014: Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates-Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption; Asociación Española de Normalización (AENOR): Madrid, Spain, 2014.

UNE-EN 12457-4:2004: Characterisation of Waste-Leaching-Compliance Test for Leaching of Granular Waste Materials and Sludges-Part 4: One Stage Batch Test at a Liquid to Solid Ratio of 10 l/kg for Materials with Particle Size below 10 mm (Without or with Size Reduction); Asociacion Española de Normalizacion (AENOR): Madrid, Spain, 2004.

UNE-EN 13242:2003+A1:2008. Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes. 2008.

UNE-EN 1744-1: 2010+A1:2013. Norma UNE-EN 1744-1: 2010+A1:2013. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1. Análisis químico. 2013. Asociación española de normalización.

UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013: Tests for Chemical Properties of Aggregates-Part 1: Chemical Analysis; Asociación Española de Normalizacion (AENOR): Madrid, Spain, 2003.

UNE-EN 196-2:2014: Method of Testing Cement-Part 2: Chemical Analysis of Cement; Asociacion Española de Normalizacion (AENOR): Madrid, Spain, 2014.

UNE-EN 933-11:2009. Norma UNE-EN 933-11:2009. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. 2009. UNE. Asociación española de normalización. 2009.

UNE-EN 933-11:2009: Tests for Geometrical Properties of Aggregates-Part 11: Classification Test for the Constituents of Coarse Recycled Aggregate; Asociacion Española de Normalizacion (AENOR): Madrid, Spain, 2009.

UNE-EN ISO 17892-12:2019: Geotechnical Investigation and Testing-Laboratory Testing of Soil-Part 12: Determination of Liquid and Plastic Limits; Asociacion Española de Normalizacion (AENOR):Madrid, Spain, 2019.

UNE-EN. 1367-2:1999. Norma UNE-EN. 1367-2:1999. Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2. Ensayo de sulfato de magnesio. 1999. Asociación española de normalización.

UNE-EN-13242:2003+A1:2008: Aggregates for Unbound and Hydraulically BoundMaterials for Use in Civil Engineering Work and Road Construction; Asociacion Española de Normalizacion (AENOR):Madrid, Spain, 2003.

Vegas, I.; Ibanez, J.; José, J.S.; Urzelai, A. Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction. *Waste Manag.* 2008, 28, 565–574.

Vivian W. Y., Tam, X.F., Gao, C.M., Tam, C.H. Chan. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials.* 2008. 22. 364-369.

Vivian W.Y. Tam, c.M. Tam, Y. Wang. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. *Construction and Building Materials.* 2007. 21. 1928-1939.

Vivian W.Y., Tam, X.F., Gao, c.M., Tam. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research.* 2005. 35, 1195-1203.

Wahlström, M. Laine\_ylijoki, J, Määttänen, A. Loutojärvi, T. Environmental quality assurance system for use of crushed mineral demolition wastes in road constructions. *Waste Management.* 2000. 20, 225-232.

Walczak, P., Małolepszy, J., Reben, M., & Rzepa, K. Mechanical properties of concrete mortar based on mixture of CRT glass cullet and fluidized fly ash. *Procedia Eng.* 2015. 108, 453-458.

Watanabe T., Nishibata S., Hashimoto C., Ohtsu M. Compressive failure in concrete of recycled aggregate by acoustic emission. *Construction and Building Materials.* 2007. 21, 470-476.

Xiao, J., Sun Y., Falkner, H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete. *Engineering Structures.* 2006. 28. 1-8.

Xuan, D.; Houben, L.J.M.; Molenaar, A.A.A.; Shui, Z. Cement treated recycled demolition waste as a road base material. *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 2010, 25, 696–699.

Xuan, D.X. Houben, L.J.M., Molenaar, A.A.A., Shui Z.H. Mechanical properties of cement-treated aggregate material, A review. *Materials and Design.* 2011. 33. 496-502.

Xuan, D.X. Houben, L.J.M., Molenaar, A.A.A., Shui, Z.H. Mixture optimization of cement treated demolition waste with recycled masonry and concrete. *Materials and Structures.* 2012. 45, 143-151.



Yao, Z., Ling, T. C., Sarker, P. K., Su, W., Liu, J., Wu, W., & Tang, J. Recycling difficult-to-treat e-waste cathode-ray-tube glass as construction and building materials: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. 81, 595-604.

Yuan, W.; Li, J.; Zhang, Q.; Saito, F. Innovated Application of Mechanical Activation to Separate Lead from Scrap Cathode Ray Tube Funnel Glass. *Environ. Sci. Technol.* 2012. 46, 4109–4114.

Zoran, J.G., Toplicic-Curcic, G.A., Despotovic, I.M., Ristic N.S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. 2010. 24, 1129-1133.