



# GUÍA

de áridos reciclados de  
residuos de construcción  
y demolición (RCD) de  
Andalucía Central



Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y VIVIENDA



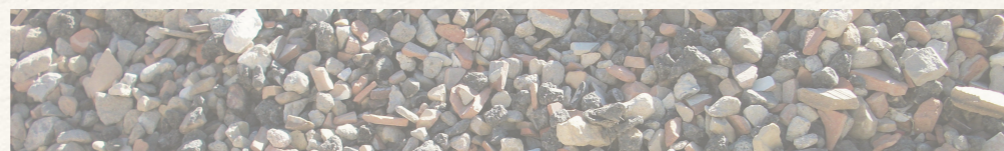
UNIVERSIDAD  
DE  
CÓRDOBA



Unión Europea  
Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional



Desarrollada por la UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA (Grupo de investigación del PAIDI "TEP 227 Ingeniería de la Construcción y la Cátedra de Medio Ambiente Enresa) con la participación de la empresa Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra S.A. (CEMOSA) y la colaboración de la Asociación de Empresas Gestoras de Residuos de Construcción y Demolición de Andalucía (AGRECA) y del Laboratorio de Control de Calidad de la Construcción de Córdoba de la Consejería de Fomento y Vivienda.. Esta Guía ha tenido la financiación de la CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y VIVIENDA de la JUNTA DE ANDALUCÍA y de los FONDOS FEDER de la U.E.







Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
**CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y VIVIENDA**



UNIVERSIDAD  
DE  
CORDOBA



**Unión Europea**

Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional

© Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
Consejería de Fomento y Vivienda  
Junta de Andalucía, 2011-2015

© Los Autores

**Edita**  
UCOPress  
Editorial Universidad de Córdoba

**ISBN**  
978-84-9927-191-0  
1ª Edición 2015

**Financiado por**  
Fondo Europeo de Desarrollo Regional, FEDER

**Diseño y producción**  
AGD Proyectos



  
**Andalucía  
se mueve con Europa**



# Índice

- ❖ Prólogo
- ❖ Introducción
- ❖ 2. Marco normativo
  - ❖ 2.1. Marco normativo comunitario
  - ❖ 2.2. Marco normativo estatal
  - ❖ 2.3. Marco normativo autonómico
- ❖ 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central
  - ❖ 3.1. Introducción
  - ❖ 3.2. Identificación y localización de las plantas
  - ❖ 3.3. Síntesis de los sistemas de gestión de las plantas visitadas
    - ❖ 3.3.1. Clasificación del material a la entrada
    - ❖ 3.3.2. Pre-tratamiento
    - ❖ 3.3.3. Pre-cribado
    - ❖ 3.3.4. Número y tipos de trituración
    - ❖ 3.3.5. Triaje
      - ❖ 3.3.6. Separador magnético
      - ❖ 3.3.7. Eliminación de materiales ligeros
      - ❖ 3.3.8. Supresor de polvo
  - ❖ 3.4. Tipología de materiales obtenidos y destino
  - ❖ 3.5. Cálculo de la tasa de reciclaje de la zona estudiada
  - ❖ 3.6. Tasa de producción de RCD por habitante
  - ❖ 3.7. Propiedades de los áridos reciclados
  - ❖ 3.8. Consideraciones ambientales
    - ❖ 3.8.1. Objetivos
    - ❖ 3.8.2. Materiales
    - ❖ 3.8.3. Metodología
    - ❖ 3.8.4. Resultados
    - ❖ 3.8.5. Conclusiones
- ❖ 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso, presente en los áridos de RCD, en las unidades de obras de construcción de carreteras
  - ❖ 4.1. Introducción



# Índice

- ❖ 4.1.1. Normativa andaluza
- ❖ 4.1.2. Los compuestos de azufre en los áridos de RCD
- ❖ 4.2. Objetivos de la investigación
- ❖ 4.3. Trabajo realizado
- ❖ 4.4. Estudio de los análisis químicos para la determinación del contenido de yeso en los suelos y zahorras RCD
  - ❖ 4.4.1. Normativa vigente para la determinación de los compuestos de azufre en suelos, zahorras y áridos RCD
  - ❖ 4.4.2. Trabajo realizado para el análisis de la normativa química de determinación de los contenidos de compuestos de azufre en suelos y zahorras
- ❖ 4.5. Estudio de la acción del yeso en las características de los suelos y zahorras para su empleo en obras viarias
  - ❖ 4.5.1. Preparación de las muestras
  - ❖ 4.5.2. Ensayos
- ❖ 4.6. Identificación del suelo y de la zahorra
  - ❖ 4.6.1. Identificación del suelo
  - ❖ 4.6.2. Identificación de la zahorra
- ❖ 4.7. Resultados ensayos químicos
  - ❖ 4.7.1. Consideraciones previas
  - ❖ 4.7.2. Normas de ensayo para determinar los contenidos de compuestos de azufre
  - ❖ 4.7.3. Resultados obtenidos
  - ❖ 4.7.4. Análisis de los resultados
  - ❖ 4.7.5. Propuesta de métodos de ensayo
  - ❖ 4.7.6. Sales solubles
- ❖ 4.8. Evolución de las características mecánicas
  - ❖ 4.8.1. Ensayos CBR
  - ❖ 4.8.2. Evolución de la resistencia a compresión
- ❖ 4.9. Conclusiones de la evolución de las características mecánicas
- ❖ 4.10. Estabilidad de volumen
  - ❖ 4.10.1. Estabilidad de volumen de las muestras sin ligar con cemento
- ❖ 4.11. Ensayo probetas mixtas
  - ❖ 4.11.1. Preparación y conservación de las probetas mixtas
  - ❖ 4.11.2. Ensayo de las probetas mixtas
  - ❖ 4.11.3. Resultados de los ensayo de las probetas mixtas
- ❖ 4.12. Conclusiones de la estabilidad de volumen
- ❖ 4.13. Incorporación de aluminio



# Índice

- ❖ 4.13.1. Ensayos de envejecimiento acelerado del suelo con la incorporación de aluminio
  - ❖ 4.14. Conclusiones del trabajo
    - ❖ 4.14.1. Consideraciones técnicas
    - ❖ 4.14.2. Propuestas para elevar los límites de contenido de compuestos de azufre
    - ❖ 4.14.3. Ensayos para el control de los compuestos de azufre
    - ❖ 4.14.4. Compromiso de los productores de áridos reciclados
- ❖ 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos reciclados procedentes de RCD en obras de ingeniería civil
  - ❖ 5.1. Objeto
  - ❖ 5.2. Clasificación y denominación de los áridos reciclados
  - ❖ 5.3. Recomendaciones para el empleo de áridos reciclados en usos no ligados
    - ❖ 5.3.1. Zahorras recicladas mixtas para bases granulares de firmes
    - ❖ 5.3.2. Suelos reciclados
    - ❖ 5.3.3. Material drenante reciclado
    - ❖ 5.3.4. Material fino reciclado
  - ❖ 5.4. Recomendaciones para el empleo de áridos reciclados ligados con cemento
    - ❖ 5.4.1. Suelo-cemento y grava-cemento para capas estructurales de firme
    - ❖ 5.4.2. Hormigón reciclado
    - ❖ 5.4.3. Hormigón compactado con rodillo
- ❖ 6. Referencias bibliográficas
- ❖ ANEXO 1. Estudio de las condiciones de filtro
- ❖ ANEXO 2. Protocolo para la realización de las amasadas de HCR



# Prólogo

Una de las actividades a desarrollar en el proyecto de investigación “APLICACIONES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) PARA LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE DE INFRAESTRUCTURAS VIARIAS EN ANDALUCÍA CENTRAL” presentado por la Universidad de Córdoba en la convocatoria de proyectos de investigación I+D+i relativos al ámbito competencial de la Consejería de Obras Públicas y Vivienda para los años 2011 a 2013, ha sido la elaboración de una guía de áridos reciclados de RCD de Andalucía Central.

El proyecto, financiado con fondos FEDER de la Unión Europea ha sido desarrollado por la Universidad de Córdoba a través del Grupo de Investigación del PAIDI “TEP 227 Ingeniería de la Construcción” y de la Cátedra de Medio Ambiente Enresa. Asimismo cuenta con la participación de la empresa Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra S.A. (CEMOSA) y la colaboración de la Asociación de Empresas Gestoras de Residuos de Construcción y Demolición de Andalucía (AGRECA)

y del Laboratorio de Control de Calidad de la Construcción de Córdoba de la Consejería de Fomento y Vivienda.

El equipo investigador ha estado constituido por las siguientes instituciones y personas:

- Grupo de investigación “Ingeniería de la Construcción” de la Universidad de Córdoba

Profesor Dr. Jesús Ayuso Muñoz (Investigador responsable y coordinador del Proyecto de Investigación)

Profesor Dr. José Ramón Jiménez Romero

Profesor Dr. Francisco Agrela Sainz

Profesora Dra. Adela Pérez Galvín

Profesor Dr. Martín López Aguilar

Profesor Dr. Alfonso Caballero Repullo

- Cátedra de Medio Ambiente Enresa

Profesor Antonio Jesús González Barrios

- Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía

M<sup>a</sup> del Lirio García Garrido

M<sup>a</sup> José Sierra López

Rosario Herrador Martínez



# Prólogo

- Asociación de empresas gestoras de valorización de Residuos de Construcción y Demolición de Andalucía (AGRECA)

Pablo Pérez González

- Centro de Estudios de Materiales y Control de Obras S.A (CEMOSA)

Manuel Salas Casanova

Sergio Escriba Marín

Noemi Jiménez Redondo

El equipo redactor de esta guía ha estado constituido por las siguientes personas:

Jesús Ayuso Muñoz (Universidad de Córdoba)

M<sup>a</sup> Auxiliadora Barbudo Muñoz (Universidad de Córdoba)

José Ramón Jiménez Romero (Universidad de Córdoba)

Francisco Agrela Sainz (Universidad de Córdoba)

Adela Pérez Galvín (Universidad de Córdoba)

Martín López Aguilar (Universidad de Córdoba)

Manuel Salas Casanova (CEMOSA)

Antonio J. Gonzalez Barrios (Cátedra de Medio Ambiente-UCO)

M<sup>a</sup> del Lirio García Garrido (AOPJA)

M<sup>a</sup> José Sierra López (AOPJA)

Rosario Herrador Martínez (AOPJA)

Isaac del Rey Tirado (Universidad de Córdoba)

Antonio López Uceda (Universidad de Córdoba)





# Introducción

En las últimas dos décadas se ha producido un gran avance en el tratamiento de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), y su procesamiento para la obtención de Áridos Reciclados (AR). En décadas anteriores, los RCD se trasladaban a vertederos, siendo su reciclado despreciable, en contraste con las tasas de reciclado de otros países europeos como Holanda o Dinamarca, en los cuales se reciclaba más del 70% en los años 70 y 80.

Los primeros impulsos normativos que se dieron en España fueron a finales de los años 90, cuando se planteó el primer Plan Nacional de Residuos 2001-2006, en el cual se comenzaron a fijar principios para la gestión de los RCD, y se fijaban objetivos muy ambiciosos para reciclar hasta un 40% de los RCD recogidos al finalizar el periodo de vigencia del plan. Posteriormente se planteó un segundo plan 2008-2015, donde no solo se fijaban objetivos de reciclaje y reutilización, sino que se incluía un diagnóstico de la situación del reciclaje de RCD en España, y se fijaban nuevos objetivos fijando una tasa del 40% de reciclaje para el año 2015, un valor bastante realista por otra parte.

Fue en el año 2008 cuando se aprobó el RD 105/2008 por el que se regulaba la producción y gestión de RCD. En este Real Decreto se definen las figuras jurídicas de los agentes que intervienen en el proceso de gestión de los RCD, así como los distintos conceptos a incluir en los proyectos básicos para la obtención de licencias por parte de las empresas del Sector. Este RD supuso un importante avance, ya que se ordenó de una manera clara a todos los intervinientes en el proceso de recogida y tratamiento de los RCD.

Posteriormente se comenzó a regular la aplicación de los AR en la fabricación de hormigones, o en la constitución de capas de firmes de carreteras. Así apareció el anexo 15 de la EHE-08 (Instrucción del Hormigón Estructural), donde se prescribían las condiciones que deben tener los AR para su aplicación en la fabricación de hormigones. Igualmente se incluyeron diversos párrafos en las actualizaciones del PG3, para que se pudieran aplicar en carreteras como relleno tipo terraplén, o en sustitución de materiales sueltos tipo zahorra en capas estructurales de firmes de carreteras.

Un avance muy significativo se produjo en la Comunidad Autónoma de Andalucía, cuando se publicó el documento “Recomendaciones para la Redacción de Pliegos de Carreteras para la inclusión de Áridos Reciclados”. Este documento se



# Introducción

realizó en base a diversas investigaciones y aplicaciones en tramos de carreteras de áridos reciclados. Este documento fue pionero en España, y dio lugar a un cambio de las prescripciones que se exigían a los materiales reciclados para su aplicación en carreteras.

Finalmente se debe destacar que otros documentos pre-normativos se han ido publicando, con el objetivo común de incrementar la tasa de reciclaje de RCD en España, y la producción de los AR con una calidad adecuada a cada uso. Estos textos son:

- Recomendaciones para la redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD). 2010. GIASA.
- Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. 2011. Publicación IHOBE-CEDEX. Trabajo realizado por CEDEX-AIDICO-LABEIN-UCO.
- Guía de Áridos Reciclados Procedentes de RCD. 2012. Proyecto GEAR - GERD.

Una vez realizado un breve análisis del marco normativo, que en un apartado posterior se desarrolla de una forma más pormenorizada, se va a comentar los hitos más importantes en el desarrollo de la investigación sobre AR realizada en España, centrándonos fundamentalmente en la llevada a cabo en la Comunidad Autónoma de Andalucía en los últimos diez años.

Entre los años 2003 y 2010 se realizaron dos proyectos de investigación liderados por el Laboratorio de Estructuras y Materiales del CEDEX, en el que participaron diversas universidades y centros de investigación de España, proyectos Rechnor y Cleam. En ellos, se estudiaron las posibles aplicaciones de AR de hormigón y mixtos en la fabricación de hormigones, tanto estructurales como no estructurales. Las conclusiones de estos trabajos fueron incluidas tanto en la EHE-08, como en el documento editado por IHOBE "Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición" (2011). A nivel nacional también es de destacar el proyecto GEAR financiado por el Ministerio de Medio Ambiente y realizado entre los años 2008 y 2012. Los resultados obtenidos se han publicado en la Guía española de áridos reciclados procedentes de RCD (2012). En la misma, se incluye una propuesta de clasificación de los AR que contiene las posibles aplicaciones y especificaciones de los mismos.



# Introducción

En la Comunidad Autónoma de Andalucía se han desarrollado diversos proyectos de investigación entre los que cabe destacar el financiado por la empresa pública GIASA, hoy transformada en Agencia de la Obra Pública de la Junta de Andalucía (AOPJA), para la aplicación en carreteras de áridos reciclados mixtos y de hormigón, en capas granulares del firme (zahorras) y ligados con cemento (grava-cemento). El más importante y trascendental fue el proyecto de ejecución de varios tramos de carretera en el tramo denominado como “Venta del Cordobés” en el año 2009. Los resultados de este proyecto de investigación dieron lugar a la redacción del documento mencionado previamente “Recomendaciones para la redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD)” en el año 2010.

Así mismo, la Universidad de Córdoba (UCO), a través del grupo de investigación del PAIDI TEP 227 Ingeniería de la Construcción ha realizado varios proyectos de investigación con empresas públicas (EPREMASA y ENRESA) y privadas (SACYR y PLODER-UICESA) que han permitido realizar cuatro tramos experimentales en los que se han probado zahorras recicladas mixtas como capas de base sin revestir de caminos rurales, zahorras recicladas de hormigón en capas de base de carreteras de tráfico T2 y por último capas de suelo-cemento con áridos reciclados mixtos en capas de base de un acceso a la Hiper-

ronda de Málaga. El comportamiento de todos los materiales reciclados ensayados ha sido excelente.

Por último cabe destacar el actual proyecto de investigación financiado por parte de la Agencia de la Obra Pública de la Junta de Andalucía con fondos FEDER denominado “Aplicaciones de los Áridos Reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) para la construcción sostenible de infraestructura viaria en Andalucía Central”, el cual se está desarrollando en 2012 y 2013. En este proyecto liderado por el grupo de investigación de Ingeniería de la Construcción de la UCO participa la empresa CEMOSA y la Asociación AGRECA. Los objetivos principales de este proyecto son evaluar nuevas aplicaciones de los AR como material drenante, como suelo-cemento (SC20) utilizando arenas recicladas, y la fabricación de hormigones no estructurales con zahorras recicladas mixtas y bajo contenido en cemento. Así mismo, se va a realizar una evaluación ambiental mediante ensayos de lixiviación de los AR producidos en Andalucía central, así como tramos experimentales que permitan hacer visible a ingenieros y contratistas el buen comportamiento de estos materiales con el fin de potenciar su uso. Los resultados de este proyecto han permitido elaborar esta “Guía de áridos reciclados de Andalucía central” que pretende ser un manual de consulta para los agentes intervinientes en el proceso de transformación de los RCD, así como consultores, contratistas, administraciones,



# Introducción

---

etc., y que pueda servir de guía para mejorar los procesos de tratamiento de estos residuos.

Esta guía de Áridos Reciclados pretende ser un texto útil, funcional y formativo, donde se sienten las bases de los conceptos y principios a aplicar en el tratamiento de los RCD, y en su transformación en áridos reciclados. También se abordará tanto la legislación actual, como los estudios de investigación a nivel nacional realizados hasta la fecha. Se propondrá una clasificación de áridos reciclados en la cual se conjuguen tanto los criterios de nomenclaturas científicas, como los nombres comerciales que se aplican cotidianamente por parte de los gestores de RCD.

Esperamos que este documento, sea un instrumento útil para todo el sector relacionado con los usos y aplicaciones de los áridos reciclados de RCD (administración, empresas constructoras, recicladores e investigadores).





---

# Marco Normativo



## 2. Marco Normativo

### 2.1. Marco normativo comunitario

La Unión Europea, desde finales de los años 90, considera a los RCD como un "flujo prioritario de residuos". A pesar de esto todavía no se ha publicado una legislación específica sobre ellos. A continuación se indica, la legislación europea que afecta a la gestión y tratamiento de RCD, como a la comercialización de los áridos reciclados.

#### **Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos**

Se establece para impedir o reducir los efectos negativos para la salud humana y el medio ambiente producidos por el vertido de residuos. Están sujetos a esta Directiva los residuos que se almacenen previa valorización durante un periodo de tres o más años y previa eliminación por un periodo de un año o más.

#### **Reglamento (CE) 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de junio de 2006, relativo a los traslados de residuos**

Se recogen los requisitos esenciales para la gestión de residuos, estableciendo los procedimientos y regímenes de control para su correcto traslado.

#### **Directiva 2008/98/CE del Parlamento y del Consejo de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos**

Es la legislación comunitaria que regula la producción y gestión de los residuos, conocida como Directiva Marco de Residuos, con la que se derogan Directivas anteriores. Su función principal es prevenir o reducir los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, entre los que se encuentran los RCD, de manera que se proteja el medio ambiente y la salud humana. Respecto a la prevención y gestión de residuos, establece una jerarquía que servirá de orden de prioridades en la legislación:

- prevención: a finales de 2014 se establecerán unos objetivos de prevención de residuos que serán desvinculados para 2020;
- preparación para la reutilización y reciclado: se tomarán medidas que fomenten la reutilización de los productos,



## 2. Marco Normativo

fomentando el establecimiento de redes de reutilización y reparación. También se promoverá un reciclado de alta calidad y, para este fin, se establecerá una recogida selectiva en origen cuando ésta sea factible técnica, económica y medioambientalmente posible. Para cumplir estos objetivos, antes de 2020, deberá aumentarse, como mínimo, un 70% de su peso la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales;

- otro tipo de valorización: se tomarán las medidas necesarias para garantizar que todos los residuos se sometan a operaciones de valorización;
- y en última instancia, su eliminación: cuando no se pueda realizar una valorización, todos los residuos se eliminarán de una forma segura, asegurando una protección de la salud humana y el medio ambiente.

Los residuos que deben cumplir esta Directiva aparecen en la lista establecida en la Decisión 2000/532/CE de 3 de mayo de 2000, dentro de la cual, en el capítulo 17, se encuentran los residuos de construcción y demolición, modificada por la Decisión 2001/118/CE de 16 de enero de 2001, excluyendo a los materiales naturales definidos en la categoría 17 05 04.

**Reglamento (UE) 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011, por el que se establecen**

### **condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo**

Su entrada en vigor plena se ha producido el 1 de julio de 2013. Los fabricantes tendrán que realizar una declaración de las prestaciones de los productos que comercialicen (DdP) en relación con sus características esenciales. La reglamentación nacional, será la que establezca los valores que se precisen en la obra de cada producto.

### **2.2. Marco normativo estatal**

La adaptación de la legislación y normas armonizadas de la Unión Europea por parte de España ha dado lugar al siguiente desarrollo legislativo:

#### **Ley 2/2006, de 5 de mayo, de Prevención de la Contaminación y Calidad Ambiental**

Por la que se definen y regulan los instrumentos de intervención administrativa ambiental a las que están sujetas todas aquellas instalaciones o actividades que puedan afectar al medio, con el fin de obtener un alto nivel de protección del medio ambiente e



## 2. Marco Normativo

integrar y agilizar los procedimientos administrativos.

### **Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la Producción y Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición**

Es la legislación básica que regula la producción y gestión de los RCD en España. Con él se pretende fomentar la prevención, reutilización, reciclado y valorización de los RCD, con el fin de proteger y mejorar la calidad de vida y defender el medio ambiente. Se han tomado las siguientes medidas preventivas:

- el productor (titular del bien inmueble) deberá de incluir un proyecto de gestión de RCD y, además, tendrá que realizar un inventario de los residuos peligrosos, con una separación selectiva, y transportarlos a un gestor autorizado.
- el poseedor (quien ejecuta la obra) se ve obligado a realizar un plan de gestión de RCD.
- a los gestores se les prohíbe el depósito en vertedero a residuos sin tratamiento previo.

Con estas medidas, de obligado cumplimiento (a excepción de obras menores de construcción y reparación domiciliaria), se pretende que los residuos reciban un tratamiento adecuado antes de ser depositados en vertedero.

### **Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, modificado por el Real Decreto 1304/2009 por el que se regula la Eliminación de Residuos mediante su Depósito en Vertedero**

Estos decretos transponen la Directiva 1999/31/CE a la legislación española.

### **II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCD)**

El Gobierno de España aprobó, el 26 de diciembre de 2008, el Plan Nacional Integrado de Residuos para 2008-2015, donde se enmarca el II Plan de Residuos de Construcción y Demolición. Este plan busca mejorar la gestión de los residuos generados en España, tomando como base principal los planes de las Comunidades Autónomas y de las Entidades locales, estimulando a las Administraciones y agentes involucrados hacia proyectos más ambiciosos. De esta manera se pretende cumplir con los objetivos impuestos por la Unión Europea con la Directiva Marco de Residuos.

### **Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados**

Es la transposición de la Directiva marco sobre residuos. La Ley 22/2011 dicta que, las Administraciones Públicas, aprobarán



## 2. Marco Normativo

antes del 12 de diciembre de 2013 un programa de prevención de residuos, en el que se establecerán los objetivos de prevención, de reducción de los residuos generados y de reducción de las sustancias peligrosas. Estas medidas pretenden reducir en un 10%, para el año 2020, las cantidades generadas en el 2010. Para ver la eficacia de las medidas adoptadas se llevará a cabo una evaluación de los programas de prevención, como mínimo, cada seis años. Además, en el caso de los residuos no peligrosos de construcción y demolición, la reutilización, el reciclado y valorización deberá alcanzar como mínimo el 70% en peso producido.

Así mismo, para promocionar el empleo de áridos reciclados se han producido las siguientes modificaciones en la normativa técnica:

### **ORDEN FOM/891/2004, por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, relativos a firmes y pavimentos (PG-3)**

La presente Orden modifica la Orden de 6 de febrero de 1976 del entonces Ministerio de Obras Públicas, por la que se aprobó el PG-3. Este pliego dispone las instrucciones para el desarrollo de obras de carreteras y puentes, con las condiciones técnicas normalizadas. A continuación, se indican los artículos modificados que permiten el empleo de AR de RCD.

#### Artículo 510. Zahorras

Se permite el empleo de materiales granulares reciclados de RCD como zahorras artificiales en categorías de tráfico T2 a T4, siempre que cumplan con las especificaciones de este artículo.

#### Artículo 513. Materiales tratados con cemento (suelo-cemento y grava-cemento)

Se permite el empleo de materiales granulares reciclados de RCD en la elaboración de suelo-cemento (SC20 y SC40), así como áridos gruesos reciclados en la elaboración de grava-cemento, siempre que cumplan las especificaciones técnicas de este artículo.

#### Artículo 551. Hormigón magro vibrado

Se permite el empleo de AR gruesos de RCD siempre que cumplan las especificaciones técnicas de este artículo,

Las especificaciones técnicas del Articulado del PG-3 se han establecido para áridos naturales, lo que ha limitado el uso de AR, cuyas propiedades físico-mecánicas y químicas son diferentes a la de los áridos naturales.



## 2. Marco Normativo

**ORDEN CIRCULAR 24/2008, por el que se modifican determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) para adaptarlos a normas europeas armonizadas**

Artículo 542. Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso

Permite el empleo de áridos para capas de base e intermedias incluidas las de alto módulo, del material procedente del fresado de mezclas bituminosas en caliente en proporciones inferiores al 10% de la masa total de la mezcla, siempre que cumplan las especificaciones de este artículo.

Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)

Esta instrucción regula el proyecto, ejecución y control de estructuras de hormigón estructural, teniendo por objeto la seguridad de las obras de edificación y de ingeniería civil afectadas por esta normativa. El Anejo 15 especifica las recomendaciones para la utilización de árido grueso reciclado con naturaleza de hormigón, a efectos de la instrucción definido como hormigón reciclado. Entre las recomendaciones de su aplicación en hormigón estructural, cabe destacar, que se

aconseja limitar el árido grueso reciclado a un 20%. Sólo podrá usarse en hormigón en masa u hormigón armado de resistencia característica no superior a 40 N/mm<sup>2</sup>.

### 2.3. Marco normativo autonómico

A continuación se mencionan las normas que en base a sus competencias ha elaborado la Comunidad Autónoma de Andalucía en relación con la gestión de RCD y las aplicaciones de los áridos reciclados.

**Decreto 397/2010 de 2 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Director Territorial, de Gestión de Residuos No Peligrosos de Andalucía 2010-2019**

La Ley 10/1998, ya derogada por la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, establece que es competencia de las Comunidades Autónomas la elaboración de planes autonómicos de gestión de residuos no peligrosos. Por lo que la Comunidad de Andalucía aprobó este plan territorial con los objetivos de reducción, reutilización, reciclado y dar otras formas de valorización a los residuos. Entre los residuos estudiados por este plan se encuentran los residuos de construcción y demolición.



## 2. Marco Normativo

El programa de prevención busca implicar a todos los agentes sociales y económicos que puedan reducir la generación de residuos. El objetivo 1.9, específico para los residuos de la construcción, es la prevención en origen de la generación de RCD.

El programa de gestión engloba las actuaciones que deben de realizar los productores y los gestores para garantizar una adecuada administración de los residuos hasta que son valorizados o eliminados, previamente se han tenido que agotar las opciones de prevención. Los objetivos para los RCD de este programa son:

- Objetivo 2.17. Separación en origen y correcta gestión ambiental de las distintas fracciones de residuos contenidas en RCD. Eliminación del vertido incontrolado de RCD y erradicación del vertido de RCD en vertederos de residuos inertes sin tratamiento previo
- Objetivo 2.18. Aplicación del principio de jerarquía a los RCD. Maximización de la valorización:
- Objetivo 2.19. Separación y gestión de forma ambientalmente correcta del 100% de los residuos peligrosos procedentes de los RCD

- Objetivo 2.20. Reciclado del 35% de RCD en el año 2015 y el 40% en el año 2019
- Objetivo 2.21. Alcanzar una valorización del 20% de RCD en el 2015 y el 25% en 2019
- Objetivo 2.22. Eliminación en vertedero con tratamiento previo, como máximo del 45% de RCD en el 2015 y el 40% en el 2019

Además, se realizará un seguimiento especial para controlar el vertido incontrolado de RCD.

### **Decreto 73/2012, de 22 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía**

Tiene el objetivo de regular la producción, posesión y gestión de los residuos que se generen y se gestionen en la Comunidad de Andalucía, así como, prevenir su generación y fomentar la prevención, reutilización, reciclado y valorización.

### **Recomendaciones para la redacción de: Pliegos de especificaciones técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD), realizado por la empresa pública Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A. (GIASA)**

Tiene como objetivo principal facilitar el uso de los áridos



## 2. Marco Normativo

---

reciclados de RCD, debido a que la normativa vigente, a pesar de permitir su uso, impone unas exigencias técnicas demasiado restrictivas para que estos materiales secundarios puedan utilizarse. Por eso, en este pliego, se proponen unas especificaciones técnicas para estos materiales, basada en su comportamiento en tramos experimentales de infraestructuras viarias. Contiene 4 artículos, uno relativo a consideraciones generales y los otros relativos a:

Artículo 1. Zahorras artificiales de reciclado de RCD

Artículo 2. Grava-cemento con áridos gruesos del reciclado de hormigón (GCR HORM)

Artículo 3. Suelos de reciclado de RCD





.....

# Los áridos reciclados en Andalucía Central



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

## 3.1. Introducción

En este apartado, se realiza un inventario de plantas autorizadas como gestores de RCD de la zona objeto de este proyecto, datos de cantidades de RCD gestionados en los últimos 5 años, tipos y cantidades de áridos reciclados producidos, así como destino de los mismos, tasa de reciclaje por plantas y por provincias. Por último, se incluirá la tasa de producción de RCD por habitante y año en las provincias de Córdoba y Málaga. Este dato se obtendrá a partir de los RCD gestionados por las plantas estudiadas (las únicas autorizadas por la Consejería de Medio Ambiente).

Así mismo, se realiza una caracterización de las propiedades físicas y químicas de las distintas tipologías de AR producidos en las distintas plantas. El análisis de los resultados obtenidos permitirá hacer una propuesta de clasificación de los AR.

## 3.2. Identificación y localización de las plantas

Se ha realizado un inventario de las plantas fijas autorizadas por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía para la gestión de RCD, localizadas en Andalucía central (provincias de Córdoba, Málaga y parte de Granada).

El resultado de esta recogida de información se resume en la Tabla 1, donde se observa que en la provincia de Córdoba hay 8 empresas gestoras de RCD autorizadas (una de ellas con 6 plantas de tratamiento), y otras 8 en la provincia de Málaga. De forma adicional, se han seleccionado dos plantas autorizadas en la provincia de Granada con vistas a una posible aplicación en una obra cercana.

Se ha de destacar que las plantas del Complejo Medioambiental de Córdoba y del Centro Medioambiental de Málaga “Los Ruices”, corresponden a las empresas municipales de recogida de residuos urbanos de la ciudad de Córdoba y Málaga



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

	EMPRESA	LOCALIDAD
1	<b>COMPLEJO MEDIOAMBIENTAL DE CÓRDOBA (SADECO)</b>	<b>Córdoba</b>
2	<b>GESTIÓN DE ESCOMBROS DE CÓRDOBA, S.A. (GECORSA)*</b>	<b>Córdoba</b>
3	<b>RECICOR XXI, S.L. (GRUPO BAREA)</b>	<b>Córdoba</b>
4	<b>EPREMASA - Montemayor</b>	<b>Montemayor (Córdoba)</b>
5	EPREMASA - Belmez	Belmez (Córdoba)
6	EPREMASA - Fuente Palmera	Fuente Palmera (Córdoba)
7	EPREMASA - Montoro	Montoro (Córdoba)
8	EPREMASA - Nueva Carteya	Nueva Carteya (Córdoba)
9	EPREMASA - Rute	Rute (Córdoba)
10	<b>EPSILON, S.L.*</b>	<b>Moriles (Córdoba)</b>
11	RECICLADOS ECOBAENA, S.L.	Baena (Córdoba)
12	<b>EXNITRANSA, S.L.</b>	<b>Castro del Río (Córdoba)</b>
13	UNIÓN DE RECICLAJES Y ESCOMBROS, S.A.	Lucena (Córdoba)
14	<b>RECICLADOS ESPEJO *</b>	<b>Cuevas Bajas (Málaga)</b>
15	<b>RECICLADOS MIJAS, S.L. *</b>	<b>Cala de Mijas (Málaga)</b>
16	<b>ÁRIDOS LA VENTILLA, S.L.</b>	<b>Parauta (Málaga)</b>
17	<b>CENTRO AMBIENTAL DE MÁLAGA “LOS RUICES” (LIMASA)</b>	<b>Málaga</b>
18	<b>ARISTERRA, S.L. *</b>	<b>Málaga</b>
19	<b>ÁRIDOS ECOLÓGICOS DEL SUR, S.L. *</b>	<b>Málaga</b>
20	ORTEGA VELA-ORVESA *	Estepona (Málaga)
21	RECICLADOS AXARQUÍA *	Canillas de Aceituno (Málaga)
22	<b>INERTES GUHILAR S.L. *</b>	<b>Alhendín (Granada)</b>
23	<b>EIDER S.L. *</b>	<b>Guadix (Granada)</b>

*\*Plantas pertenecientes a AGRECA*

Tabla 1. Listado de plantas de tratamiento de RCD

respectivamente (Saneamientos de Córdoba (SADECO), y Servicios de Limpieza Integral de Málaga (LIMASA). Así mismo, EPREMASA es la Empresa Provincial de Residuos y Medio Ambiente de la Diputación Provincial de Córdoba, que es la

propietaria de 6 plantas situadas en Montemayor, Belmez, Fuente Palmera, Montoro, Nueva Carteya y Rute que son gestionadas mediante concesión por la empresa Urbajicar. Por lo tanto en la zona objeto de estudio, existen 23 plantas de tratamiento de RCD.

De estas 23 plantas, 10 pertenecen a La Asociación de Empresas Gestoras de Residuos de Construcción y Demolición de Andalucía (AGRECA), que se creó para agrupar y defender los intereses comunes de las empresas ubicadas en Andalucía que se dedican al reciclaje de RCD.

Las plantas de Reciclados EcoBaena (Baena, Córdoba) y Unión Reciclajes y Escombros (Lucena, Córdoba) han cerrado, dejando de ser Gestores Autorizados de RCD. Del resto, se han visitado 14 plantas de tratamiento (fondo sombreado en la Tabla 1). Su situación se puede apreciar en la Figura 1. De las 6 plantas de EPREMASA tan solo se ha visitado la de Montemayor ya que el resto de plantas tienen el mismo sistema de gestión de los RCD. No obstante, se ha obtenido información de entrada de RCD y áridos reciclados producidos de las cinco restantes. Por ello, se va a considerar que el número de plantas incluidas en el proyecto es de 19.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

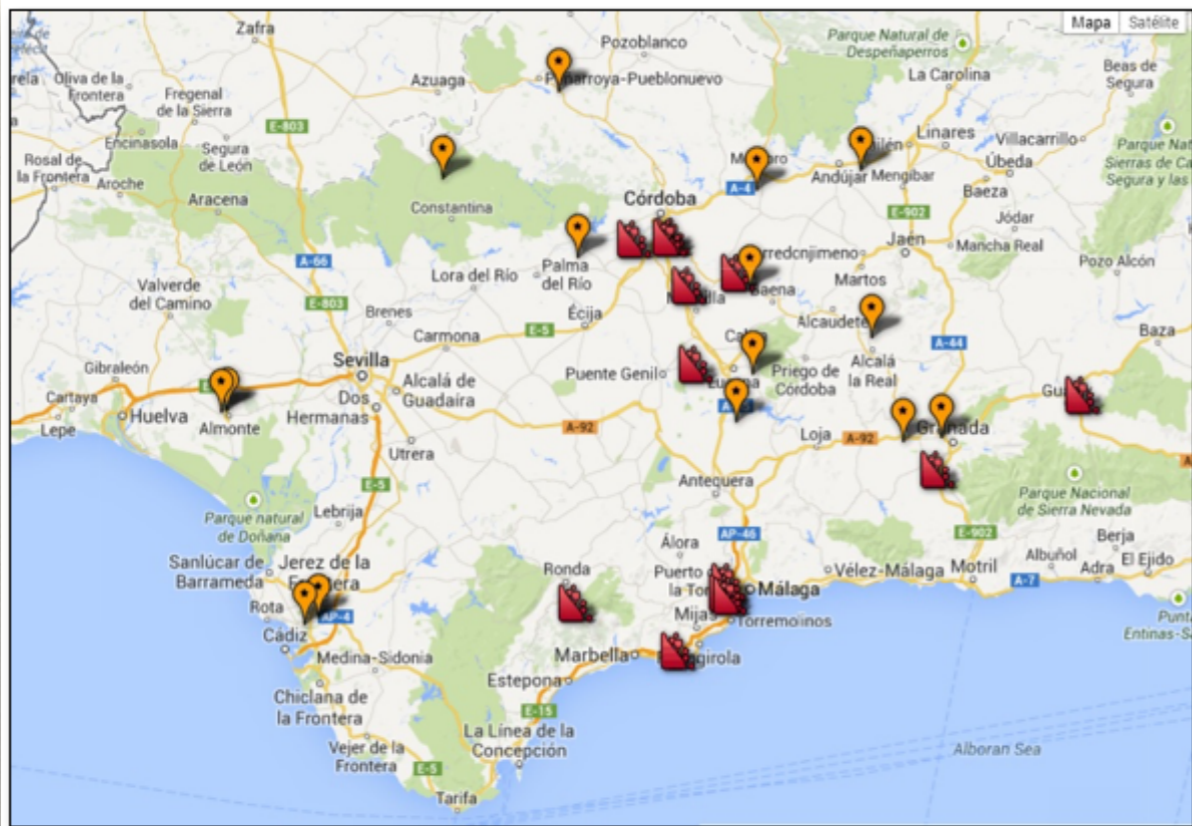


Figura 1. Situación de las plantas de tratamiento de RCD

Las plantas marcadas con símbolo rojo son aquellas que han sido visitadas e incluidas en el presente proyecto, mientras que las marcadas con símbolo naranja se refieren a otras plantas de tratamiento de RCD autorizadas de la Comunidad Autónoma de Andalucía, la mayoría de ellas, pertenecientes a la asociación AGRECA.

Una información más detallada de la localización, sistema de tratamiento, datos de producción... etc, se encuentra en la plataforma web del proyecto:

<http://www.aridosrcdandalucia.es/rcd/productores-rcd/>

A continuación se hace un resumen de los sistemas de gestión, cantidades de RCD gestionados, tipología y cantidades de áridos reciclados producidos, tasas de reciclaje y de producción de RCD por habitante.

## 3.3. Síntesis de los sistemas de gestión de las plantas visitadas

### 3.3.1. Clasificación del material a la entrada

La Tabla 2 muestra la clasificación de los RCD que realiza cada una de las plantas visitadas en base a su naturaleza y grado de contaminación. Los distintos tipos de RCD se clasifican a la entrada y se disponen en acopios diferenciados para su posterior tratamiento. De las 19 plantas incluidas en el proyecto, tan solo tres plantas (Sadeco, Limasa y Áridos la Ventilla) no separan el RCD según su naturaleza, clasificando todo el RCD como mixto y diferenciando según el grado de contaminación



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

que contenga, esto es así, debido a que las dos primeras son empresas municipales y reciben RCD de obra menor. En Áridos la Ventilla no es necesario realizar esta separación porque todos los RCD van destinados a vertedero después de realizar un tratamiento que consiste en la limpieza de materiales aprovechables por gestores autorizados (elementos férricos, plásticos, neumáticos, cartones, etc). Por último, Exnitrans no realiza ninguna clasificación del RCD a su entrada a la planta.

## 3.3.2. Pre-tratamiento

Se diferencian dos pre-tratamientos: uno para el material con naturaleza de hormigón y otro para el RCD mixto.

En el caso del material con naturaleza de hormigón solamente se le realiza una disminución de volumen mediante martillo vibrante. En Gecorsa y Arecosur también utilizan un demoledor para la eliminación de la armadura del hormigón.

Para el caso del RCD mixto, se realiza una separación de las impurezas (maderas, elementos férricos, papeles, cartones, neumáticos, etc.) manual y mecánicamente, así como una disminución de volumen mediante martillo vibrante.

Además, en Recicor, Epsilon y Limasa se aplica un pequeño riego para evitar la producción de polvo durante el proceso de reciclaje.

## 3.3.3. Pre-cribado

En casi todas las plantas, la primera operación que se realiza es un pre-cribado para eliminar todas las partículas finas que habitualmente es donde se concentra la mayor proporción de

Naturaleza	Clases	Plantas	Destino
Hormigón limpio	Masa y Armado	Gecorsa, Urbajicar	Reciclado
	Mezcla masa y armado	Recicor, Epsilon, Reciclados Mijas, Aristerra, Arecosur, Guhilar, Eider, Cuevas Bajas	Reciclado
Mixto	Limpio	Sadeco, Gecorsa, Recicor, Urbajicar, Epsilon, Limasa, Guhilar, Eider, Cuevas Bajas	Reciclado
		Áridos La Ventilla	Vertedero
	Semi-sucio	Sadeco, Gecorsa, Recicor, Urbajicar, Epsilon, Limasa	Reciclado
		Áridos La Ventilla	Vertedero
	Sucio	Sadeco, Gecorsa, Recicor XXI, Áridos La Ventilla, Eider, Cuevas Bajas	Vertedero
		Urbajicar, Epsilon	Reciclado
Muy sucio	Urbajicar	Vertedero	
Sin clasificar	Reciclados Mijas Aristerra, Arecosur	Reciclado	
Asfáltico	-----	Gecorsa, Urbajicar Guhilar, Eider	Reciclado
Tierras de excavación		Sadeco, Epsilon Arecosur, Eider	Cribado

Tabla 2. Clasificación del RCD en la entrada de las plantas



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

elementos como el yeso y tierras que son muy perjudiciales para la calidad de los áridos reciclados. Solo en Exnitransa, Cuevas Bajas y Urbajicar no se realiza este proceso. En la planta de Recicor se realiza este pre-cribado para no saturar la molienda, introduciendo el material extraído después de la machacadora. El tamiz que se utiliza es muy diferente según la planta, siendo los más comunes: #10, #15, #20, #25 y #40. Este proceso se realiza tanto al RCD procedente de hormigón como al mixto.

En función de la calidad y origen del material procedente del pre-cribado, se destina bien a vertedero, bien a obras internas de explotación y mantenimiento del vertedero o bien se vende como tierra vegetal o para rellenos.

## 3.3.4. Número y tipos de trituración

La trituración se realiza con una machacadora de mandíbulas, o un molino de impacto, dependiendo de la planta de tratamiento. La Tabla 3 muestra el número de líneas, de equipos y tipos de trituración existentes en cada una de las plantas.

## 3.3.5. Triaje

Para limpiar el material que se está procesando, en 9 plantas se realiza un triaje manual, las cinco plantas que no realizan triaje manual son: Urbajicar, Epsilon, Aristerra, Cuevas Bajas y Arecosur. Este triaje se realiza para eliminar los materiales inadecuados para un árido reciclado de calidad, pero que se pueden reciclar, tales como madera, vidrio, plásticos, (Código 1702 del catálogo Europeo de Residuos) y acero y otros metales (Código 1704 del Catálogo Europeo de Residuos). En Sadeco, Gecorsa, línea de hormigón de Recicor XXI, línea de material mixto en Reciclados Mijas, Limasa, Áridos la Ventilla y Eider tienen una cabina de triaje en la cual pueden realizar la limpieza hasta 4 operarios. En Exnitransa hay un pequeño puesto a la salida de la machacadora donde un operario elimina estos materiales. Y en Guhilar a la salida de la primera trituración hay un puesto para un operario y después del primer cribado tiene una cabina de triaje.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Nº de líneas	Plantas	Nº de equipos de trituración	Tipo de equipos de trituración
1	Limasa, Aristerra, Arecosur, Cuevas Bajas y Eider	1	Molino de impacto
	Epsilon	1	Machacadora de mandíbulas
	Áridos La Ventilla	<sup>(1)</sup>	
	Sadeco, Gecorsa, Epsilon y Exnitransa	2	Machacadora de mandíbulas + Molino de impacto
2	Recicor XXI	2	Machacadora de mandíbulas
	Reciclados Mijas	3	Línea de hormigón: 1 Machacadora de mandíbulas
			Línea de RCD mixto: Machacadora de mandíbulas + Molino de impacto
3	Guhilar <sup>(2)</sup>	3	Línea de pretratamiento
			Línea de hormigón: Machacadora de mandíbulas + 2 Molinos de impacto
			Línea de RCD mixto: 2 Molinos de impacto

<sup>(1)</sup> Esta planta no tiene ninguna machacadora al ir todo a vertedero

<sup>(2)</sup> Los dos molinos de impacto son comunes para las líneas de tratamiento de hormigón y RCD mixto. Por el contrario, la línea de RCD mixto no tiene machacadora de mandíbulas

Tabla 3. Número y tipo de molindas en casa planta

### 3.3.6. Separador magnético

Todas las plantas visitadas tienen un separador magnético o electroimán para la eliminación del material férreo. En la Tabla 4 se detalla el número de electroimanes que tiene cada planta y su ubicación.

Nº líneas	Plantas	Nº electroimanes	Ubicación
1	Gecorsa, Epsilon, Urbajicar, Exnitransa, Aristerra, Arecosur, Eider, Cuevas Bajas	1	A la salida de la primera molienda
	Áridos La Ventilla	1	Después del triaje manual
	Sadeco, Limasa	2	Uno después del pre-cribado y otro a la salida de la primera molienda
2	Recicor XXI Reciclados Mijas	2	Línea de hormigón: A la salida de la primera molienda
			Línea de RCD mixto: A la salida de la primera molienda
3	Guhilar	3	Línea de hormigón: A la salida de la primera molienda
			Líneas (2) de RCD mixto: A la salida del trómel

Tabla 4. Separador magnético

### 3.3.7. Eliminación de materiales ligeros

Para eliminar materiales ligeros se utilizan sopladores o lavadoras. Generalmente, estos elementos se disponen después de realizar el cribado, en las cintas transportadoras por las que sale el material más grueso. En las plantas de Exnitransa, Aristerra, Cuevas Bajas, Guhilar y Eider no se utiliza ningún medio para eliminar los materiales ligeros. La Tabla 5 muestra el tipo y el número de equipos que se utilizan para la eliminación de los materiales ligeros en cada una de las plantas.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

## 3.3.8. Supresor de polvo

Para evitar la producción de polvo durante el proceso de reciclado, 8 plantas de las 19 incluidas en el proyecto utilizan supresores de polvo en la producción de arenas. En Sadeco, Gecorsa, Recicor, Urbajicar, Aristerra, Arecosur y Guhilar se suprime el polvo con un riego mediante aspersores al final de la cinta que transporta la arena al acopio, y en Epsilon se colocan tubos verticales al final de la cinta para que el material caiga directamente en el suelo, evitando que las partículas finas permanezcan en suspensión en el aire.

Tipo	Número	Plantas	Ubicación
Soplador	1	Sadeco	A la salida de la tercera criba (>8 mm)
		Recicor (hormigón)	A la salida de la segunda criba (>8 mm)
		Urbajicar (Rute)	A la salida de la criba (>40 mm)
		Limasa	A la salida de la primera criba (>400 mm)
		Áridos La Ventilla	A la salida del trómel (>30 mm)
	2	Gecorsa	Uno a la salida de la tercera criba (>5 mm) y otro a la salida de la cuarta criba (>40 mm)
		Recicor XXI (mixto)	A la salida de la segunda criba (>30 y >8 mm)
		Reciclos Mijas (mixto)	Dos a la salida de la primera criba (>8 mm)
Lavadora	1	Epsilon	A la salida de la segunda criba (>30 mm)

Tabla 5. Eliminación de materiales ligeros

## 3.4. Tipología de materiales obtenidos y destino

En la Tabla 6 se muestra un resumen del listado de materiales reciclados obtenidos, su naturaleza y el destino que normalmente suele darse a dichos materiales. La granulometría de los materiales es muy variable, así las arenas oscilan entre 0-6 y 0-10 mm, las gravas entre 6 mm (tamaño más pequeño) y 40 mm tamaño máximo, las zahorras entre 0-32 y 0-40 mm, el árido grueso entre 32-60 mm y 40-80 mm.

Material	Naturaleza	Destino
Arena	Mixta	Cama de tuberías y tierra vegetal
	Hormigón	Cama de tuberías, mortero de albañilería y hormigón no estructural
Grava	Mixta	Rellenos y material drenante
	Hormigón	Rellenos, material drenante y hormigón pobre
Zahorra	Mixta	Caminos rurales y subbase de carreteras
	Hormigón	Caminos rurales y subbase de carreteras, calles, acerados y carril bici
Árido grueso > 32 mm	Mixta	Material drenante
	Hormigón	
Tierras de excavación		Tierra Vegetal y Rellenos

Tabla 6. Resumen de materiales obtenidos y destino

El uso de las arenas para el hormigón no estructural solo ocurre en la planta de Epsilon, al vender la totalidad de las arenas recicladas a una empresa local (Vipreluc) para la fabricación de adoquines.



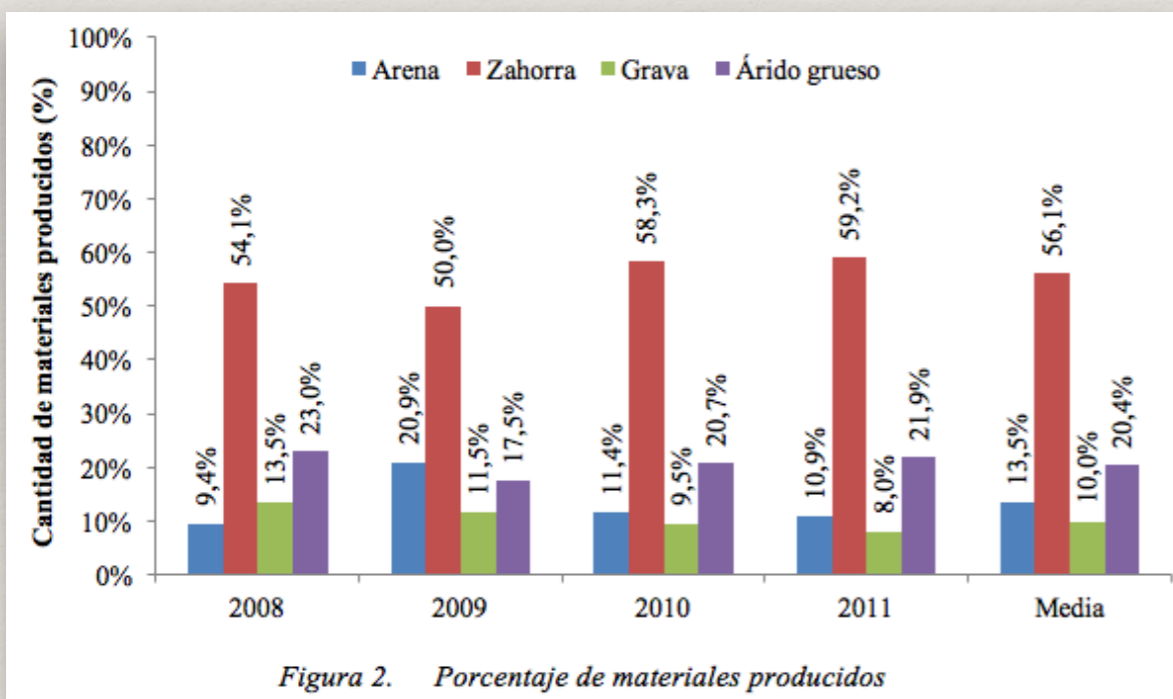
# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

La Figura 2 muestra las cantidades producidas en porcentaje de los distintos tipos de áridos reciclados. Para ello, se han utilizado los datos suministrados por 16 plantas, ya que las plantas de Epsilon (Córdoba), Arcosur (Málaga) no disponen de las cantidades producidas de cada tipo de árido reciclado. La planta de Cuevas Bajas tampoco se ha considerado ya que solo ha funcionado en el año 2012. En la figura se aprecia que el material de mayor producción es la zahorra (media del 56.1%), que se utiliza en la construcción de caminos rurales, explanadas, subbases de carreteras, vías urbanas, acerados etc. A continuación le sigue el árido grueso (media del 20.4%) que se utiliza como material drenante.

Por último, la arena y la grava reciclada se producen en cantidades similares (13,5 y 10% respectivamente).

## 3.5. Cálculo de la tasa de reciclaje de la zona estudiada

A partir de los datos suministrados por cada una de las 19 plantas, correspondientes al periodo 2007-2011 se ha calculado la tasa de reciclaje de la zona objeto de estudio que se ha desglosado por provincias. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos. Se aprecia que la provincia de Córdoba es la que tiene una mayor tasa de reciclaje (media del 66%) que casi duplica a las de Málaga y Granada (media del 38 y 36% respectivamente). Sin embargo, como se comentará más adelante, la tasa de entrada de RCD a las plantas de Córdoba es muy baja en relación a la provincia de Málaga. Esto puede indicar que una parte importante de los RCD generados en Córdoba se estén gestionando de manera inadecuada en vertederos ilegales. Otro dato que avala esta tesis es que en la provincia de Córdoba, a pesar de la crisis económica general y de la grave situación del sector de la construcción, la entrada de RCD en las plantas autorizadas ha crecido en los dos últimos años un 34%. Esto puede ser debido a la introducción de unos





# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

mejores mecanismos y sistemas de control de la producción de RCD promovidos por el RD 105/2008 por el que se regula la producción y gestión de los RCD. También conviene resaltar que aunque la provincia de Málaga tiene una tasa de reciclaje media del 38%, en los dos últimos años la tasa es superior al 60%, lo que indica una clara mejoría en los sistemas de tratamiento de los RCD. La tasa media de reciclaje de la zona objeto de estudio en el periodo analizado es del 40%, siendo la del año 2011 del 53%, lo que indica una tendencia creciente y positiva de la tasa de reciclaje de la zona estudiada.

Uno de los objetivos cuantitativos del II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD 2008-2015), es conseguir una tasa de reciclaje del 25 % en el año 2012 y del 40 % en el 2015. Como se puede ver en la anterior tabla, en las tres provincias se ha cumplido el objetivo del año 2012.

Además, en la provincia de Córdoba se supera el objetivo del año 2015 y la de Málaga lo ha superado en los dos últimos años. Sin embargo, en las dos plantas estudiadas de la provincia de Granada, la tasa de reciclaje ha tenido oscilaciones entre el 26 y el 43 %, estando la media del periodo por encima del objetivo del 2012, pero ligeramente por debajo del objetivo del 2015.

Provincia	Año	Entrada (t)	Salida (t)	Tasa de reciclaje
Córdoba	2007	69.762	43.888	63 %
	2008	61.082	38.668	63 %
	2009	73.733	58.052	79 %
	2010	88.788	58.280	66 %
	2011	99.106	61.464	62 %
	<b>MEDIA</b>	<b>78.494</b>	<b>52.070</b>	<b>66 %</b>
Málaga	2007	532.943	0	0 %
	2008	559.151	149.160	27 %
	2009	560.050	223.466	40 %
	2010	721.602	436.156	61 %
	2011	474.192	282.469	60 %
	<b>MEDIA</b>	<b>568.188</b>	<b>218.250</b>	<b>38 %</b>
Granada <sup>(1)</sup>	2007	409.599	160.641	39 %
	2008	277.547	118.904	43 %
	2009	312.998	80.991	26 %
	2010	329.018	117.760	36 %
	2011	198.527	66.266	33 %
	<b>MEDIA</b>	<b>305.538</b>	<b>108.912</b>	<b>36 %</b>

(1) En esta provincia tan solo se han analizado 2 plantas de tratamiento de RCD

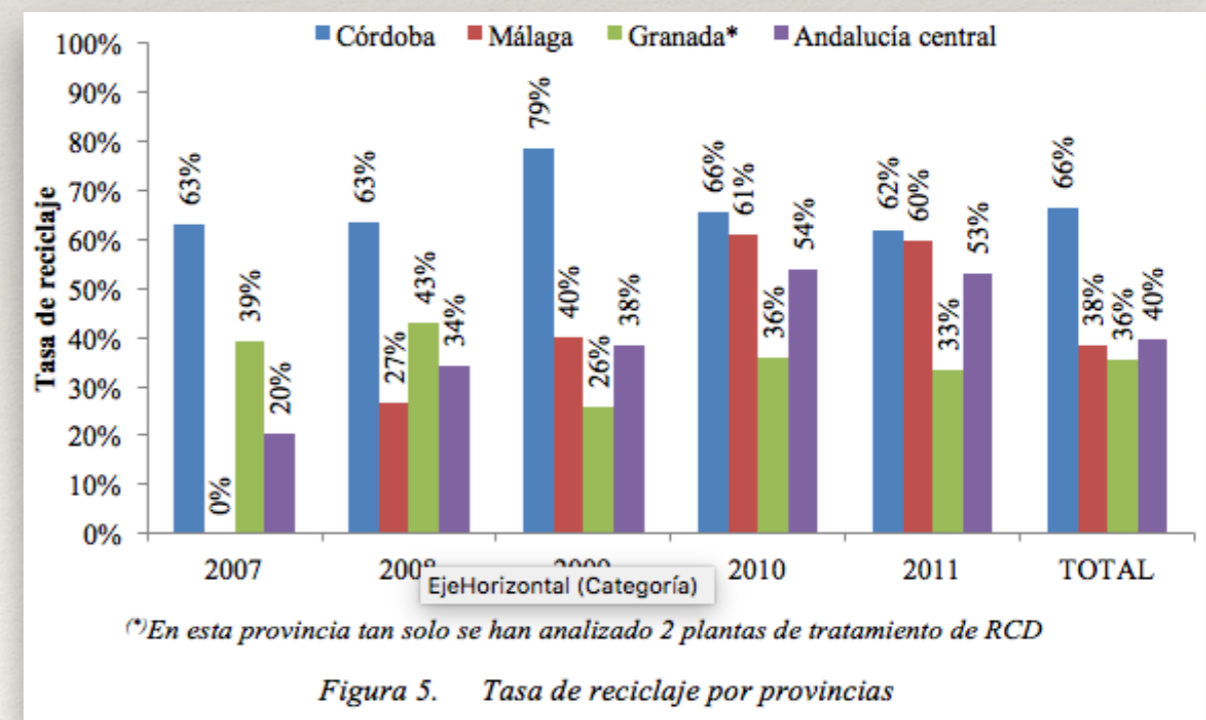
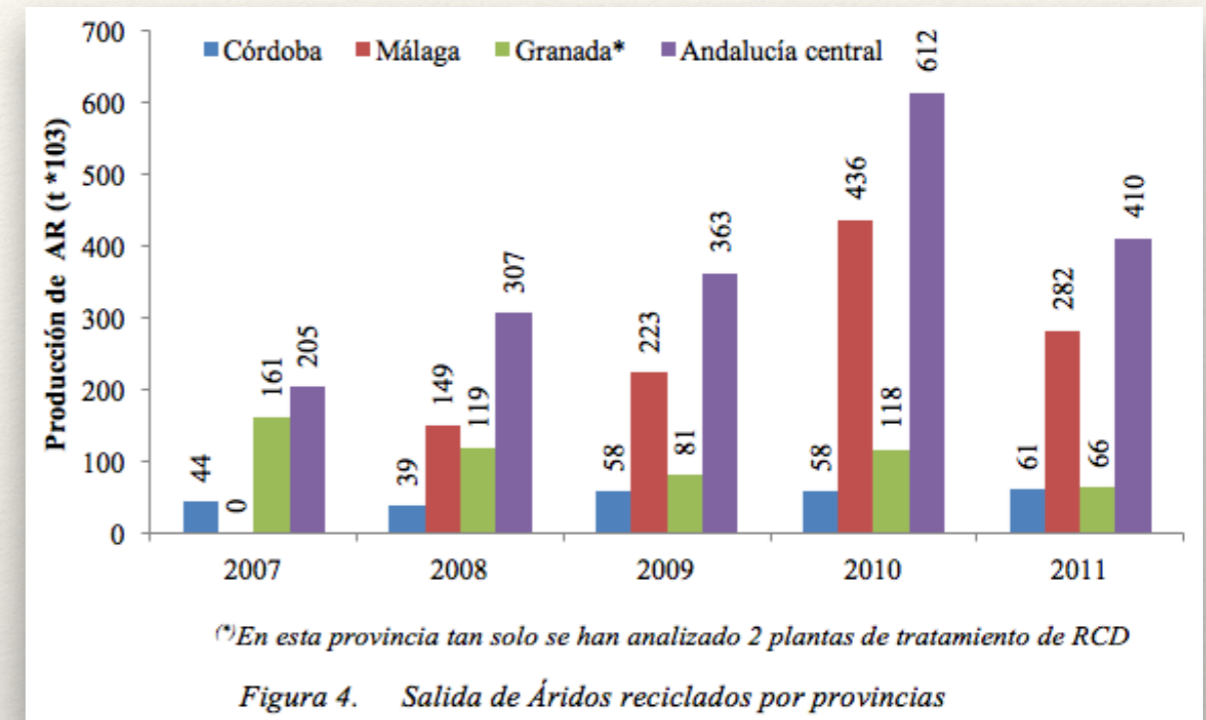
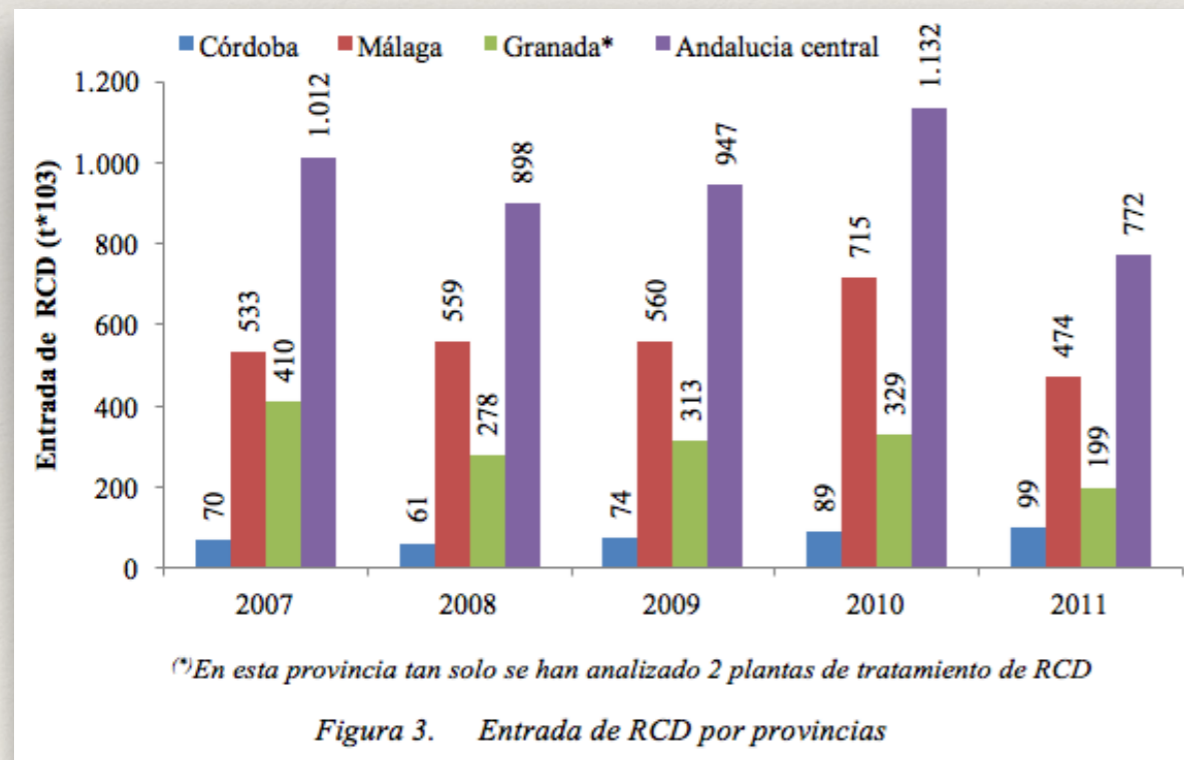
Tabla 7. Entrada de RCD y producción de áridos reciclados en Andalucía central



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

En resumen se puede afirmar que se están cumpliendo los objetivos del II PNRC, pero aún se está lejos de alcanzar la tasa que marca la Directiva Marco Europea, reciclar un 70 % de los RCD para el año 2020. Por este motivo, es necesario seguir teniendo iniciativas en el sector, de manera que se pueda conseguir el objetivo propuesto por la Unión Europea.

La evolución de la entrada, salida y la tasa de reciclaje durante los últimos años se puede ver en las Figura 3-5.





# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

En las gráficas se puede ver la tendencia que ha habido durante los últimos años, se observa como en Andalucía central ha habido un aumento, tanto de entrada como de reciclaje, hasta el año 2010. En el año 2011 se aprecia un descenso tanto de entradas como de ventas. Esto se debe a la grave crisis económica en la que se encuentra, actualmente, envuelto el país, que afecta especialmente al sector de la construcción, que ha disminuido su actividad en tasas próximas al 50%.

## 3.6. Tasa de producción de RCD por habitante

La Tabla 8 muestra la tasa de producción de RCD en kg/hab. y año que han gestionado las 16 plantas incluidas en el proyecto de las provincias de Córdoba y Málaga en el periodo 2007-2011. Esta tasa no se ha calculado para la provincia de Granada, ya que tan solo se han visitado dos plantas de las existentes en la provincia.

Como se puede observar en esta tabla, las tasas medias en el periodo de estudio son 98 y 360 kg/hab y año, en Córdoba y Málaga, respectivamente. Estas tasas son muy inferiores a las estimadas por el Ministerio de Medio Ambiente en el PNRCD (2008-2015) que eran de 790 kg/hab y año para toda la

población española, y 723 kg/hab y año en la Comunidad Autónoma de Andalucía, en el año 2005.

La provincia de Málaga tiene una tasa un 54 % inferior a la estimada para España en el año 2005. Si se considera la contracción experimentada por el sector de la construcción en el periodo 2005-2011 se puede aceptar como bastante próximo a la realidad la tasa de producción de 360 kg/hab y año. Sin embargo, en la provincia de Córdoba es un 88% inferior. Esto no solo es consecuencia de la crisis del sector, sino que indica que hay una gran cantidad de RCD que son gestionados de manera ilegal. Conviene resaltar que en ambas provincias se han visitado todas las plantas autorizadas por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía que tienen actividad, a excepción de dos plantas de la provincia de Málaga, concretamente, correspondientes a las empresas "Reciclados Espejo" de Cuevas Bajas, y "Ortega Vela-Orvesa" de Estepona que no han podido ser visitadas.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Provincia	Año	Entrada (t)	Población (hab)	Tasa de producción (kg/hab y año)
Córdoba	2007	69.762	792.182	88
	2008	61.082	798.822	76
	2009	73.733	803.998	92
	2010	88.788	805.108	110
	2011	99.106	805.857	123
	<b>TOTAL</b>	<b>78.494</b>	<b>801.193</b>	<b>98</b>
Málaga	2007	532.943	1.517.523	351
	2008	559.151	1.563.261	358
	2009	560.050	1.593.068	352
	2010	721.602	1.609.557	444
	2011	474.192	1.625.827	292
	<b>TOTAL</b>	<b>569.603</b>	<b>1.581.847</b>	<b>360</b>

Tabla 8. Tasa de producción

- Epsilon (Córdoba)
- Gecorsa (Córdoba)
- Guhilar (Granada)
- Mijas (Málaga)

De estas plantas se tomaron para su ensayo en laboratorio un total de 17 materiales, según se muestra en la Tabla 9.

Los ensayos llevados a cabo son los establecidos por el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obra de Carreteras y Puentes (PG-3), teniendo en cuenta la última edición de las normas UNE referidas en éste.

Los criterios de validación empleados en este capítulo son los actualmente vigentes en Andalucía en cuanto a la utilización de este tipo de materiales en cada unidad de obra dentro de una infraestructura viaria, es decir, PG-3 y/o “Recomendaciones para la Redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas para el Uso de Materiales Reciclados de RCD” (en adelante Pliego RCD) de GIASA. En el caso de arena para su uso como cama de apoyo de tuberías, dado que no existe ninguna normativa aplicable, se ha utilizado las recomendaciones de AGRECA editadas en 2011.

## 3.7. Propiedades de los áridos reciclados

Con el objeto de caracterizar los áridos reciclados que se producen en la actualidad en Andalucía Central, se tomaron muestras en las siguientes plantas de gestión de RCD de Córdoba, Málaga y Granada:

- Aristerra (Málaga)
- Barea (Córdoba)



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

En la Tabla 10 se recogen los posibles usos de estos materiales según los antecedentes del proyecto, normativa y experiencias previas, así como la normativa empleada para su validación:

Código	Tipo de material	Tamaño	Planta
Z1	1 zahorra reciclada mixta	0-32 mm	Gecorsa (Córdoba)
Z2	1 zahorra reciclada mixta	0-32 mm	Aristerra (Málaga)
Z3	1 zahorra reciclada mixta	0-30 mm	Mijas (Málaga)
Z4	1 zahorra reciclada mixta	0-32 mm	Epsilon (Córdoba)
Z5	1 zahorra reciclada de hormigón	0-32 mm	Aristerra (Málaga)
Z6	1 zahorra reciclada de hormigón	0-32 mm	Epsilon (Córdoba)
A1	1 arena reciclada mixta	0-8 mm	Guhilar (Granada)
A2	1 arena reciclada mixta	0-8 mm	Barea (Córdoba)
A3	1 arena reciclada de hormigón	0-8 mm	Aristerra (Málaga)
G1	1 grava reciclada mixta	8-30 mm	Barea (Córdoba)
G2	1 grava reciclada mixta	8-30 mm	Mijas (Málaga)
G3	1 grava reciclada mixta	8-40 mm	Guhilar (Granada)
D1	1 ár. grueso reciclado mixto	40-80 mm	Epsilon (Córdoba)
D2	1 ár. grueso reciclado mixto	40-80 mm	Gecorsa (Córdoba)
D3	1 ár. grueso reciclado mixto	40-80 mm	Guhilar (Granada)
D4	1 ár. grueso reciclado de hormigón	40-80 mm	Aristerra (Málaga)
D5	1 ár. grueso reciclado de hormigón	40-80 mm	Mijas (Málaga)

Tabla 9. Muestras ensayadas

Código	Posible uso	Normativa/ Recomendaciones
Z1	Firme de carretera	PG-3 / Pliego RCD
Z2	Firme de carretera	PG-3 / Pliego RCD
Z3	Firme de carretera	PG-3 / Pliego RCD
Z4	Firme de carretera	PG-3 / Pliego RCD
Z5	Firme de carretera	PG-3 / Pliego RCD
Z6	Firme de carretera	PG-3 / Pliego RCD
A1	Lecho de apoyo para tuberías	Recomendaciones AGRECA
A2	Lecho de apoyo para tuberías	Recomendaciones AGRECA
A3	Lecho de apoyo para tuberías	Recomendaciones AGRECA
G1	Árido grueso para gravacemento	PG-3 / Pliego RCD
G2	Árido grueso para gravacemento	PG-3 / Pliego RCD
G3	Árido grueso para gravacemento	PG-3 / Pliego RCD
D1	Relleno localizado de material drenante	PG-3
D2	Relleno localizado de material drenante	PG-3
D3	Relleno localizado de material drenante	PG-3
D4	Relleno localizado de material drenante	PG-3
D5	Relleno localizado de material drenante	PG-3

Tabla 10. Criterio de validación según su posible uso

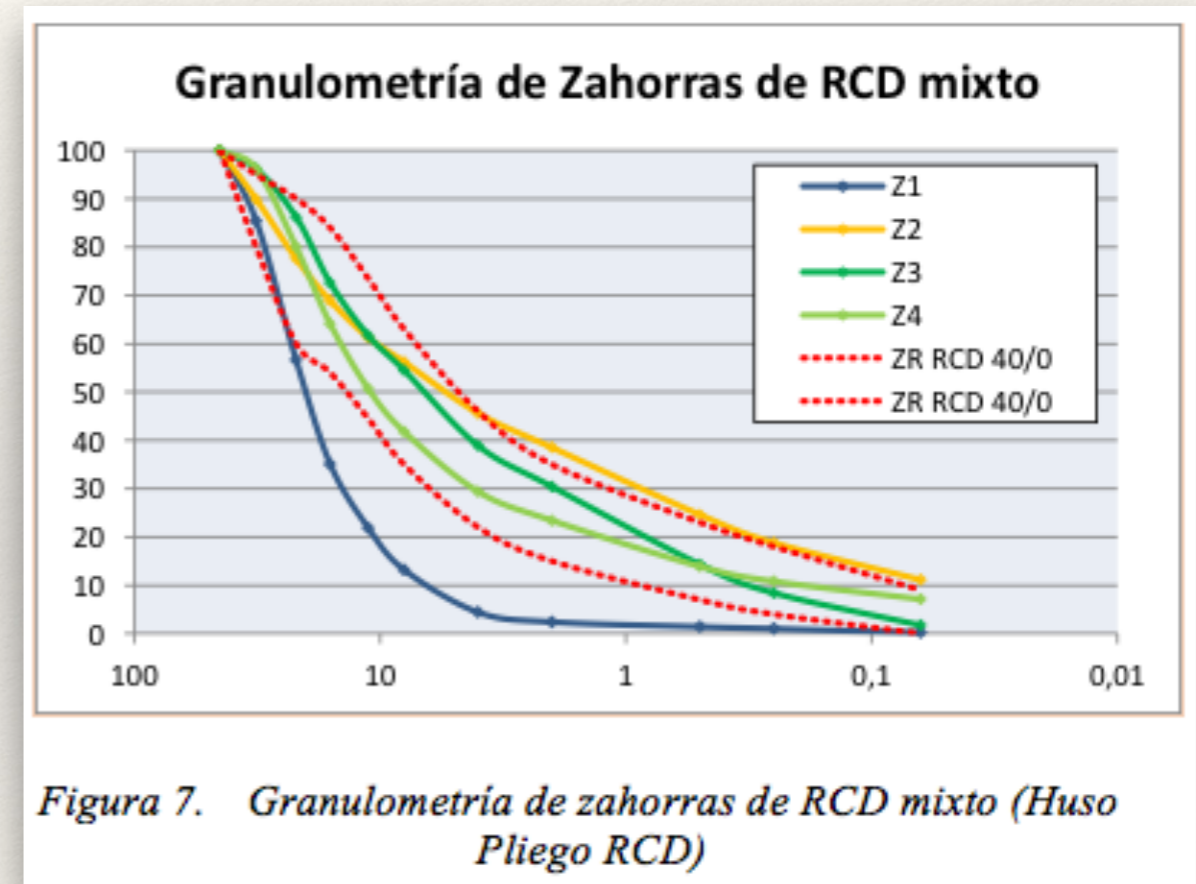
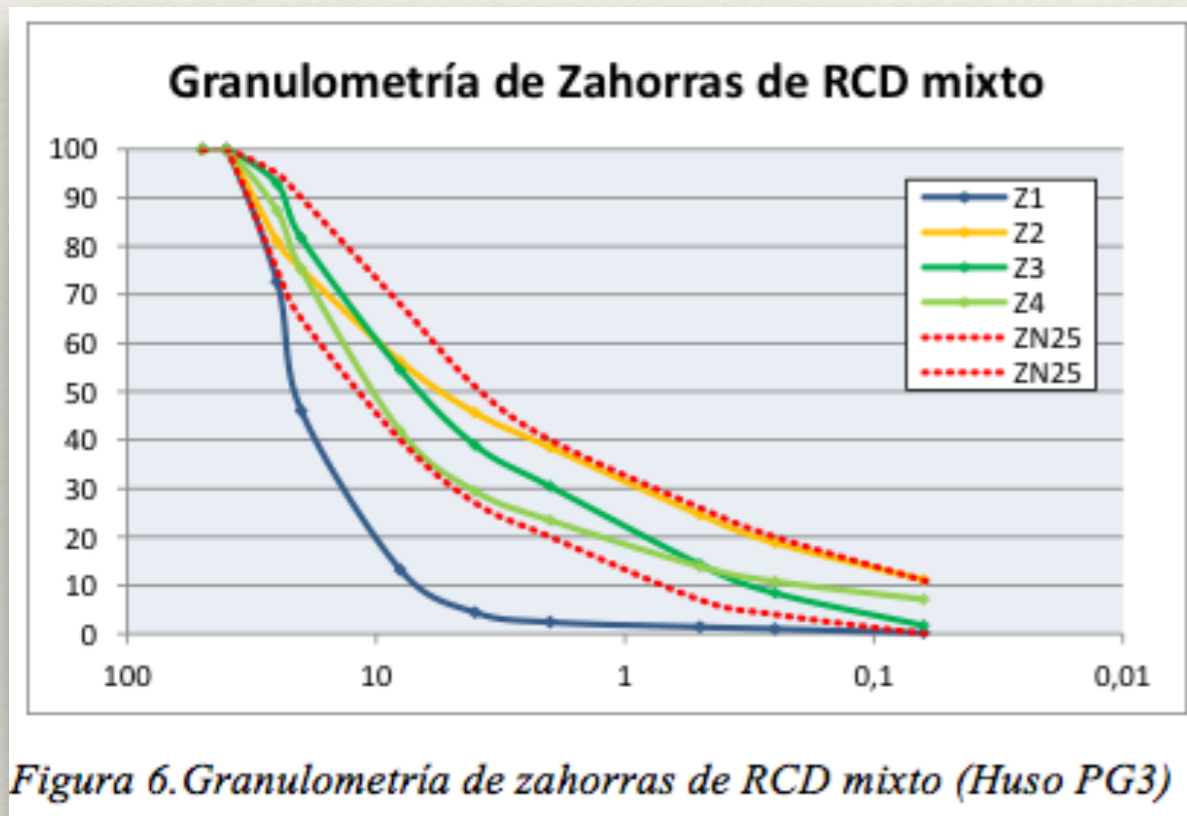
A continuación se muestra un resumen de las propiedades obtenidas en cada tipo de material:

Zahorras Z1, Z2, Z3, Z4 y Z5:

Las muestras de zahorra procedentes de RCD mixto presentan una granulometría que encaja dentro del huso ZN25 del PG-3 y del ZR RCD 40/0 del Pliego RCD, a excepción de la muestra Z1 que presenta una granulometría muy discontinua (Figuras 6 y 7).



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central





# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Sin embargo, la composición de estas zahorras de RCD se encuentra fuera de los valores permitidos por el Pliego RCD, con contenidos en hormigón inferiores al 70% en todos los casos (Figura 8).

En cuanto a las zahorras recicladas de hormigón, las muestras analizadas presentan granulometrías que se encuentran dentro tanto del huso ZA20 del PG-3, como del ZR HORM 22/0 del Pliego RCD (Figuras 9 y 10).

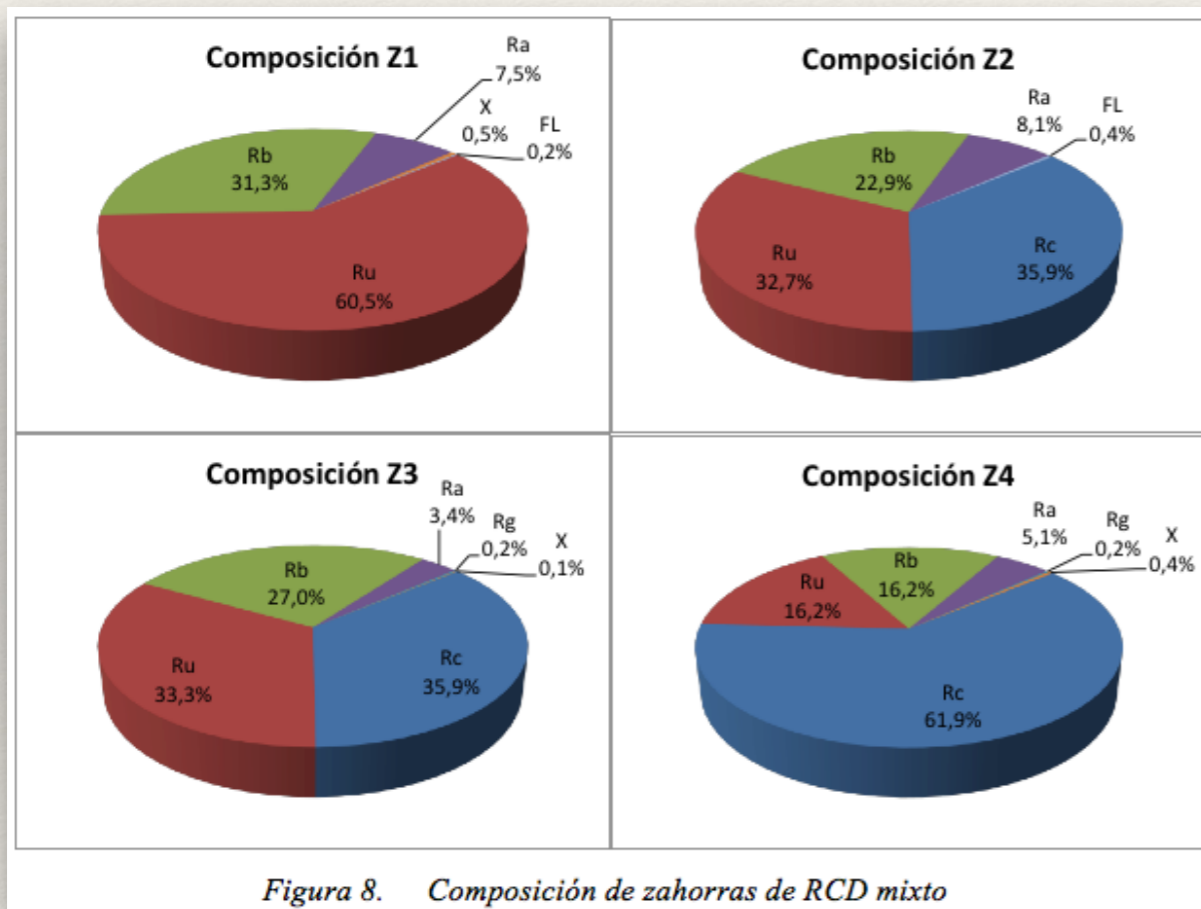


Figura 8. Composición de zahorras de RCD mixto

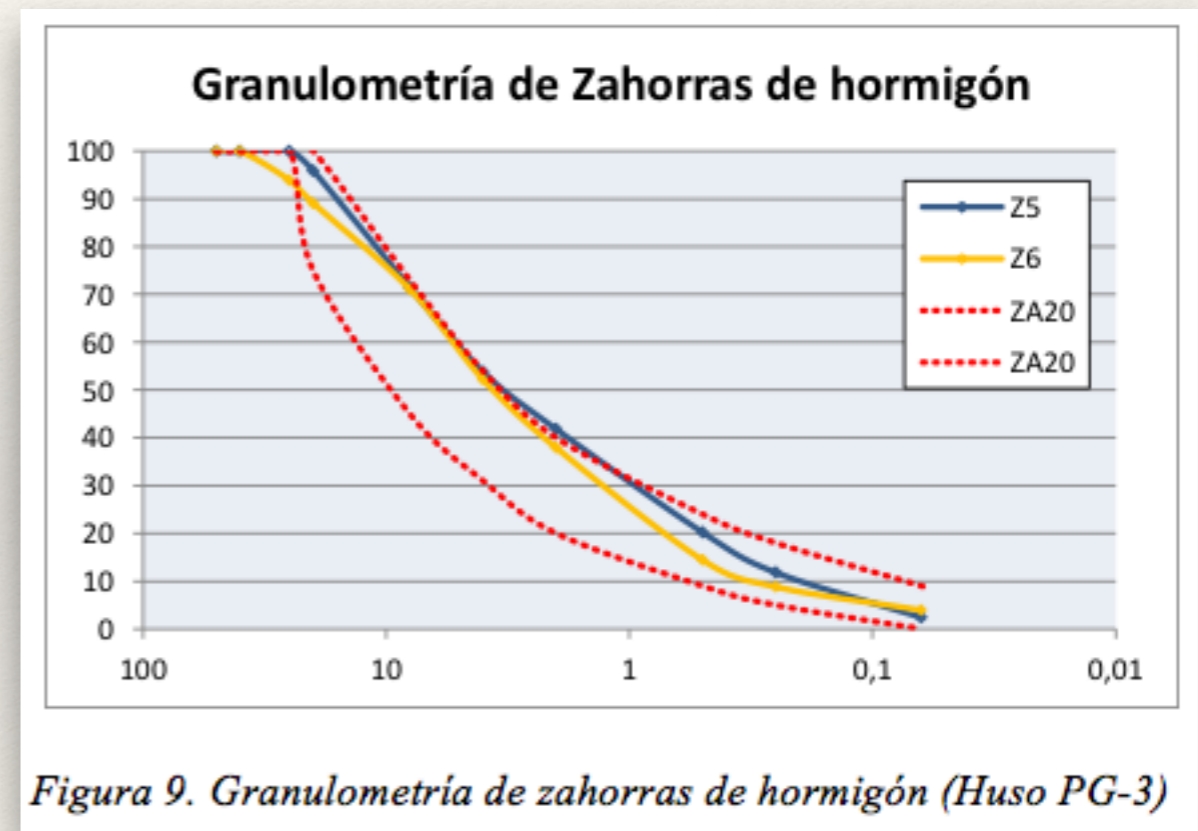


Figura 9. Granulometría de zahorras de hormigón (Huso PG-3)



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

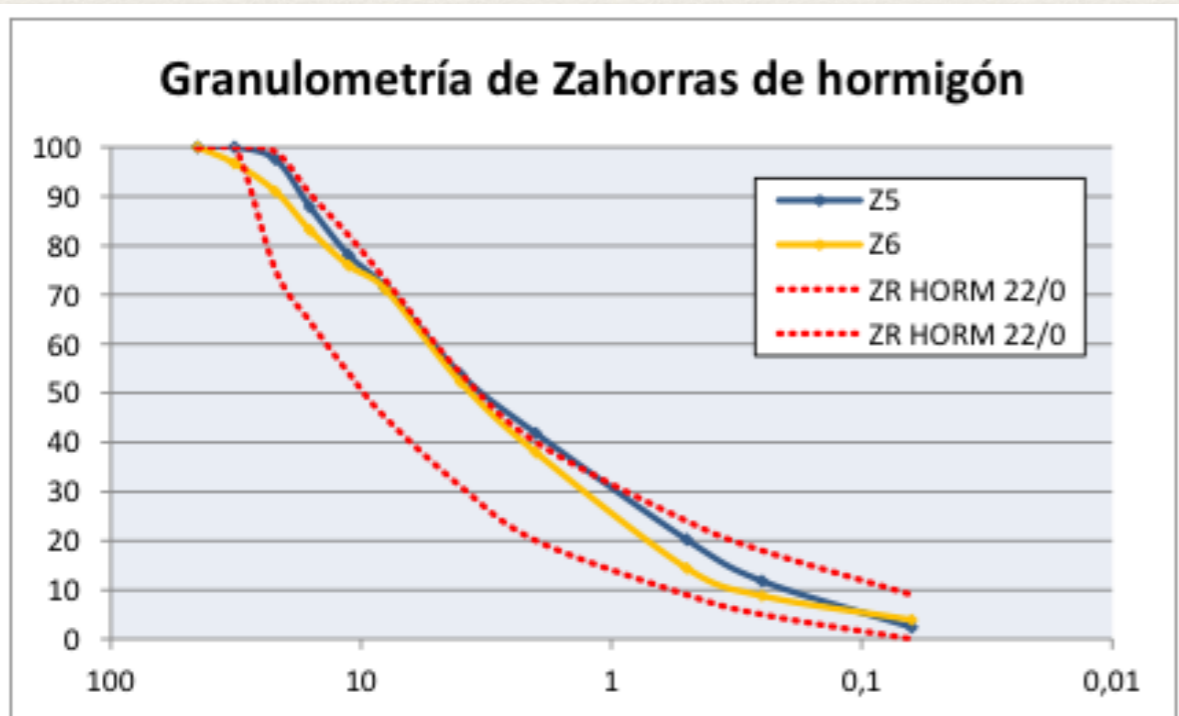


Figura 10. Granulometría de zahorras de hormigón (Huso Pliego RCD)

La composición de estas zahorras según la norma UNE-EN 933-11 reflejan contenidos de hormigón superiores al 90%, cumpliendo así las recomendaciones del Pliego RCD (Figura 11).

Destaca el elevado valor del Coeficiente de Desgaste de los Ángeles, en todos los casos superior a 35, valor máximo especificado en PG-3, aunque inferiores a 45, valor máximo prescrito en el Pliego RCD. La muestra Z6 supera ambos valores, como puede comprobarse en la Figura 12.

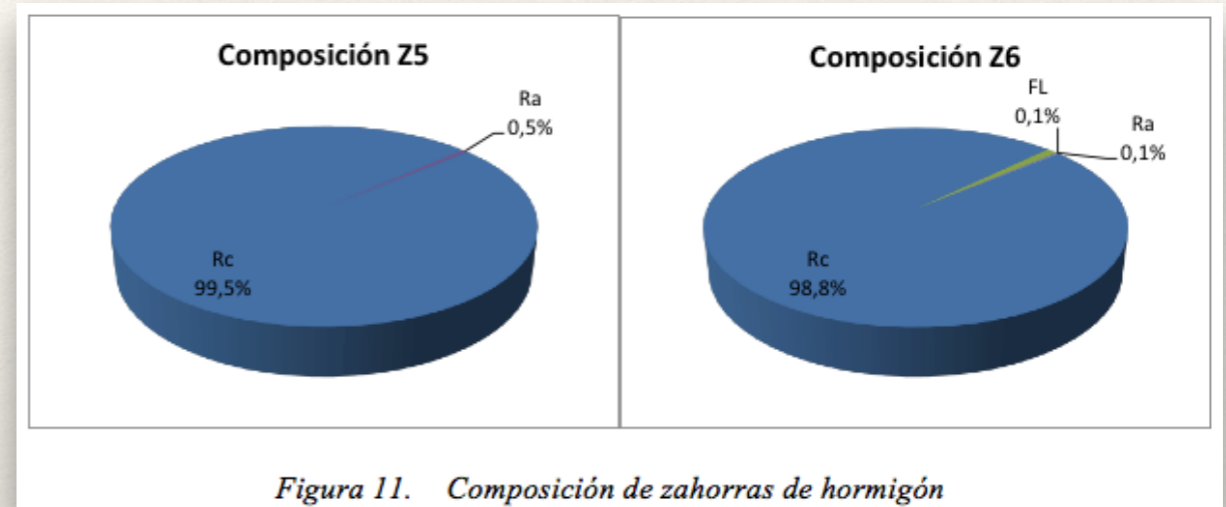


Figura 11. Composición de zahorras de hormigón

El equivalente de arena, por otra parte, supera el valor especificado en la normativa aplicable (35) en cinco de las seis muestras. En la Figura 13 se muestran los resultados obtenidos junto con el valor de azul de metileno, que en todos los casos resultó inferior a 10.

Por último, destaca el elevado contenido en yesos y azufre en las muestras Z2 y Z4. Este último parámetro supera el valor especificado en la normativa de referencia (1%). En la Figura 14 se representan los valores obtenidos junto con el porcentaje de sulfatos solubles en agua.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

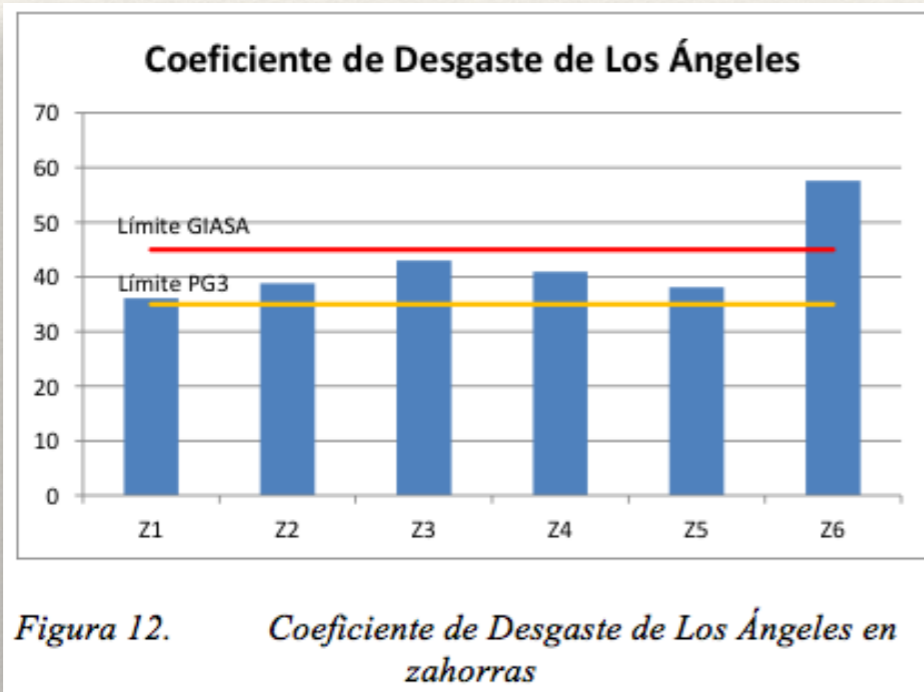


Figura 12. Coeficiente de Desgaste de Los Ángeles en zahorras

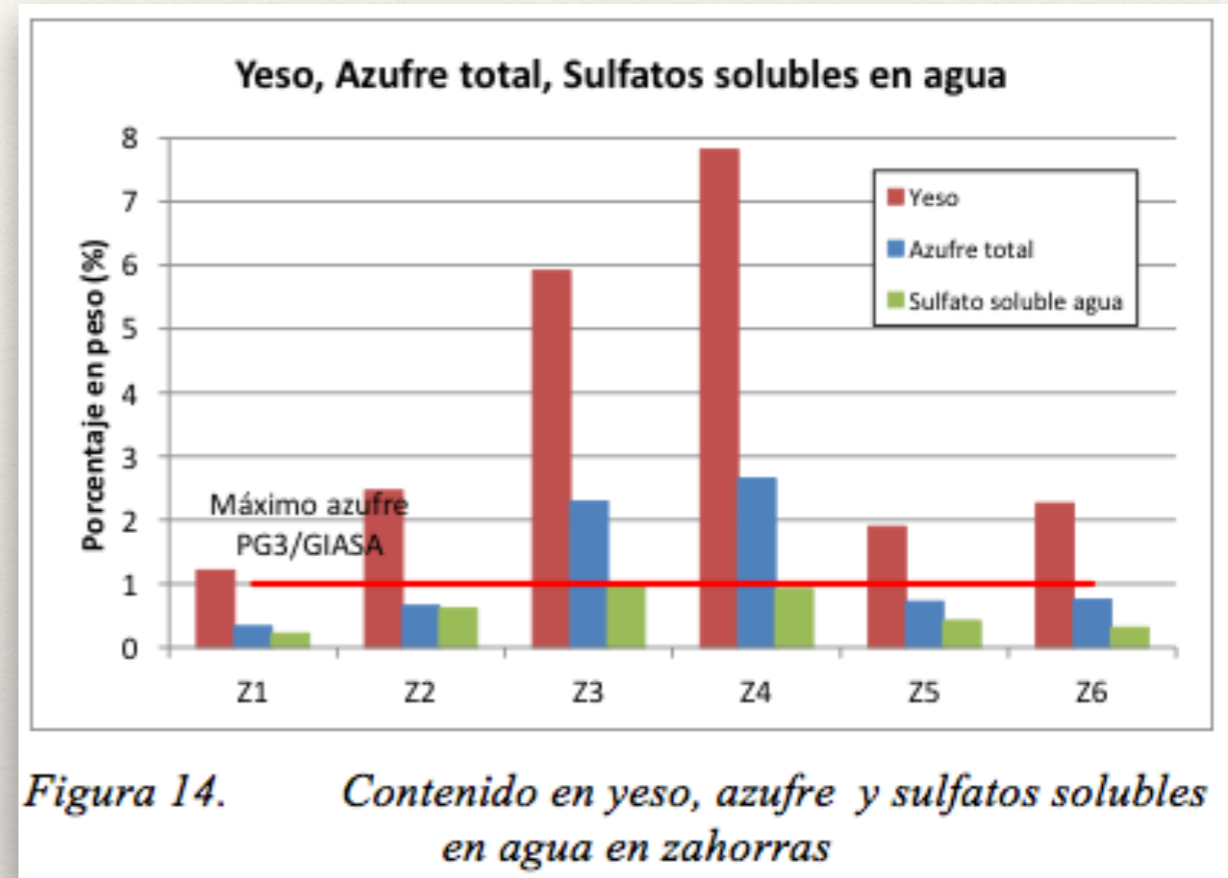


Figura 14. Contenido en yeso, azufre y sulfatos solubles en agua en zahorras

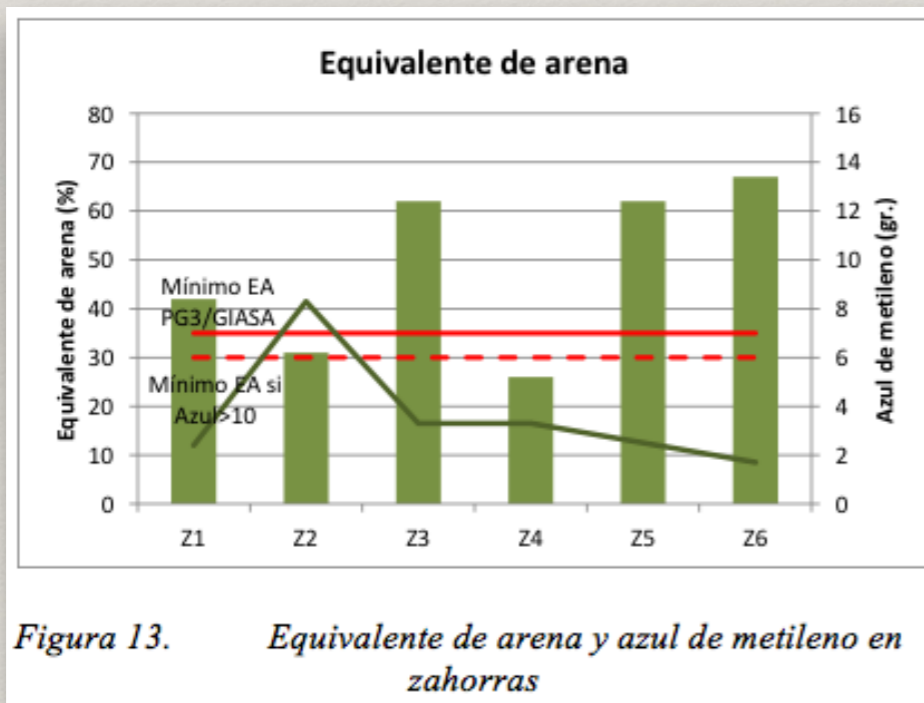


Figura 13. Equivalente de arena y azul de metileno en zahorras



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

## Arenas A1, A2 y A3:

Las tres muestras de arenas de RCD analizadas presentan una granulometría muy semejante, bastante continua y con porcentajes de finos cercanos al 10%. En la Figura 15 se muestra la granulometría de las muestras analizadas.

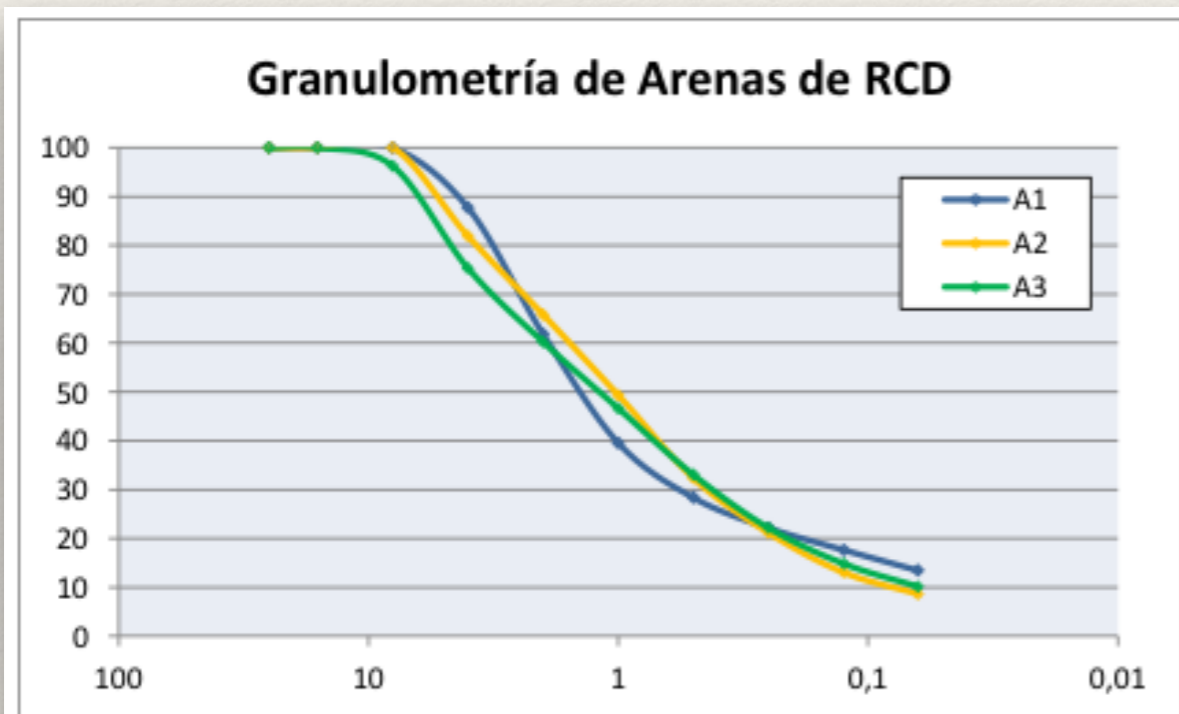


Figura 15. Granulometría de arenas de RCD

La composición de estas arenas según la norma UNE-EN 933-11 presenta una gran variabilidad. Así, las muestras A1 y A2, procedentes de RCD mixto, presentan porcentajes de hormigón del 2% y 27% respectivamente, mientras que la A3, procedente de hormigón, contiene más del 90% de hormigón, como puede comprobarse en la Figura 16.

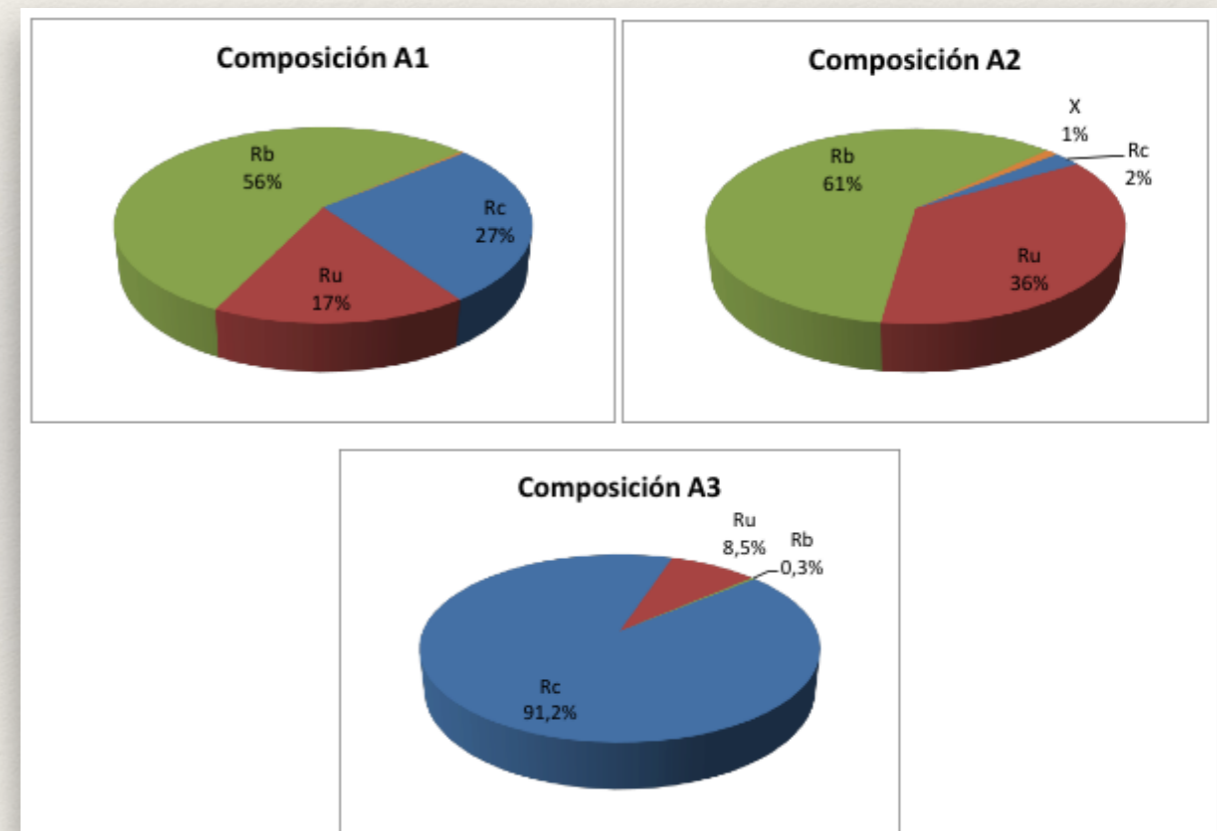


Figura 16. Composición de arenas de RCD



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Por otra parte, el equivalente de arena es superior a 40 en todos los casos, siendo el valor de azul de metileno siempre inferior a 10. En cuanto a su composición química, el contenido de azufre total expresado en  $SO_3$  supera el valor límite del 1% en uno de los casos (A2), mientras que los sulfatos solubles en agua son en los tres materiales inferiores al 0.4%. En las Figuras 17 y 18 se muestran los resultados de estos ensayos de forma gráfica.

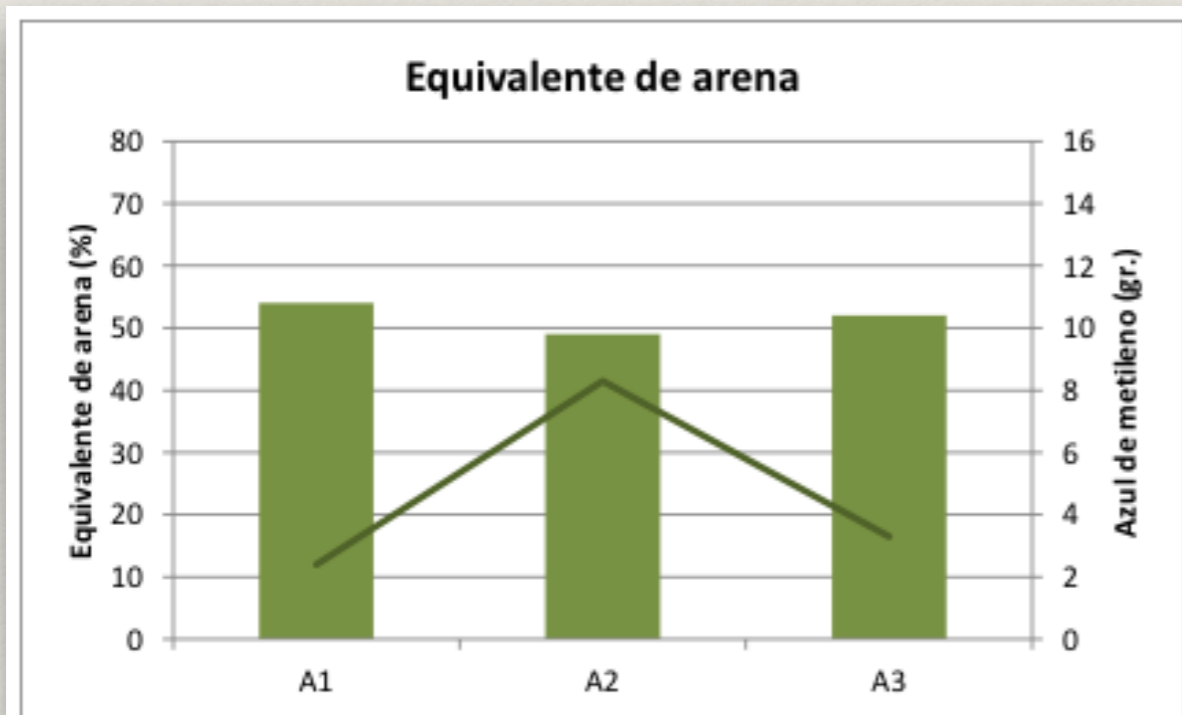


Figura 17. Equivalente de arena y azul de metileno en arenas de RCD

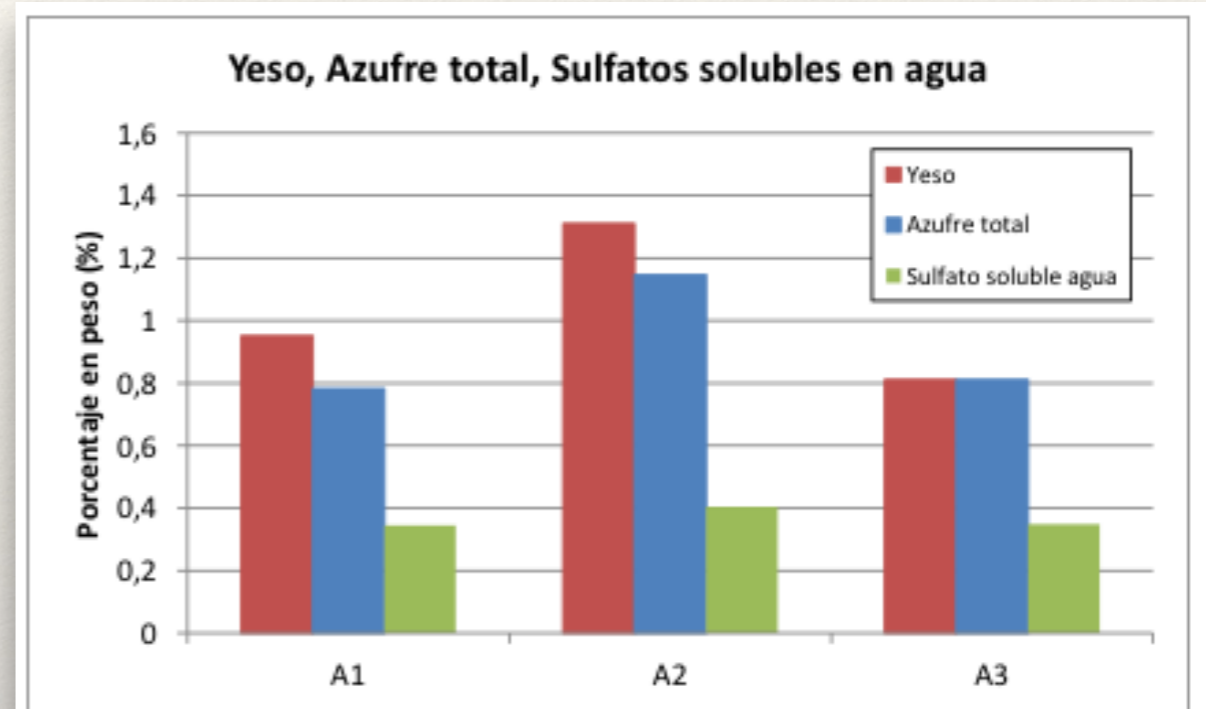


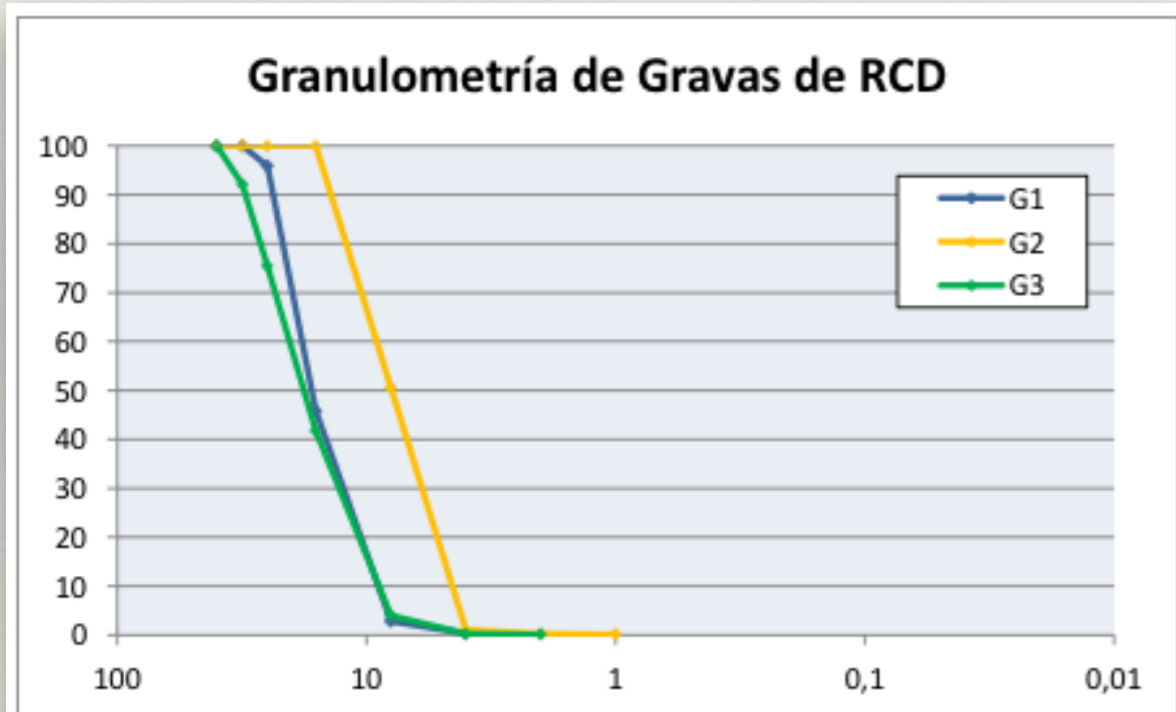
Figura 18. Contenido en yeso, azufre y sulfatos solubles en agua en arenas de RCD



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

## Gravas G1, G2 y G3:

Los áridos gruesos o gravas denominadas G1, G2 y G3 presentan una granulometría discontinua con contenido nulo en finos. La composición del material reciclado se encuentra fuera de las recomendaciones del Pliego de RCD, como puede comprobarse en las Figuras 19 y 20.





# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

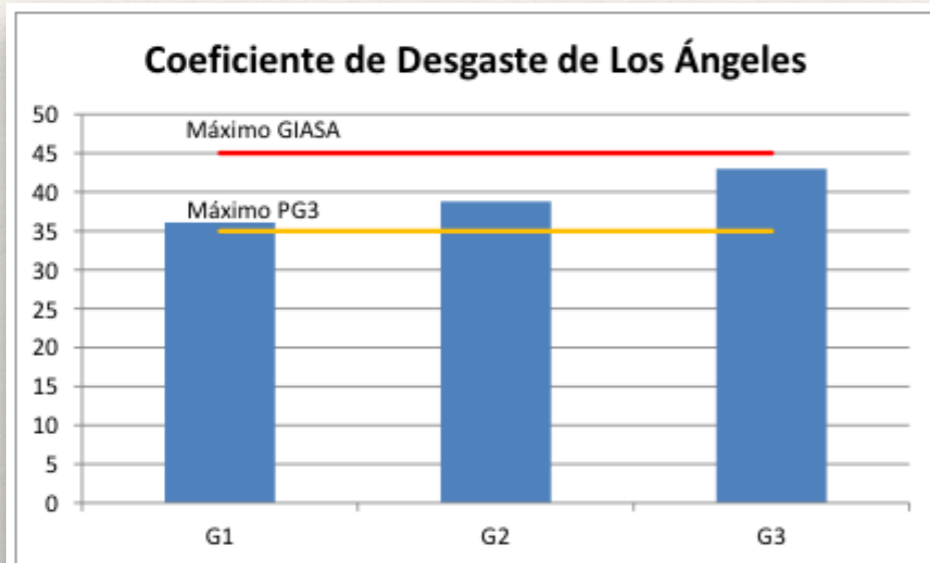


Figura 21. Coeficiente de Desgaste de Los Ángeles en gravas de RCD

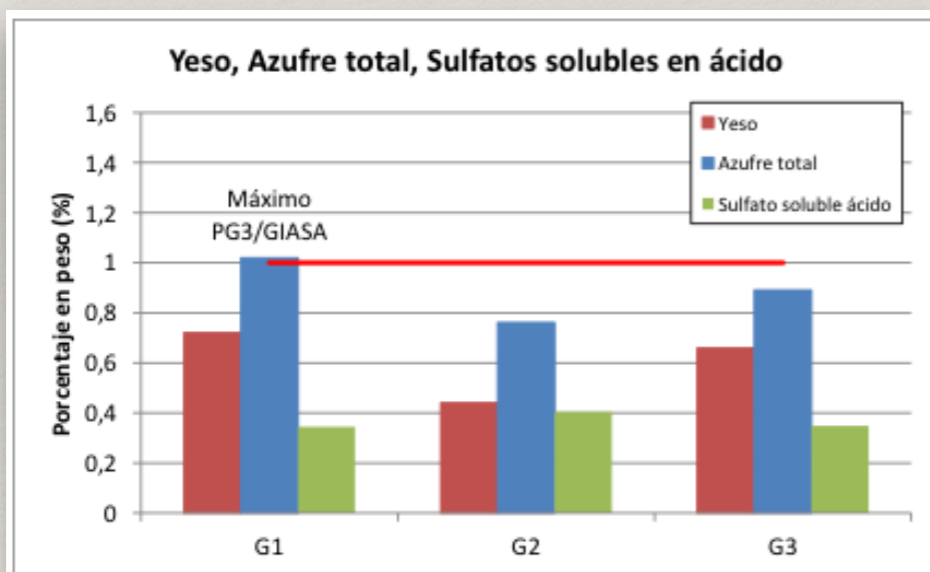


Figura 22. Contenido en yeso, azufre total y sulfatos solubles en agua en gravas de RCD

## Árido grueso o macadam D1, D2, D3, D4 y D5:

El árido grueso o macadam de RCD puede emplearse en general como relleno localizado de material drenante según las especificaciones del artículo 421 del PG-3 (Figura 23). Tan sólo una de las muestras, la denominada D1, presenta tamaños de partículas superiores al especificado por dicha normativa. La muestras son no plásticas y con Equivalente de Arena superior a 30 en todos los caso.

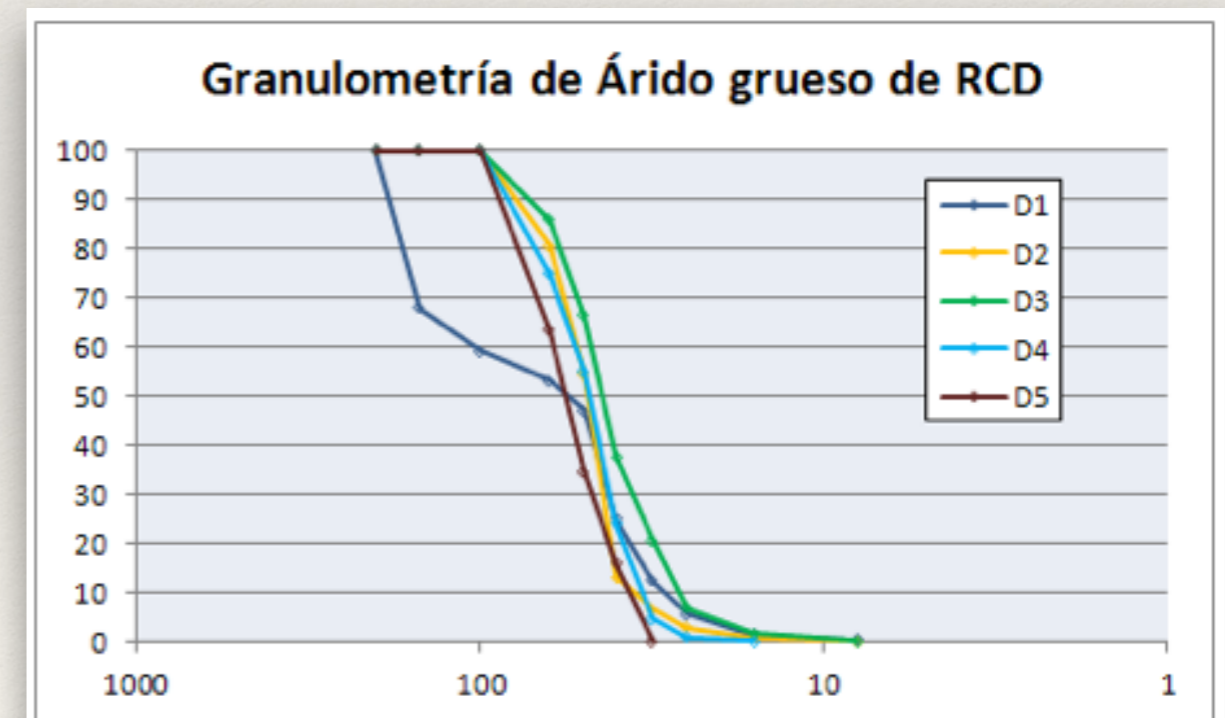


Figura 23. Granulometría de áridos gruesos de RCD



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

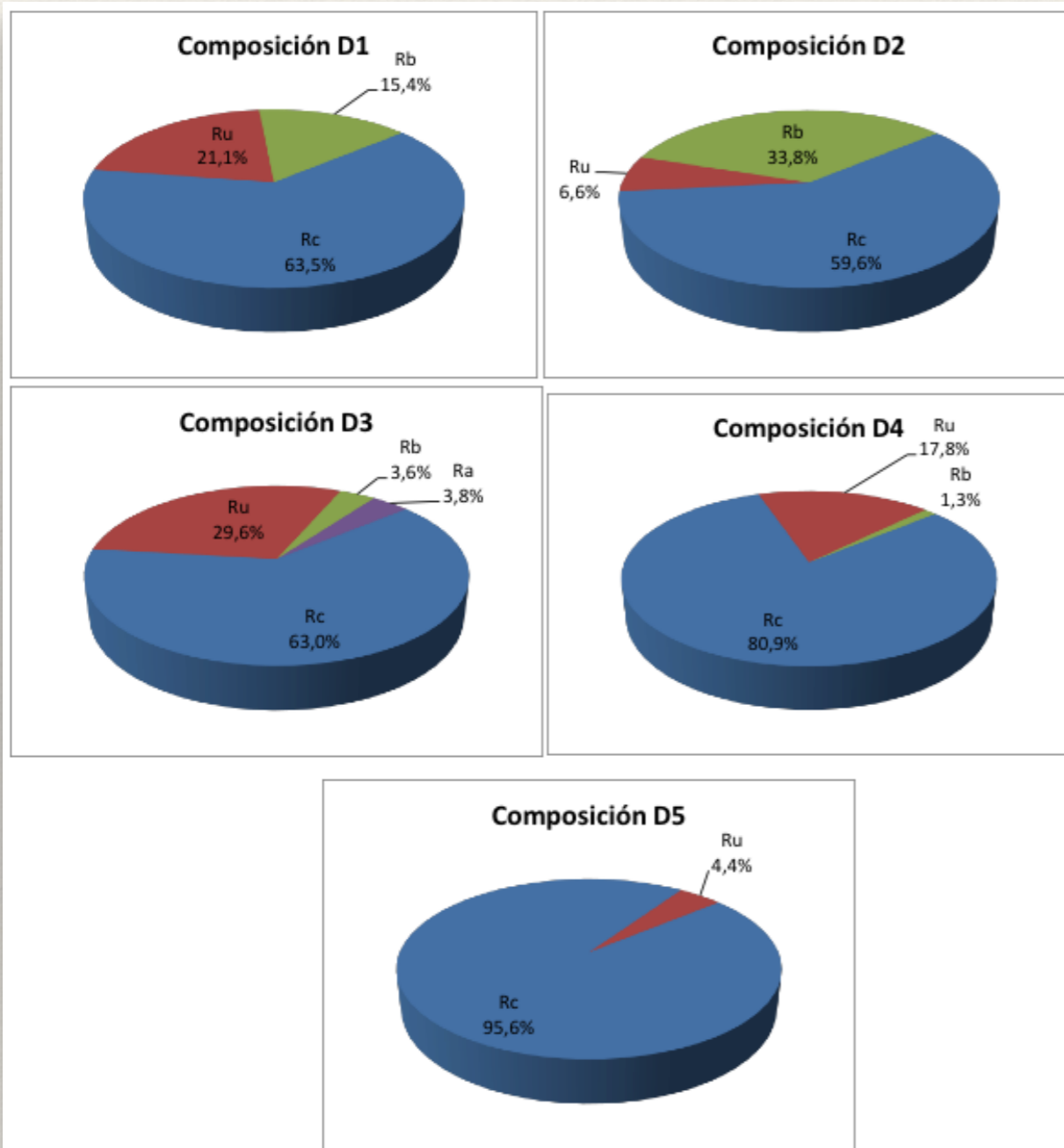


Figura 24. Composición de áridos gruesos de RCD

Por último, en la Figura 25 puede comprobarse como el contenido en azufre y yeso es inferior al 1% en cuatro de los cinco casos, mientras que el contenido en sulfatos solubles en agua es inferior al 0.2% en estas mismas muestras.

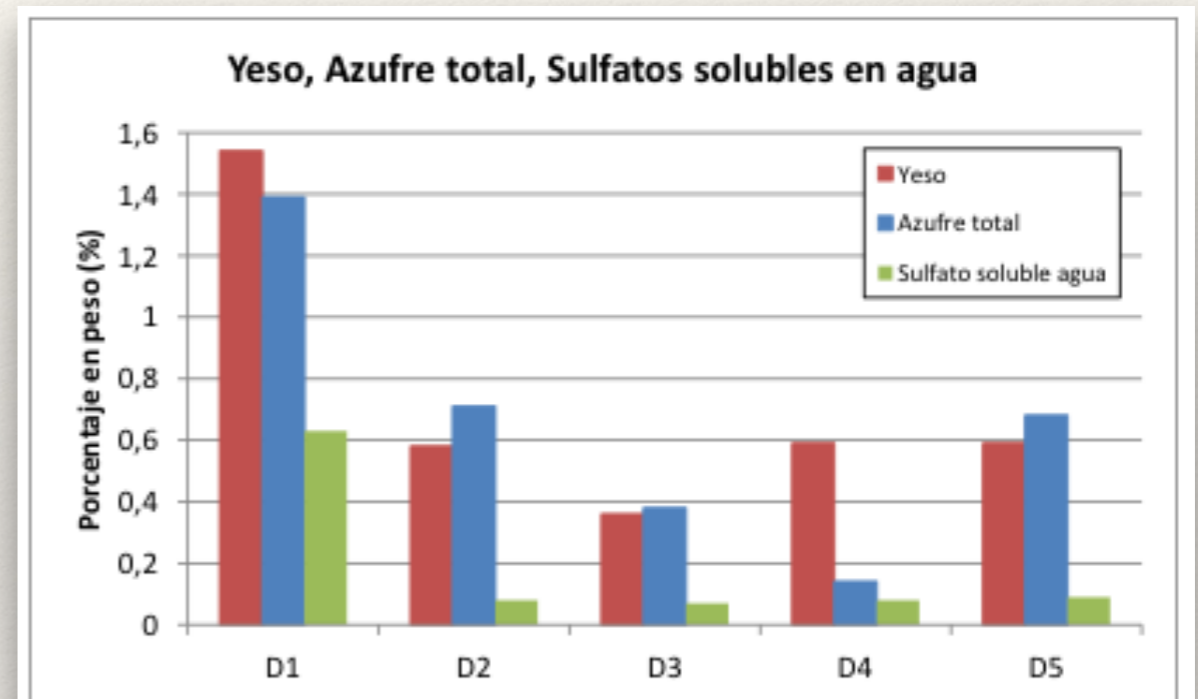


Figura 25. Contenido en yeso, azufre y sulfatos solubles en agua en áridos gruesos de RCD



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

## 3.8. Consideraciones ambientales

Para evaluar el impacto medioambiental de materiales que incorporan subproductos o materiales secundarios, los ensayos de lixiviación son una herramienta indispensable. Cuando los materiales secundarios son aplicados en el exterior, el agua de lluvia, el agua superficial o las aguas subterráneas, pueden ser responsables de que ocurran procesos de lixiviación o procesos de disolución y transporte de componentes de la fase sólida a una fase acuosa (Barbudo, 2012). Estos lixiviados pueden incorporarse a los suelos y/o a las aguas superficiales y/o aguas profundas, pudiendo representar la contaminación de los mismos o el aumento del grado de contaminación en el caso de que estos ya lo estén (Güell y col, 2012).

La lixiviación es la extracción de los componentes solubilizados en el agua u otro disolvente. Los ensayos de lixiviación tratan de reproducir en el laboratorio los procesos que tienen lugar bajo las condiciones de exposición del campo u obra.

La cantidad disponible de un elemento para ser lixiviado, bajo condiciones extremas, es, una información necesaria para poder predecir las cantidades máximas que se pueden lixiviar a largo plazo. Se habla en este caso del término "disponibilidad" o "concentración potencialmente lixiviable", para indicar la concentración máxima lixiviable de un elemento (Galvín y col.,

2012 y Engelsen y col.,2010). Se ha de diferenciar del concepto de "concentración total", que no tiene una relación directa con el impacto medioambiental, y del de "evolución de la lixiviación con el tiempo" (Hidalgo y Alonso, 2005).

Se puede decir que el comportamiento frente a la lixiviación de todos los tipos de materiales, está relacionado con factores críticos, como la solubilidad de cada elemento (Lopez Meza y col., 2008). Ésta está influenciada por el pH, la formación de complejos inorgánicos, la materia orgánica disuelta y por sus propiedades de oxidación-reducción.

### 3.8.1. Objetivos

El objetivo general de esta tarea es evaluar el riesgo de contaminación por lixiviación de los áridos reciclados de RCD.

Este objetivo se va a desglosar en los siguientes objetivos parciales:

- Determinación de las concentraciones de metales y aniones establecidos en la Directiva 2003/33/EC en el lixiviado procedente de áridos reciclados de diferente composición y procedencia.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

- Clasificación de los áridos reciclados en base a los límites establecidos por la Directiva 2003/33/EC
- Caracterización del comportamiento de los diferentes elementos contaminantes a largo plazo, y estimar cuál será la evolución de los niveles de liberación a lo largo del tiempo.

## 3.8.2. Materiales

En este estudio, se han analizado los valores de concentración de elementos nocivos mediante la realización de la prueba de conformidad de lixiviación de los materiales granulares residuales de 17 áridos reciclados descritos en la Tabla 11.

Como se puede comprobar en la anterior tabla, se han estudiado 4 grandes grupos de materiales denominados como zahorras, arenas, gravas y áridos gruesos con tamaño superior a 40 mm. Dichos materiales proceden de las plantas de tratamiento de RCD detalladas en la última columna de la Tabla 11, intentando que haya un número igual de muestras en las provincias de Córdoba y Málaga, provincias situadas en el ámbito de estudio del presente proyecto, así como 3 materiales más procedentes de Granada.

ZAHORRAS			
Z1	Zahorra reciclada mixta	0-32 mm	Gecorsa (Córdoba)
Z2	Zahorra reciclada mixta	0-32 mm	Aristerra (Málaga)
Z3	Zahorra reciclada mixta	0-32 mm	Mijas (Málaga)
Z4	Zahorra reciclada mixta	0-32 mm	Epsilon (Córdoba)
Z5	Zahorra reciclada de hormigón	0-32 mm	Aristerra (Málaga)
Z6	Zahorra reciclada de hormigón	0-32 mm	Epsilon (Córdoba)
ARENAS			
A1	Arena reciclada mixta	0-8 mm	Guhilar (Granada)
A2	Arena reciclada mixta	0-8 mm	Barea (Córdoba)
A3	Arena reciclada de hormigón	0-8 mm	Aristerra (Málaga)
GRAVAS			
G1	Grava reciclada mixta	8-30 mm	Barea (Córdoba)
G2	Grava reciclada mixta	8-30 mm	Mijas (Málaga)
G3	Grava reciclada mixta	8-40 mm	Guhilar (Granada)
ÁRIDO GRUESO SUPERIOR A 40 mm			
D1	Árido grueso reciclado mixto	40-80 mm	Epsilon (Córdoba)
D2	Árido grueso reciclado mixto	45-60 mm	Barea (Córdoba)
D3	Árido grueso reciclado mixto	40-80 mm	Guhilar (Granada)
D4	Ár. grueso reciclado de hormigón	40-80 mm	Aristerra (Málaga)
D5	Ár. grueso reciclado de hormigón	40-80 mm	Mijas (Málaga)

Tabla 11. Tabla resumen con descripción de materiales analizados

Estos áridos están siendo utilizados, según el caso, para las diferentes aplicaciones objeto de este estudio, y quedan completamente caracterizados en el apartado 3.6.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

## 3.8.3. Metodología

### 3.8.3.1. Ensayo de conformidad

La metodología utilizada es la descrita en la norma UNE EN 12457-3. Este ensayo de lixiviación es realizado en dos fases o etapas: en la etapa 1: se añade una cantidad de lixivante (agua desionizada) de modo que se establezca una relación líquido/sólido (en adelante L/S) igual a 2 l/kg. Se agita en un volteador durante 6 horas y después se procede al filtrado de la muestra. En la etapa 2 a la muestra anterior se añade agua desionizada para conseguir una relación L/S igual a 10 l/kg, manteniendo la disolución en agitación durante 18 horas. Tras finalizar cada etapa, se registran los datos de pH, conductividad y T<sup>a</sup> del lixiviado.

Finalmente se extraen submuestras de cada etapa, que tras ser filtradas se les determinará la concentración de especies químicas potencialmente contaminantes.

#### 3.8.3.1.1. Determinación del contenido de metales pesados en el lixiviado

El contenido de metales pesados que se encuentran disueltos en el lixiviado obtenido previamente, se determinan mediante el equipo ICP-masas (Perkin Elmer ELAN DRC-e). Este equipo cuantifica las concentraciones de un total de 83 elementos disueltos, estando expresadas en µg/kg m.s. o partes por billón: ppb.

De cara a la estimación del potencial contaminante del material, se ha tomado como referencia los niveles máximos exigidos a los 12 metales pesados indicados por la Directiva de la Comisión Europea 2003/33/CEE que se indican a continuación:

**Cromo, Níquel, Cobre, Zinc, Arsénico, Selenio, Molibdeno, Cadmio, Antimonio, Bario, Mercurio y Plomo.**

Dicha Directiva clasifica el material en función de su peligrosidad (INERTE, NO PELIGROSO Y PELIGROSO) basándose en los niveles de concentración presentes en el lixiviado. La Tabla 12 recoge dichos niveles legales de peligrosidad (en mg/kg) de cada uno de los metales estudiados.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Elemento	Residuo inerte		Residuo no peligroso		Residuo peligroso	
	L/S=2 l/kg	L/S=10 l/kg	L/S=2 l/kg	L/S=10 l/kg	L/S=2 l/kg	L/S=10 l/kg
Cr	≤ 0,2	≤ 0,5	0,2 - 4	0,5 - 10	4 - 25	10 - 70
Ni	≤ 0,2	≤ 0,4	0,2 - 5	0,4 - 10	5 - 20	10 - 40
Cu	≤ 0,9	≤ 2	0,9 - 25	2 - 50	25 - 50	50 - 100
Zn	≤ 2	≤ 4	2 - 25	4 - 50	25 - 90	50 - 200
As	≤ 0,1	≤ 0,5	0,1 - 0,4	0,5 - 2	0,4 - 6	2 - 25
Se	≤ 0,06	≤ 0,1	0,06 - 0,3	0,1 - 0,5	0,3 - 4	0,5 - 7
Mo	≤ 0,3	≤ 0,5	0,3 - 5	0,5 - 10	5 - 20	10 - 30
Cd	≤ 0,03	≤ 0,04	0,03 - 0,6	0,04 - 1	0,6 - 3	1 - 5
Sb	≤ 0,02	≤ 0,06	0,02 - 0,2	0,06 - 0,7	0,2 - 2	0,7 - 5
Ba	≤ 7	≤ 20	7 - 30	20 - 100	30 - 100	100 - 300
Hg	≤ 0,003	≤ 0,01	0,003 - 0,05	0,01 - 0,2	0,05 - 0,5	0,2 - 2
Pb	≤ 0,2	≤ 0,5	0,2 - 5	0,5 - 10	5 - 25	10 - 50

Tabla 12. Valores límite de metales pesados permitidos (mg/kg) según Decisión del Consejo 2003/33/CEE

Así pues, la presente guía incluye las tablas de resultados que muestran la clasificación de los materiales, siguiendo el siguiente código de color: material inerte (verde), no peligroso (naranja) o peligroso (rojo), lo cual se ha realizado para los cuatro grupos de materiales estudiados: zahorras, gravas, arenas y áridos gruesos.

### 3.8.3.1.2. Determinación del contenido de fluoruros, cloruros y sulfatos en el lixiviado

Además de los 12 metales pesados, la Directiva de la Comisión Europea 2003/33/CEE incluye 3 aniones críticos que en caso de estar presentes en el lixiviado en grandes cantidades ocasionaría

problemas ambientales: fluoruros, cloruros y sulfatos. Dichos aniones son determinados por cromatografía de intercambio iónico.

A continuación, la Tabla 13 muestra los valores límite permitidos por la Directiva para los iones fluoruro, cloruro y sulfato, en función de los cuales se podrá clasificar el material.

Elemento	Residuo inerte		Residuo no peligroso		Residuo peligroso	
	L/S = 2 l/kg	L/S = 10 l/kg	L/S = 2 l/kg	L/S = 10 l/kg	L/S = 2 l/kg	L/S = 10 l/kg
Cloruro	≤ 550	≤ 800	550 - 10000	800 - 15000	10000 - 17000	15000 - 25000
Fluoruro	≤ 4	≤ 10	4 - 60	10 - 150	60 - 200	150 - 500
Sulfato	≤ 560	≤ 1000	560 - 10000	1000 - 20000	10000 - 25000	20000 - 50000

Tabla 13. Valores límite de iones (mg/kg) según Decisión del Consejo 2003/33/CEE

### 3.8.3.2. Ensayo de percolación

El ensayo de percolación se ha realizado con el fin de comprobar los niveles presentes en el lixiviado de determinados elementos. Así pues, la Directiva 2003/33/CEE especifica que en el caso de que un residuo no cumpla los valores de sulfatos establecidos para residuos inertes, podrá considerarse que cumple los criterios de admisión siempre que en el ensayo de percolación no supere los 1500 mg/l con una relación L/S = 0.1 l/kg, ni los 6000 mg/kg con una relación L/S = 10 l/kg.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Es por ello que se realiza dicho ensayo de percolación, en base a la Norma NEN 7343: 1994. La diferencia fundamental con el ensayo de cumplimiento es que se obtiene el lixiviado del material no por simple agitación de la disolución del material en el líquido, sino que es obtenido a partir del flujo de agua a través de una columna la cual contiene el material a ensayar. Es por ello que la situación del material es más realista a las condiciones que el mismo tendrá in-situ una vez que sea puesto en obra, ya que simula el efecto de agua de lluvia percolando a través de una capa de un determinado espesor de material.

Durante el ensayo, se coloca la porción de ensayo en una columna y el líquido lixivante pasa a través del material en dirección ascendente. Este ensayo se compone de siete etapas de lixiviación, cada una a una determinada relación líquido/sólido: 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5 y 10 l/kg, simulando así el comportamiento a largo plazo del material en cuanto a la liberación de contaminantes. Al finalizar cada etapa se obtiene un lixiviado en el cual se analizan las concentraciones de elementos potencialmente contaminante tal y como se hacía en el ensayo de conformidad.

A continuación, se exponen los resultados de lixiviación obtenidos para cada uno de los grupos de materiales en estudio.

## 3.8.4. Resultados

### 3.8.4.1. Ensayo de conformidad UNE EN 12457-3

#### 3.8.4.1.1. Zahorras

A continuación, se muestran los gráficos de resultados. Se indican en el eje de abscisas cada uno de los materiales ensayados, y en el eje vertical las concentraciones alcanzadas para cada uno de ellos.

Se puede observar para se han trazado con líneas discontinua y de puntos los límites legales establecidos por la Directiva (Tablas 12 y 13) en ambas etapas de lixiviación (a L/S = 2 y a L/S = 10). La finalidad de superponer los valores límites establecidos para residuos inertes es poder detectar visualmente si los niveles de los contaminantes superan dichos umbrales.

Por lo tanto, se han marcado con círculos los valores que han sido excedidos con el fin de facilitar su identificación. Cabe indicar que, aunque un material sobrepase el límite de inerte solamente en una de las etapas, ya será considerado como residuo No Peligroso.

Los resultados obtenidos para zahorras se muestran a continuación en las Figuras 26 y 27.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

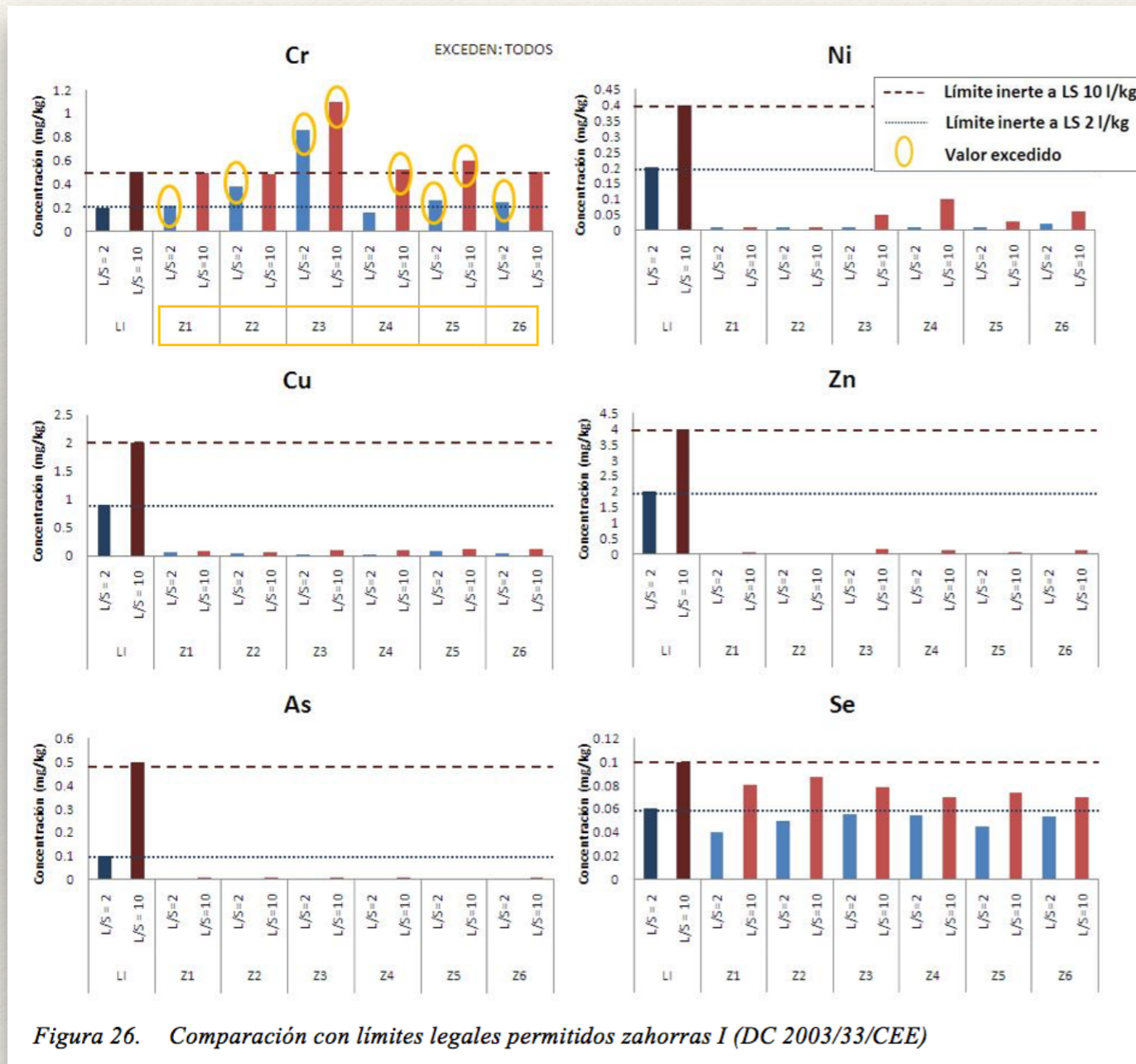


Figura 26. Comparación con límites legales permitidos ahorras I (DC 2003/33/CEE)

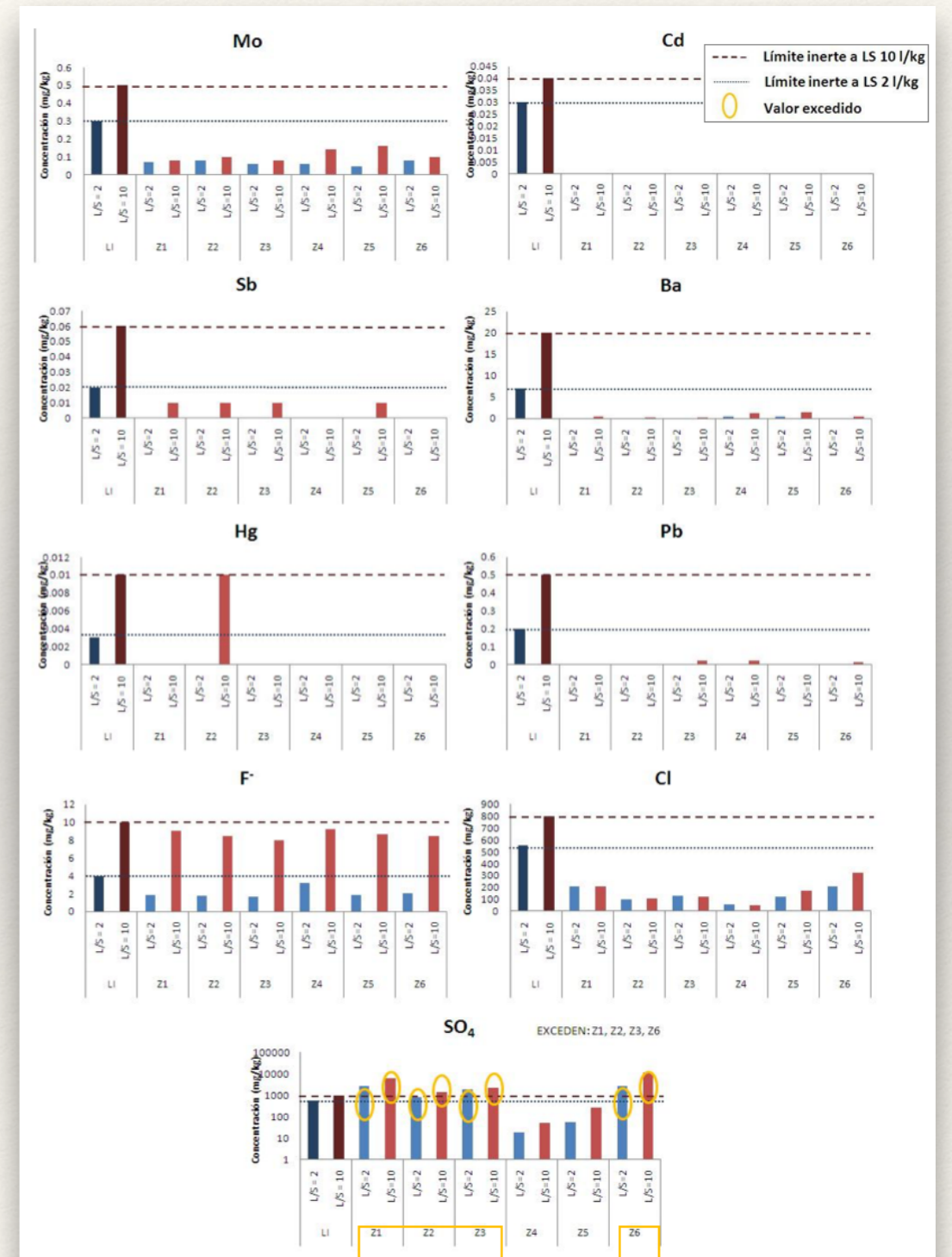


Figura 27. Comparación con límites legales permitidos ahorras II (DC 2003/33/CEE)

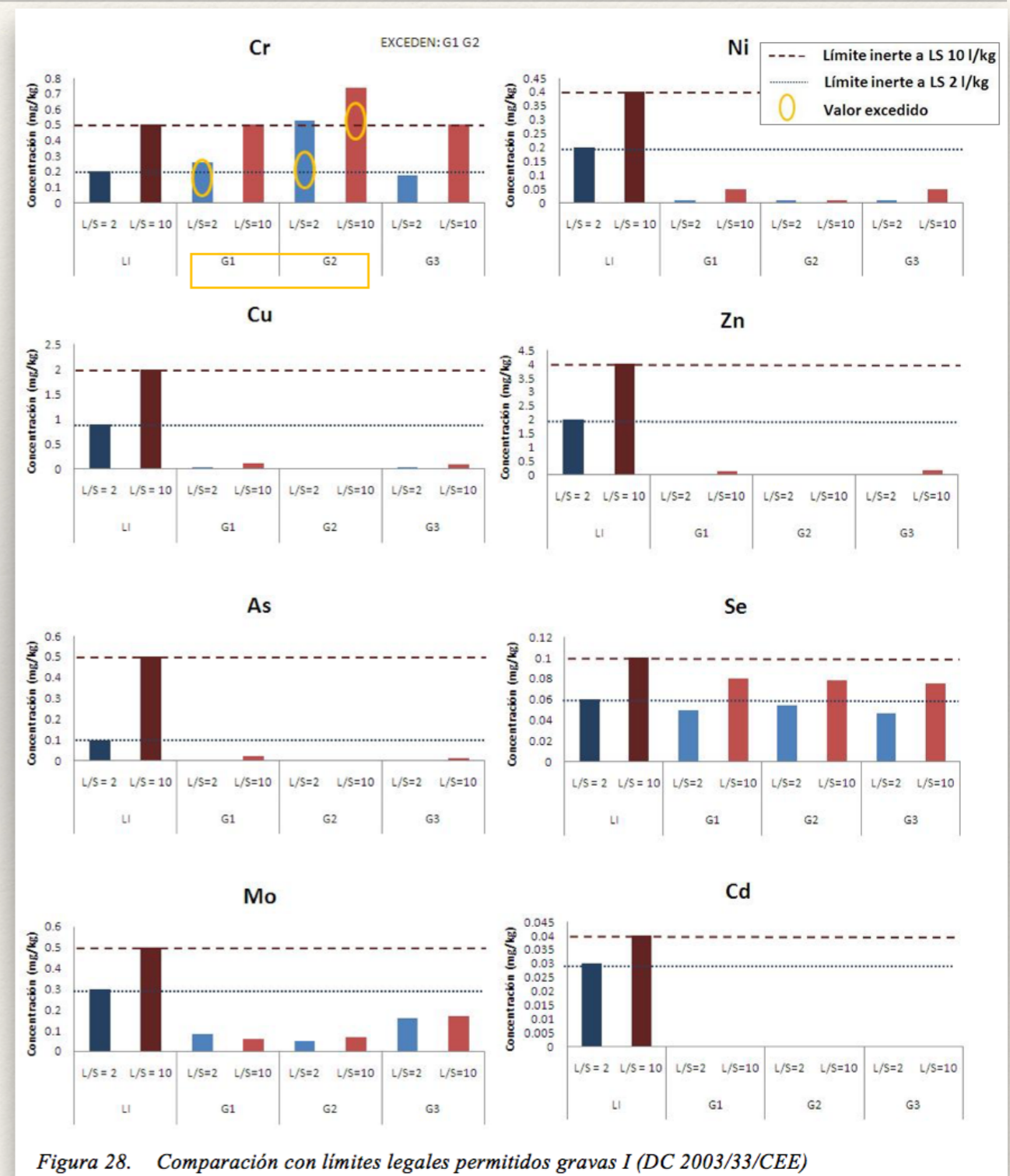


# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Los resultados graficados indican que el cromo y el sulfato son los elementos más limitantes ya que se superan los valores límite para residuos inertes, lo cual provoca que las 6 zahorras sean clasificadas como materiales "no peligrosos".

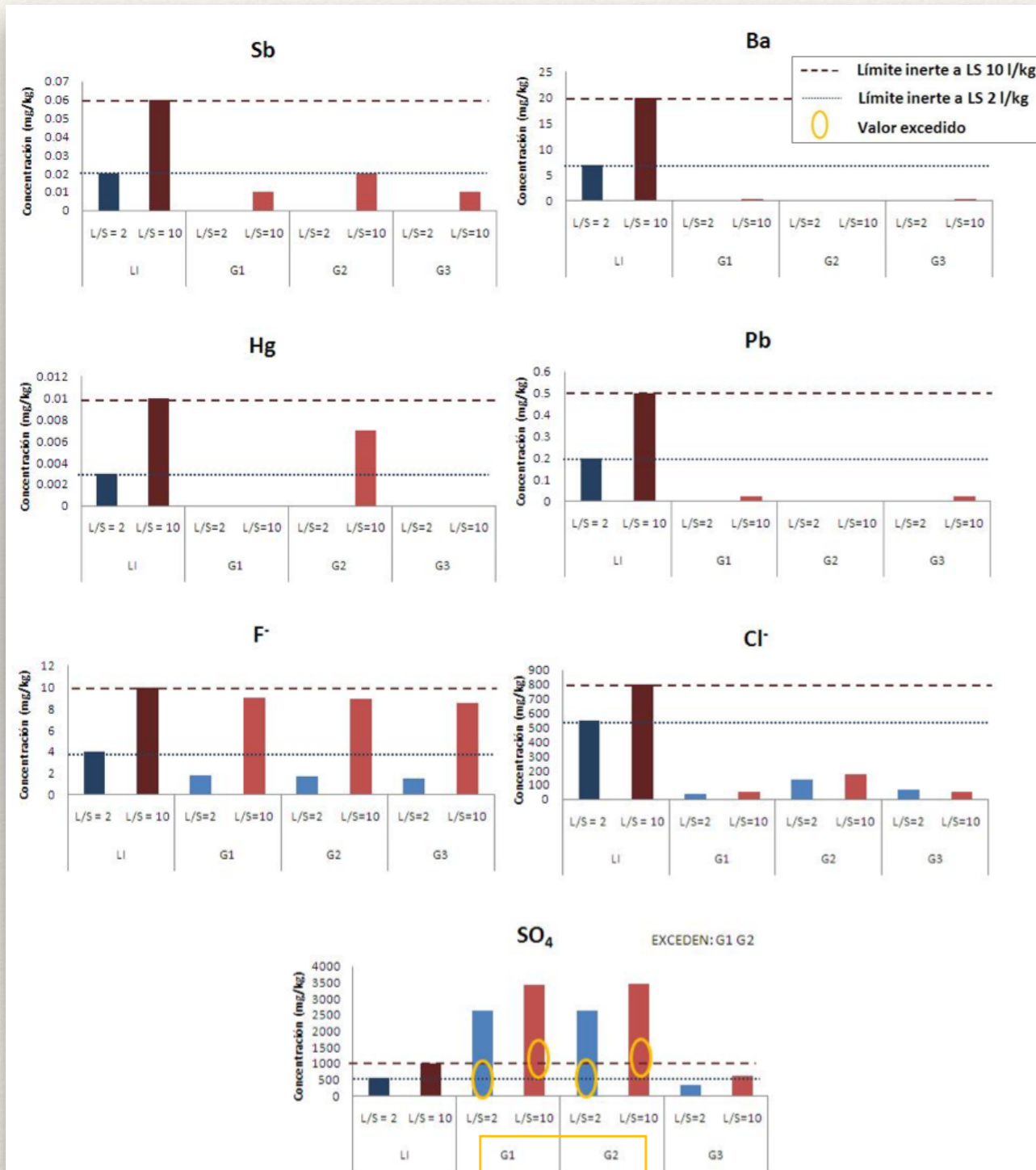
## 3.8.4.1.2. Gravas

Las Figuras 28 y 29 muestran las gráficas de resultados para las gravas, comparando los valores obtenidos en los lixiviados analizados con los valores límites impuestos por la normativa europea.





# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central



En base a los resultados se observa una mayor liberación de elementos contaminantes en las gravas G1 y G2, así pues, ambas sobrepasan el límite para sulfatos y cromo. Cabría destacar que tanto el selenio como el ion fluoruro son liberados en mayor concentración que el resto de elementos, si bien no llegan a superar los umbrales de peligrosidad impuestos.

Por tanto, los resultados confirman que de nuevo cromo y sulfato son los elementos más restrictivos en el caso de las gravas, haciendo que dos de ellas (G1 y G2) sean clasificadas como materiales "no peligrosos" y una (G3) como "inerte".

### 3.8.4.1.3. Arenas

Las Figuras 30 y 31 comparan los valores obtenidos en los lixiviados procedentes de las arenas con los valores límites legales con el fin de ser clasificadas en función de su peligrosidad.

Figura 29. Comparación con límites legales permitidos gravas II (DC 2003/33/CEE)



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

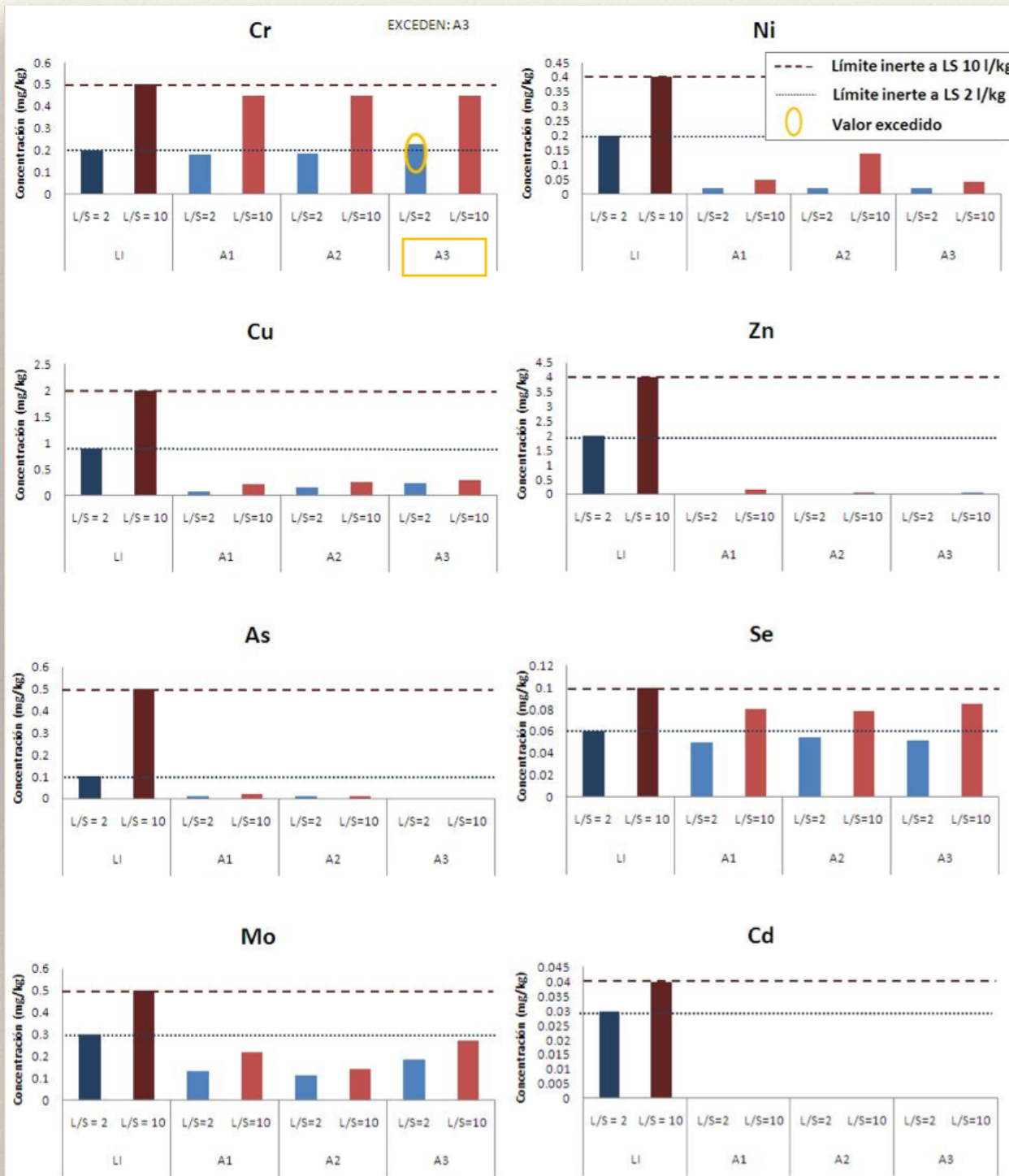


Figura 30. Comparación con límites legales permitidos arenas I (DC 2003/33/CEE)

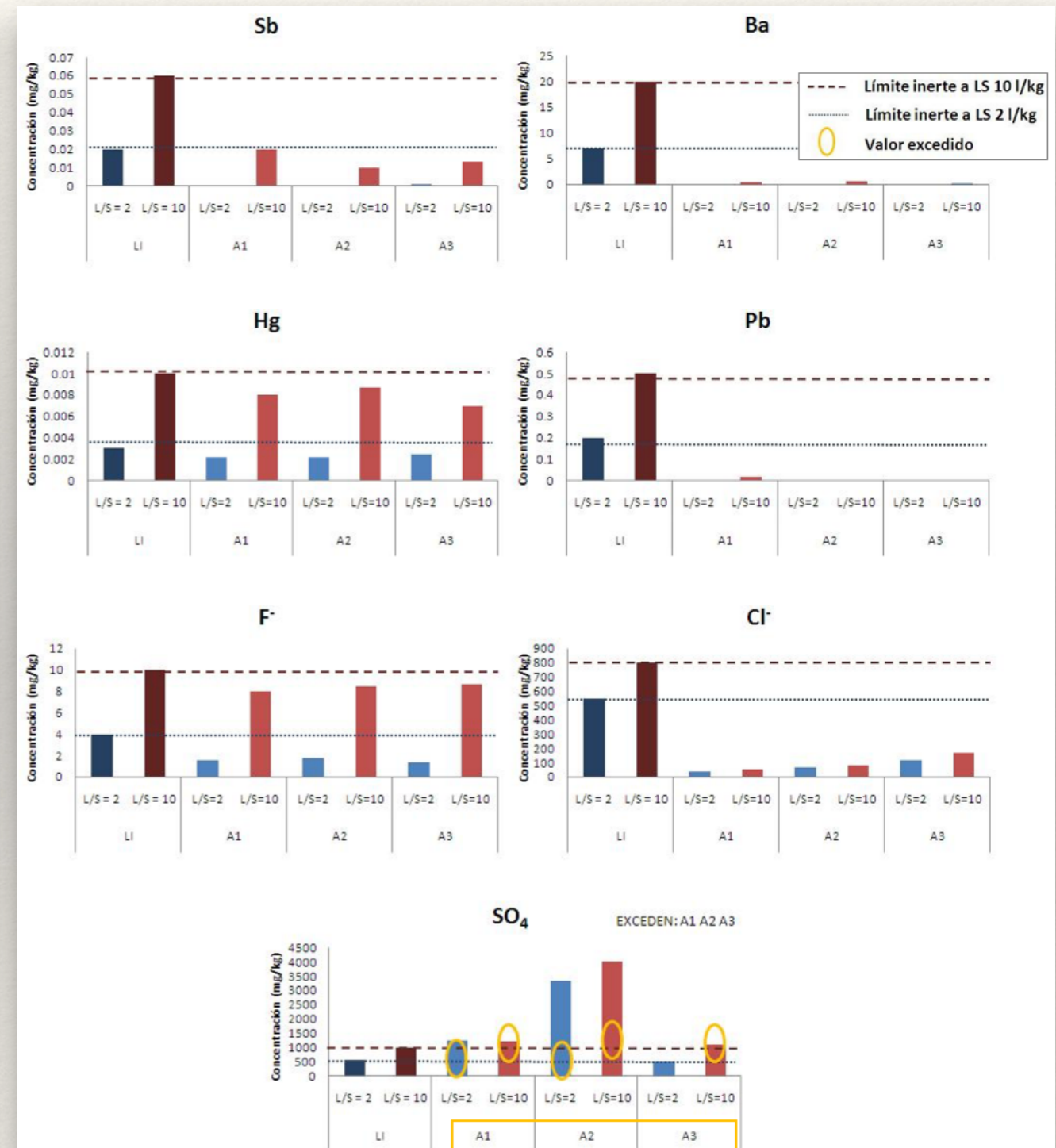


Figura 31. Comparación con límites legales permitidos arenas II (DC 2003/33/CEE)



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Así pues, se puede observar como los elementos que sobrepasan el valor límite para residuos inertes son cromo y sulfatos, al igual que ocurría en las zahorras y gravas. Sin embargo, también se observan altos valores de selenio, molibdeno, mercurio y fluoruros, si bien ninguno de estos elementos supera el umbral para inertes, como se puede apreciar a continuación en las gráficas.

Así pues, en base a los resultados y tal y como se observa en las Figuras 30 y 31, todas las arenas son clasificadas como materiales "no peligrosos".

### 3.8.4.1.4. Áridos gruesos con tamaño superior a 40 mm para su uso como material drenante.



Figura 32. Comparación con límites legales permitidos drenantes I (DC 2003/33/CEE)



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

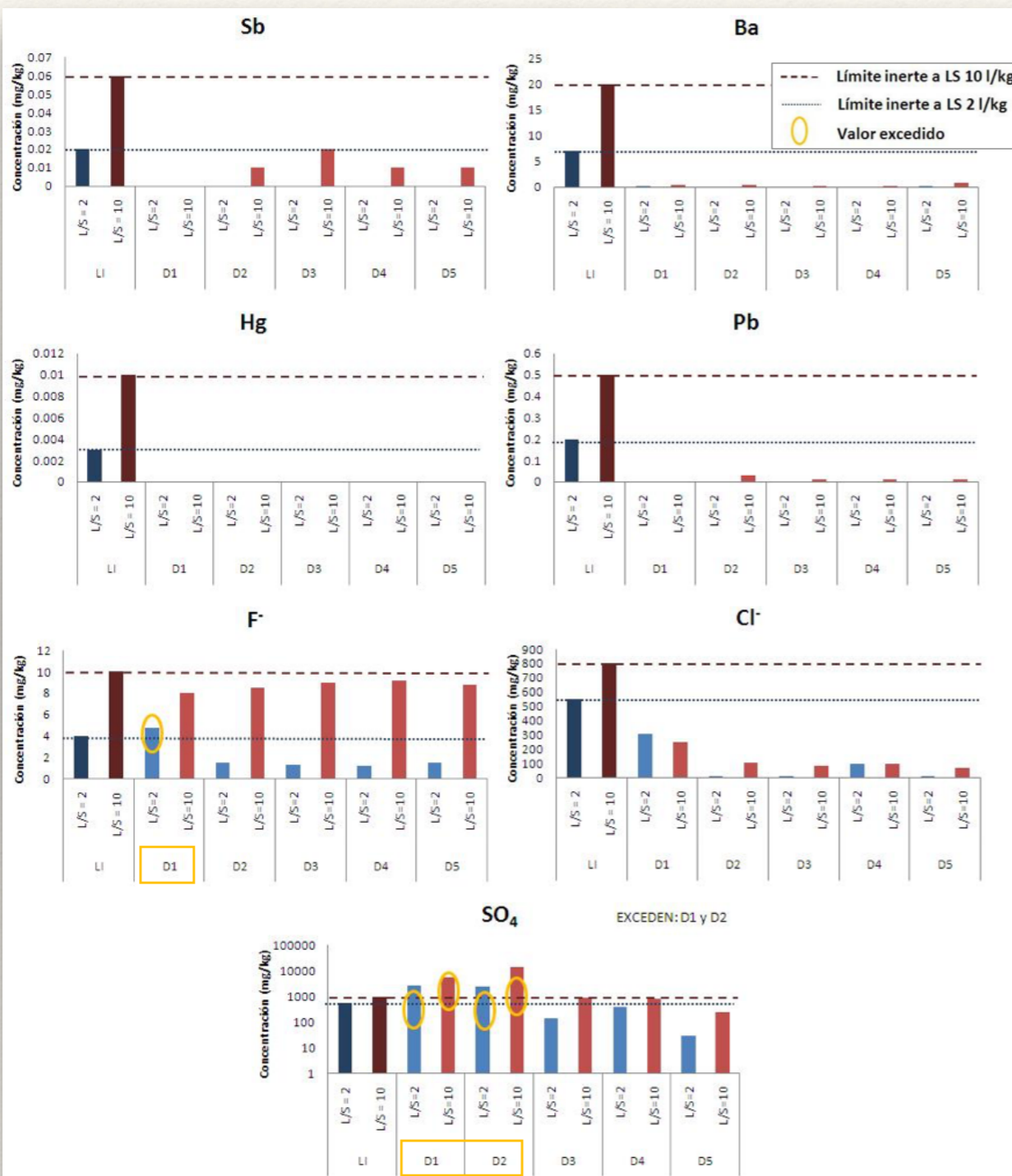


Figura 33. Comparación con límites legales permitidos drenantes II (DC 2003/33/CEE)

En base a los datos obtenidos, dos materiales (D3 y D5) se clasifican como "inertes" y tres (D1, D2 y D4) se clasifican como "no peligrosos". Si bien el cromo y los sulfatos fueron de nuevo los más conflictivos, siendo superados en tres de los cinco materiales, en el material D1, también se superó los niveles de fluoruros para la primera etapa del ensayo a LS = 2 l/kg.

Por tanto, en las Figuras 32 y 33 se observan los tres elementos que sobrepasaron los límites. Cabría destacar que, además de detectar niveles elevados de cromo, sulfatos y fluoruros, se midieron altas concentraciones de selenio, a pesar de que en ninguno de los materiales analizados se superó el umbral establecido.

### 3.8.4.1.5. Síntesis de resultados del ensayo de conformidad

Sobre la clasificación del árido según la legislación ambiental aplicable:

De los resultados obtenidos, se puede concluir que de los 17 materiales estudiados:

3 materiales (17,6% del total) son **INERTES** G3, D3 y D5

14 materiales (82,4% del total) son **NO PELIGROSOS**



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

En materiales clasificados como NO PELIGROSOS, los elementos conflictivos y que por tanto superan los límites establecidos para residuos inertes por la Decisión del Consejo 2003/33/CEE, han sido el **CROMO** y **SULFATOS** (y únicamente en el material D1 se superan además los niveles de fluoruro).

## Resultados atendiendo a la tipología de árido (mixtos o de hormigón):

Así mismo conviene comentar los resultados distinguiendo entre áridos reciclados mixtos y de hormigón. De los 17 materiales analizados, 12 materiales son MIXTOS y 5 son de HORMIGÓN, obteniéndose:

Se clasifican como materiales **INERTES**:

A. 2 materiales MIXTOS (16,7% de los mixtos) G3 y D3

B. y 1 material de HORMIGÓN (20% de los de hormigón) D5

Se clasifican como materiales **NO PELIGROSOS**:

C. 10 materiales MIXTOS (83,3% de los mixtos) Z1 Z2 Z3 Z4, G1 G2, A1 A2, D1 D2

D. y 4 materiales de HORMIGÓN (80% de los de hormigón) Z5 Z6, A3, D4

## Resultados atendiendo al uso del árido (zahorra, grava, arena o drenante):

Respecto a la recapitulación de resultados de lixiviación según los usos previstos, se han obtenido los siguientes datos:

- Todas las zahorras (4 mixtas, 2 de hormigón) son clasificadas como NO PELIGROSAS.
- De las 3 gravas (todas mixtas), la G3 es INERTE y las G1 y G2 son NO PELIGROSAS.
- Todas las arenas (2 mixtas, 1 de hormigón) son clasificadas como NO PELIGROSAS.
- De los 5 drenantes (3 mixtos, 2 de hormigón), D3 y D5 (mixto y de hormigón respectivamente) son INERTES, mientras que D1, D2 y D4 (2 mixtos y uno de hormigón respectivamente) son NO PELIGROSOS.

Para finalizar el análisis, en la Tabla 14 se resumen los elementos que han superado los niveles legales permitidos, así como la clasificación de todos los materiales estudiados según el código de color descrito anteriormente. Se indica además el uso previsto para el árido (zahorra, grava, arena o drenante) y la tipología de árido (mixto o de hormigón).



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Uso	Material		Cromo		Sulfato		Fluoruro		Clasific.	Material
	Código	Tipología	L/S=2	L/S=10	L/S=2	L/S=10	L/S=2	L/S=10		
	Z1	M							NP	Z1
	Z2	M							NP	Z2
	Z3	M							NP	Z3
	Z4	M							NP	Z4
	Z5	H							NP	Z5
	Z6	H							NP	Z6
	G1	M							NP	G1
	G2	M							NP	G2
	G3	M							I	G3
	A1	M							NP	A1
	A2	M							NP	A2
	A3	H							NP	A3
	D1	M							NP	D1
	D2	M							NP	D2
	D3	M							I	D3
	D4	H							NP	D4
	D5	H							I	D5

*Nota: M (mixto), H (de hormigón), NP (no peligroso), I (inerte)*

Tabla 14. Resumen de resultados al test de cumplimiento en base a las UNE EN 12457-3

Una vez que los materiales han sido clasificados acorde con la legislación vigente, se continuará con la caracterización del comportamiento a largo plazo de aquellos materiales con mayor potencial contaminante y que por tanto, no han sido clasificados como residuos inertes.

## 3.8.4.2. Ensayo de percolación NEN 7343

El ensayo de percolación (también denominado test de columna) según el procedimiento descrito por la norma NEN 7343 permite analizar cuál es la evolución de la concentración de los elementos a lo largo del tiempo, ya que analiza los niveles contaminantes para diferentes fracciones líquido sólido (un total de 7 extracciones) que de forma creciente a lo largo del ensayo, simulan qué ocurriría con la liberación a lo largo de la vida de servicio del material en obra.

Por tanto, una vez que los materiales G3, D3 y D5 son clasificados como inertes, se continúa el presente análisis con los materiales restantes.

Ya que los elementos conflictivos detectados con la realización del test de cumplimiento (UNE EN 12457-3) han sido cromo y sulfatos, el test de percolación se realiza con la finalidad de detectar si los niveles de estos elementos en los materiales siguen siendo conflictivos a largo plazo o si por el contrario, se ven disminuidos.

En este sentido, la Directiva 2003/33/CEE también incluye valores límite para la primera extracción realizada en el test de percolación (C0 se refiere a la concentración expresada en mg/l), siendo ésta la realizada a una L/S = 0,1 l/kg. Por lo tanto, la Tabla



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

15 indica los valores límites establecidos para residuos Inertes, No Peligrosos y Peligrosos atendiendo a estas condiciones.

Elemento	Residuo inerte	Residuo no peligroso	Residuo peligroso
	L/S = 0,1 l/kg	L/S = 0,1 l/kg	L/S = 0,1 l/kg
As	0,06	0,3	3
Ba	4	20	60
Cd	0,02	0,3	1,7
<b>Cr total</b>	<b>0,1</b>	<b>2,5</b>	<b>15</b>
Cu	0,6	30	60
Hg	0,002	0,03	0,3
Mo	0,2	3,5	10
Ni	0,12	3	12
Pb	0,15	3	15
Sb	0,1	0,15	1
Se	0,04	0,2	3
Zn	1,2	15	60
Cloruro	460	8 500	15 000
Fluoruro	2,5	40	120
<b>Sulfato</b>	<b>1.500</b>	<b>7.000</b>	<b>17.000</b>

Tabla 15. Valores límite según Decisión (en mg/l) del Consejo 2003/33/CEE, establecidos para la primera extracción (LS = 0,1 l/kg) del test de percolación

El análisis del comportamiento a largo plazo se realizará sobre los materiales para los que han sido clasificados como NO PELIGROSOS, centrándonos en aquellos elementos conflictivos: Cromo y Sulfatos.

Respecto a la concentración de sulfatos, la Directiva europea indica lo siguiente:

"Aunque el residuo no cumpla los valores de inertes correspondientes al sulfato, podrá considerarse que cumple los criterios de admisión como residuo INERTE, si la lixiviación no supera ninguno de los siguientes valores: 1500 mg/l en C0 con una relación = 0,1 l/kg y 6000 mg/kg con una relación L/S = 10 l/kg. Será necesario por tanto utilizar la ensayo de percolación para determinar el valor límite con una relación L/S = 0,1 l/kg en las condiciones iniciales de equilibrio, mientras que el valor con una relación L/S = 10 l/kg se podrá determinar, bien mediante una prueba de lixiviación por lotes, bien mediante una ensayo de percolación en condiciones próximas al equilibrio local".

Por lo tanto, se tratará de determinar si aquellos materiales clasificados como NO PELIGROSOS por exceder los niveles de inertes en sulfatos: Z1, Z2, Z3, Z6, G1, G2, A1, A2, A3, D1 y D2 (ver Tabla 14) podrían pasar a ser clasificados como residuos INERTES si no superan los 1500 mg/l a LS = 0,1 l/kg ni los 6000 mg/kg a L/S = 10 l/kg.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

Respecto al cromo, se determinará de igual modo su comportamiento a largo plazo y se determinará si en los materiales clasificados como NO PELIGROSOS que superaron los niveles de cromo: Las 6 zahorras, las gravas (G1 y G2), la arena A3 y los materiales drenantes (D1 y D4), se continúan superando los niveles permitidos para el test de columna (indicados en la Tabla 15).

## 3.8.4.2.1. Análisis de niveles de cromo a largo plazo

En la Figura 34 se muestran los resultados obtenidos para el cromo en el test de percolación. Se ilustran los datos para cada material (expresados en escala logarítmica) y se han indicado en color rojo aquellos materiales que exceden el límite legal (representado como un punto rojo) establecido para una L/S = 0,1 l/kg de acuerdo con los valores indicados en la Tabla 15.

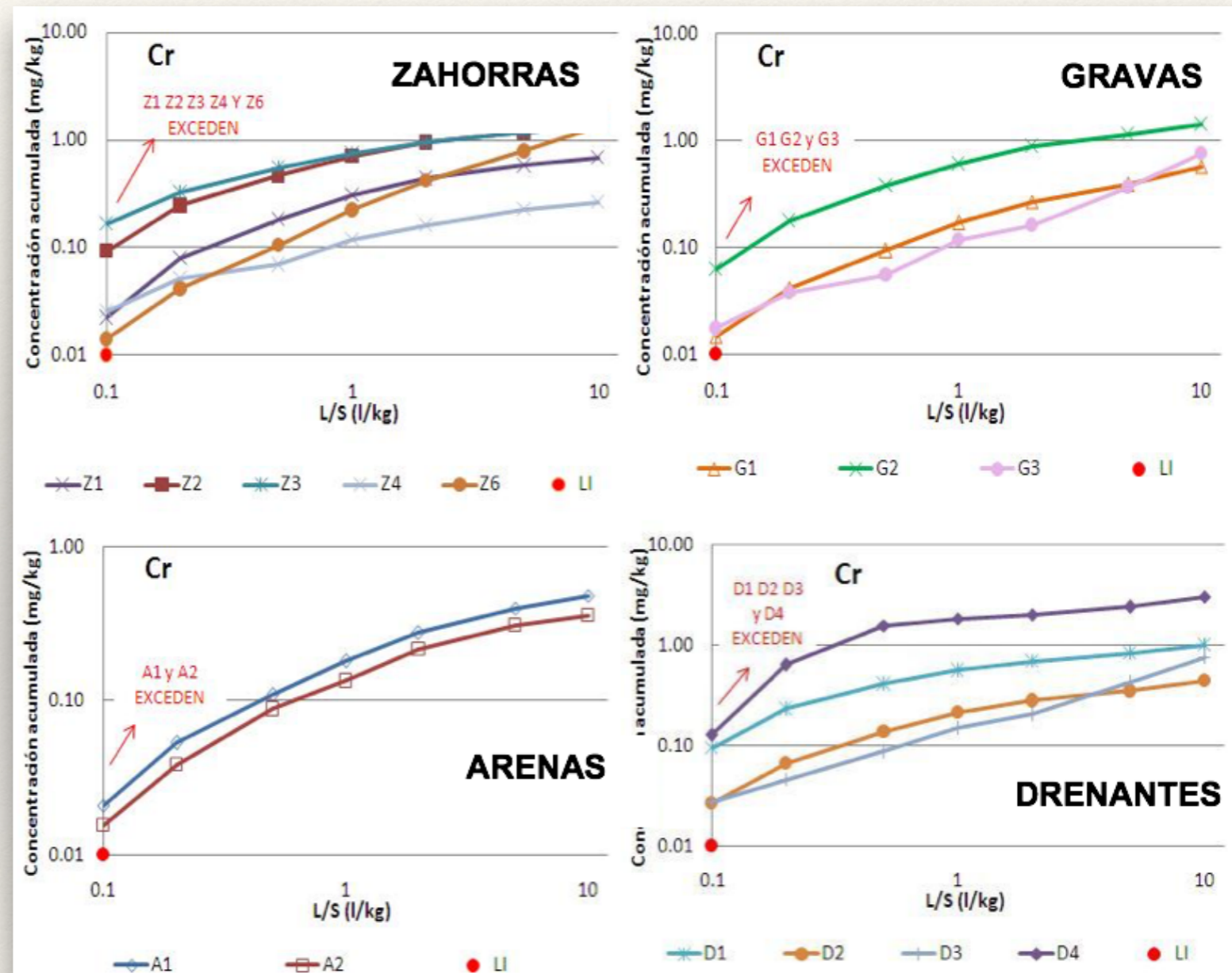


Figura 34. Resultados del test de percolación (NEN 7345) y comparación con límites legales permitidos (DC 2003/33/CEE)



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

De los resultados obtenidos se puede concluir que los niveles de Cromo a L/S = 0,1 l/kg continúan excediendo los valores límite establecidos por la Directiva. Seguidamente se analizará si los niveles de sulfatos se reducen en base a los resultados del test de percolación.

## 3.8.4.2.2. Análisis de los niveles de sulfato a largo plazo

En la Figura 35 se muestran los resultados obtenidos por el test de percolación para aquellos materiales que superaron el valor límite de INERTES tras realizar el test de cumplimiento UNE EN 12457-3.

Se muestran mediante puntos rojos los dos valores límite establecidos por la Directiva para sulfatos (1500 mg/l con una relación = 0,1 l/kg y 6000 mg/kg con una relación L/S = 10 l/kg).

En texto de color rojo se indican los materiales que han excedido dichos niveles, y en texto de color verde los que no los sobrepasan.

De la gráfica se deduce que los únicos materiales que han reducido los niveles de sulfato con la realización del test de percolación, han sido los siguientes: Z2, Z6, G2 y A1.

Sin embargo, hay que indicar que de estos cuatro materiales (que no han sobrepasado el límite de sulfatos para residuos inertes impuesto para el test de percolación), tres de ellos habían excedido los niveles permitidos de cromo: Z2, Z6, G2 (según se observa en la Figura 38). Por lo tanto, **ÚNICAMENTE el material A1 podría pasar a ser considerado material INERTE.**

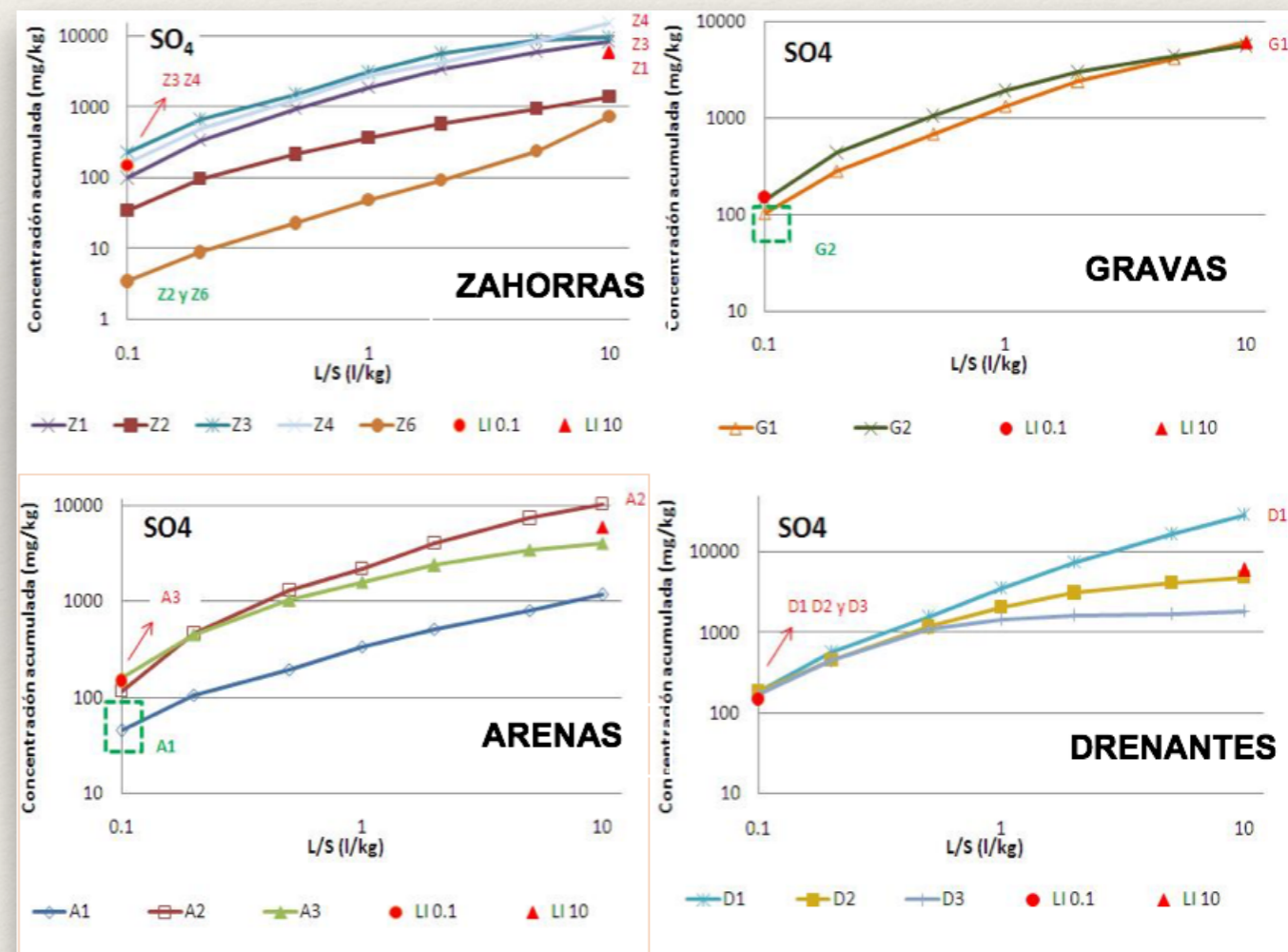


Figura 35. Resultados del test de percolación (NEN 7345) y comparación con límites legales permitidos (DC 2003/33/CEE)



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

## 3.8.4.3. Valoración del potencial contaminante de Zahorras empleadas en la ejecución de tramos experimentales

### 3.8.4.3.1. Zahorra reciclada asfáltica procedente de fresado. Tramo de Chiclana (Cádiz)

Se han analizado tres muestras de zahorra reciclada asfáltica procedente del fresado de la mezcla bituminosa en caliente de un vial ubicado en Chiclana, Cádiz. Las tres muestras se denominaron CE1, CE2 y CE3, a las cuales se les realizó el ensayo de conformidad de acuerdo a la Norma UNE EN 12457-3.

Los niveles de metales y aniones obtenidos en las tres muestras han permitido clasificarlos como materiales inertes. Además, se determinó el índice de fenol según Norma UNE 77053:2002 debido a la naturaleza del material. De acuerdo con la Directiva Europea, para clasificar a un material como inerte en base a este parámetro, se debe obtener un valor inferior a 0,5 mg/kg para una relación L/S = 2. En las tres muestras se ha obtenido un índice de fenol inferior a 0,4 mg/kg, no superando el límite para residuos inertes.

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos, todas las muestras del material procedente de fresado para la ejecución

del tramo experimental ubicado en Chiclana (Cádiz) son clasificadas como material "inerte".

### 3.8.4.3.2. Zahorra reciclada puesta en obra en el Puerto de Huelva

Se ha estudiado el comportamiento frente a lixiviación de dos muestras de una zahorra reciclada de hormigón utilizada en la ejecución de un pavimento ubicado en el muelle "Ciudad de Palos", en la margen izquierda de la ría en el Puerto de Huelva. A las dos muestras se les realizó el ensayo de conformidad.

Los resultados han mostrado, que los niveles de metales pesados fueron muy bajos y que en ningún caso superaron los valores límite para materiales inertes. Sin embargo, las concentraciones de cloruros y sulfatos liberados en ambas muestras han superado los niveles permitidos en sulfatos para residuos inertes y una de las muestras superó además el valor límite establecido para los cloruros.

Por lo tanto, ambos materiales son clasificados como no peligrosos.



# 3. Los áridos reciclados en Andalucía Central

## 3.8.5. Conclusiones

En base al estudio de lixiviación realizado, se concluye que la clasificación de los materiales ensayados en base a su potencial contaminante, es la siguiente:

- De los 17 materiales ensayados, tan solo 4 (23,5%) que son la grava G3 (mixta), la arena A1 (mixta) y los materiales gruesos (D3 mixto y D5 de hormigón) se clasifican como "inertes". Los 13 materiales restantes (76,5%) se clasifican como "no peligrosos". Estos resultados son similares a los obtenidos en el proyecto GEAR donde tan solo 3 de los 12 materiales estudiados (25%) son "inertes".
- Los elementos que superan los límites establecidos para materiales inertes por la Decisión de la CEE del 2003 son el Cromo (Cr) en 11 de los 17 materiales estudiados (65%) y los sulfatos, también en 11 de los 17 materiales estudiados (65%). Estos resultados coinciden con los obtenidos en el proyecto GEAR donde ambos elementos son los únicos que superan los límites de materiales inertes.

Uso	Material		Cromo		Sulfato		Cromo		Sulfato		Clasific.	Material
	Código	Tipología	L/S=2	L/S=10	L/S=2	L/S=10	L/S=0,1	L/S=0,1	L/S=10			
	Z1	M									NP	Z1
	Z2	M									NP	Z2
	Z3	M									NP	Z3
	Z4	M									NP	Z4
	Z5	H									NP	Z5
	Z6	H									NP	Z6
	G1	M									NP	G1
	G2	M									NP	G2
	G3	M									I	G3
	A1	M									I	A1
	A2	M									NP	A2
	A3	H									NP	A3
	D1	M									NP	D1
	D2	M									NP	D2
	D3	M									I	D3
	D4	H									NP	D4
	D5	H									I	D5

*Nota: M (mixto), H (de hormigón), NP (no peligroso), I (inerte)*

Tabla 16. Resumen de resultados de lixiviación en base al test de cumplimiento UNE EN 12457-3 y test de percolación (NEN 7345).





---

Estudio experimental sobre la acción del yeso,  
presente en los áridos de RCD, en las unidades  
de obras de construcción de carreteras



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.1. Introducción

La Directiva Europea 2008/98/CE (Marco de Residuos), la Ley 22/2011 de Residuos y Suelos contaminados Española (también conocida como Ley Marco de Residuos) y el Decreto 73/2012, de 20 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía, exigen que para el año 2020, al menos, el 70% de los Residuos de Construcción y Demolición (en adelante RCD) sean reciclados.

Estas mismas normativas definen reciclar, cuando se trata de áridos RCD, al empleo de estos materiales en obras de construcción como sustitución de áridos naturales.

Los actuales porcentajes de reciclado de RCD en España son muy inferiores a lo exigido por estas legislaciones.

Los motivos de esta baja tasa de reciclado son muy variados, siendo uno de ellos, y principal, la normativa técnica que en España se ha aplicado a estos áridos para su uso en las obras.

Los Pliegos Generales, como son el PG-3 o la EHE, aunque permiten el uso de los áridos RCD les fijan valores de calidad como si se tratasen de áridos naturales, no tienen, totalmente en cuenta, la especificidad de estos materiales, lo que ha supuesto, y aún supone, un importante impedimento para su incorporación a las obras.

Pero habiéndose constatado que no cumpliendo con todo lo exigido por estos Pliegos Generales, obras realizadas con áridos RCD alcanzaban los niveles de calidad exigidos en el proyecto, los legisladores responsables de la gestión de los RCD solicitan a las Administraciones competentes de la ejecución de la obras de construcción que modifiquen los Pliegos de Condiciones referentes a los áridos RCD para facilitar que estos puedan ser empleados en las obras.

### 4.1.1. Normativa andaluza

AOPJA, anteriormente GIASA, asumió el mandato impuesto por la Junta de Andalucía de modificar sus Pliegos de Condiciones,



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

relativos a los áridos RCD, para potenciar el uso de estos residuos lo que permitiría conseguir la tasa de reciclado exigida para el año 2020.

Pero la modificación de las especificaciones de validez de los áridos debe realizarse garantizando la calidad final de la obra, por lo tanto AOPJA planteó el siguiente plan de actuación:

- Investigación a nivel de laboratorio de las modificaciones de especificaciones de los áridos RCD.
- A partir de los resultados de estos trabajos de laboratorio la ejecución de tramos experimentales.
- A partir de los resultados obtenidos en los tramos experimentales la redacción de una normativa específica para el empleo de áridos RCD, con especificaciones de calidad que:
  - Puedan ser asumidas por los productores de estos materiales
  - Y que garantizasen la calidad final de las obras
- Redacción de una guía de áridos RCD, que incluyera el compromiso de los productores de los áridos RCD de certificar y asegurar dicha calidad certificada en los productos suministrados.

- Un catálogo de firmes que ayude a las Administraciones, Proyectistas, Direcciones de Obra, Contratistas y Laboratorios a incorporar estos materiales en las obras.

En el año 2010 se publicó las recomendaciones de AOPJA, en la actualidad se están elaborando el resto de documentos.

### 4.1.2. Los compuestos de azufre en los áridos RCD

#### 4.1.2.1 Consideraciones previas

Las Recomendaciones de AOPJA modifican, entre otras, especificaciones de los áridos RCD como son su procedencia, contenidos de materia orgánica, sales solubles y resistencia al desgaste Los Ángeles, sin embargo, en las Recomendaciones del año 2010 se decidió no actuar sobre las exigencias relativas a los compuestos de azufre.

La presencia de compuestos de azufre en los áridos supone un riesgo potencial para la unidad de obra donde sean colocados.

Los compuestos de azufre pueden disolverse provocando pérdidas de volumen y en contacto con productos como el cemento o cal, dependiendo de la composición de la mezcla, pueden producir reacciones expansivas.



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

Los áridos RCD contienen compuestos de azufre que provienen de distintas fuentes, el hormigón presenta un porcentaje de sulfatos (% SO<sub>3</sub>) en el entorno del 0,3 al 0,6%, y es habitual la presencia en los RCD de restos de yesos o escayolas. La reducción de estos compuestos de azufre hasta alcanzar los niveles exigidos por la normativa en muchos casos es prácticamente imposible y en otros supone un encarecimiento muy importante del reciclado.

Al igual que lo comentado anteriormente, hay experiencias de obras en las que se han empleado áridos RCD que han superado los niveles exigidos para los compuestos de azufre y no se han producido patologías.

Cualquier modificación al alza de los niveles actuales de exigencia para estos compuestos de azufre supondría una muy importante ayuda para empleo de estos áridos.

Pero, en sintonía con lo indicado, cualquier modificación de estas especificaciones de los áridos debe estar suficientemente documentada para asegurar la calidad final de la obra donde se incorporen.

### 4.1.2.2 Normas de ensayos químicos

La normativa vigente presenta un problema añadido para el estudio de la acción de los compuestos de azufre presentes en

los áridos, y es que dependiendo del empleo para el que se requiera el árido la determinación del contenido de estos compuestos se realiza con distintas normas de ensayo, como entre otras, las indicadas a continuación:

- Para su uso en suelos, el PG-3 y las Recomendaciones de AOPJA emplean la norma NLT 115.
- Para su uso como zahorras, el PG-3 y las Recomendaciones de AOPJA emplean la norma UNE EN 1744-1.
- Para su uso como suelos estabilizados, el PG-3 emplea la UNE 103201.
- Para áridos de hormigón, suelocemento o gravacemento el PG-3, las Recomendaciones de AOPJA y la EHE emplean la norma UNE EN 1744-1.

Los áridos RCD fabricados en una planta, dependiendo de su calidad, pueden ser empleado para distintos usos que a priori desconoce el productor, es más operativo contar con un solo tipo de ensayos y a partir de estos ensayos fijar las especificaciones en función de su empleo en las obras.

### 4.2. Objetivos de la investigación

En base a lo indicado, los objetivos de esta investigación son dos:



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

- Determinar cuál de los métodos de ensayo citados son los más adecuados para los áridos RCD, teniendo en cuenta que estos compuestos de azufre proceden de residuos de productos de la construcción, y atendiendo a lo investigado y a lo establecido en la normativa de obligado cumplimiento (la europea) proponer la mejor normativa para aplicar a los áridos RCD.
- Investigar a partir de que contenido en compuestos de azufre, y en que condiciones, se pueden producir patologías y en base a ello proponer, en su caso, modificaciones a los límites actualmente establecidos.

### 4.3. Trabajo realizado

De acuerdo con los objetivos propuestos, se han ejecutado dos líneas de trabajo:

- La referente a los ensayos químicos para la determinación de los contenidos de compuestos de azufre en los áridos RCD.
- La referente al estudio de la acción del yeso en los áridos para su empleo en obras de construcción, tanto en productos ligados como no ligados con cemento.

### 4.4. Estudio de los análisis químicos para la determinación del contenido de yeso en los suelos y zahorras RCD

#### 4.4.1. Normativa vigente para la determinación de los compuestos de azufre en suelos, zahorras y áridos RCD

La determinación de los compuestos de azufre, especificados en el PG- 3, en las Recomendaciones de AOPJA y en la normativa armonizada europea para áridos RCD, se realiza con las siguientes normas de ensayo:

- Cuando se caracterizan los suelos para su empleo en los terraplenes (Art. 330 PG-3, Art. 3.2.1 AOPJA)
  - NLT 115 Contenido de yeso en suelos.
- Cuando se emplean los áridos como zahorras (Art. 510 PG-3, Art.1.2.6 AOPJA)
  - UNE EN 1744-1 Compuestos totales de azufre
- Cuando se emplean los suelos como suelos estabilizados con cemento (Art. 512 PG-3)
  - UNE 103201 Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo.
- Cuando se emplean los suelos como suelocemento (Art. 513 PG-3), gravacemento (Art. 513 PG-3, Art. 2.2.2.2 AOPJA)



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

- UNE EN 1744-1:
  - Compuestos totales de azufre y
  - Contenido en sulfatos solubles en ácido.
- La norma armonizada UNE-EN 13242:2003+A1:2008 especifica dos métodos de ensayo para la determinación del contenido de yesos en los áridos RCD:
  - Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. UNE-EN 933-11:2009/AC:2010. Con esta norma se determina el contenido de partículas de yeso en la fracción gruesa del árido RCD
  - Apartado 10.2 de la UNE EN 1744-1 donde se describe un método de ensayo específico para la determinación del contenido en sulfatos solubles en agua para los áridos RCD.

### 4.4.2. Trabajo realizado para el análisis de la normativa química de determinación de los contenidos de compuestos de azufre en suelos y zahorras

El Plan de trabajo que se ha ejecutado para esta investigación química se ha establecido en base a las siguientes consideraciones:

#### 4.4.2.1. Consideraciones legales

La norma referente, y la que se debería emplear en caso de discrepancias, será norma europea para el mercado CE. (Apdo. 10.2 de la UNE EN 1744-1)

Varios son los motivos para ello:

- Es el ensayo que deben realizar los fabricantes de áridos RCD para su mercado CE.
- Es una norma preparada específicamente para determinar la agresividad del yeso procedente de residuos RCD.

#### 4.4.2.2. Consideraciones técnicas

La mejor normativa será aquella que mejor determine los contenidos reales de los compuestos de azufre habituales en los RCD.

En este trabajo, para decidir cuál es la normativa más adecuada para los áridos RCD, lo que se ha realizado es determinar el contenido de sulfatos y compuestos de azufre de muestras preparadas en el laboratorio incrementando de una manera conocida los contenidos en yesos.



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

Las normas mencionadas en 3.1.1 presentan diferencias no solo en el método de ensayo, sino también, y lo que afecta a los resultados de una manera muy importante, en la preparación de la muestra para ensayo, pero para el estudio realizado en este trabajo se han eliminado las variables debidas a las diferencias en la preparación de las muestras.

Así puesto que el método de ensayo referente será el del Apdo. 10.2 de la UNE EN 1744-1, la preparación de las muestras ha sido la indicada por esta norma.

Por lo demás, aunque se pueda poner en duda alguna de las etapas definidas en alguna de estas normas, los ensayos se han ejecutado rigurosamente de acuerdo con lo especificado en ellas.

De acuerdo con todo lo expuesto, el trabajo realizado ha consistido en:

### 4.4.2.3. Muestras analizadas

Se ha partido de un suelo y una zahorra de reciclados RCD. Tanto con el suelo como con la zahorra se han preparado en el laboratorio mezclas incrementando el contenido en la proporción de yesos.

Se han analizado los materiales iniciales y los tratados con yesos. El procedimiento seguido es el indicado a continuación:

#### 4.4.2.3.1. Toma de muestras

Se tomaron, tanto del suelo como de la zahorra, una muestra suficiente para todo el trabajo, de los acopios de una planta de reciclado de áridos RCD.

La planta elegida fue la de ARISTERRA situada en Málaga.

La denominación de estos materiales es:

- Suelo reciclado RCD.
- Zahorra reciclada RCD.

#### 4.4.2.3.2. Preparación de un yeso de RCD para incorporarlo a las muestras

Se ha tomado un saco de yeso comercial, que se ha amasado con agua y se ha esperado a su fraguado y endurecimiento. Este material endurecido, para los ensayos químicos, se ha triturado en el laboratorio hasta alcanzar el tamaño de fracción solicitado



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

para los ensayos químicos de áridos por la UNE EN 1744-1.

### 4.4.2.3.3. Preparación de las muestras para los ensayos químicos

Por cuarteo se ha tomado tanto del suelo como de la zahorra la suficiente cantidad de muestra para realizar todos los ensayos químicos indicados a continuación.

Se ha preparado una única muestra de suelo y una de zahorra del material inicial, que denominamos:

- Suelo inicial
- Zahorra inicial

La reducción de los materiales hasta las muestras de ensayo se ha realizado según lo indicado en el apartado 10.1.3 de la norma UNE EN 1744-1.

Con las fracciones del suelo, de la zahorra y del yeso triturado, preparados para ensayos químicos, se han fabricado en el laboratorio las siguientes mezclas:

- Suelo inicial + un 2% de yeso endurecido.
- Suelo inicial + un 4% de yeso endurecido.

- Zahorra inicial + un 2% de yeso endurecido.
- Zahorra inicial + un 4% de yeso endurecido.

### 4.4.2.3.4. Ensayos químicos

Sobre el suelo y zahorra tomados en la planta y antes de su preparación para los ensayos químicos se ha determinado:

- Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. UNE-EN 933-11:2009/AC: 2010.

Sobre las siguientes muestras, preparadas según el Apdo. 10.1.3 de la UNE EN 1744-1:

- El suelo inicial.
- El suelo inicial + 2% de yeso endurecido.
- El suelo inicial + 4% de yeso endurecido.
- La zahorra inicial.
- La zahorra inicial + 2% de yeso endurecido.
- La zahorra inicial + 4% de yeso endurecido.



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

Se han realizado las siguientes determinaciones químicas:

- Contenido de yeso en suelos. NLT 115/99.
- Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo. UNE 103201:1996 y UNE 103201:2003 ERRATUM.
- Determinación del contenido total en azufre. Apdo. 11 de UNE EN 1744-1.
- Determinación del contenido en sulfatos solubles en ácido. Apdo. 12 de UNE EN 1744-1.
- Determinación del contenido en sulfatos solubles en agua de los áridos reciclados. Apdo. 10.2 de UNE EN 1744-1.

### 4.5. Estudio de la acción del yeso en las características de los suelos y zahorras para su empleo en obras viarias

El Plan de trabajo que se ha desarrollado tiene como objetivo analizar cómo afecta distintas proporciones de yeso a las características de un suelo y una zahorra para su empleo en obras de carreteras y viales urbanos.

Se ha realizado un planteamiento similar al anteriormente indicado para los ensayos químicos:

- Se ha partido del mismo suelo y zahorra reciclados de RCD empleados en los ensayos químicos y al igual que en el apartado anterior,

- En el laboratorio se ha incrementado las proporciones de yeso,
- Se realizan ensayos sobre todas estas muestras,
- Y con los resultados obtenidos se investiga cómo afecta a los parámetros ensayados las distintas proporciones de yeso.
- Con lo obtenido en esta investigación, en su caso, se tendrán argumentos técnicos con los que poder proponer nuevos criterios de especificaciones para estos compuestos.

También se han ensayado estas muestras de suelo y zahorra tras su mezcla con cemento. Con ello se pretende estudiar cómo afecta a la estabilización con cemento la presencia de yesos en los áridos RCD, y a partir de los resultados obtenidos, en su caso, proponer nuevos límites de contenido en yesos para permitir su tratamiento como suelocemento o gravacemento.

El yeso que se ha empleado es el anteriormente definido y preparado en el laboratorio a partir de un yeso comercial, la única diferencia es que para este nuevo grupo de ensayos el yeso endurecido se ha triturado menos que para los ensayos químicos, preparando una fracción similar a los tamaños de yesos que se encuentran habitualmente en los áridos RCD.

De acuerdo con todo lo indicado el trabajo realizado ha consistido en:



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

### 4.5.1. Preparación de las muestras

Se ha partido del suelo y la zahorra iniciales tomadas en la planta de ARISTERRA (Málaga). En el laboratorio se ha preparado un yeso RCD similar al existente en los áridos RCD:

- Se ha partido de un saco de yeso comercial que se amasa con agua en el laboratorio y se deja fraguar y endurecer.
- Se ha triturado este yeso endurecido hasta conseguir un material de granulometría 0/8 mm.

En el laboratorio se han fabricado las siguientes muestras para estos materiales sin ligar con cemento:

- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
- Suelo inicial + 4% de yeso endurecido
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial + 4% de yeso endurecido

Además de las anteriores se han preparado las siguientes muestras de estos materiales ligados con cemento:

- Suelo inicial + 3% de cemento
- Suelo inicial + 3% de cemento + 2% de yeso endurecido
- Suelo inicial + 3% de cemento + 4% de yeso endurecido

- Zahorra inicial + 3% de cemento
- Zahorra inicial + 3% de cemento + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial + 3% de cemento + 4% de yeso endurecido

### 4.5.2. Ensayos

Los ensayos que se han realizado sobre estas muestras tienen como objetivo definir cómo influyen las distintas proporciones de yeso en las características mecánicas y estabilidad volumétrica del suelo y de la zahorra, sin y con, tratamiento con cemento.

Además se han analizado si estas afecciones se originan de una manera inmediata o si se producen más lentamente.

Se ha optado por un ensayo tipo envejecimiento acelerado, que nos pueda informar con rapidez de estas acciones.

Y por último se ha investigado cómo puede afectar a una carretera las alteraciones producidas por el yeso en un suelo o en una zahorra teniendo en cuenta en que unidades de obra van a ser colocados.

De acuerdo con todo ello el plan de ensayos ejecutado es el indicado a continuación:



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

### 4.5.2.1. Ensayos para identificar el suelo y la zahorra iniciales

Se han identificado el suelo y la zahorra inicial con los ensayos habituales solicitados por el PG-3 o normativa AOPJA para su empleo como materiales para carreteras.

Estos ensayos han sido:

#### a) Para el suelo

- UNE-EN 933-11:2009 y UNE-EN 933-11:2009/AC: 2010. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.
- UNE 103101:1995 Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
- UNE 103103:1994 Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.
- UNE 103104:1993 Determinación del límite plástico de un suelo.
- UNE 103204 Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico.

Los ensayos relativos a los contenidos de sulfatos, sales solubles e índices CBR se realizan en otros apartados de este trabajo.

#### b) Para la zahorra

- UNE-EN 933-11:2009 y UNE-EN 933-11:2009/AC:2010. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.
- UNE 103101:1995 Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
- UNE 103103:1994 Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.
- UNE 103104:1993 Determinación del límite plástico de un suelo.
- UNE-EN 933-8:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
- UNE-EN 933-3:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
- UNE 146130:2000 Coeficiente de limpieza.
- UNE-EN 1097-2:2010 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.

Los ensayos relativos a los contenidos de sulfatos, sales solubles e índices CBR se realizan en otros apartados de este trabajo.



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

### 4.5.2.2. Ensayos para determinar la evolución de las características mecánicas

Se han realizado estudios de evolución del índice CBR para los materiales sin ligar y de la evolución de la resistencia a compresión de los materiales ligados con cemento.

#### 4.5.2.2.1. Evolución del índice CBR

Sobre las siguientes muestras:

- Suelo inicial
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido

Se ha determinado:

- Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor modificado. UNE 103501:1994.
- Sobre cada una de ellas se confeccionará 12 probetas CBR (UNE 103502:1995) pero todas con las condiciones de compactación Proctor modificado, sobre las que se realizarán los siguientes ensayos:
- Se ha determinado el índice CBR con cadencia mensual durante un año.
- La sobrecarga empleada ha sido la mínima especificada por la norma de ensayo: 4.54 kg.

#### 4.5.2.2.2. Evolución de la resistencia a compresión

Sobre las siguientes muestras:

- Suelo inicial + 3% de cemento
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido + 3% de cemento
- Suelo inicial + 4% de yeso endurecido + 3% de cemento
- Zahorra inicial + 3% de cemento
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido + 3% de cemento
- Zahorra inicial + 4% de yeso endurecido + 3% de cemento



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

Sobre cada una de estas muestras se han preparado 12 probetas con las condiciones Proctor modificado según lo indicado en:

- Compactación con martillo vibrante de materiales granulares tratados. NLT 310/90. Estas probetas se han ensayado con frecuencia mensual durante un año, determinando:
- Resistencia a compresión simple de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos. NLT 305/90.

Las condiciones de conservación han sido en bolsas en cámara húmeda ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y más de 95% de humedad).

### 4.5.2.3. Ensayos para determinar la evolución de la estabilidad volumétrica

Los ensayos realizados para determinar la evolución de la estabilidad volumétrica de estos materiales son:

a) A partir de los ensayos de evolución de las características mecánicas

Se ha determinado:

- Las variaciones de volumen de todas las probetas CBR definidas en 3.2.2.1.1. Determinando la expansión o retracción en el molde.

b) Ensayos en edómetro

Sobre las siguientes muestras:

- Suelo inicial
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido

Se ha determinado:

- Ensayo del hinchamiento libre de un suelo en edómetro. UNE 103601:1996.

Estas muestras se han mantenido en las bancadas edométricas un mínimo de tres meses.

c) Ensayos de control acelerado

En el caso de que se produzcan variaciones de volumen en el tiempo es necesario contar con un ensayo que informe de ello lo más pronto posible.



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

El ensayo empleado para ello ha sido el establecido en la norma:

- UNE EN 13286-49:2008. Mezclas de áridos sin ligante y con conglomerante hidráulico: Ensayo de hinchamiento acelerado para suelos tratados con cal o con conglomerante hidráulico.

Este ensayo se ha ejecutado sobre los áridos sin ligar y tratados con cemento, las muestras ensayadas han sido:

- Los materiales sin ligar con cemento
  - Suelo inicial
  - Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
  - Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
  - Zahorra inicial
  - Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido
  - Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido
- Los materiales ligados con cemento
  - Suelo inicial + 3% de cemento
  - Suelo inicial + 3% de cemento + 2% de yeso endurecido
  - Suelo inicial + 3% de cemento + 2% de yeso endurecido
  - Zahorra inicial+ 3% de cemento
  - Zahorra inicial + 3% de cemento + 2% de yeso endurecido

- Zahorra inicial + 3% de cemento + 2% de yeso endurecido

El ensayo consiste en la preparación de probetas a partir de una compactación normalizada (estática con doble pistón en tres fases), estas probetas, tras un curado inicial en cámara húmeda, se someten a un envejecimiento acelerado consistente en ser sumergidas 7 días en agua a 40°C, transcurridos este tiempo las probetas son ensayadas determinándose si se ha producido variación en su volumen.

### 4.5.2.4. Ensayos para determinar la posible acción de las distintas proporciones de yeso en el suelo y zahorra en una carretera o vial urbano

Para que se produzcan reacciones de expansión de los yesos en los suelos y zahorras, como podría ser por la formación de la etringita, es necesario que además de la presencia de los yesos concurren otras variables como son agua y suficiente temperatura.

Es por ello que las patologías por la presencia de yesos principalmente se han producido cuando estos se encontraban en las capas más superficiales del terraplén y justo bajo las de rodadura. En estas capas siempre hay presencia de agua y calor,



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

sobre todo si el firme es una capa asfáltica.

De acuerdo con ello, es posible que con importantes cantidades de yesos en los suelos en las capas del terraplén, si hay suficientes barreras al agua y si estas capas están muy distantes de la rodadura y por tanto no se sobrecalientan, no se produzcan reacciones con los yesos y con ello tampoco variaciones de volumen.

Para este estudio se ha desarrollado el siguiente plan de trabajo:

### a) Preparación de probetas mixtas

Se han preparado probetas cilíndricas de 15 X 30 cm con tres capas de distintos materiales, que han sido:

- Capa base/capa intermedia/capa rodadura

La capa base ha estado compuesta de, aproximadamente, 18 centímetros de suelo reciclado con distintas proporciones de yesos, la capa intermedia ha consistido en, aproximadamente, 8 centímetros de la zahorra reciclada con distintas proporciones de yesos y la rodadura ha sido confeccionada con una capa de 4 centímetros de una mezcla bituminosa tipo hormigón bituminoso AC 16 SURF S.

El yeso que se ha empleado ha sido el definido en 5.1.

Las combinaciones de los materiales de las capas han sido:

- Suelo inicial / zahorra inicial / MBC
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido / zahorra inicial / MBC
- Suelo inicial + 4% de yeso endurecido / zahorra inicial / MBC
- Suelo inicial / zahorra inicial + 2% de yeso endurecido / MBC
- Suelo inicial / zahorra inicial + 4% de yeso endurecido / MBC

Todas las capas se han compactado con martillo vibrante de acuerdo con la norma:

- Compactación con martillo vibrante de materiales granulares tratados. NLT 310/90

Se han fabricado cuatro probetas de cada una de estas cinco combinaciones, que se han conservado durante seis meses según los siguientes ambientes:

- Una al aire libre (en Málaga capital) en el exterior del laboratorio, (secas al aire).
- Una al aire libre (en Málaga capital) en el exterior del laboratorio pero sumergida en agua (saturadas en piscina en el exterior).
- Una en estufa de laboratorio a 40°C, (secas con calor).
- Una sumergidas en agua en estufa a 40°C (saturadas y con calor).



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

Transcurridos los primeros seis meses, se han alternado, con cadencia semanal, durante otros seis meses, tanto las probetas a temperatura ambiente como las de estufa, de estado seco a saturadas y viceversa.

b) Ensayo de las probetas mixtas

Se han determinado las variaciones de volumen.

c) Análisis de los resultados

Con esta investigación se analizará como los yesos pueden actuar en función de:

- Su proporción.
- Las condiciones medioambientales.
- Su posición en la carretera o vial urbano.

## 4.6. Identificación del suelo y de la zahorra

### 4.6.1. Identificación del suelo

En el anejo de este informe se adjunta el informe de identificación de este suelo. A continuación, en los siguientes apartados, se indica algunos de estos resultados:

#### 4.6.1.1. Composición

Los áridos gruesos de este suelo proceden en más de un 95% de trituración de hormigón, el contenido de cerámicos es inferior al 2%.

#### 4.6.1.2. Granulometría

En la siguiente tabla (Tabla 17) se resume la granulometría del suelo:

GRANULOMETRÍA. % PASA TAMICES UNE					
40	25	10	5	2	0,08
100	97,4	77,6	59,6	43,1	7,8

Tabla 17. Granulometría del suelo RCD

#### 4.6.1.3. Plasticidad

El suelo es No Plástico



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.6.2. Identificación de la zahorra

En el anejo de este informe se adjunta el informe de identificación de este suelo. A continuación, en los siguientes apartados, se indica algunos de estos resultados:

### 4.6.2.1. Composición

Los áridos gruesos de este suelo proceden en más de un 95% de trituración de hormigón, el contenido de cerámicos es inferior al 2%.

### 4.6.2.2. Granulometría

En la siguiente tabla se resume la granulometría del suelo:

GRANULOMETRÍA. % PASA TAMICES UNE					
40	22	8	4	2	0,063
100	95,9	69,4	52,6	41,4	4,1

Tabla 18. Granulometría de la zahorra RCD

### 4.6.2.3. Parámetros físico mecánicos

El resto de los parámetros ensayados han sido:

- Equivalente de arena: 62
- Índice de lajas: 8%
- Partículas fracturadas: 100%
- Coeficiente de desgaste los Ángeles: 37,06

## 4.7. Resultados ensayos químicos

### 4.7.1. Consideraciones previas

El objetivo del presente trabajo es analizar si se pueden elevar las especificaciones de los contenidos de compuestos de azufre de los áridos RCD para facilitar su reciclado, siempre y cuando ello no afecte a la calidad de la obra.

Es conocido que no todos los compuestos de azufre presentes en un árido van a reaccionar provocando variaciones de volumen, por lo que interesará saber qué proporción de los compuestos totales son susceptibles de reacción.

Así por ejemplo en el caso de las estabilizaciones con



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

conglomerantes hidráulicos de los suelos naturales se legisla, principalmente, sobre los compuestos de azufre solubles en agua.

Pero, como ya se ha mencionado, la normativa vigente establece diferentes tipos de ensayo para determinar los compuestos de azufre según el empleo de los áridos.

Además hay que tener presente que los compuestos de azufre, mayoritariamente presentes en los áridos RCD, son diferentes a los existentes en los áridos naturales, estos compuestos proceden principalmente de los reguladores de fraguado del hormigón y mortero de cemento y de los derivados de los yesos y escayolas comerciales.

Pero si el objetivo es permitir una mayor proporción de compuestos de azufre, necesariamente se debe de contar, con una serie coordinada de ensayos físicos, mecánicos y químicos, cuyo objeto sea determinar a partir de que contenidos de compuestos de azufre (determinados químicamente) se pueden producir reacciones de cambio de volumen (determinadas con los ensayos físicos y mecánicos).

De acuerdo con todo lo expuesto, para permitir, con la seguridad de que no habrá patologías, modificaciones de los límites

establecidos para los contenidos de compuestos de azufre habrá que:

- Decidir de las normativas químicas vigentes las más adecuadas para estas determinaciones.
- Determinar contenidos totales de compuestos de azufre.
- Determinar contenidos de compuestos de azufre susceptibles de reacción.
- Contar con ensayos de tipo físico o mecánico que determine si se puede o no producir cambio de volumen.

### 4.7.2. Normas de ensayo para determinar los contenidos de compuestos de azufre

A continuación se resume los procedimientos de ensayo, para determinar compuestos de azufre, de las normas indicadas por los Pliegos Generales para permitir el empleo de un árido en las obras de construcción.

#### 4.7.2.1. NLT 115/99. Contenido de yesos en suelo

Primeramente se determina el contenido total de sulfatos solubles en una disolución ácida y posteriormente el contenido parcial de sulfatos no procedentes de yesos ( $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que son los



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

solubles en acetona, el contenido de yesos es el resultado de restar los totales menos los parciales.

### 4.7.2.2. UNE 103201. 1996 y 103201:2003 ERRATUM.

#### Contenido cuantitativo en sulfatos solubles

Esta es la norma indicada en el artículo 512 del PG-3 para los suelos estabilizados con cemento determina el contenido de sulfatos solubles en agua.

El PG-3 entiende que sólo los compuestos de azufre solubles en agua son susceptibles de reacción.

### 4.7.2.3. UNE EN 1744-1:2010+A1. Análisis químico de los áridos

En esta norma están recogidos varios métodos ensayo para determinar distintos tipos de compuestos de azufre:

- Compuestos totales de azufre, el procedimiento para este ensayo se encuentra en el apartado 11.
  - Primeramente se trata la muestra con peróxido de hidrógeno y ácido clorhídrico para transformar a todos los compuestos de azufre (sulfatos, sulfitos o sulfuros) en sulfatos y posteriormente se determinan estos sulfatos en medio ácido.
- Sulfatos solubles en ácido, el procedimiento para este ensayo se encuentra en el apartado 12.

- Se determina el contenido de sulfatos solubles en medio ácido.
- Sulfuros solubles en ácido, el procedimiento para este ensayo se encuentra en el apartado 13.
  - La muestra se trata con ácido clorhídrico en medio reductor. Los sulfuros transformados en sulfuro de hidrógeno se hacen pasar por una disolución amoniacal de sulfato de cinc, el sulfuro de cinc precipitado se determina por iodometría.
- Sulfatos solubles en agua, el procedimiento para este ensayo se encuentra en el apartado 10.
  - Se determina el contenido de sulfatos solubles en agua.
- Sulfatos solubles en agua en áridos reciclados, el procedimiento para este ensayo se encuentra en el apartado 10.2. La Norma define este método como específico para los áridos RCD
  - Se determina, por espectrometría, el contenido en sulfatos solubles en agua caliente.

En el principio del método de este apartado se indica que lo que se determina son los “sulfatos activos” (por ejemplo polvo de yeso) que son fuente potencial de fallos en el árido.

Los métodos de ensayo de esta norma UNE EN 1744-1 son los más referidos en los Pliegos de Especificaciones como son:



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

- En el caso del PG-3, para los áridos cuando se van a emplear como:
  - Zahorras.
  - Suelocemento y gravacemento
  - Hormigones de pavimento, magros, etc.
- En el caso de las Recomendaciones de AOPJA, para los áridos cuando se van a emplear como:
  - Zahorras.
  - Gravacemento
- En la EHE para áridos para confeccionar hormigones.
- En el caso de las normas armonizadas para el mercado CE de los áridos para
  - Hormigón la UNE EN 12620:2003+A1:2009
  - Capas granulares UNE EN 13242:2003+A1:2008

## 4.7.2.4. NLT 114/99 Sales solubles

Esta norma determina las sales solubles en agua de un suelo o árido.

Se han determinado las sales solubles de las muestras para con ello determinar que proporción de yeso RCD se solubiliza en agua.

## 4.7.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos son los indicados en la siguiente tabla y gráficas:

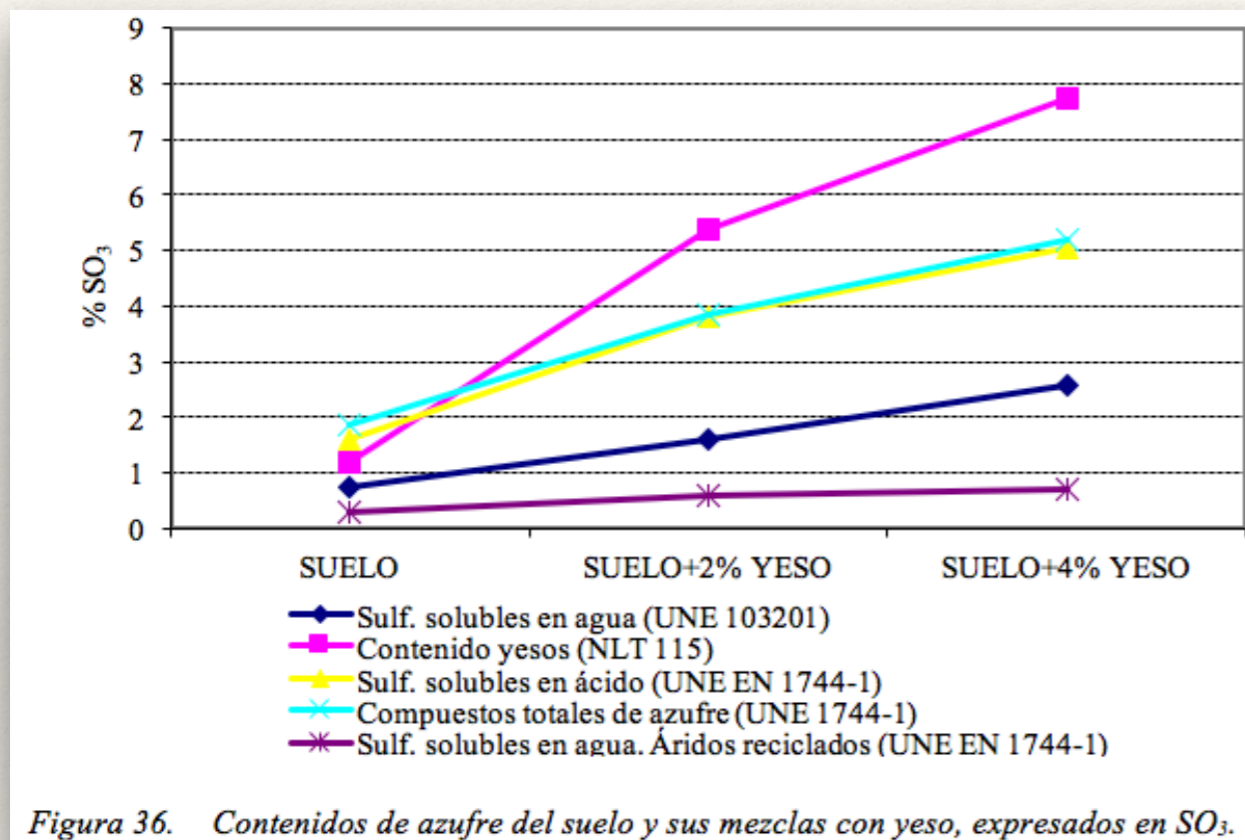
MUESTRA	Sulf. sol. en agua	Contenido yesos	Sulf. sol. en ácido	Comp. totales de azufre	Sulf. sol. en agua. Ár. reciclados	Sales solubles
	% SO <sub>3</sub>	% SO <sub>4</sub> Ca.2H <sub>2</sub> O	% SO <sub>3</sub>	% SO <sub>3</sub>	%SO <sub>4</sub>	%
	UNE 103201	NLT 115	UNE EN 1744-1	UNE EN 1744-1	UNE EN 1744-1	NLT 114
SUELO	0,75	2,54	1,59	1,88	0,37	1,00
SUELO + 2% YESO	1,59	11,60	3,80	3,83	0,71	1,11
SUELO + 4% YESO	2,57	16,59	5,04	5,20	0,83	2,16
ZAHORRA	0,11	0,35	0,59	0,63	0,07	0,27
ZAHORRA + 2% YESO	1,03	8,79	2,62	2,71	0,36	1,06
ZAHORRA + 4% YESO	2,42	17,20	4,32	4,33	0,80	1,92

Tabla 19. Resultados ensayos químicos



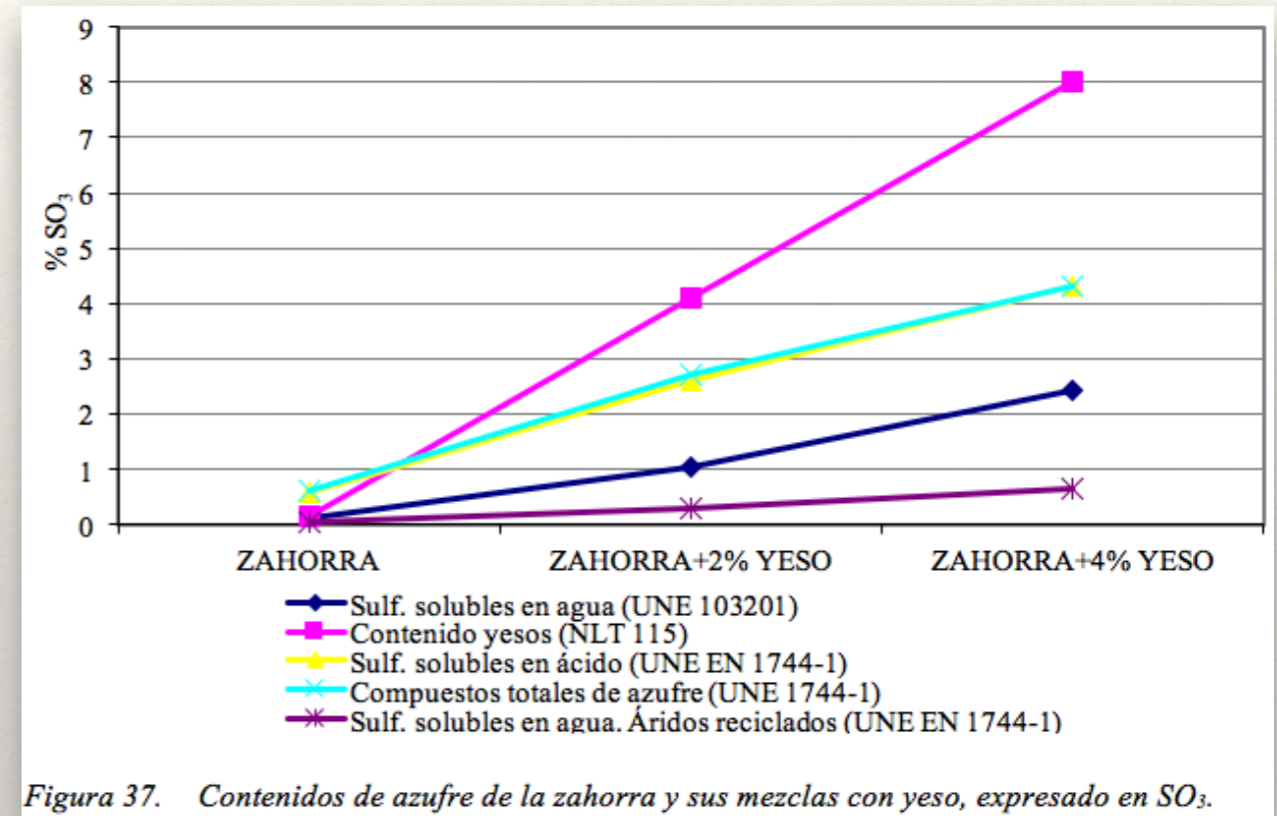
# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

En las Figura 36 y 37 se indican los resultados de los contenidos en compuestos de azufre:



## 4.7.4. Análisis de los resultados

Atendiendo a los resultados obtenidos, el método de ensayo NLT 115 no es válido para la determinación de los contenidos de azufre procedentes de yeso comercial.



A continuación se expone el análisis de estos resultados:

- Las normas empleadas detectan el incremento porcentual del yeso RCD.
- El yeso RCD es muy soluble en ácido, los resultados de los compuestos totales de azufre y el de los sulfatos solubles en ácido son prácticamente los mismos.
- La proporción de sulfatos que se solubiliza en agua según la norma UNE 103201 son:
  - Del 40 al 49% en el caso del suelo, con un valor medio del 44%



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

- Del 18 al 56% en el caso de la zahorra, con un valor medio del 37%
- La proporción de sulfatos que se solubiliza en agua según la norma UNE EN 1744-1, Apartado 10.2 son:
  - Del 16 al 20% en el caso del suelo, con un valor medio del 18%
  - Del 11 al 18% en el caso de la zahorra, con un valor medio del 14%

### 4.7.5. Propuesta de métodos de ensayo

#### 4.7.5.1. Métodos de ensayos

El análisis realizado a los métodos de ensayo concluye que, excepto el método de la NLT 115, cualquiera de los otros cuatro métodos es válido para determinar el contenido de azufre en sus distintas formas.

Pero el objetivo de este trabajo es definir ensayos independientemente del empleo del áridos RCD, y además tener la certeza de conocer su posible agresividad.

Si además se tiene en cuenta la obligación de ajustarse a la normativa armonizada europea, se propone como ensayos a realizar a los áridos RCD para fijar especificaciones:

- Determinar el contenido de compuestos totales de azufre, según UNE EN 1744-1 apartado 11.
- Determinar el contenido de sulfatos solubles en agua en áridos reciclados, según UNE EN 1744-1 apartado 10.2.

#### 4.7.5.2. Preparación de la muestra de ensayo

Otra de las diferencias a tener en cuenta entre los áridos naturales y los RCD es la heterogeneidad de sus componentes.

En un suelo o zahorra natural la química de sus partículas es muy similar, sin embargo los RCD se componen de materiales de diferente composición química: áridos, hormigones, morteros, cerámicos, yesos, etc.

Esta diferencia de composición requiere definir la cantidad mínima de muestra necesaria para que se pueda considerar representativa del acopio que se analiza, lo que ya se recoge en el apartado 10.2 de la norma UNE EN 1744-1. En este apartado se especifica que se debe partir de una masa mínima de muestra, obtenida según la norma UNE EN 932-1, de 3000 gramos, y que toda ella debe triturarse hasta pasar por el tamiz 4 mm.



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.7.6. Sales solubles

La proporción de sales solubles, respecto al contenido total de compuestos de azufre ha sido:

- Del 29 al 53% en el caso del suelo, con un valor medio del 41%
- Del 39 al 44% en el caso de la zahorra, con un valor medio del 42%

## 4.8. Evolución de las características mecánicas

### 4.8.1. Ensayos CBR

#### 4.8.1.1. Criterio de ensayos

Como se indicó en el apartado 4.5.2.2.1 se han realizado ensayos para analizar cómo puede afectar la presencia de yesos a la capacidad soporte de un suelo y de una zahorra durante un año.

Se han ensayado las siguientes muestras:

- Suelo inicial
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido

- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido

Sobre cada una de ellas se han confeccionado 12 probetas CBR (UNE 103502:1995), todas con las mismas condiciones de compactación a las del Proctor modificado, determinándose:

- El índice CBR con cadencia mensual durante un año, empleándose como sobrecarga la mínima especificada por la norma de ensayo: 4.54 kg.

Los resultados obtenidos son los indicados en la siguiente tabla:

#### 4.8.1.2. Resultados Índices CBR

Los resultados obtenidos se indican en las siguientes tablas y gráficas:



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.8.1.2.1. Suelo

EDAD	SUELO INICIAL	SUELO INICIAL + 2% YESOS	SUELO INICIAL + 4% YESOS
	ÍNDICE CBR	ÍNDICE CBR	ÍNDICE CBR
4 DIAS	60,7	123,4	78,6
1 MES	142,2	124,9	88,2
2 MES	139,0	143,1	96,7
3 MES	151,7	131,9	81,9
4 MES	145,8	126,6	82,6
5 MES	158,0	129,7	77,2
6 MES	153,6	122,9	99,5
7 MES	153,9	134,6	102,8
8 MES	144,5	139,4	95,6
9 MES	157,4	135,6	99,7
10 MES	154,1	137,4	105,6
11 MES	161,2	134,9	99,4
12 MES	158,1	130,5	96,3

Tabla 20. Evolución de los índices CBR del suelo y sus mezclas con yesos

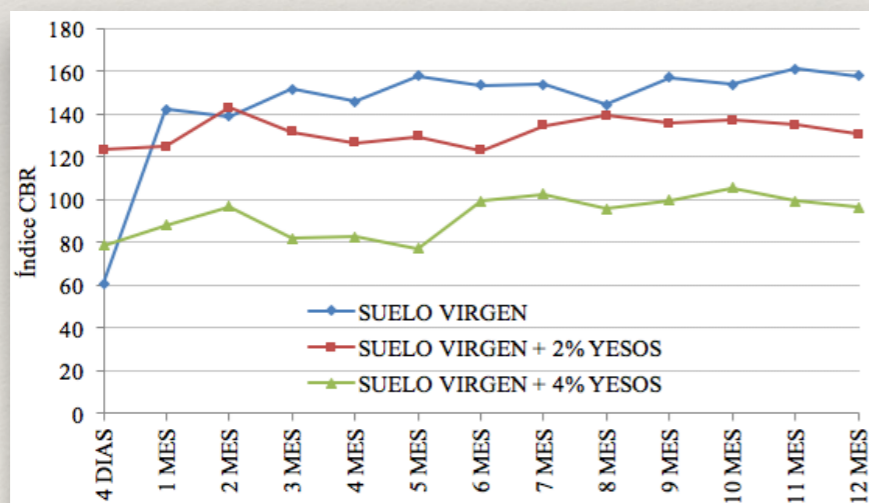


Figura 38. Evolución de los índices CBR del suelo y sus mezclas con yesos.

## 4.8.1.2.2. Zahorra

EDAD	ZAHORRA INICIAL	ZAHORRA INICIAL + 2% YESOS	ZAHORRA INICIAL + 4% YESOS
	ÍNDICE CBR	ÍNDICE CBR	ÍNDICE CBR
4 DIAS	131,5	223	235,5
1 MES	126,9	199,9	188,6
2 MES	149,5	186,9	206,9
3 MES	157,9	217,9	187,6
4 MES	253,8	222,9	199,4
5 MES	268,9	207,9	213,0
6 MES	244,6	221,6	188,7
7 MES	251,6	231,4	196,4
8 MES	240,4	236,1	208,4
9 MES	226,0	232,8	215,9
10 MES	234,2	229,4	222,7
11 MES	224,6	231,1	217,1
12 MES	232,0	240,1	210,0

Tabla 21. Evolución de los índices CBR de la zahorra y sus mezclas con yesos

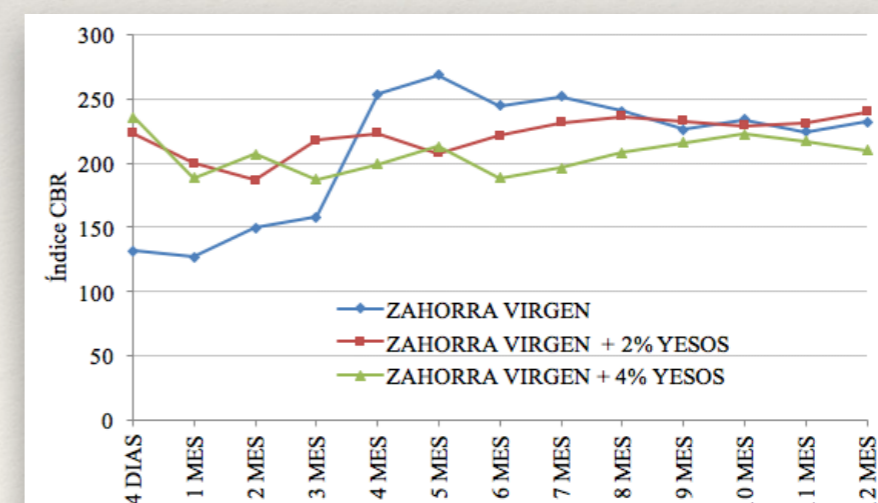


Figura 39. Evolución de los índices CBR de la zahorra y sus mezclas con yesos.



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

### 4.8.1.3. Análisis de los resultados de los Índices CBR

Inicialmente, tanto para el suelo como para la zahorra, los índices CBR de las muestras con más proporción de yesos es superior que el de las muestras sin yesos añadidos.

Una explicación de ello puede ser que se haya producido efectos de fraguado de los yesos tras su trituración para fabricar las probetas.

Posteriormente se aprecia un efecto de autoaglomeración en el suelo y zahorra sin yesos añadidos, que incluso consigue que los índices CBR superen, a partir de los tres meses, a los de las muestras con yesos.

En el caso de los materiales con yesos añadidos los valores de los índices CBR oscilan, pero ni mejoran ni empeoran en el tiempo. Sin embargo, como se ha comentado, el suelo y zahorra sin yeso añadido incrementa su capacidad soporte durante, aproximadamente, los tres primeros meses y a partir de entonces, aunque con oscilaciones, también se mantiene su capacidad soporte.

A partir de los tres meses, ya estabilizados todos los índices CBR, en el caso del suelo se observa que al aumentar la dotación de yeso disminuye el índice CBR.

En el caso de la zahorra, a partir de los tres primeros meses y hasta los ocho meses los índices CBR disminuyen al incrementar el contenido de yeso, pero a partir del octavo mes los tres materiales presentan similares capacidades soporte.

Como conclusión de este ensayo:

- Los índices CBR que se han obtenido, y sobre todo en el caso del suelo, son muy elevados.
- En el caso del suelo puede indicarse que el exceso de yeso rebaja la capacidad soporte del material, lo que no se ha visto tan claro con la zahorra.
- El exceso de yesos anulan el efecto de autoaglomeración de los RCD pero a cambio presenta un efecto de fraguado inicial.

En conclusión el exceso de yeso no afecta significativamente a la capacidad soporte de un suelo o zahorra RCD.



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.8.2. Evolución de la resistencia a compresión

### 4.8.2.1. Criterio de ensayos

Se investiga cómo puede afectar un exceso de yeso a materiales RCD ligados con cemento.

Con el anterior estudio del CBR se analizan las especificaciones de los contenidos de sulfatos de los áridos RCD para su uso como suelos o zahorras, en este caso se trata del estudio de la acción de los yesos en el empleo de los RCD como suelos estabilizados, suelocemento e incluso gravacemento.

Los ensayos han consistido en determinar cómo evolucionan durante un año probetas del suelo y de la zahorra RCD, y de estos con incorporación de yeso, mezcladas con un 3% de cemento

Se han ensayado las siguientes muestras:

- Suelo inicial + 3% de cemento
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido + 3% de cemento
- Suelo inicial + 4% de yeso endurecido + 3% de cemento
- Zahorra inicial + 3% de cemento
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido + 3% de cemento

- Zahorra inicial + 4% de yeso endurecido + 3% de cemento

### 4.8.2.2. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se indican en las siguientes tablas y gráficas:

#### 4.8.2.2.1. Suelo

EDAD	SUELO INICIAL 3% CEMENTO	SUELO VIRGEN 3% CEMENTO + 2% YESOS	SUELO INICIAL 3% CEMENTO + 4% YESOS
ROTURA	MPa	MPa	MPa
7 DÍAS	3,7	3,8	3,8
1 MES	4,9	5,1	4,5
2 MES	5,3	5,6	4,7
3 MES	6,0	5,9	5,0
4 MES	6,3	6,2	5,3
5 MES	6,3	6,3	5,2
6 MES	6,2	6,3	5,3
7 MES	6,5	6,4	5,6
8 MES	6,4	6,6	5,6
9 MES	6,9	7,3	5,9
10 MES	7,3	7,4	6,0
11 MES	7,1	7,2	6,1
12 MES	7,1	7,3	6,5

Tabla 22. Evolución de la resistencia a compresión del suelo y sus mezclas con yesos



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

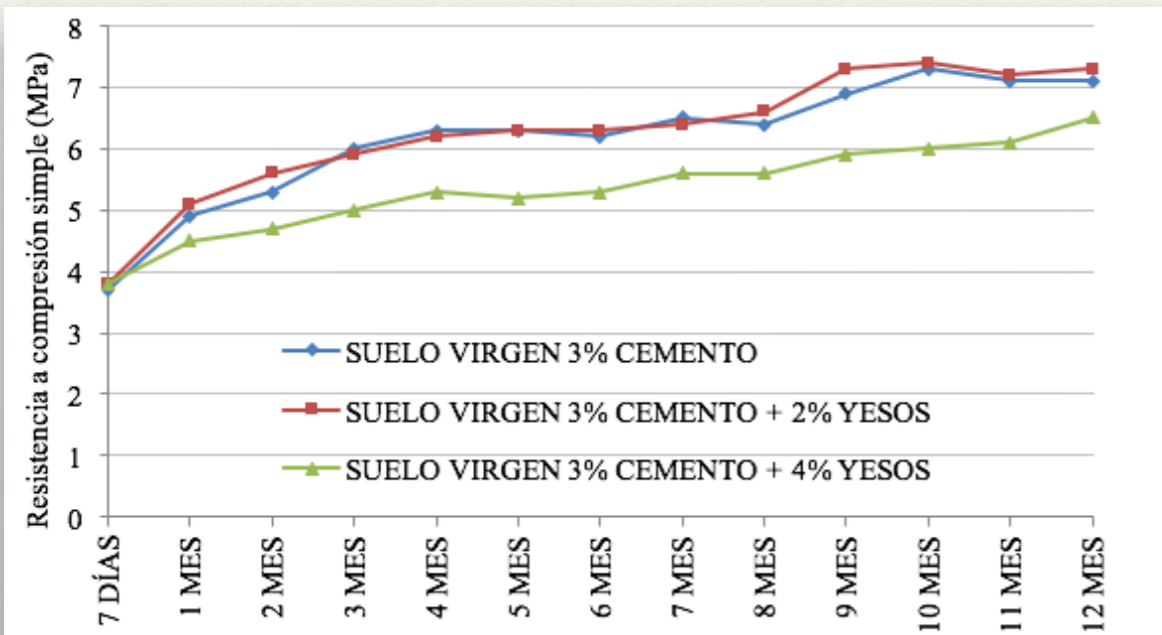


Figura 40. Evolución de la resistencia a compresión del suelo y sus mezclas con yesos

## 4.8.2.2.2. Zahorra

EDAD	ZAHORRA INICIAL + 3% CEMENTO	ZAHORRA INICIAL + 3% CEMENTO + 2% YESOS	ZAHORRA INICIAL + 3% CEMENTO + 4% YESOS
ROTURA	MPa	MPa	MPa
7 DÍAS	3,7	3,7	3,4
1 MES	4,9	4,1	3,9
2 MES	5,4	4,6	4,6
3 MES	5,8	5,0	5,3
4 MES	6,1	5,5	5,7
5 MES	5,9	5,4	5,3
6 MES	6,0	5,2	5,2
7 MES	6,2	5,6	5,3
8 MES	6,2	5,7	5,4
9 MES	6,5	5,6	5,4
10 MES	6,8	5,8	5,5
11 MES	7,3	6,0	5,4
12 MES	7,5	6,2	5,8

Tabla 23. Evolución de la resistencia a compresión de la zahorra y sus mezclas con yesos

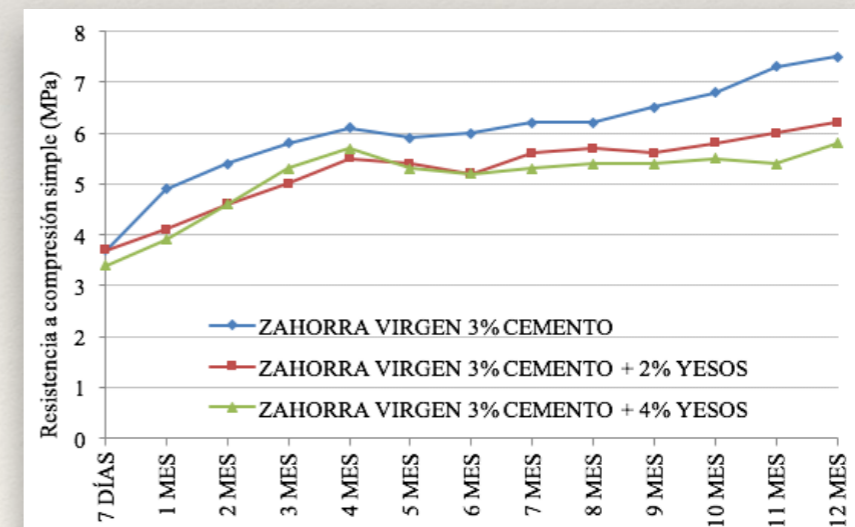


Figura 41. Evolución de la resistencia a compresión de la zahorra y sus mezclas con yesos



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

### 4.8.2.3. Análisis de los resultados de las resistencias a compresión

La incorporación de yesos, aunque muy escasamente, rebaja la resistencia a compresión de este suelo y zahorra tratados con cemento.

En el caso del suelo, tanto para el inicial como los mezclados con yesos, se produce un crecimiento de resistencia hasta los cuatro meses a partir de los cuales el incremento de resistencia es muy leve.

Con este suelo prácticamente se obtiene las mismas resistencias con el inicial y con la incorporación de un 2% de yeso, y ya con la mezcla de un 4% de yeso se pierde, aproximadamente, 1 MPa de resistencia respecto a los otros dos para todas las edades.

En el caso de la zahorra, al igual que con el suelo, el incremento de resistencias se produce hasta el cuarto mes, a partir de esta edad se estabiliza esta propiedad. Con este material las resistencias con el 2% y 4% de yeso añadido son prácticamente las mismas. La zahorra inicial presenta una resistencia superior en el entorno de 1 MPa a las otras dos muestras para todas las edades.

La conclusión para este ensayo es muy similar a lo que se obtuvo con los CBR:

- La incorporación de dotaciones del 2% y 4% de yesos a un suelo y a una zahorra tratadas con un 3% de cemento suponen una muy ligera pérdida de resistencia a compresión.
- Con estos materiales, con una dotación de cemento del 3%, se han obtenido resistencias en el entorno de lo solicitado para las gravacimientos.

### 4.9. Conclusiones de la evolución de las características mecánicas

Los resultados obtenidos de los ensayos efectuados indican que la incorporación de un 2 y 4% de yesos RCD a un suelo y a una zahorra reciclados prácticamente no afecta a la evolución de las características mecánicas de estos materiales.

Lo mismo puede indicarse para estos materiales tratados con cemento.

Por lo tanto se puede concluir que, a este suelo y zahorra reciclados, la incorporación de hasta un 4% de yesos no le afecta a sus propiedades de capacidad soporte cuando no están ligados ni a su resistencia a compresión cuando son estabilizados con cemento.



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.10. Estabilidad de volumen

Como se ha indicado en el apartado 4.5.2.3, se ha determinado las posibles variaciones de volumen en el suelo y zahorra provocado por la adición de yesos según los siguientes ensayos:

- Sobre los materiales sin ligar con cemento:
  - A partir de los hinchamientos CBR.
  - Con ensayos edométricos manteniendo las muestras seis meses en las células de ensayo.
  - Con el ensayo de envejecimiento acelerado definido en UNE EN 12386-49.
- Sobre los materiales ligados con cemento:
  - Con el ensayo de envejecimiento acelerado definido en UNE EN 12386-49.

EDAD	SUELO INICIAL	SUELO INICIAL + 2% YESOS	SUELO INICIAL + 4% YESOS
	% HINCH.	% HINCH.	% HINCH.
4 DIAS	0,05	-0,02	-0,11
1 MES	0,04	-0,08	-0,03
2 MES	0,19	-0,04	-0,5
3 MES	-0,04	-0,21	-0,16
4 MES	-0,15	-0,11	-0,2
5 MES	0,11	-0,31	-0,02
6 MES	-0,08	-0,26	-0,26
7 MES	0,19	-0,34	-0,17
8 MES	-0,06	-0,25	-0,11
9 MES	-0,07	-0,14	-0,16
10 MES	-0,09	-0,29	-0,01
11 MES	-0,11	-0,2	-0,26
12 MES	-0,02	-0,15	-0,05

Tabla 24. Evolución de los hinchamientos CBR del suelo y sus mezclas con yesos

### 4.10.1. Estabilidad de volumen de las muestras sin ligar con cemento

#### 4.10.1.1 Hinchamientos CBR

##### 4.10.1.1.1 Suelo

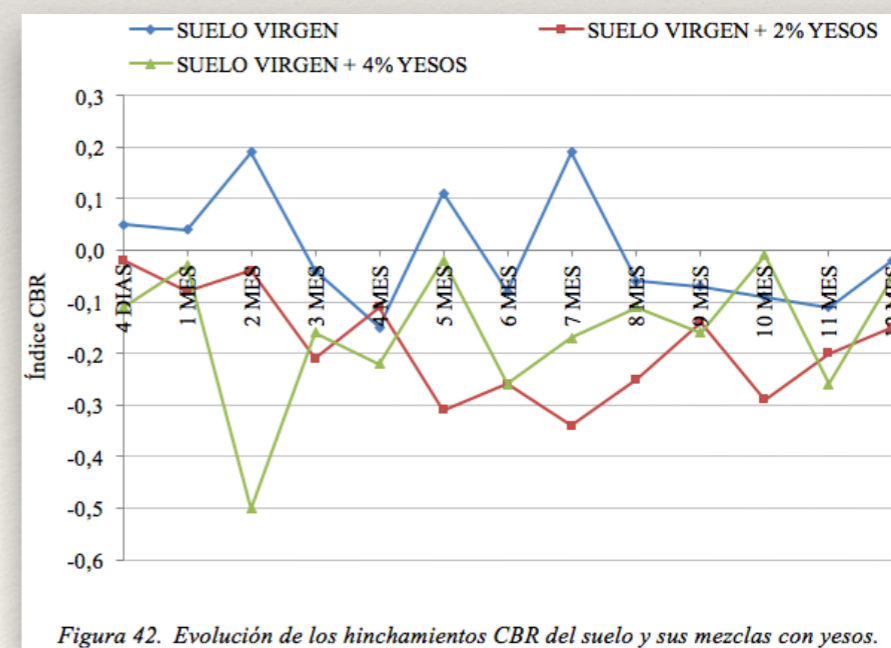


Figura 42. Evolución de los hinchamientos CBR del suelo y sus mezclas con yesos.



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.10.1.1.2. Zahorra

EDAD	ZAHORRA INICIAL	ZAHORRA INICIAL + 2% YESOS	ZAHORRA INICIAL + 4% YESOS
	% HINCH.	% HINCH.	% HINCH.
4 DIAS	-0,10	-0,05	-0,14
1 MES	-0,36	-0,22	-0,16
2 MES	-0,21	-0,16	-0,21
3 MES	-0,33	-0,1	0,11
4 MES	-0,49	-0,31	-0,3
5 MES	-0,64	-0,36	-0,24
6 MES	-0,54	-0,19	-0,05
7 MES	-0,71	-0,26	-0,16
8 MES	-0,4	-0,19	-0,05
9 MES	-0,61	-0,47	-0,22
10 MES	-0,54	-0,44	-0,13
11 MES	-0,44	-0,35	-0,22
12 MES	-0,40	-0,30	-0,20

Tabla 25. Evolución de los hinchamientos CBR de la zahorra y sus mezclas con yesos

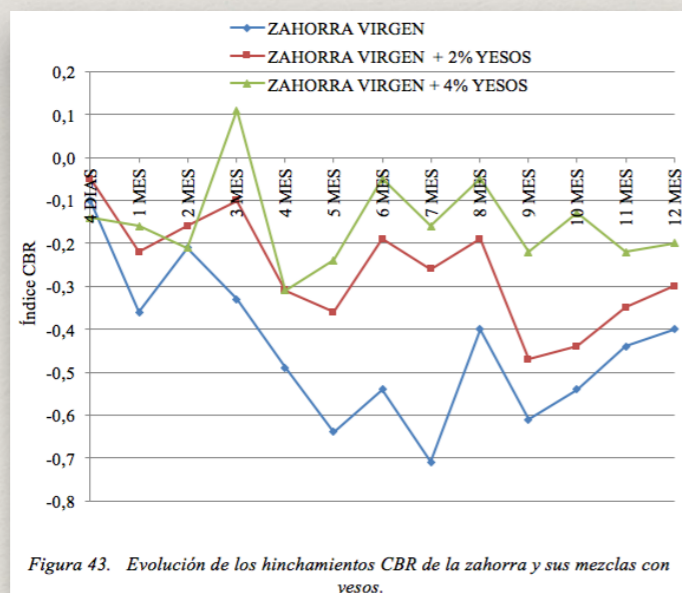


Figura 43. Evolución de los hinchamientos CBR de la zahorra y sus mezclas con yesos.

## 4.10.1.2. Análisis de los resultados de los hinchamientos CBR

No se han producido hinchamientos CBR por haber añadido yesos en exceso.

En el caso del suelo sin añadido de yesos prácticamente no se ha producido variación de volumen, cuando se le añade yesos se producen asientos, con oscilaciones, similares para el 2 y el 4%.

Con la zahorra los resultados han sido diferentes que para el suelo, la muestra sin yesos añadidos ha experimentado una contracción superior al de las muestras mezcladas con yesos, contracción que disminuye según se incrementa el porcentaje de yesos añadidos, así es la muestra con el 4% de yesos la que menos contrae.

Como conclusión, para “este suelo y esta zahorra” de RCD no se produce, durante un año, variaciones de volumen importantes al ser mezcladas con un 2 y un 4% de yeso.



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.10.1.3. Estabilidad de volumen ensayos edométricos

Como se ha indicado en el apartado 4.5.2.3. se ha realizado ensayo edométricos sobre las siguientes muestras:

- Suelo inicial
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
- Suelo inicial + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido
- Zahorra inicial + 2% de yeso endurecido

Se han determinado las modificaciones de volumen que se han producido manteniendo las muestras tres meses en sus bancadas.

La determinación de la variación de volumen se ha realizado de acuerdo con lo indicado en la norma UNE 103601:1996.

### 4.10.1.3.1. Resultados obtenidos y análisis

- Suelo

Datos de la probeta	Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )
Suelo inicial	2,18	2,02
Suelo inicial + 2% Yeso añadido	2,14	1,97
Suelo inicial + 4% Yeso añadido	2,18	1,98

Tabla 26. Datos de las probetas de suelo para edómetro

Las variaciones de volumen se indican en la siguiente gráfica:

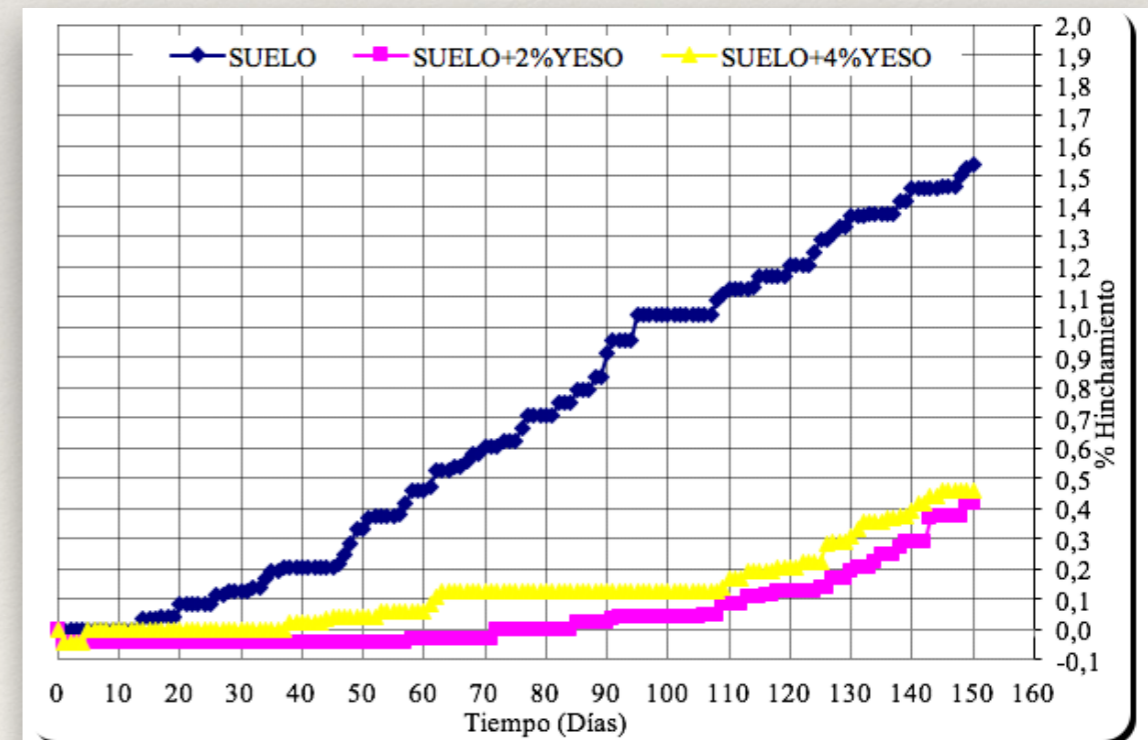


Figura 44. Hinchamiento libre del suelo inicial y sus mezclas con el 2 y 4% de yeso en edómetro durante tres meses



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

- Zahorra

Datos de la probeta	Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )
Zahorra inicial	1,98	1,80
Zahorra inicial + 2% yeso añadido	1,93	1,72
Zahorra inicial + 4% yeso añadido	1,97	1,75

Tabla 27. Datos de las probetas de zahorra para edómetro

Las variaciones de volumen de la zahorra se indican en la siguiente gráfica:

Los comportamientos del suelo y la zahorra han sido distintos, en el caso del suelo, el que más ha hinchado ha sido el suelo sin yesos añadidos, al añadir yesos han disminuido los hinchamientos, podría afirmarse que los yesos “han estabilizado” al suelo.

Por lo tanto los hinchamientos del suelo RCD no se han debido a la acción de los yesos, muy posiblemente sea consecuencia de presencia de material arcilloso que inicialmente se encontrase impermeabilizado (cubierto por mortero de cemento o yesos) y que a partir de, aproximadamente, un mes por la acción del agua se rompe esta coraza iniciándose su absorción de agua y con ello una continua elevación del hinchamiento hasta alcanzar, a los tres meses, valores de hinchamiento del 1,6%.

Comportamiento similar, pero más tardío y en menor escala, se ha producido con el suelo con yesos, en estas mezclas los hinchamientos empiezan en el entorno de los dos meses y se elevan hasta valores del 0,6% a los tres meses, es por lo que se puede admitir que los yesos ayudan a esta impermeabilización del material que absorba el agua.

En el caso de las zahorras, la inicial sin yeso añadido, prácticamente no modifica su volumen y cuando se añade yeso el comportamiento es muy similar para el 2 y el 4%, se produce lo que podría ser una hidratación inicial de los yesos, durante 15 a

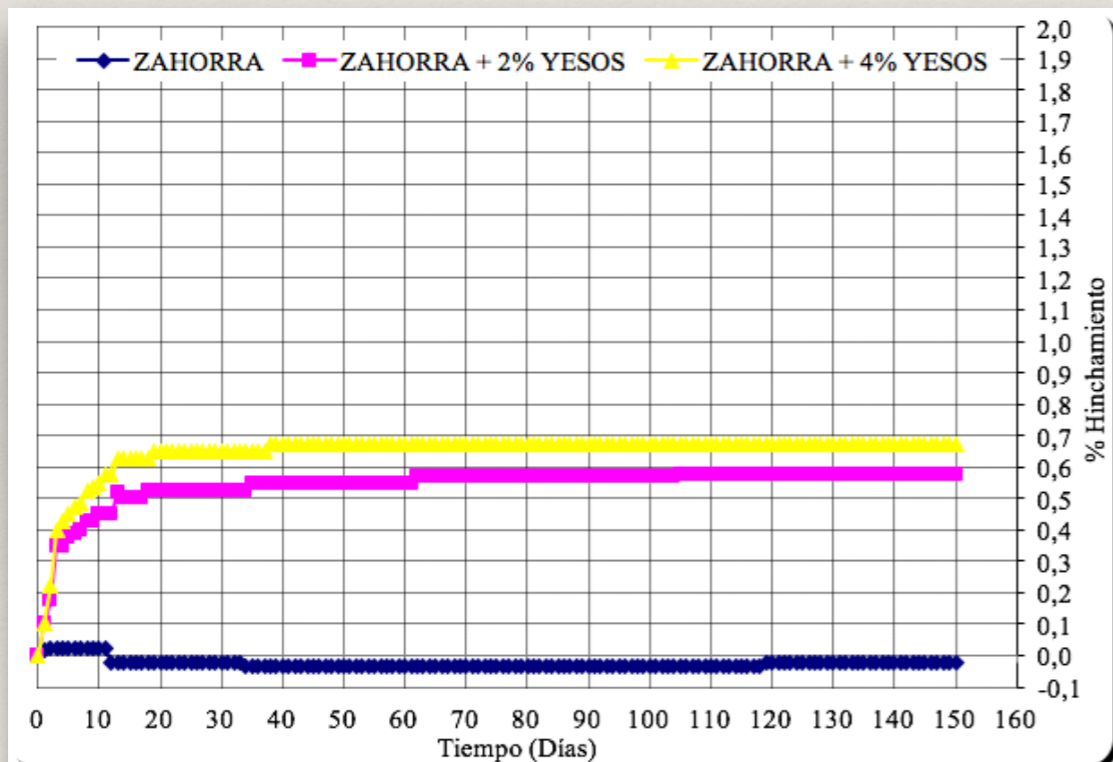


Figura 45. Hinchamiento libre de la zahorra inicial y sus mezclas con el 2 y 4% de yeso en edómetro durante tres meses



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

20 días alcanzando hinchamientos en el entorno del 0,6 a 0,7%, y a partir de entonces estas mezclas no modifican su volumen.

En conclusión para este ensayo:

- Las variaciones de volumen más importantes (las de los suelos) no se deben a la acción del yeso.
- Y en el caso de la zahorra, los hinchamientos producidos, posiblemente, por la hidratación de los yesos no superan (a los tres meses) el 0,6%.

## 4.10.1.4. Estabilidad de volumen ensayos envejecimiento acelerado

### 4.10.1.4.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos son los indicados en la siguiente tabla:

MATERIAL	HINCHAMIENTO %	
	3 DÍAS	7 DÍAS
Suelo inicial	0,1	1,5
Suelo inicial + 2% yeso	0,1	1,5
Suelo inicial + 4% yeso	0,0	1,5
Suelo inicial + 3% cemento	0,0	0,3
Suelo inicial + 3% cemento + 2% yeso	0,0	0,3
Suelo inicial + 3% cemento + 4% yeso	0,0	0,3
Zahorra inicial	0,3	0,3
Zahorra inicial + 2% yeso	1,8	2,0
Zahorra inicial + 4% yeso	1,0	1,2
Zahorra inicial + 3% cemento	-0,2	0,0
Zahorra inicial + 3% cemento + 2% yeso	0,1	0,3
Zahorra inicial + 3% cemento + 4% yeso	0,0	0,8

Tabla 28. Evolución de los hinchamientos del suelo y la zahorra y sus mezclas con yesos, sin y ligados con cemento



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.10.1.4.2. Análisis de los resultados

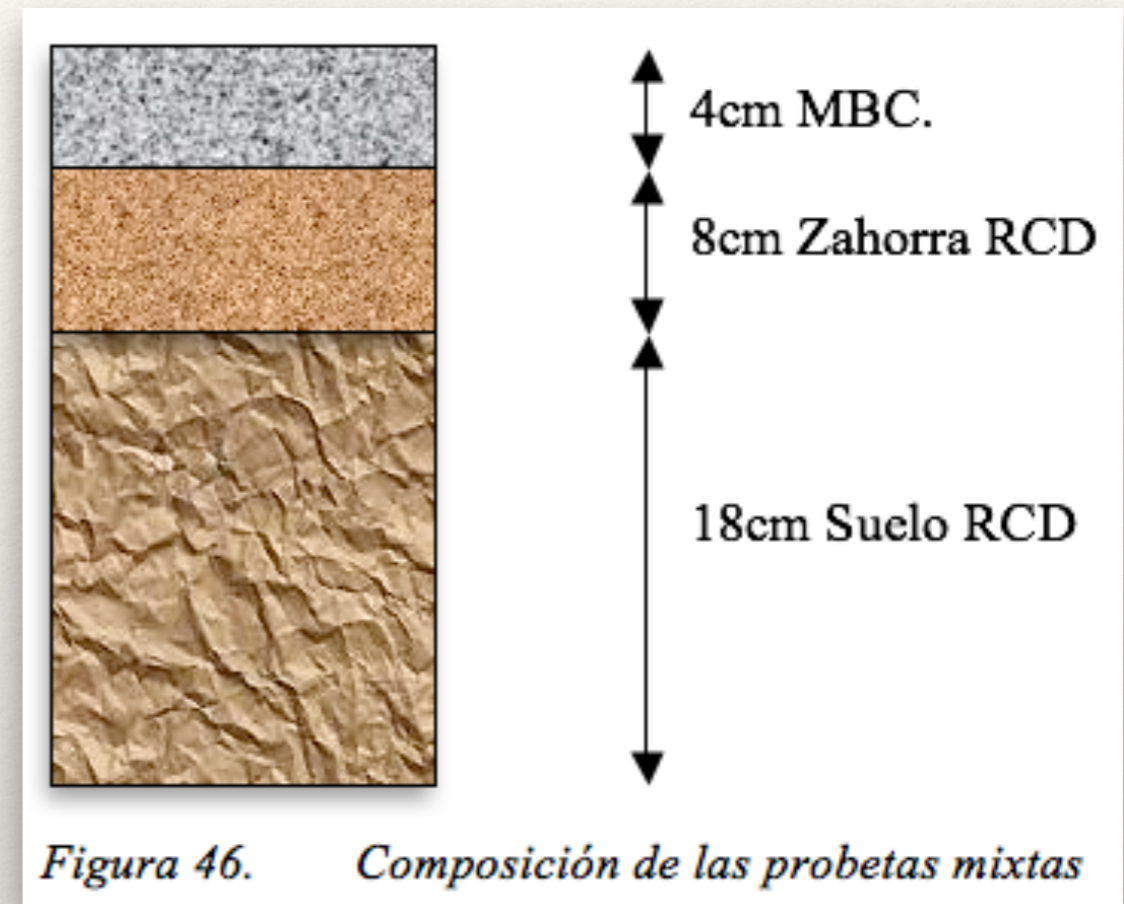
Al igual que con los ensayos anteriores, con este ensayo no se detecta variación de volumen del suelo o de la zahorra por la incorporación de un 2 y 4% de yesos.

## 4.11. Ensayo probetas mixtas

### 4.11.1. Preparación y conservación de las probetas mixtas

En el apartado 4.5.2.4 se define la preparación de estas probetas mixtas.

Con este ensayo se intenta reproducir como actuará un exceso de yeso en la capa de coronación del terraplén y/o en la de zahorra, siendo la capa de rodadura asfáltica, tal y como se indica en la siguiente figura:



Para que se produzcan reacciones con los yesos es necesario contar con agua y estas posibles reacciones se aceleraran al aumentar la temperatura.

Es por eso que las probetas se han conservado en ambientes secos y húmedos y a su vez a temperatura ambiente (exterior en Málaga capital) y a 40 grados centígrados (en estufa de laboratorio).



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD



Figura 47. Probeta mixta

Como se indicó en el apartado 4.5.2.4, y puede verse en las fotografías, las probetas se componen de una capa de suelo, la de zahorra y la de mezcla bituminosa.

Las tres capas de las probetas se compactaron con martillo vibrante.

Los moldes fueron especialmente engrasados para permitir los movimientos de los materiales, y para asegurar el paso del agua (para las probetas sumergidas) no se cerraron totalmente.

El número de probetas y sistemas de conservación fueron:

Composición de la probeta	Número de probetas/sistema de conservación			
	Secas a T <sup>a</sup> ambiente	Saturadas a T <sup>a</sup> ambiente	Secas a 40°C	Saturadas a 40°C
Suelo inicial/zahorra inicial/MBC	1	1	1	1
Suelo inicial + 2% de yeso endurecido/zahorra inicial/MBC	1	1	1	1
Suelo inicial + 4% de yeso endurecido/zahorra inicial/MBC	1	1	1	1
Suelo inicial /zahorra inicial + 2% de yeso endurecido /MBC	1	1	1	1
Suelo inicial /zahorra inicial + 4% de yeso endurecido /MBC	1	1	1	1

Tabla 29. Número y sistemas de conservación de las probetas mixtas

Estas condiciones de conservación se mantuvieron durante seis meses.



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

Transcurridos estos primeros seis meses, se han alternado, con cadencia semanal, durante otros seis meses, las probetas en estado secas a saturadas y viceversa, tanto las conservadas a temperatura ambiente como las de estufa.



Figura 48. Las 5 probetas mixtas que se han conservado al aire, secas.



Figura 49. Las 5 probetas mixtas que se han conservado al aire, secas.



Figura 50. Probeta número 1. Se ha abierto el molde para visualizar la composición de la probeta. Se pueden observar las tres capas, el suelo, la zahorra (más clara) y la rodadura bituminosa.



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD



Figura 51. Llenado de agua la piscina donde fueron conservadas las probetas mixtas a temperatura ambiente (en el exterior del laboratorio) y sumergidas en agua.



Figura 52. Las 5 probetas mixtas que se han conservado en el exterior del laboratorio y sumergidas en agua.



Figura 53. Las 5 probetas mixtas que se han conservado secas en estufa de laboratorio a 40°C.



Figura 54. Fotografía de la estufa donde se han conservado las 5 probetas mixtas secas a 40°C



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD



*Figura 55. Fotografía de cuatro de las cinco probetas mixtas que se han conservado en húmedo en estufa de laboratorio a 40°C.*

### 4.11.2. Ensayo de las probetas mixtas

El ensayo de estas probetas mixtas ha consistido en determinar las variaciones de volumen que se hayan producido. Para ello se ha empleado el medidor de volúmenes del ensayo CBR.



*Figura 56. Sistema de medida de variación de volumen de las probetas mixtas.*

### 4.11.3. Resultados de los ensayo de las probetas mixtas

Transcurridos los tiempos de ensayo indicados, no se han detectado variaciones de volumen en ninguna de las probetas ensayadas.



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

### 4.12. Conclusiones de la estabilidad de volumen

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados indican que la incorporación de un 2 y 4% de yesos a este suelo y zahorra no le ha supuesto modificación de su estabilidad de volumen.

Lo mismo se puede afirmar para estos materiales tratados con cemento

Por lo tanto, se puede concluir que para este suelo y zahorra reciclados la incorporación de hasta un 4% de yesos no le afecta a su estabilidad de volumen cuando no están ligados ni cuando son estabilizados con cemento.

### 4.13. Incorporación de aluminio

Los compuestos de azufre pueden provocar modificaciones de volumen en los áridos por diversas acciones, entre las que se destaca:

- Disminución de volumen por disolución de los yesos.
- Fenómenos de expansión por la generación de productos como pueden ser la etringita o taumasita.

En esta primera parte del trabajo no se ha producido ninguno de estos fenómenos.

La formación de la etringita o taumasita requieren unas determinadas condiciones físicas y químicas que no se han producido en estos ensayos, así por ejemplo para la formación de la etringita se precisa de aluminio, que en RCD de procedencias distintas a las de este trabajo podrían existir.

En esta segunda parte del trabajo se ha ensayado el suelo con la incorporación de un residuo con gran proporción de aluminio procedente del reciclado de este metal.

Los ensayos realizados y resultados obtenidos se indican en los siguientes apartados:

#### 4.13.1. Ensayos de envejecimiento acelerado del suelo con la incorporación de aluminio

##### 4.13.1.1. Ensayo realizado

Se ha determinado las variaciones de volumen del suelo incorporando un 4% de filler de aluminio al suelo inicial y a las mezclas del suelo con el 2% y 4% de yesos, y además estas mezclas con un 3% de cemento.



# 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

## 4.13.1.2. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos son los indicados en la siguiente tabla:

MATERIAL	CON ALUMINIO	
	HINCHAMIENTO %	
	3 DÍAS	7 DÍAS
Suelo inicial	0,3	0,6
Suelo inicial + 4% Filler Al	0,2	0,8
Suelo inicial + 4% Filler Al + 2% yeso	2,8	11,2
Suelo inicial + 4% Filler Al + 4% yeso	4,7	12,1
Suelo inicial + 3% cemento + 4% Filler Al	0,3	0,5
Suelo inicial + 3% cemento + 4% Filler Al + 2% yeso	1,1	1,5
Suelo inicial + 3% cemento + 4% Filler Al + 4% yeso	0,5	5,1

Tabla 30. Resultados de los hinchamientos determinados con el ensayo de envejecimiento acelerado incorporando filler de aluminio a las muestras

## 4.13.1.3. Análisis de los resultados

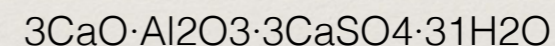
La incorporación del filler de aluminio al suelo original y a este ligado con cemento no ha provocado hinchamiento.

La incorporación del filler de aluminio a las mezclas del suelo con yeso y a estas con cemento ha provocado importantes hinchamientos, superiores al aumentar el contenido de yeso.

Por lo tanto si se cumplen los límites establecidos en la actual normativa vigente, la presencia de aluminio no es suficiente para que se produzcan patologías debidas a los yesos.

Si se superan los límites actualmente establecidos, dependiendo de las condiciones de los áridos se pueden producir patologías.

La norma empleada ha detectado estas variaciones de volumen. Esta muy importante variación de volumen, muy posiblemente, se haya debido a la formación de etringita:



La etringita se forma con hasta 31 moléculas de agua por lo que la formación de este compuesto conlleva un importante incremento de volumen.

## 4.14. Conclusiones del trabajo

### 4.14.1. Consideraciones técnicas

Los áridos RCD ya sean empleados sin ligar con cemento (suelos, zahorras, material drenante, camas de tuberías, etc.) o ligados con cemento (suelos estabilizados, suelocemento, gravacemento, áridos para hormigón, etc.) si cumplen los límites normativos actualmente establecidos para los compuestos de azufre, al igual que los áridos naturales, no presentarán ningún



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

tipo de patología asociada a estos elementos.

Si se superan estos límites, al igual que los naturales, es posible que puedan aparecer patologías asociadas a procesos físicos y químicos en los que intervienen estos compuestos.

En el trabajo realizado se ha experimentado con un suelo y zahorra RCD.

Inicialmente el suelo, como consecuencia de su composición química (compuestos de azufre y sales solubles), se califica como tolerable de acuerdo con el artículo 3.2 de las Recomendaciones de AOPJA.

La zahorra cumplía con todos los requisitos químicos exigidos por el artículo 1.2 de las Recomendaciones de AOPJA para zahorra artificial.

En el laboratorio se han fabricado mezclas de estos materiales con exceso de yeso, de tal manera que ya no cumplían las exigencias químicas de las normativas vigentes, el suelo dejaba de ser tolerable y la zahorra incumplía las prescripciones químicas.

Pero, incumpliendo las especificaciones, estos materiales con exceso de yeso, a nivel de laboratorio, no han presentado patologías (variaciones de volumen) en ninguno de los ensayos realizados.

Sin embargo al modificar las condiciones iniciales de estos áridos, aportando un filler de óxido de aluminio, se han producido reacciones con una importante generación de hinchamientos, tanto en los productos sin ligar como en los ligados con cemento.

Por lo tanto superar los límites establecidos para los compuestos de azufre, puede, según el tipo de árido, inhabilitarlos para su uso como árido para construcción.

Es importante destacar que con la norma UNE EN 12386/49 se detecta de una manera fácil y, lo que es más efectivo, rápida, cuando con un árido RCD ya esté ligado o no con cemento, se puedan producir, por los motivos que sean, variaciones de volumen.

De acuerdo con todo ello, y en la misma línea que plantea el borrador del nuevo PG-3, se podría aceptar incrementos de los límites de las actuales especificaciones para los compuestos de azufre siempre que se realice estudios específicos de aptitud al uso requerido.

### 4.14.2. Propuestas para elevar los límites de contenido de compuestos de azufre

El trabajo realizado es exclusivamente de laboratorio, para



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

decidir modificaciones para la normativa vigente sobre áridos RCD (Recomendaciones de AOPJA) es necesario la ejecución de tramos experimentales que se fabriquen con áridos con exceso controlados de yesos.

Por lo tanto las propuestas que se indican a continuación serían para la ejecución de estos tramos experimentales.

En este trabajo se han ensayados muestras de suelo y zahorra RCD sin aluminio y con contenidos de compuestos totales de azufre en el entorno del 4 al 5% de  $\text{SO}_3$ .

Las propuestas de las nuevas especificaciones deben estar limitadas a las dotaciones de este trabajo y a los valores habituales obtenidos en las plantas de tratamiento de estos áridos.

Los tramos experimentales deberían ejecutarse con contenidos en compuestos de azufre en el entorno de la posible propuesta y con un exceso de yesos para analizar lo que se podría producir.

### 4.14.3. Ensayos para el control de los compuestos de azufre

El control de la acción de los compuestos de azufre en los áridos RCD, al igual que en los naturales, debe realizarse en base a una batería coordinada de ensayos:

- Ensayos químicos para determinar su contenido.
- Ensayo físicos y mecánicos para determinar su estabilidad de volumen.

#### 4.14.3.1. Ensayos químicos

De acuerdo con lo indicado en este trabajo, los ensayos requeridos para evaluar los contenidos de compuestos de azufre y sobre los que se podrían indicar las especificaciones para los distintos usos (suelo, zahorras, materiales ligados con cemento, etc.) son:

- Determinación de los compuestos totales de azufre, según UNE EN 1744/1 apartado 11.
- Determinación de los sulfatos solubles en agua en áridos reciclados, según UNE EN 1744/1 apartado 10.2.

La preparación de la muestra de ensayo sería según lo indicado en la norma UNE 932-1, con un mínimo de 3000 gramos



## 4. Estudio experimental sobre la acción del yeso en RCD

preparados según lo indicados en la norma UNE EN 932-1.

### 4.14.3.2. Ensayos para determinar posibles cambios de volumen

Los ensayos que se realizarían serían los habituales de la normativa vigente para cada tipo de uso:

- Hinchamiento libre en edómetro.
- Variaciones de volumen en el ensayo CBR
- Variaciones de volumen de las probetas para los ensayos de compresión de los materiales ligados con cemento

Y sobre todo si se han superado las actuales especificaciones de los compuestos de azufre:

- El ensayo de envejecimiento acelerado UNE EN 12386/49.

### 4.14.4. Compromiso de los productores de áridos reciclados

Una de las diferencias importantes entre los áridos RCD y los naturales es su heterogeneidad, los áridos RCD proceden de

residuos de construcción y demolición a priori son más heterogéneos que los naturales.

Si el productor de áridos RCD consigue que sus productos presenten contenidos de compuestos de azufre inferiores a los límites actualmente establecidos debería bastar con sus certificados de calidad como sería el mercado CE o la certificación AGRECA.

Pero si sus áridos superan estos límites, para proponer su uso en construcción, además de certificar los valores máximos de presencia de compuestos de azufre deberían disponer de algún estudio específico que garantizase que estos excesos no provocan reacciones con variaciones de volumen superiores a los permitidos.





.....

Recomendaciones técnicas para el uso  
de áridos reciclados procedentes de  
RCD en obras de ingeniería civil



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

## 5.1. Objeto

El objeto de este documento es proporcionar a todos los agentes que intervienen en la producción y aplicación de los áridos reciclados de RCD, una clasificación y denominación comercial de los distintos materiales reciclados procedentes de RCD que clarifique el mercado y evite confusiones entre recicladores, ingenieros y constructores.

Así mismo, y basándose en la normativa tanto nacional como internacional, así como en los resultados de trabajos previos del equipo investigador, se van a establecer los requisitos que los materiales reciclados de RCD deben satisfacer en función del uso al que se destinen. Por último, se indicarán unas recomendaciones de puesta en obra.

## 5.2. Clasificación y denominación de los áridos reciclados

Se propone una clasificación general de los materiales producidos en una planta de reciclaje de RCD que se muestra en la Tabla 31. Está basada en el ensayo de composición (UNE-EN 933-11) y absorción (UNE-EN 933-1:2012) que es considerada como un indicio de calidad del material reciclado.

Se distinguen 4 tipos de áridos y 2 suelos reciclados. Como es sabido, los áridos reciclados mixtos (ARM) representan en Andalucía alrededor del 90% de la producción. Este tipo de áridos puede contener hasta un 15% de materiales bituminosos que le aportarían una alta capacidad de soporte y resistencia a la fragmentación. Además, se ha considerado conveniente distinguir en los ARM dos calidades diferentes en base al contenido de partículas impropias (X), flotantes (FI) y absorción. Existe un amplio consenso a nivel nacional e internacional en definir a un árido reciclado de hormigón (ARH) al que tenga un porcentaje de  $R_c + R_u \geq 90\%$ . La absorción de la fracción gruesa de estos materiales (grava) debe ser inferior al 7% como indica la EHE-08, mientras que la de la fracción fina (arena) se eleva al 10%. Por último, los áridos reciclados asfálticos (ARA), deben tener más de un 50% de materiales bituminosos. La entrada de este tipo de materiales a las plantas es muy escasa y



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

habitualmente se mezclan con los ARM.

En los suelos reciclados de RCD (SR) que generalmente no han recibido machaqueo ni trituración se distinguen dos calidades, seleccionados y tolerables en base al contenido de impropios y partículas flotantes.

Tipo	Composición			Absorción	
	Componentes principales	X	FL*	Finos (< 4mm)	Gruesos (≥ 4mm)
ARH	Rc + Ru ≥ 90 %	< 1 %	< 1 cm³/kg	< 10 %	< 7 %
ARM	Rc + Ru + Ra ≥ 70 %	< 1 %		< 12 %	< 9 %
	Rc + Ru ≥ 55 %	< 2 %	< 2 cm³/kg	< 14 %	< 11 %
ARA	Ra ≥ 50% Rc + Ru + Ra ≥ 90%	< 1 %	< 1 cm³/kg	< 10 %	< 7 %
SR Seleccionado	-	< 3 %	< 2 cm³/kg	-	< 12 %
SR Tolerable	-	< 5 %		-	< 14 %

\* Se rebajará a 0,5 cm³/kg cuando el suelo no vaya a ser cubierto por ninguna otra capa

Tabla 31. Clasificación general del material producido en planta

Las siglas utilizadas en el ensayo de composición, según la norma son las siguientes:

Componente	Descripción
Rc	Hormigón, productos de hormigón, mortero, unidades de albañilería de hormigón
Ru	Áridos no tratados, piedra natural, áridos tratados con conglomerantes hidráulicos
Rb	Unidades de albañilería de arcilla (ladrillo y tejas), de silicato cálcico y hormigón aireado no flotante
Ra	Materiales bituminosos
X	Arcilla, arenas, metales, madera no flotante, plástico, caucho, y yeso
FL	Partículas flotantes en agua

Tabla 32. Descripción de componentes en ensayo de composición

Estos materiales pueden tener diferentes aplicaciones siempre y cuando cumplan los requisitos y especificaciones mostradas en los siguientes apartados.

## 5.3. Recomendaciones para el empleo de áridos reciclados en usos no ligados

En la actualidad, tanto a nivel nacional como internacional, las principales aplicaciones de los áridos reciclados de RCD son en usos no ligados, donde se emplean más del 90% de la producción anual.

Los principales usos son:

- Zahorras para bases granulares de firmes
- Suelos para rellenos tipo terraplén
- Material drenante
- Camas de asiento de tuberías

A continuación, se presenta una síntesis de los trabajos de investigación realizados por el equipo investigador relativos a estas cuatro aplicaciones, así como una propuesta relativa a los requisitos que deben cumplir en función de la aplicación a la que



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

vayan a ser destinados. Por último, se incluyen unas recomendaciones de puesta en obra y control de calidad.

## 5.3.1. Zahorras recicladas mixtas para bases granulares de firmes

### 5.3.1.1. Introducción

El potencial de los áridos reciclados procedentes de RCD como materiales para la construcción de explanadas y capas estructurales de firmes ha sido estudiado previamente por numerosos autores, concluyendo que estos materiales tienen unas excelentes propiedades mecánicas, gran capacidad de soporte medida por el ensayo CBR (Jiménez J. R. y col. 2011) y ensayos de carga con placa en tramos experimentales. Identificando como principales propiedades limitantes el contenido de sales solubles y yeso (Agrela F. y col. 2006; Jiménez J. R. y col. 2006; Jiménez J. R. y col. 2007; Vegas I. y col. 2008).

La mayoría de los AR de hormigón (ARH) cumplen los límites establecidos en el Art. 510 del PG-3 (Jiménez J. R. y col. 2011; Agrela F. y col. 2006; Jiménez J. R. y col. 2006; Jiménez J. R. y

col. 2007; Vegas I. y col. 2008), de ahí que la mayor parte de los países permiten la utilización de los ARH como zahorras en las capas estructurales del firme.

Sin embargo, los AR mixtos (ARM), con cierto porcentaje de material cerámico, cumplen para categorías de tráfico T3 a T4 los límites establecidos en el PG-3 para granulometría, plasticidad (no plásticos), coeficiente de limpieza, equivalente de arena, índice de lajas, partículas trituradas e hinchamiento. Habiéndose identificado dos propiedades limitantes: el contenido de compuestos de azufre totales y el coeficiente de Los Ángeles (LA) (Jiménez J. R. y col. 2011; Vegas I. y col. 2008; Vegas I. y col. 2011). El valor de este último aumenta en los ARH con la cantidad de mortero adherido (Sánchez M. y Alaejos P. 2009), y aumenta con el porcentaje de cerámicos en los ARM (Vegas I. y col. 2011; Barbudo A. y col 2012).

En lo relativo al contenido de sulfatos y sales solubles, su cantidad está limitada en áridos para carreteras para garantizar la estabilidad dimensional de las explanadas y firmes, así como, evitar patologías en las estructuras de hormigón o capas adyacentes tratadas con cemento. En los AR, los sulfatos solubles proceden mayoritariamente de la disolución del yeso. Sin embargo, se desconoce el efecto del yeso sobre la estabilidad dimensional y capacidad portante de los AR, en



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

ensayos a corto y largo plazo. Sin embargo, los límites que aparecen en el PG-3 para estas propiedades limitantes (coeficiente de LA y compuestos totales de azufre) han sido establecidos para áridos naturales y no para AR, por lo que han sido ampliamente discutidos por los investigadores españoles, estableciendo como necesario el desarrollo de una normativa específica que regule el uso de los AR de RCD en carreteras (Jiménez J. R. y col. 2007; Vegas I. y col. 2011).

En esta línea, cabe destacar, a nivel nacional y autonómico, la publicación de los siguientes documentos:

- Recomendaciones para la redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas para el uso de materiales reciclados de RCD. GIASA. Consejería de Obras Públicas y Vivienda. Junta de Andalucía. (GIASA 2010).
- Uso de áridos reciclados mixtos procedentes de RCD. Investigación pre-normativa. Ihobe SA. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Gobierno Vasco. (IHOBE 2011).
- Recomendaciones para la redacción de Pliegos para el uso de materiales reciclados de RCD en obras urbanas y asimilables. (AGRECA y CEMOSA 2012).
- Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD (GEAR), recientemente publicada por iniciativa de la Asociación Española de Gestores de RCD (GERD 2012).

La sustitución de zahorras artificiales por zahorras recicladas no disminuye la capacidad portante de secciones construidas con ARM y ARH, según han evidenciado Jiménez J. R. y col (2012) en tramos experimentales de caminos no pavimentados, mostrando en algún caso incrementos del módulo de compresibilidad en el ensayo de carga con placa (Jiménez J. R. y col. 2012b) e incluso una mejora en el IRI.

Sin embargo, a pesar de los avances anteriormente expuestos, los Ingenieros Directores rechazan el empleo de estos materiales en los firmes de carreteras, incluidos los de baja intensidad de tráfico, urbanas y asimilables.

### 5.3.1.2. Objetivos

El objetivo general de esta tarea es establecer unas recomendaciones de uso de áridos reciclados mixtos como zahorra artificial en la formación de firmes.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el efecto del yeso en la estabilidad dimensional y capacidad portante de zahorras recicladas compactadas.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

- Evaluar la susceptibilidad a la compactación de estos materiales. Para ello, se va a estudiar el efecto de la compactación sobre la granulometría, equivalente de arena y coeficiente de LA de las zahorras recicladas compactadas, a efectos de comparar los resultados con los límites establecidos en los documentos de recomendaciones para la elaboración de Pliegos elaborado por GIASA (2010).

### 5.3.1.3. Materiales y métodos

Para estudiar el efecto del yeso en la estabilidad dimensional y capacidad portante de zahorras recicladas compactadas, se han utilizado tres zahorras recicladas mixtas, dos de ellas con un porcentaje de compuestos de azufre total en SO<sub>3</sub> inferiores al 1% y una con un contenido superior al 3% (3,13%). Las dos primeras se han enriquecido con un 1,5 y un 3% de yeso obtenido a partir de partículas de yeso de RCD, dando lugar a siete materiales diferentes. La Tabla 33 muestra el contenido de azufre total (UNE-EN 1744-1) y de sulfatos solubles en agua (UNE-EN 1744-1 Apto. 10.2) de los siete materiales.

Con los siete materiales se han realizado ensayos de evolución de la estabilidad dimensional sobre probetas compactadas sometidas a un proceso de percolación mediante simulación de ciclos de lluvia intermitentes. La cantidad de agua aplicada equivale a 5000 mm de lluvia que para una precipitación media de 500 mm/año corresponde a un periodo de 10 años. La estabilidad dimensional se ha evaluado midiendo el hinchamiento/colapso que han experimentado las probetas al final del ensayo. Así mismo, se ha estudiado la evolución de la capacidad portante del material a partir del índice CBR.

	Azufre total		Sulfatos solubles en agua
	% S	% SO <sub>3</sub>	%SO <sub>3</sub>
Z2	0,14	0,35	0,16
Z2 + 1.5	0,51	1,28	0,63
Z2 + 3	0,70	1,75	0,99
Z3	0,35	0,88	0,36
Z3 + 1.5	0,75	1,88	0,69
Z3 + 3	1,26	3,15	1,07
Z4	1,25	3,13	0,88

Tabla 33. Resultados químicos de muestras con adición de yeso

Para evaluar la susceptibilidad a la compactación de zahorras recicladas, se han utilizado cinco zahorras, tres de ellas mixtas, una de hormigón y otra artificial de naturaleza caliza que sirve de contraste.

A cada uno de los cinco materiales se les ha realizado los



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

siguientes ensayos antes de ser compactados y después de su compactación mediante el ensayo Proctor Modificado (UNE 103 501:94) para simular los efectos de una compactación durante la puesta en obra de las zahorras:

- a) Granulometría (UNE EN 933-1)
- b) Equivalente de Arena (UNE EN 933-8)
- c) Desgaste de los Ángeles (UNE EN 1097-2).

## 5.3.1.4. Resultados

- a) Efecto del yeso en la estabilidad dimensional

La Tabla 34 muestra los resultados del ensayo CBR. Antes de la simulación de lluvia se aprecia un incremento del CBR para adiciones del 1,5% de yeso, produciéndose descensos para adiciones del 3%. No obstante, incluso para el 3% de adición de yeso, los valores de CBR son aceptables teniendo en cuenta las bajas energías de compactación empleadas. Los valores de CBR después del lavado por simulación de lluvia aumentan para las zahorras Z2 y Z4, apreciándose disminuciones para la Z3 con adiciones de yeso, pero siendo los valores aceptables. La mayoría de los resultados de los ensayos C.B.R. realizados

muestran una mejoría de esta propiedad una vez los materiales han sido sometidos a ciclos de simulación de lluvia. No obstante, las capacidades de soporte de todos los materiales después de la simulación de una lluvia equivalente a 5000 mm que supone aproximadamente la lluvia caída y percolada en un periodo de 10 años (precipitación media de 500 mm/año) se considera satisfactoria, considerando que los materiales se han compactado con una energía equivalente al 80% del Proctor Normal, bastante inferior a la de obra.

	C.B.R.		Densidad seca		Hinchamiento/colapso (%)	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Z2	18,96	19,01	1,87	1,84	-0,01	-0,09
Z2 + 1.5	25,69	28,59	1,84	1,70	0,01	-0,05
Z2 + 3	12,87	23,81	1,79	1,63	0,03	-0,06
Z3	35,82	37,41	1,72	1,67	-0,01	0,01
Z3 + 1.5	38,19	23,89	1,64	1,63	0,02	-0,06
Z3 + 3	32,04	19,63	1,61	1,60	0,05	-0,08
Z4	34,57	53,17	1,68	1,65	-0,02	-0,02

Tabla 34. Resultados de C.B.R. e hinchamiento antes y después de ciclos de lluvia

En cuanto a la densidad seca, se observa una disminución de ésta tanto conforme aumenta el contenido de yeso, como después de los ciclos de simulación de lluvia, tal y como era de esperar. Asimismo, se aprecia la inexistencia de un posible colapso de las muestras producido por un lavado y arrastre de sales solubilizadas por la percolación del agua, ya que el colapso máximo producido es inferior al 0,1%.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

## b) Estudio de susceptibilidad a la compactación

En la Tabla 35 se recogen los resultados obtenidos para el coeficiente de LA, equivalente de arena, azul de metileno y porcentaje de finos (pasante por el tamiz 0,063 mm) antes y después de la compactación en las cinco zahorras estudiadas.

		Los Ángeles	Equivalente de arena	Azul metileno	% Finos
ZA-C	Antes	25	47	-	6,0
	Después	20	36		8,0
Z2	Antes	39	31	8,3	8,9
	Después	37	25	No cumple	10,4
Z3	Antes	43	62	-	4,0
	Después	39	59		7,9
Z4	Antes	41	26	No cumple	9,4
	Después	39	24		11,1
Z5	Antes	38	62	-	1,5
	Después	35	47		8,3

Tabla 35. Resultados obtenidos antes y después del proceso de compactación

Se observa un descenso de 2-4 unidades en el coeficiente de desgaste Los Ángeles tras la compactación de las zahorras. En todo caso, cualquiera de los materiales estudiados con un coeficiente superior a 40, tras la compactación, este valor desciende por debajo de este límite. Además, en los AR se

observa que, de una forma general, cuanto mayor es el coeficiente de desgaste Los Ángeles, menos margen de variación se estima que se produciría después de una compactación.

En cuanto al equivalente de arena, se observa que la zahorra reciclada de hormigón Z5 presenta un descenso bastante significativo en el valor de este coeficiente que podría ser explicado con el incremento acusado de partículas finas. En cuanto al contenido de partículas finas, las zahorras Z3 y Z5 son las que han presentado mayor variación, que coincide con aquellos materiales que han experimentado un mayor descenso del coeficiente de desgaste LA.

Por otro lado, y excepto en Z2 y en Z5, tanto antes como después de compactar, en los casos estudiados el equivalente de arena es superior a 35, límite establecido por el PG-3, para un tráfico T2-T4. En caso de que los valores obtenidos fuesen inferiores a 35, la normativa indica que ha de realizarse el ensayo de azul de metileno, que deberá resultar inferior a 10, y en todo caso, el equivalente de arena no debe ser inferior a 30. Es por ello que la zahorra mixta Z2 después de compactar, y la zahorra de hormigón Z5, tanto antes como después de compactar, no cumplirían con este requisito, a pesar de que estos materiales fueron seleccionados como zahorras no cumplirían esta especificación.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

En cuanto al material de referencia, una zahorra artificial de naturaleza caliza, de mayor resistencia al desgaste que los áridos reciclados, tal y como se observa en la Tabla 35, ha presentado una variación del equivalente de arena de 11 unidades y un 2% de finos más que antes de la compactación. Por su parte, este material ha experimentado el mayor descenso de todos los materiales ensayados (5 unidades) en el coeficiente de LA, lo cual puede estar relacionado con su naturaleza caliza.

Con respecto a la variación de la granulometría, a continuación se muestran las gráficas con las dos curvas granulométricas de cada material, antes y después de la compactación.

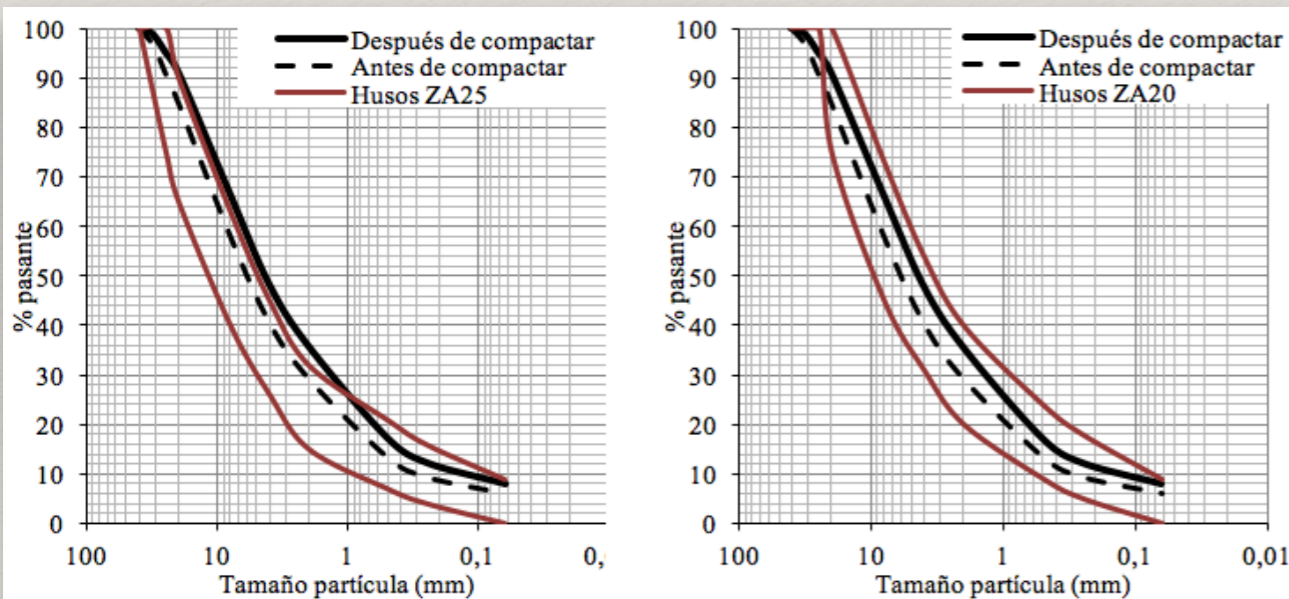


Figura 57. Curvas granulométricas de la zahorra natural caliza (ZA-C)

Para la zahorra artificial caliza (Figura 57), se observa que la granulometría se encuentra muy cercana al límite superior granulométrico de la ZA25. Sin embargo, tanto antes como después de compactar, presentan una distribución de partículas más similar a una ZA20.

En cuanto a las zahorras recicladas, se han ajustado más adecuadamente a una zahorra de tipo ZA20, tal y como muestran las siguientes figuras:

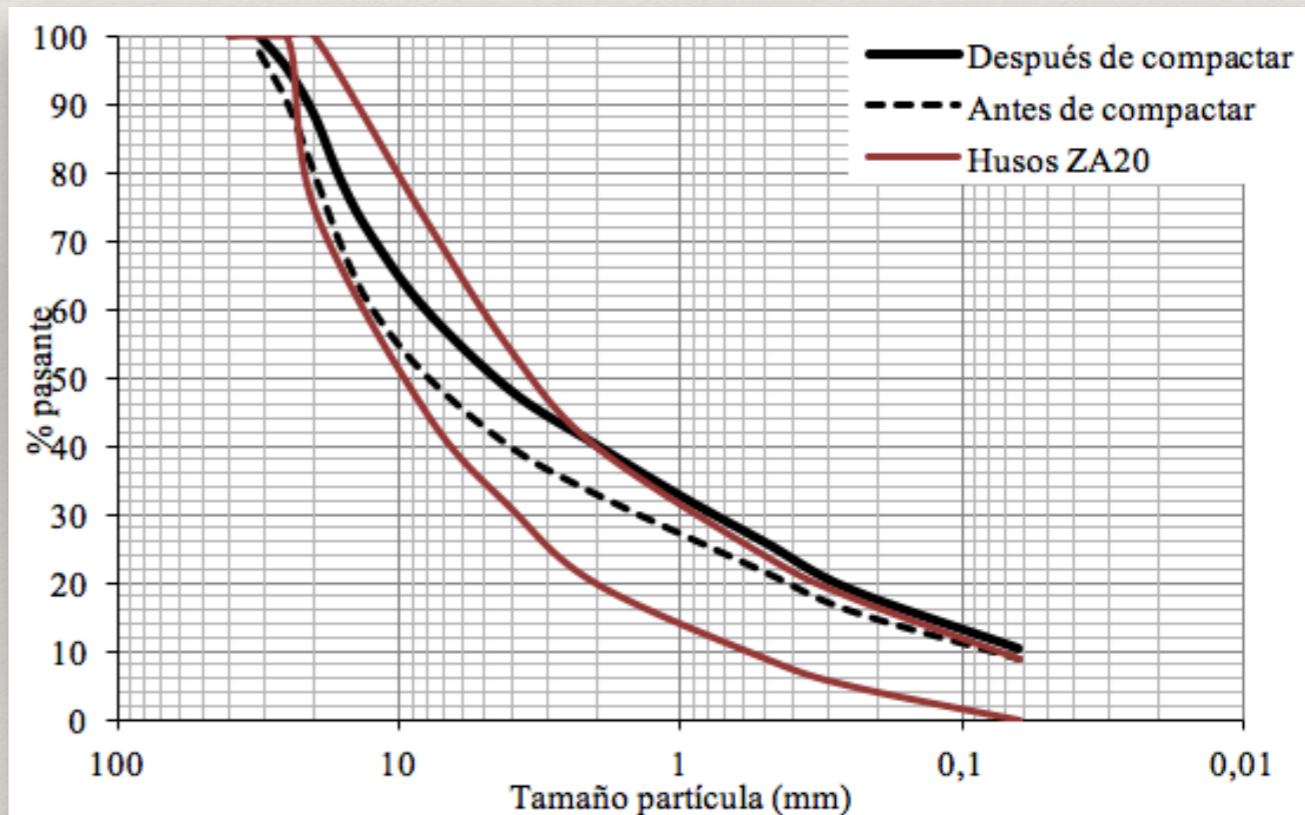


Figura 58. Curvas granulométricas de la zahorra reciclada mixta Z2



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

En la Figura 58 se observa que la curva granulométrica correspondiente a la zahorra Z2 sin compactar es desplazada casi paralelamente a la derecha una vez que dicho material es compactado, lo que indica una reducción del tamaño de las partículas después de dicha operación. Algo similar ocurre con la zahorra reciclada mixta Z3 (Figura 59), aunque en este caso ambas distribuciones son más adecuadas como ZA20.

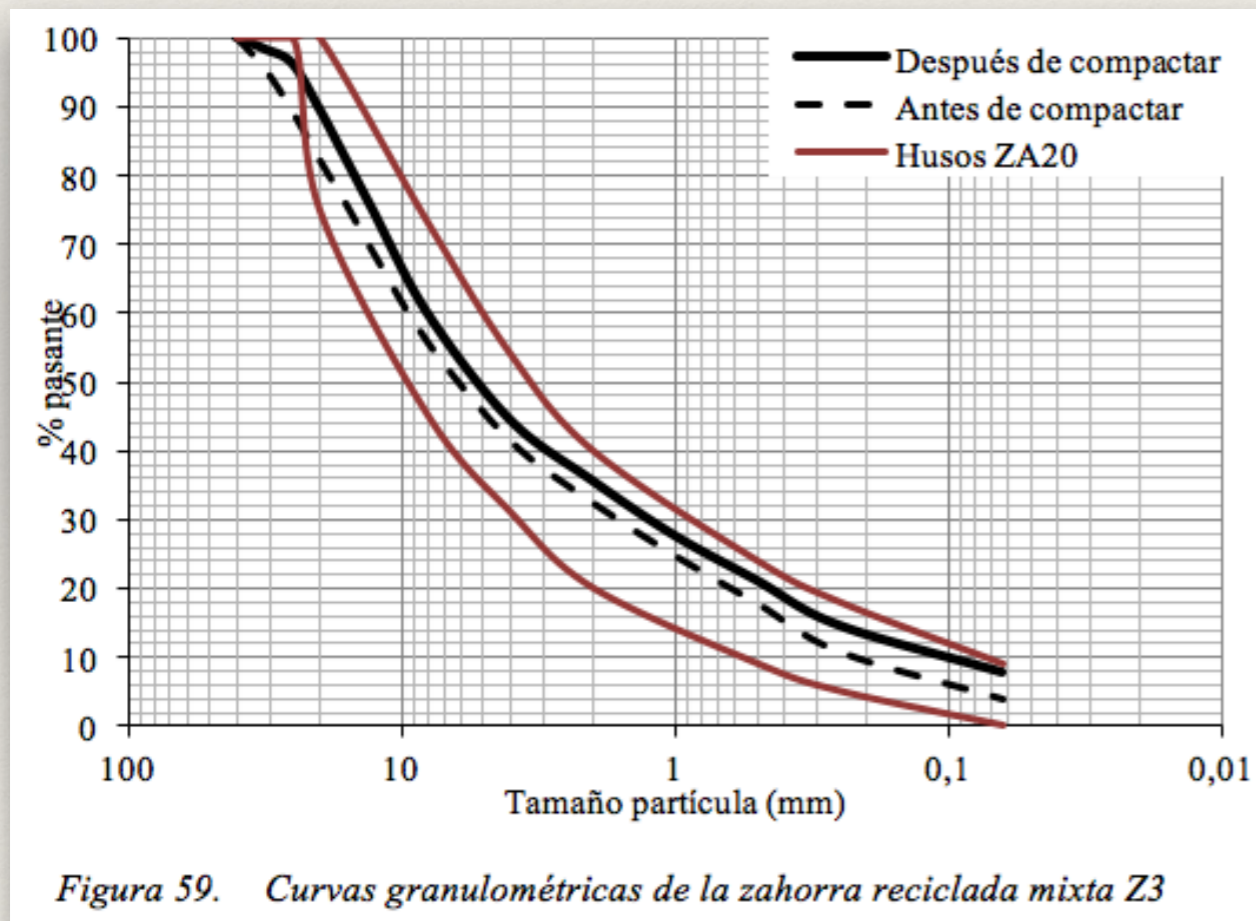


Figura 59. Curvas granulométricas de la zahorra reciclada mixta Z3

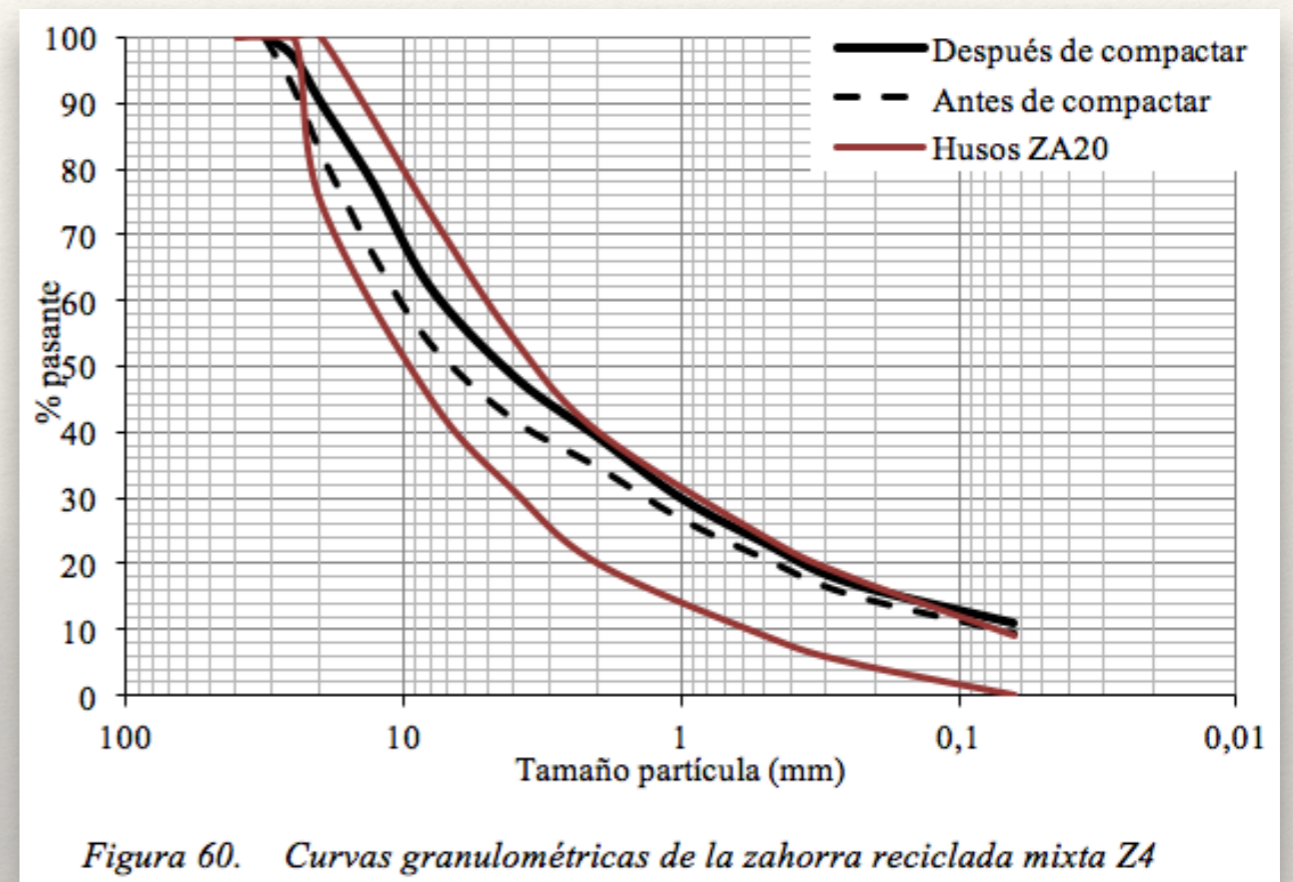


Figura 60. Curvas granulométricas de la zahorra reciclada mixta Z4

Para el caso de la zahorra reciclada mixta Z4 (Figura 60) la granulometría después de la compactación se encuentra desplazada hacia la derecha, al igual que en los dos casos anteriores, a pesar de que, en su fracción más fina (inferior a 2 mm), se encuentra muy cercana al límite superior exigido por el PG-3 para ZA20.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

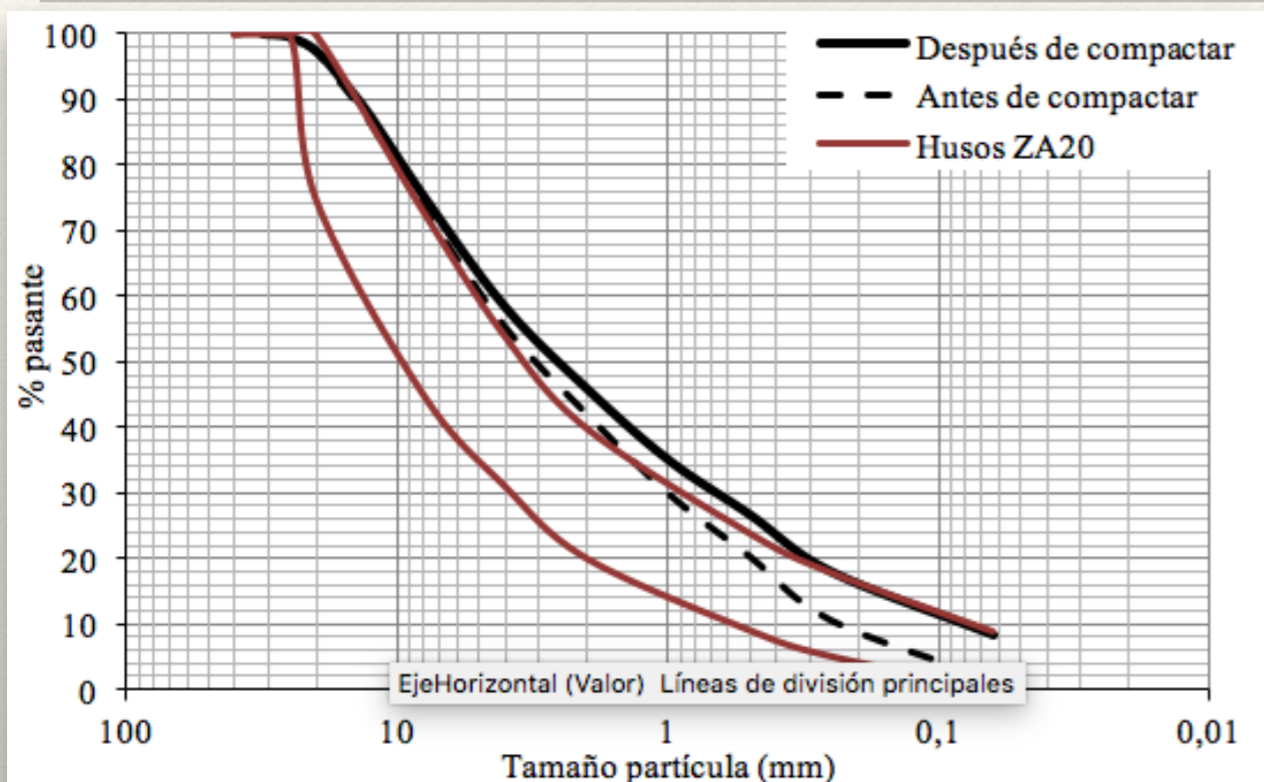


Figura 61. Curvas granulométricas de la zahorra reciclada de hormigón Z5

En contraste con las zahorras recicladas mixtas, en la Figura 61 se observa un aumento bastante claro de la fracción contenido de finos en la zahorra reciclada de hormigón Z5, que pasa del 1,5% al 8,3% (Tabla 36). Esto es debido a la disgregación de partículas de mortero por el efecto de la energía de compactación. Este efecto dependerá de la calidad y resistencia del mortero.

Además del huso granulométrico, el PG-3 especifica que el cernido por el tamiz 0.063 mm debe ser menor que los dos tercios (2/3) del cernido por el tamiz 0.250 mm. En todas las

granulometrías estudiadas, se cumple este criterio, tal y como muestra la Tabla 36.

		Pasante por 0.063 mm	2/3 Pasante por 0.250 mm
ZA-C	Antes	6,0	6,2
	Después	8,0	8,1
Z2	Antes	8,9	10,6
	Después	10,4	12,7
Z3	Antes	4,0	7,2
	Después	7,9	9,8
Z4	Antes	9,4	10,3
	Después	11,1	11,5
Z5	Antes	1,5	7,1
	Después	8,3	12,0

Tabla 36. Limitación granulométrica del PG-3

## 5.3.1.5. Conclusiones

### a) Efecto del yeso en la estabilidad dimensional

Antes del lavado por agua de lluvia, el aumento de un 1.5% de yeso produce una mejora de la capacidad portante mientras que cuando este porcentaje sube al 3%, el índice C.B.R. desciende levemente. Además, no se aprecian pérdidas significativas en la capacidad portante de los áridos cuando éstos han sido sometidos a ciclos de lluvia equivalente a 10 años, sino que, por el contrario, se observa una leve mejoría de esta propiedad.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

En cuanto al hinchamiento-colapso de las muestras compactadas las variaciones mostradas con respecto a la muestra antes de los ciclos de lluvia, puede afirmarse que son insignificantes, garantizando la estabilidad dimensional de estos materiales puestos en obra, incluso con contenido total de azufre superior al 3%.

### b) Estudio de susceptibilidad a la compactación

A partir de los resultados obtenidos, se puede afirmar que las zahorras recicladas seleccionadas para este estudio no presentaban, ya de partida, una buena distribución granulométrica conforme a los husos descritos en PG-3 para este tipo de materiales. Sin embargo, tras la compactación, no se han producido grandes cambios en esta distribución, aunque si bien es cierto que el porcentaje de cernido acumulado ha aumentado levemente para todos los tamaños de tamices.

Así, se puede afirmar que durante la compactación de las zahorras recicladas se produce la rotura de las partículas más blandas generando un aumento del porcentaje de finos. Este efecto es más acusado en el caso de la zahorra reciclada de hormigón, en el que las partículas de mortero son las más frágiles frente a la compactación según los resultados obtenidos, aunque si bien es cierto que dependerá del tipo y cantidad de cemento, cantidad de arena, edad del mortero y resistencia del hormigón del que proceda.

De igual forma, se observa una mayor resistencia al desgaste de los áridos reciclados una vez han sido compactados, ya que después de la compactación, las partículas restantes son las más resistentes al desgaste, esto es, se rompen las más blandas, resultando en todos los casos un coeficiente de Los Ángeles menor de 40, por lo que pueden ser utilizadas, basándose en este criterio, como zahorras incluso en una categoría de tráfico T2.

### 5.3.1.6. Recomendaciones de uso de zahorras recicladas en capas estructurales de firmes

Al igual que en los áridos reciclados, se distinguen cuatro clases de zahorras recicladas, una de hormigón, dos mixtas y una asfáltica. La Tabla 37 muestra la clasificación y su denominación comercial.

	Descripción
ZARHor	Zahorra artificial reciclada de hormigón
ZARM I	Zahorra artificial reciclada mixta tipo I
ZARM II	Zahorra artificial reciclada mixta tipo II
ZARA	Zahorra artificial reciclada asfáltica

Tabla 37. Denominación de las zahorras recicladas



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

En las Tabla 38 a 41 se recogen los requisitos relativos a composición, geometría, físico-mecánicos y químicos que deben cumplir cada uno de estos materiales.

		ZARHor	ZARM I	ZARM II	ZARA
<b>Composición</b> UNE-EN 933-11:2009	Rc + Ru + Ra	-	≥ 70%	≥ 70%	≥ 90%
	Rc + Ru	≥ 90%	≥ 55%	≥ 55%	-
	Rc	-	-	-	-
	Ra	-	-	-	≥ 50%
	Rb	-	-	-	-
	X	< 1%		< 2 %	< 1%
	FL	<1 cm³/kg		<2 cm³/kg	<1 cm³/kg

Tabla 38. Clasificación de zahorras recicladas según ensayo de composición

		ZARHor	ZARM I	ZARM II	ZARA
<b>Absorción</b> UNE-EN 933-1:2012	< 4 mm	< 10 %	< 12%	< 14 %	< 10 %
	> 4 mm	< 7 %	< 9%	< 11%	< 7%
<b>Equivalente de Arena</b> UNE-EN 933-8:2012+A1:2015		> 35	> 30	> 25	> 35
<b>Plasticidad</b>	UNE 103103:1994	N.P.		LL < 25	N.P.
	UNE 103104:1993			IP < 6	
<b>C.B.R.</b> UNE 103502:1995		> 40	> 20	> 30	
<b>Pérdida de masa en el ensayo de estabilidad a los sulfatos</b> UNE-EN 1367-2:2010		≤ 18%			

Tabla 40. Requisitos físico-mecánicos de las zahorras recicladas

		ZARHor-ZARM I-ZARA			ZARM II		
		0/32	0/20	ZAD 0/20	0/40	0/32	0/22
<b>Granulometría</b> UNE EN 933-1	56	-	-	-	100	-	-
	45	-	-	-	85-100	100	-
	40	100	-	-	75-99	87-100	-
	32	88-100	100	100	68-95	75-99	100
	20	65-90	75-100	65-100	56-85	62-91	71-97
	12,5	52-76	60-86	47-78	44-74	50-79	55-84
	8	40-63	45-73	30-58	35-63	40-68	45-75
	4	26-45	31-54	14-37	22-46	27-51	32-61
	2	15-32	20-40	0-15	15-35	20-40	25-50
	0,5	7-21	9-24	0-6	7-23	7-26	10-32
	0,25	4-16	5-18	0-4	4-18	4-20	5-24
0,063	0-9	0-9	0-2	0-9	0-11	0-11	
<b>Índice de lajas</b> UNE-EN 933-3:2012		< 35					
<b>Partículas total y parcialmente trituradas</b> UNE-EN 933-5:1999 y UNE-EN 933-5:1999/A1:2005	T2	> 70 %					
	T3-T4	> 50 %					
<b>Partículas totalmente redondeadas</b> UNE-EN 933-5:1999 y UNE-EN 933-5:1999/A1:2005		< 10			< 50		

En todos los casos, el cernido por el tamiz 0,063 mm (norma UNE-EN 933-2) será menor que los dos tercios (< 2/3) del cernido por el tamiz 0,250 mm (norma UNE-EN 933-2).

Tabla 39. Requisitos geométricos de las zahorras recicladas

		ZARHor	ZARM I	ZARM II	ZARA
<b>Materia Orgánica</b> UNE 103204:1993		< 1%	< 2 % <sup>(1)</sup>		
<b>Comp. totales de azufre (SO<sub>3</sub>) <sup>(2)</sup></b> UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013. Punto 11		1,3%	1,8%	1,3%	
<b>Sulfatos solubles en Agua (SO<sub>4</sub>)</b> UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013. Punto 10.2		< 0,7% (SO <sub>4</sub> ) < 0,5 (SO <sub>4</sub> ) en contacto con hormigón			

<sup>(1)</sup> Siempre que se justifique que la materia orgánica provenga de materiales bituminosos

<sup>(2)</sup> Siempre que no esté en contacto con cemento u hormigón. Si no fuera así, el contenido de azufre total deberá ser inferior al 0,5% expresado en SO<sub>3</sub>.

Tabla 41. Requisitos químicos de las zahorras recicladas



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Las aplicaciones donde pueden ser usadas estas zahorras se muestran a continuación en la Tabla 42:

	Desgaste Los Ángeles (UNE-EN 1097-2:2010)			
	Capas granulares de firmes			Vías ciclistas y peatonales urbanas
	T2	T3	T4	
ZARHor	< 35			< 40
ZARM I				< 40
ZARM II			< 40	< 45
ZARA	< 35			< 40

Tabla 42. Principales aplicaciones de zahorras recicladas

## 5.3.2. Suelos reciclados

### 5.3.2.1. Recomendaciones de uso de suelos reciclados

Si los materiales reciclados de granulometría continua no se clasifican dentro de alguna de las clases de zahorra indicadas en el apartado anterior, podrán ser clasificados como suelos reciclados si cumplen los criterios mostrados en las Tabla 43 a 46.

		SR Seleccionado	SR Tolerable
<b>Composición</b> UNE-EN 933-11:2009	X	< 3%	< 5%
	FL <sup>(1)</sup>	< 2 cm <sup>3</sup> /kg	
	Yeso	< 1 %	< 2 %

<sup>(1)</sup> Se rebajará a 0,5 cm<sup>3</sup>/kg cuando el suelo no vaya a ser cubierto por ninguna otra capa.

Tabla 43. Clasificación de los suelos reciclados según el ensayo de composición

		SR Seleccionado	SR Tolerable
<b>Granulometría</b>	UNE 103101:1995	# 20 > 70 % y # 0,40 < 15% ó # 2 < 80%, # 0,40 < 75% # 0,08 < 25% LI < 30 IP < 10	# 20 > 70 % ó # 0,080 > 35%
<b>Tamaño máximo</b>		D <sub>máx</sub> ≤ 100 mm	-

Tabla 44. Requisitos geométricos de los suelos reciclados

		SR Seleccionado	SR Tolerable
<b>Absorción</b> UNE-EN 1097-6:2000	< 4 mm	-	-
	> 4 mm	< 12%	< 14%
<b>Asiento ensayo colapso</b>	NLT-254/99	-	< 1%
<b>Hinchamiento libre</b>	UNE 103601:1996	-	< 3%
<b>Plasticidad</b>	UNE 103103:1994	LL < 30	LL < 65
	UNE 103104:1993	IP < 10	IP > 0,73 (LL-20) siempre que LL > 40

Tabla 45. Requisitos físico mecánicos de los suelos reciclados



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

	SR Seleccionado	SR Tolerable
<b>Materia orgánica</b> UNE 103204:1993	<0,2 % si procede de tierras de excavación	< 2 %
	<1% si procede de RCD	
	<2 % si procede de material bituminoso	
<b>Sales solubles</b> NLT-114/99	< 2 %	< 4 %
<b>Contenido en yesos</b> NLT-115	< 2 %	< 5 %

Tabla 46. Requisitos químicos de los suelos reciclados

Estos suelos podrán ser utilizados en las aplicaciones mostradas en la Tabla 47.

	CORONACIÓN (CBR ≥ 5)	NÚCLEO y CIMENTO (CBR ≥ 3)
<b>SR Seleccionado</b>		
<b>SR Tolerable</b>		

Tabla 47. Aplicaciones de suelos reciclados

Aquellos materiales que no hayan podido ser clasificados como zahorras ni suelos reciclados seleccionados o tolerables (no clasificados), requerirán un estudio adicional para destinarle una determinada aplicación.

## 5.3.3. Material drenante reciclado

### 5.3.3.1. Introducción

Las zanjas drenantes consisten en zanjas rellenas de material drenante, adecuadamente compactado, en el fondo de las cuales generalmente se dispone un dren (perforado, o con juntas abiertas), y que, se aíslan de las aguas superficiales por una capa impermeable que sella su parte superior. A veces se omiten los tubos de drenaje, en cuyo caso la parte inferior de la zanja queda completamente rellena de material drenante, constituyendo un dren ciego o dren francés. En estos drenes el material que ocupa el centro de la zanja es piedra gruesa. Cuando exista peligro de migración del suelo, que rodea la zanja, se deberá disponer de un filtro normalmente geotextil, protegiendo el material drenante.

Los rellenos localizados de material drenante (Art. 421 PG-3) consisten en la extensión y compactación de materiales drenantes en zanjas, trasdoses de obras de fábrica, o cualquier otra zona, cuyas dimensiones no permitan la utilización de los equipos de maquinaria pesada.

Los materiales drenantes a emplear en rellenos localizados serán áridos naturales, o bien áridos procedentes del machaqueo y trituración de piedra de cantera o grava natural, o áridos



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

artificiales. En todo caso estarán exentos de arcilla, y otros materiales extraños. El PG-3 vigente no contempla el uso de áridos reciclados de RCD como material drenante, tampoco las recomendaciones de GIASA (2010) ni la Guía Española de Áridos Reciclados (2012) contempla este uso para los áridos reciclados.

Las condiciones exigidas en el PG-3 se resumen a continuación en la Tabla 48. En esta tabla se puede ver que el tamaño máximo no será, en ningún caso, superior a 76 mm (equivalente a 3"), y el cernido ponderal acumulado por el tamiz 0,08 mm no rebasará el 5%.

En las condiciones de filtro, el  $F_x$  es el tamaño o abertura del tamiz por el cual pasa el x%, en peso, del material filtrante, y  $d_x$  el tamaño o abertura del tamiz por el cual pasa el x%, en peso, del terreno a drenar.

### 5.3.3.2. Objetivos

El objetivo general de esta tarea es establecer unas recomendaciones de uso de áridos reciclados de RCD como material drenante para usarse en relleno de zanjas drenantes ciegas, relleno en zanjas con tuberías de drenaje y/o trasdoses de obras de fábrica y muros. Asimismo, se pretende identificar las propiedades limitantes de estos AR con respecto a las especificaciones del Art. 421 del PG-3, así como la estabilidad química a largo plazo de estos materiales.

### 5.3.3.3. Materiales y métodos

Se han seleccionado 5 áridos reciclados gruesos, 2 de ellos mixtos y 3 procedentes de hormigón. El material drenante seleccionado para este estudio es el material grueso retenido en la criba de 30 ó 40 mm utilizadas en las plantas para la producción de zahorras recicladas. La Tabla 49 muestra el origen y denominación de los materiales empleados en este estudio.

Composición granulométrica			
Tamaño máximo			76 mm
Pasante por el 0,080 mm			< 5%
Condiciones de filtro <sup>(1)</sup>	Generales	<sup>(1)</sup> F15/d85 (Filtrante/capa a Drenar)	< 5
		<sup>(1)</sup> F15/d15 (Filtrante/capa a Drenar)	> 5
		<sup>(1)</sup> F50/d50 (Filtrante/capa a Drenar)	< 25
	En limos y arenas finas	F15	< 1 mm
	En suelos cohesivos	Las condiciones a) y b) son sustituidas por F15	< 0,4 mm > 0,1 mm
	Uso con tubos perforados	F85/diámetro del orificio	> 1
	Uso con tubos con juntas abiertas	F85/apertura de la junta	> 1,2
	Uso con tubos de hormigón poroso	F85/ d15 del árido del tubo	> 0,2
Coeficiente de uniformidad	En rellenos drenantes localizados	Coeficiente de uniformidad (F60/F10)	< 20
	En drenes ciegos	Coeficiente de uniformidad (F60/F10)	< 4
Plasticidad			
No plástico			
Equivalente de arena		UNE EN 933-8	> 30
Calidad			
Los Ángeles		UNE EN 1097-2	< 40
Estabilidad química y mecánica			

<sup>(1)</sup> Si no fuera posible cumplir las condiciones de filtro, se debe envolver el material drenante con un filtro geotextil para evitar su contaminación con el material que lo rodea.

Tabla 48. Requisitos exigidos por el PG-3, en el artículo 421



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Con el propósito de identificar las propiedades limitantes de estos materiales, se ha realizado una caracterización física y química de los mismos, para lo que se han llevado a cabo los ensayos indicados en el artículo 421 del PG-3, además del ensayo de densidad-absorción, el ensayo de composición, resistencia a ciclos de hielo-deshielo, y ensayos químicos de caracterización, como azufre total, sales solubles, sulfatos solubles en agua, cloruros, materia orgánica, y contenido en yeso.

Para evaluar la estabilidad química, se ha realizado el ensayo de lixiviación en columna, mediante la norma NEN 7343 para observar la posible contaminación frente a sucesivos ciclos de lavado.

Tipo de material	Procedencia	Denominación
Árido reciclado grueso mixto	Epsilon (Córdoba)	D1
Árido reciclado grueso mixto	Gecorsa (Córdoba)	D2
Árido reciclado grueso de hormigón	Guhilar (Granada)	D3
Árido reciclado grueso de hormigón	Aristerra (Málaga)	D4
Árido reciclado grueso de hormigón	Mijas (Málaga)	D5

Tabla 49. Descripción y procedencia de los materiales estudiados

## 5.3.3.4. Resultados

Las tablas 50 y 51 muestran los resultados de las propiedades físicas y químicas de los cinco materiales.

			D1	D2	D3	D4	D5
<b>Granulometría</b>	UNE-EN 933-1	200	100	100	100	100	100
		150	67,9	100	100	100	100
		100	59,3	100	100	100	100
		63	53,3	80,8	85,9	75,1	63,4
		50	47,1	54,7	66,4	55,1	34,7
		40	24,9	13,1	37,6	23,8	16,0
		31,5	12,3	6,7	20,6	4,6	0,2
		25	5,7	2,9	6,8	0,9	-
		16	1,4	0,9	1,5	0,1	-
<b>Hielo-deshielo</b>	UNE-EN 1367-2	MS (%)	4	3	4	7	5
<b>Composición (% en peso)</b>	UNE-EN 933-11	Rc	63,5	59,5	62,9	80,9	95,6
		Ru	21,1	6,6	29,6	17,8	4,4
		Rb	15,4	33,8	3,6	1,3	-
		Ra	-	-	3,8	-	-
		Rg	-	-	-	-	-
		X	-	-	-	-	-
<b>Densidad (kg/m³) y Absorción (%)</b>	UNE 1097-6 (> 4 mm)	pa	2637	2619	2718	2787	2707
		prd	2066	2103	2341	2384	2391
		psd	2283	2300	2480	2526	2508
		WA24	10,5	9,4	5,9	6,1	4,9
<b>Coefficiente de Los Ángeles (%)</b>	UNE-EN 1097-2 (Anejo G) <sup>(1)</sup>		43	49	35	45	50
<b>Plasticidad</b>	UNE 103-103	LL	NP	NP	NP	NP	NP
	UNE 103-104	LP	NP	NP	NP	NP	NP

<sup>(1)</sup> Para las muestras de mayor tamaño (D1-D5), que apenas poseen fracción 10/14mm, se realizó el ensayo de Desgaste de Los Ángeles UNE-EN 1097-2 de 2010, que en su Anejo G contempla como alternativa su realización con fracciones granulométricas alternativas de 16/32 mm para áridos reciclados.

Tabla 50. Resultados de caracterización física



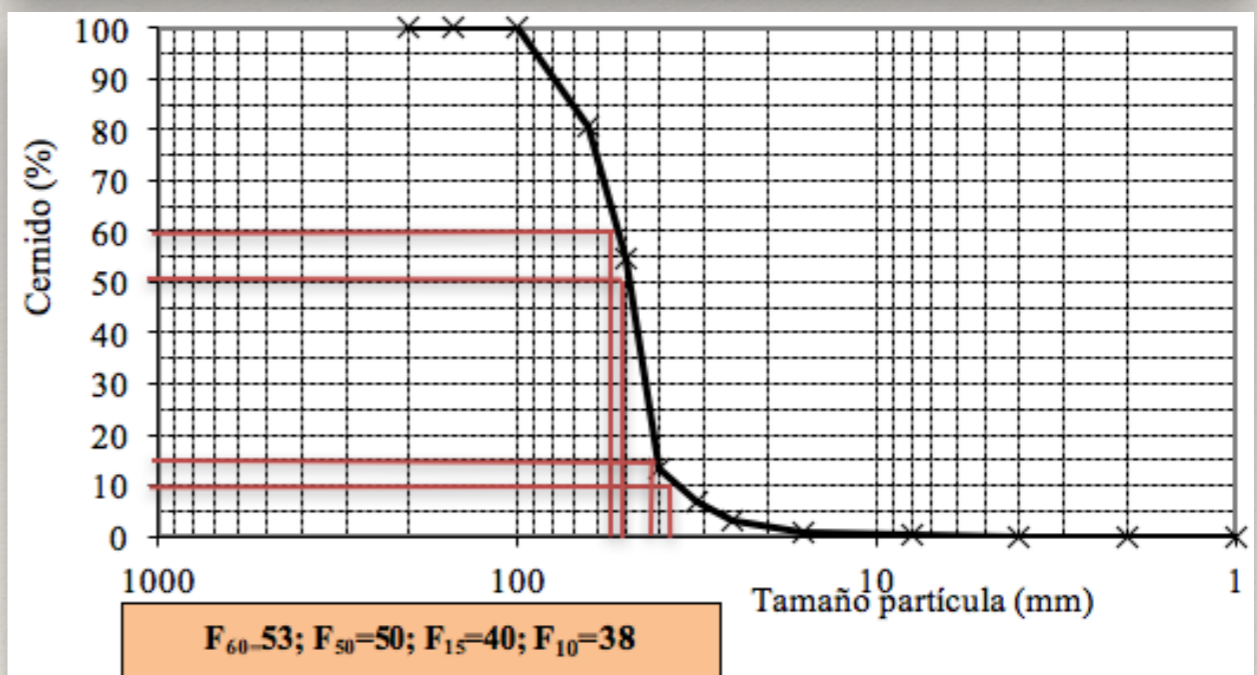
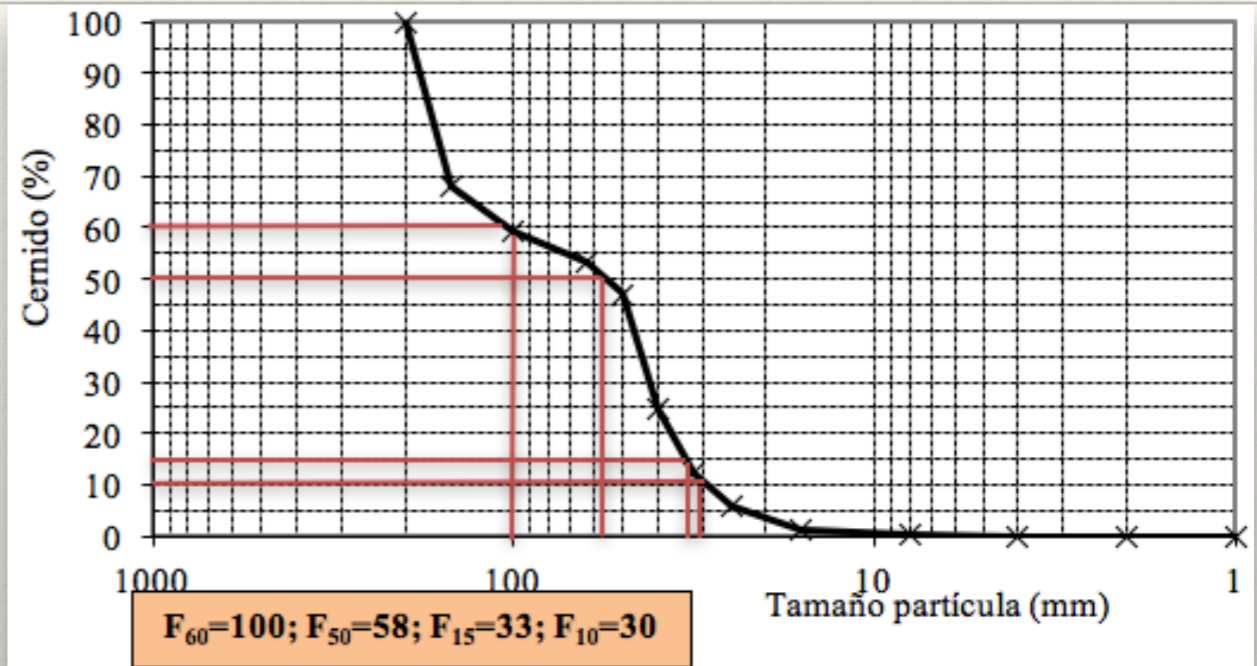
# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

			D1	D2	D3	D4	D5
Azufre Total	UNE-EN 1744-1	(%SO <sub>3</sub> )	1,40	0,71	0,38	0,14	0,68
Sales Solubles	NLT-114	(%)	1,26	0,31	0,15	0,34	0,21
Sulf. sol. en Agua	UNE-EN 1744-1 (Apdo. 10.2)	(%SO <sub>3</sub> )	0,631	0,06	0,068	0,08	0,092
Sulf. sol. en ácido	UNE-EN 1744-1	(%SO <sub>3</sub> )	1,27	0,53	0,29	0,08	0,50
Cloruros	UNE-EN 196-2	(%)	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
Mat. Orgánica	UNE 103204	(%)	0,64	0,51	0,58	0,56	0,61
Yesos	NLT-115	(%)	1,54	0,58	0,36	0,59	0,59

Tabla 51. Resultados de la caracterización química

a) Identificación de propiedades limitantes con respecto al PG-3

Las Figuras 62 a 66 muestran las curvas granulométricas de los 5 materiales. Todas presentan una forma continua y tamaños de partículas comprendidos entre 30 y 100 mm, salvo el material D1 que tiene una discontinuidad entre 50 y 150 mm y un tamaño comprendido entre 20 y 200 mm.





# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

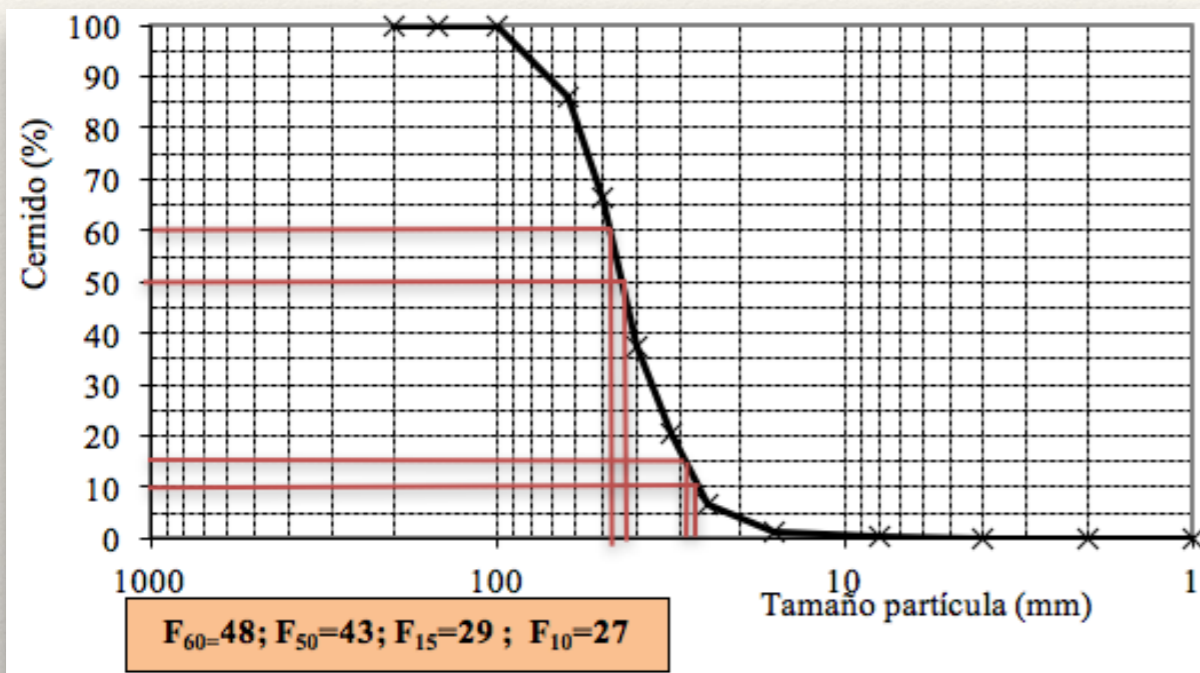


Figura 64. Curva granulométrica de D3

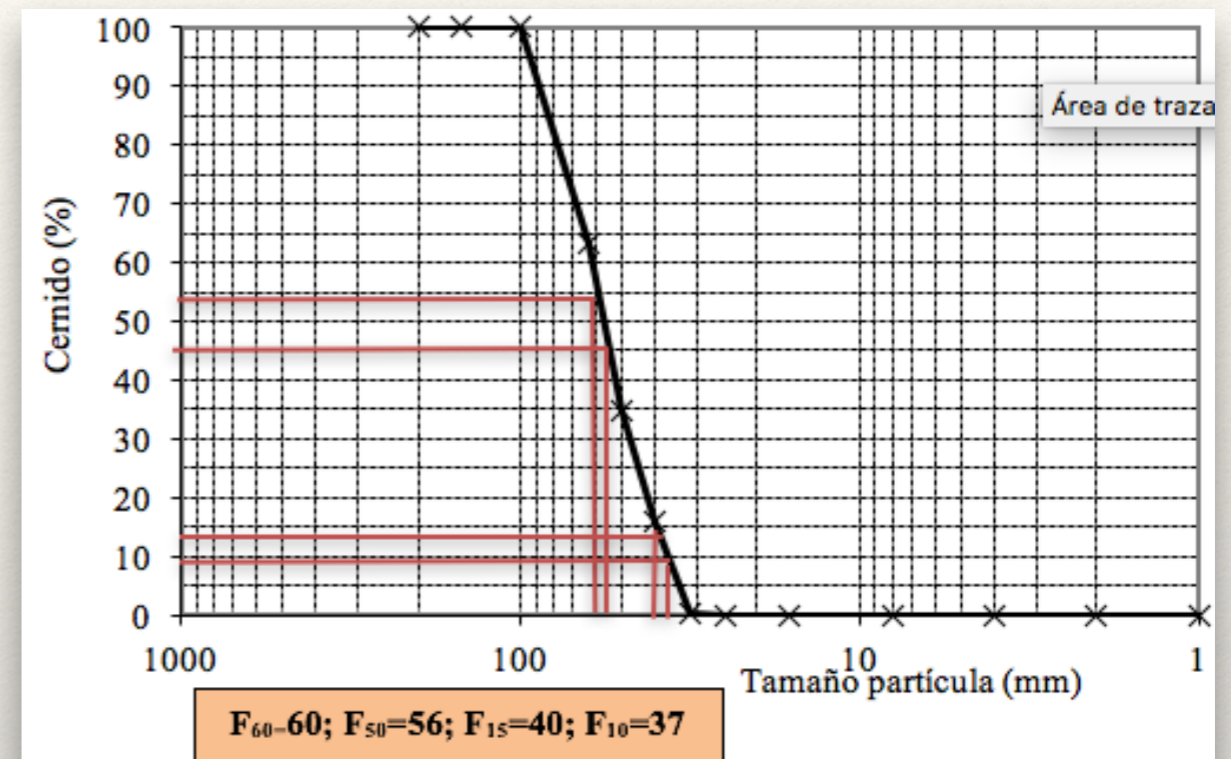


Figura 66. Curva granulométrica de D5

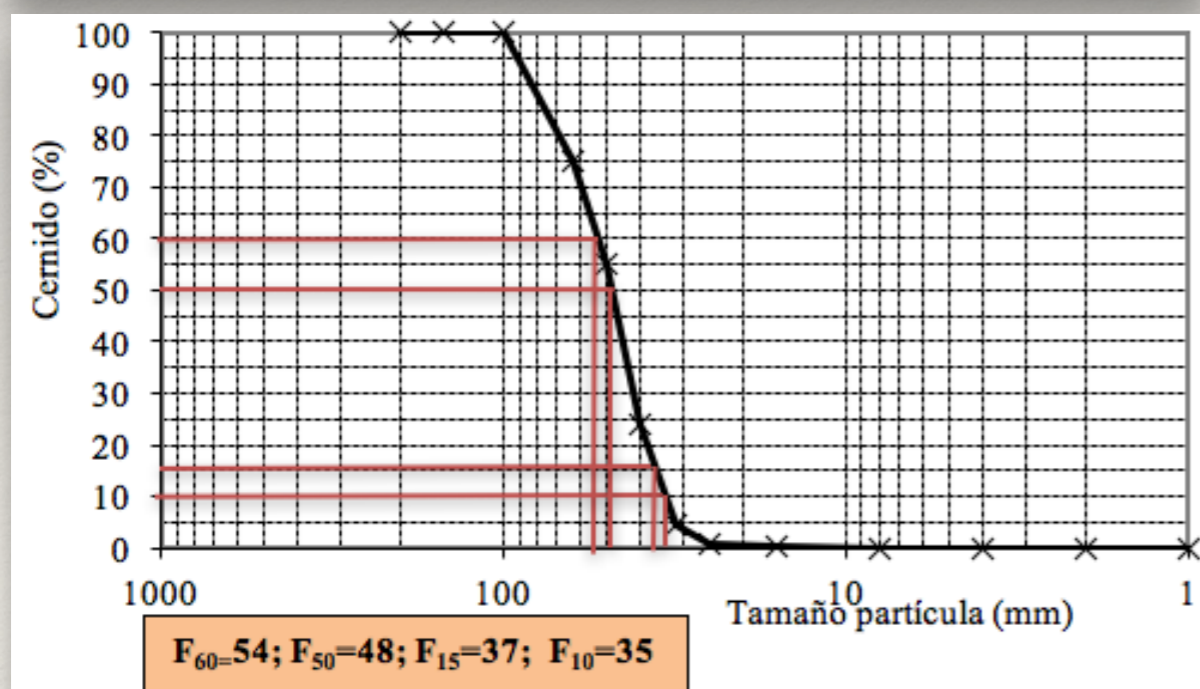


Figura 65. Curva granulométrica de D4



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

La Tabla 52 recoge los límites exigidos por el PG-3 y los valores obtenidos para los materiales drenantes. En fondo amarillo, se indican los valores que no cumplen el PG-3.

		PG-3	D1	D2	D3	D4	D5
Clasificación general		--	ARM-II	ARM-II	ARH	ARH	ARH
Granulometría UNE-EN 933-1	Tamaño máximo	76 mm	> 76 mm	< 76 mm	< 76 mm	< 76 mm	< 76 mm
	Pasante por 0,08 mm	< 5%	D	D	D	D	D
	F60/F10	< 20 < 4	3,6	1,5	1,8	1,6	1,7
Plasticidad	UNE 103104	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Los Ángeles	UNE-EN 1097-2	< 40	43	49	35	45	50

\*D = despreciable

Tabla 52. Propiedades físico-mecánicas de los materiales drenantes

Se identifica como propiedad físico-mecánica limitante el coeficiente de LA. Se propone elevar hasta 50 cuando el material drenante no esté sometido a cargas y a 45 cuando esté sometido a cargas equivalente superiores a categoría de tráfico T4. El Equivalente de Arena es un ensayo que no puede hacerse en el caso de usar como drenantes materiales muy gruesos.

## b) Comprobación de las condiciones de filtro

Para evitar la contaminación con partículas finas del suelo a drenar, los materiales drenantes deben cumplir las condiciones de filtro especificadas en la Tabla 34. Para ver si estos materiales reciclados cumplen las condiciones de filtro se han comparado con distintas tipologías de suelos. Los resultados están recogidos

en el Anexo-1 y se concluye que debido al gran tamaño de partícula de los materiales drenantes reciclados ensayados y su bajo coeficiente de uniformidad, deberán ser envueltos por un filtro geotextil que evite su contaminación con partículas finas.

## c) Estabilidad del material a largo plazo

Para evaluar la estabilidad química de los materiales a largo plazo, se han utilizado como datos de partida los resultados del test de percolación (según la Norma NEN 7343), ya que evalúa la concentración de elementos liberados a largo plazo por el material. Dicho ensayo de laboratorio obtiene los niveles de contaminantes liberados a lo largo de siete extracciones. Cada una de las extracciones representa diferentes condiciones de campo, y pueden ser traducidas a una escala de tiempo, lo cual permite determinar cuál es el tiempo de emisión equivalente de cada una de las extracciones (Hjelmar y col., 1986).

Por tanto, para una aplicación "tipo" del material grueso usado como material drenante se podría analizar si la pérdida de masa del material ha sido elevada o de lo contrario, la alteración del mismo ha sido despreciable. Para desarrollar este análisis, se ha calculado la concentración acumulada (expresada en g/kg) de todos los elementos que son medidos por el ICP-masas, siendo éstos un total de 83. En la Tabla 53 se indican los valores acumulados obtenidos para cada uno de los materiales.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Para estimar en qué plazo de tiempo se alcanzaría esa pérdida de material, se ha considerado una zanja drenante tipo de un espesor de 1 m y una densidad del material de 1,6 kg/l. Realizando los cálculos correspondientes, el valor acumulado de las concentraciones obtenidas al final del ensayo de percolación se alcanzarían en un periodo de aproximadamente 100 años.

PÉRDIDA DE MASA (a 100 años)	D1 acumulado	D2 acumulado	D3 acumulado	D4 acumulado	D5 acumulado
Total (g/kg)	41,3	9,3	3,9	5,4	4,0
Porcentaje en peso (%)	4,13%	0,93%	0,39%	0,54%	0,40%

Tabla 53. Análisis de la estabilidad química de los materiales

Se observa que los materiales más estables químicamente son el D3 y D5 con un 0,39 y 0,40% de pérdida de masa. Estos datos son consecuentes con los resultados comentados en el apartado 3.7 “Consideraciones ambientales”, ya que ambos materiales son clasificados como materiales INERTES.

Por otra parte, el material drenante más inestable es el D1, ya que podría alcanzar una pérdida de masa del 4% aproximadamente. Si bien cabría destacar que, según los cálculos realizados, al producirse en un periodo de unos 100 años se considera despreciable.

## 5.3.3.5. Conclusiones

a) Comprobación de los requisitos del artículo 421 "Rellenos localizados de material drenante" del PG3.

Se identifica como propiedad físico-mecánica limitante el coeficiente de Los Ángeles. Cuatro de los cinco materiales superan el valor de 40 propuesto en el PG3. Se propone elevarlo hasta 50 cuando el material drenante no esté sometido a cargas y a 45 cuando esté sometido a cargas equivalentes superiores a categoría de tráfico T4.

a) Comprobación de las condiciones de filtro

Todos los materiales estudiados no cumplen alguna de las condiciones de filtro por lo que existe riesgo de contaminación del material drenante por migración del suelo que rodea al material drenante. Esto es debido al gran tamaño de partícula de los materiales drenantes reciclados ensayados y su bajo coeficiente de uniformidad. Para evitar este riesgo, cuando se vaya a utilizar un material de gran tamaño se deberá disponer un geotextil envolviendo al material drenante que actúe de protección. Sin embargo en materiales drenantes reciclados que estén constituidos por una mezcla equilibrada de arenas, gravilla y grava, no sería necesario disponer un geotextil.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

## c) Estudio de la estabilidad química

La estabilidad química de los materiales, estudiada a través de la pérdida de masa acumulada experimentada en un ensayo de percolación, está garantizada ya que cuatro de los materiales han experimentado en un periodo de tiempo equivalente a 100 años aproximadamente, una pérdida inferior al 1% y uno ha tenido una pérdida ligeramente superior al 4%.

En resumen, se puede decir que los materiales drenantes reciclados tanto mixtos como de hormigón, se pueden utilizar en la ejecución de zanjas y rellenos drenantes, siempre que el material no esté sometido a cargas externas importantes, ya que en este caso el coeficiente de desgaste de Los Ángeles no tendría una gran relevancia.

Por último, cuando el material reciclado sea de gran tamaño, se deberá envolver el material en un geotextil de protección que evite la contaminación del material por migración del suelo que lo rodea.

## 5.3.3.6. Recomendaciones de uso de material drenante reciclado

En las Tabla 54 a 57 se muestran los requisitos relativos a composición, geometría, físico-mecánicos y químicos que deben cumplir estos materiales.

		Drenante
Composición UNE-EN 933-11:2009	X	< 1% <sup>(1)</sup>
	FL	< 2 cm <sup>3</sup> /kg <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Valores permitidos en la clasificación general

Tabla 54. Requisitos para material drenante reciclado según ensayo de composición

		Drenante
Granulometría UNE-EN 933-1:2012	Tamaño máximo	80 mm
	Pasante por el 0,063 mm	< 5%
Índice de lajas UNE-EN 933-3:2012		< 35 <sup>(2)</sup>

<sup>(2)</sup> Valores propuestos para evitar que los materiales cerámicos (con un elevado índice de lajas) perforen los geotextiles.

Tabla 55. Requisitos geométricos del drenante reciclado



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

			Drenante
<b>Condiciones de filtro</b> <sup>(3)</sup>	Generales	a) F15/d85 (Filtrante/capa a Drenar)	< 5
		b) F15/d15 (Filtrante/capa a Drenar)	> 5
		c) F50/d50 (Filtrante/capa a Drenar)	< 25
En limos y arenas finas	F15		< 1 mm
	En suelos cohesivos	Las condiciones a) y b) son sustituidas por F15	< 0,4 mm > 0,1 mm
<b>Sistema previsto de evacuación del agua</b>	Uso con tubos perforados	F85/diámetro del orificio	> 1
	Uso con tubos con juntas abiertas	F85/apertura de la junta	> 1,2
	Uso con tubos de hormigón poroso	F85/ d15 del árido del tubo	> 0,2
	En drenaje por mechinales	F85/diámetro del mechinales	> 1
<b>Coefficiente de uniformidad</b>	En rellenos drenantes localizados	Coefficiente de uniformidad (F60/F10)	< 20
	En drenes ciegos	Coefficiente de uniformidad (F60/F10)	< 4
<b>Plasticidad</b> UNE 103103 y UNE 103104			No plástico
<b>Equivalente de arena</b> UNE EN 933-8			> 30
<b>Los Ángeles</b> UNE EN 1097-2	Carga de tráfico igual e inferior a T4		< 50
	Carga de tráfico T2 y T3		< 45

<sup>(3)</sup> Los materiales drenantes estarán exentos de cumplir las condiciones de filtro en caso de utilizar un geotextil como elemento de separación y filtro.

Tabla 56. Requisitos físico-mecánicos del drenante reciclado

		Drenante
<b>Azufre total (SO<sub>3</sub>)</b> UNE-EN 1744-1:2009	En materiales en contacto con hormigón	< 0,5% <sup>(4)</sup>
	En el resto de casos	1,3%

<sup>(4)</sup> Límite establecido en el Art. 510 del PG-3

Tabla 57. Requisitos químicos del material drenante reciclado

## 5.3.4. Material fino reciclado

### 5.3.4.1. Recomendaciones de uso del fino reciclado

La propuesta de recomendaciones técnicas para el uso de áridos reciclados en capas de asiento de tuberías y rellenos de zanjas está basada en el Manual of Contract Documents for Highway Works: Volume 1 (MCHW1), Specification for Highway Works, Series 500 de Noviembre de 2009.

	Camas de tubería
<b>Impurezas máximas (X)</b> UNE-EN 933-11:2009	< 1 %

Tabla 58. Limitación de impurezas en finos reciclados según ensayo de composición



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Contenido de finos (< 0,063 mm) UNE-EN 933-1:2012			Camas de tubería
<b>Tam. Nom. Máx<sup>(1)</sup></b> UNE-EN 933-1:2012	<b>Diám. nominal tubería rígida</b>	100	10
		100-150	15
		150-300	-
		300-550	-
		> 550	-
	<b>Diám. nominal tubería flexible</b>	100	10
		100-150	15
		150-300	-
		300-550	-
		> 550	-

<sup>(1)</sup> Si el tamaño nominal máximo es  $\geq 15$  mm el contenido de finos debe ser  $\leq 5\%$

Tabla 59. Requisitos geométricos de los finos reciclados

		Camas de tubería
<b>Plasticidad<sup>(1)</sup></b>	<b>Límite líquido</b> UNE 103103	< 30
	<b>Índice Plasticidad</b> UNE 103104	< 10

<sup>(1)</sup> Si el contenido de finos es superior al 5% el material será N.P.

Tabla 60. Requisitos físico-mecánicos de los finos reciclados

	Camas de tubería
<b>Azufre total (SO<sub>3</sub>)</b> UNE-EN 1744-1:2009	< 1,5%
<b>S.S. ácido</b> UNE-EN 1744-1:2009 (ap. 12)	< 1 %
<b>Cloruros</b> UNE-EN 196-2:2006	< 0,1% <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Exigible en el caso de que el material esté en contacto con tuberías de hormigón armado o de acero

Tabla 61. Requisitos químicos de los finos reciclados

## 5.4. Recomendaciones para el empleo de áridos reciclados ligados con cemento

Los áridos reciclados de RCD se pueden utilizar para realizar materiales tratados con cemento. Entre las aplicaciones de estos materiales se pueden citar las siguientes:

- Suelo-cemento y grava-cemento para capas estructurales de firmes de carreteras
- Hormigón compactado con rodillo
- Gravas para la elaboración de hormigones tanto estructurales como no estructurales.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

El artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), permite el uso de áridos reciclados en la ejecución de capas de suelo-cemento y grava-cemento. Así mismo, la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 permite la sustitución de hasta un 20% de árido grueso natural por árido reciclado de hormigón (ARH) en la elaboración de hormigón estructural. Además, contempla la posibilidad de utilizar hasta el 100% de árido reciclado en la fabricación de hormigón no estructural, pero se exige de momento, que procedan de residuos de hormigón puro.

A continuación, se presenta una síntesis de los trabajos de investigación realizados por el equipo investigador relativos a estas tres aplicaciones, así como una propuesta relativa a los requisitos que deben cumplir en función de la aplicación a la que vayan a ser destinados. Por último, se incluyen unas recomendaciones de puesta en obra y control de calidad.

### 5.4.1. Suelo-cemento y grava-cemento para capas estructurales de firmes

#### 5.4.1.1. Introducción

La aplicación de materiales granulares tratados con cemento (suelo-cemento y grava-cemento), ha sido ampliamente utilizado en los últimos 30 años tanto a nivel nacional como internacional (Terrel R. L. y col. 1979). El cemento actúa como elemento estabilizador mezclado tanto con gravas como con áridos de granulometría fina, obteniendo un producto final en el caso del suelo-cemento con una elevada resistencia a la fatiga a medio y largo plazo, una adecuada trabajabilidad, y una gran capacidad portante (Jofre C. y Kraemer C. 2008).

Investigadores de la Universidad Tecnológica de Delft, Holanda (Xuan D. y col. 2011), estudiaron las propiedades mecánicas de los ARH y ARM tratados con cemento en laboratorio, concluyendo que la resistencia a compresión dependía del contenido en cemento, el tipo de cemento, el contenido de agua, el tiempo de curado, el grado de compactación y la calidad de los áridos reciclados. En una segunda fase de su estudio, investigaron sobre los cambios dimensionales que se producían en materiales reciclados con diferentes contenidos de partículas cerámicas. En esas investigaciones se realizaron trabajos con



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

áridos reciclados preparados en laboratorio, un paso importante, pero se deben extender esas investigaciones a materiales reciclados reales, los cuales son comercializados habitualmente.

Son escasas las aplicaciones reales de materiales reciclados tratados con cemento en firmes de carreteras. En concreto ha habido dos aplicaciones reales en la provincia de Málaga en los años 2008 y 2009, una de ellas de grava-cemento y otra de suelo-cemento. La primera fue promovida por GIASA, y publicada en la jornada denominada “Construcción sostenible” (Alaejos P. y col., 2010). Se llevó a cabo en la A-367, en el T. M. de Ardales (Málaga). Se realizaron dos secciones tipo que se muestran en la Figura 67. En una de ellas se utilizaron áridos naturales como capa de base y en la otra grava reciclada de hormigón. Ambos materiales se trataron con un 3,5% de cemento y tenían una granulometría correspondiente a una grava-cemento reciclada de hormigón (Pérez y col., 2013).

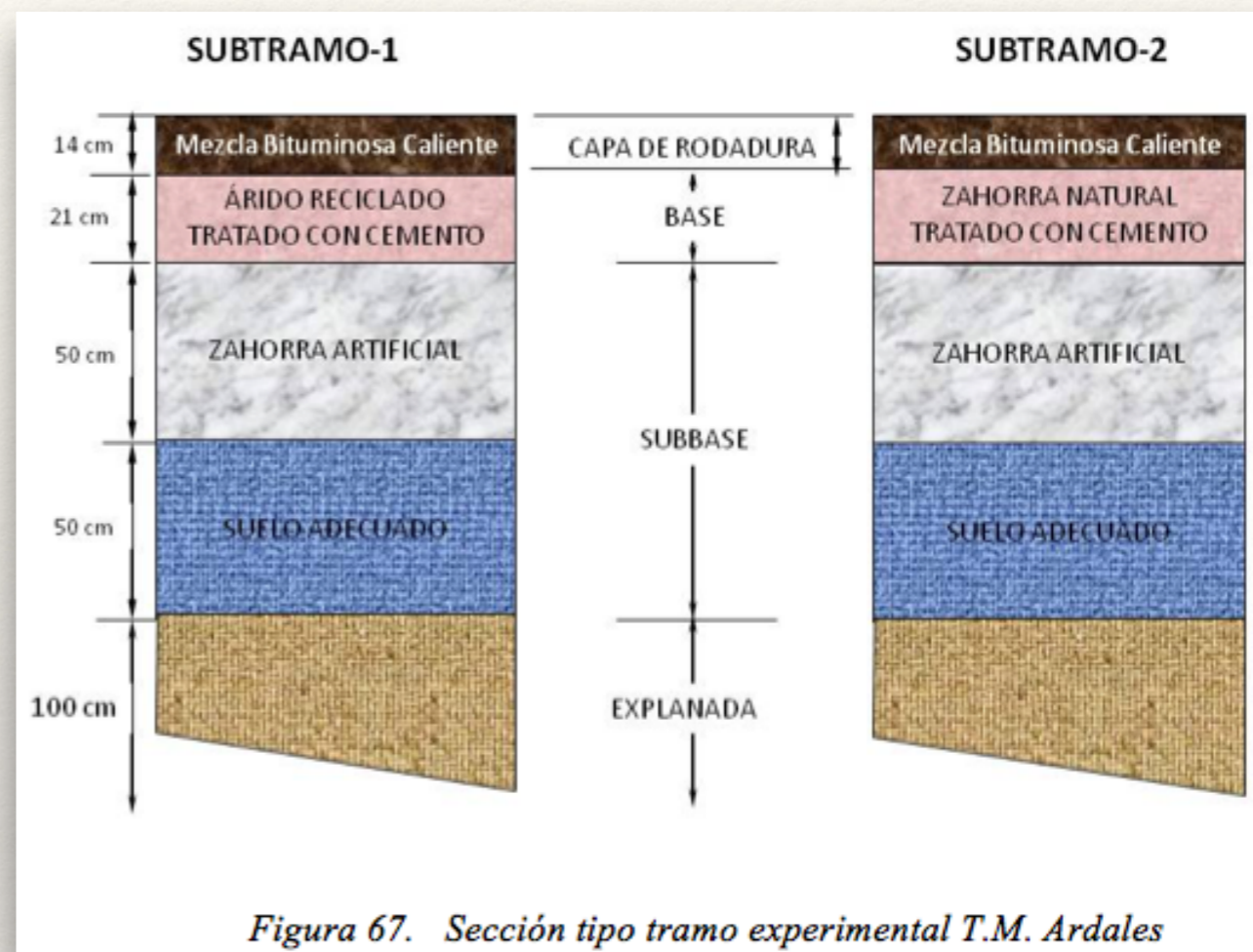


Figura 67. Sección tipo tramo experimental T.M. Ardales

Se pudo comprobar que la sustitución de materiales naturales por reciclados en capas de base, bajo el pavimento asfáltico, presentaba propiedades adecuadas, y constituye una alternativa real para ir sustituyendo áridos naturales por ARH en la fabricación de grava cemento (Pérez y col. 2013).

La segunda, propiciada por el proyecto de investigación ARECO (Áridos Reciclados en la Construcción) en colaboración entre la empresa Sacyr, y el grupo de investigación Ingeniería de la



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Construcción de la Universidad de Córdoba. Se realizó en un acceso a la Ronda Norte de la ciudad de Málaga en septiembre de 2009. Se realizaron tres secciones tipo que se muestran en la Figura 68. En una de ellas, se utilizó zahorra natural tratada con cemento y en las otras, dos ARM con diferentes proporciones de material cerámico. Los tres materiales se trataron con un 3% de cemento CEM II 32,5. Uno de los puntos más importantes es la correcta puesta en obra, aplicando las dosificaciones adecuadas, así como una humectación previa de los materiales.

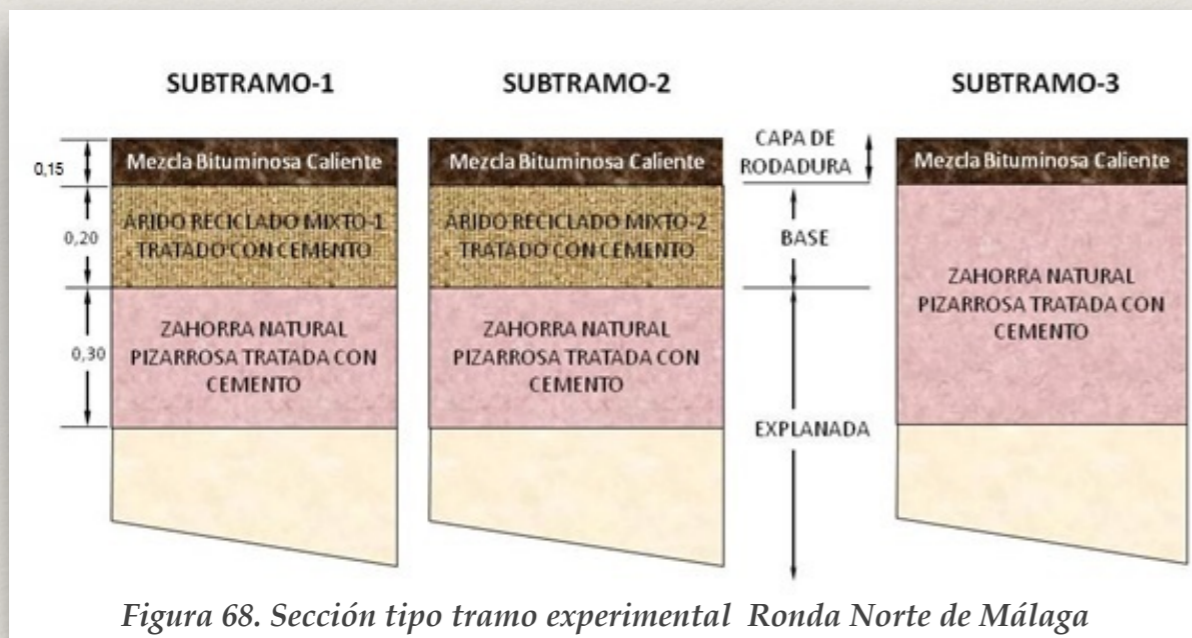


Figura 68. Sección tipo tramo experimental Ronda Norte de Málaga

Se concluía en este trabajo que los áridos reciclados presentaban un adecuado comportamiento mecánico, y pocas deformaciones del firme dos años después de ser ejecutado (Agrela F. y col. 2012).

## 5.4.1.2. Objetivos

En esta tarea se pretende establecer unas recomendaciones para el uso de suelo cemento en capas estructurales del firme, utilizando áridos reciclados de hormigón y mixtos.

Para ello, se pretende alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la resistencia a compresión de estos materiales a 7 y 28 días
- Determinar el módulo de elasticidad estático a 28 días.
- Estudiar las variaciones dimensionales de las probetas realizadas con suelo-cemento reciclado.

## 5.4.1.3. Métodos

Para la realización de este estudio se han seleccionado 6 áridos reciclados de los ya caracterizados en el apartado 3.6 de la primera parte de esta guía, tres de ellos son zahorras recicladas (dos mixtas y una de hormigón) para su aplicación como suelo-cemento SC-40 y otros tres son arenas recicladas para su uso como SC-20. De cada uno de estos grupos dos son áridos reciclados mixtos y uno de hormigón.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

La fabricación de SC-40 con ARM es un punto clave de la investigación, ya que el contenido elevado en sulfatos combinado con el cemento añadido puede dar lugar a efectos negativos en la aplicación de estos áridos en bases o subbases de carreteras.

Sin embargo, la fabricación de SC-20 a partir de arenas recicladas se plantea como más novedosa, y con más incertidumbre, ya que los áridos reciclados de granulometría fina suelen presentar altos contenidos en sulfatos solubles, y una capacidad de absorción de agua superior a los de granulometría gruesa.

Además se han seleccionado dos materiales naturales de granulometrías SC-40 y SC-20, que se han utilizado de contraste con los datos obtenidos en las mezclas con AR.

Todas las amasadas se realizaron con un 3% de cemento CEM II 32,5 y la humedad óptima del ensayo Proctor modificado. Las probetas fueron compactadas con martillo vibrante y después de curadas se determinó la resistencia a compresión a 7 y 28 días, así como el módulo de elasticidad estático en probetas no confinadas, a los 28 días.

Además, se han medido las variaciones dimensionales de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura para evaluar la retracción y/o hinchamiento de las mismas

a lo largo del tiempo. Para ello, de cada amasada se han utilizado 6 probetas, curadas 14 días en cámara húmeda, a partir de los cuales, 3 probetas fueron almacenadas en cámara de retracción (46-54 % humedad y 22-25 °C) y otras 3 probetas fueron inundadas en tanque de curado a 20-23 °C, comparando, posteriormente, los resultados obtenidos.

De los 6 áridos reciclados seleccionados, tres de ellos son de granulometría continua 0-40 mm, y otros tres son arenas recicladas de tamaño 0-8 mm. La Tabla 62 muestra la tipología y procedencia de los 6 materiales. La justificación de esta elección se basa, principalmente, en criterios granulométricos: las zahorras Z2, Z3 y Z5 poseen una granulometría comprendida entre los husos granulométricos exigidos por el PG-3.

Como contraste, se usaron dos áridos naturales, una zahorra de Encinasola (Huelva) usada comúnmente para suelo-cemento, y una arena natural de Cerro Muriano (Córdoba).

Denominación	Tipología	Procedencia
Z2	Zahorra reciclada mixta	Aristerra (Málaga)
Z3	Zahorra reciclada mixta	Mijas (Málaga)
Z5	Zahorra reciclada de hormigón	Aristerra (Málaga)
A1	Arena reciclada mixta	Guhilar (Granada)
A2	Arena reciclada mixta	Barea (Córdoba)
A3	Arena reciclada de hormigón	Aristerra (Málaga)

Tabla 62. Descripción de materiales utilizados



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Las principales propiedades de estos áridos se muestran a continuación en la Figura 69 y en la Tabla 63.

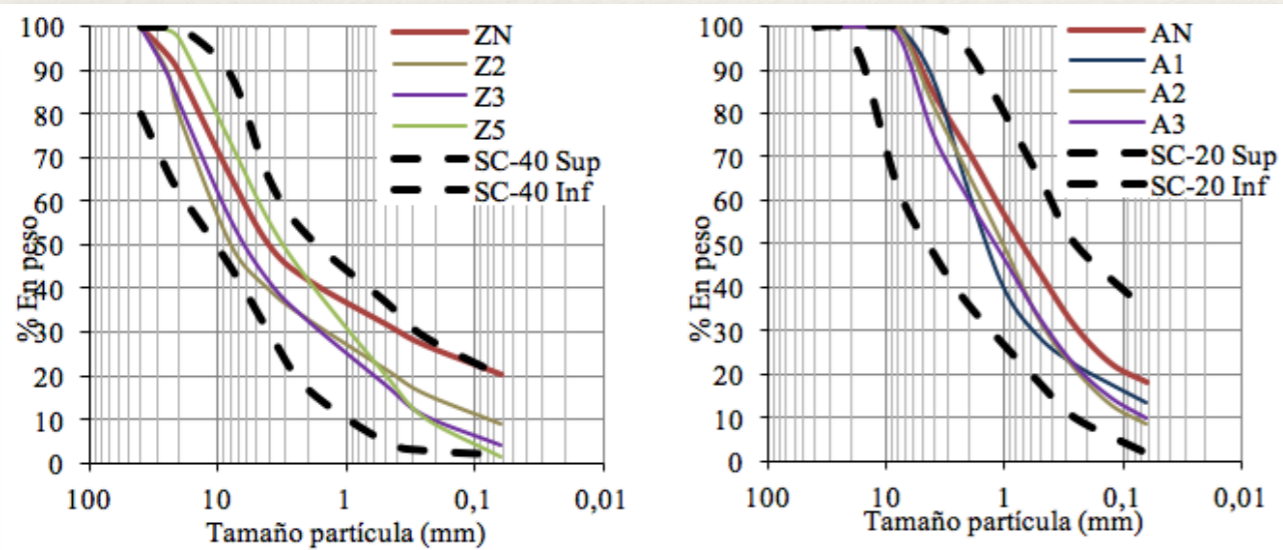


Figura 69. Granulometrías de materiales seleccionados y husos granulométricos impuestos por el PG-3 para las zahorras recicladas y arenas recicladas respectivamente

	Mat. orgánica	Az. total (%SO <sub>3</sub> )	Sulf. Sol. ácido (%SO <sub>3</sub> )	Reactividad	Plasticidad
ZN	0,09	0,22	0,18	No	No plástico
Z2	0,45	0,65	0,43	No	No plástico
Z3	0,40	2,22	1,52	No	No plástico
Z5	0,37	0,72	0,46	No	No plástico
AN	0,12	0,20	0,16	No	No plástico
A1	0,77	0,78	0,51	No	No plástico
A2	0,56	1,15	1,09	No	No plástico
A3	0,77	0,81	0,65	No	No plástico

Tabla 63. Caracterización de áridos para el estudio de suelo cemento

Conviene resaltar que dos materiales reciclados superan el límite impuesto por el PG3 en compuestos totales de azufre expresado en SO<sub>3</sub> que es del 1,0% obtenido según la Norma UNE EN 1744-1.

## 5.4.1.4. Resultados

### 5.4.1.4.1. Proctor Modificado

La Tabla 64 y las Figura 70 y 71 muestran las densidades máximas secas y las humedades óptimas de los ocho materiales utilizados. Conviene resaltar que la densidad seca media obtenida para las 3 arenas (2,02) es ligeramente superior a la obtenida para las 3 zahorras (1,98). Al contrario la humedad óptima media de las arenas (10,6%) es ligeramente inferior a la de las zahorras (11,3%).

	Densidad máxima (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)
ZN	2,28	6,5
Z2	2,07	10,2
Z3	1,87	12,5
Z5	2,00	11,3
AN	2,12	7,0
A1	2,14	9,0
A2	1,94	11,9
A3	1,99	11,0

Tabla 64. Resultados del ensayo de Proctor Modificado



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

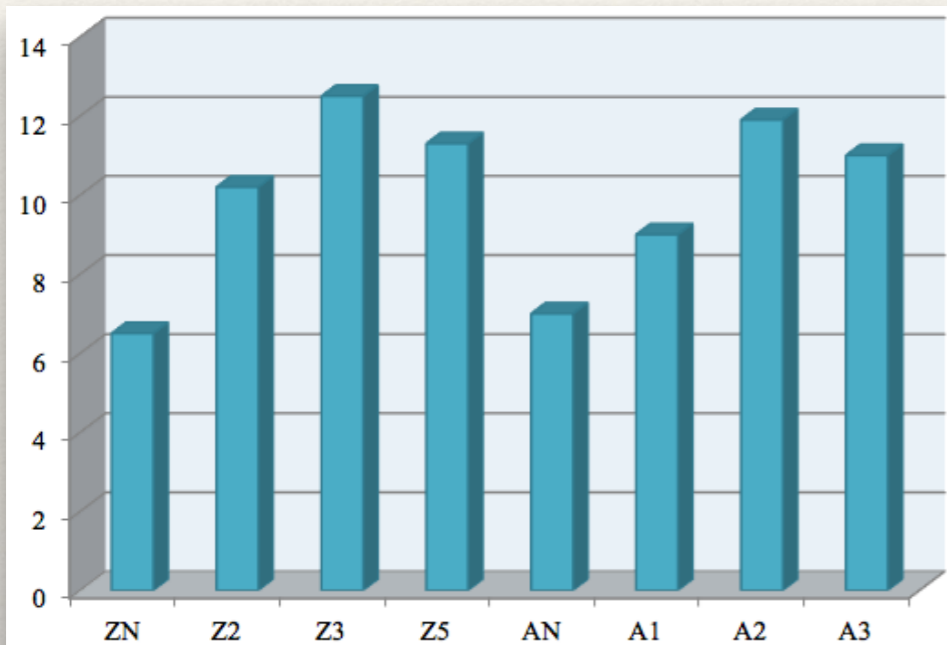


Figura 70. Diagrama de barras con humedades óptimas del ensayo Proctor Modificado

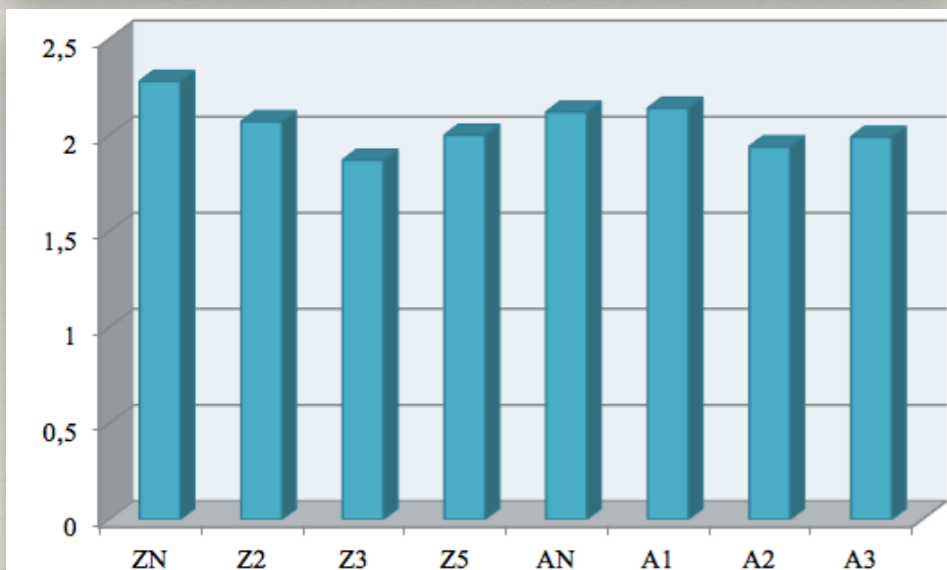


Figura 71. Diagrama de barras con densidades máximas del Proctor Modificado

## 5.4.1.4.2. Tiempo de martillo

Se han obtenido los tiempos de martillo indicados en la Tabla 65 y en la Figura 72. En ellas se observa que el tiempo necesario para compactar las arenas recicladas es considerablemente mayor que para las zahorras recicladas.

	Tiempo de martillo (segundos)
ZN	29
Z2	12
Z3	11
Z5	7
AN	51
A1	21
A2	63
A3	52

Tabla 65. Resultados de tiempos de compactación en martillo



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

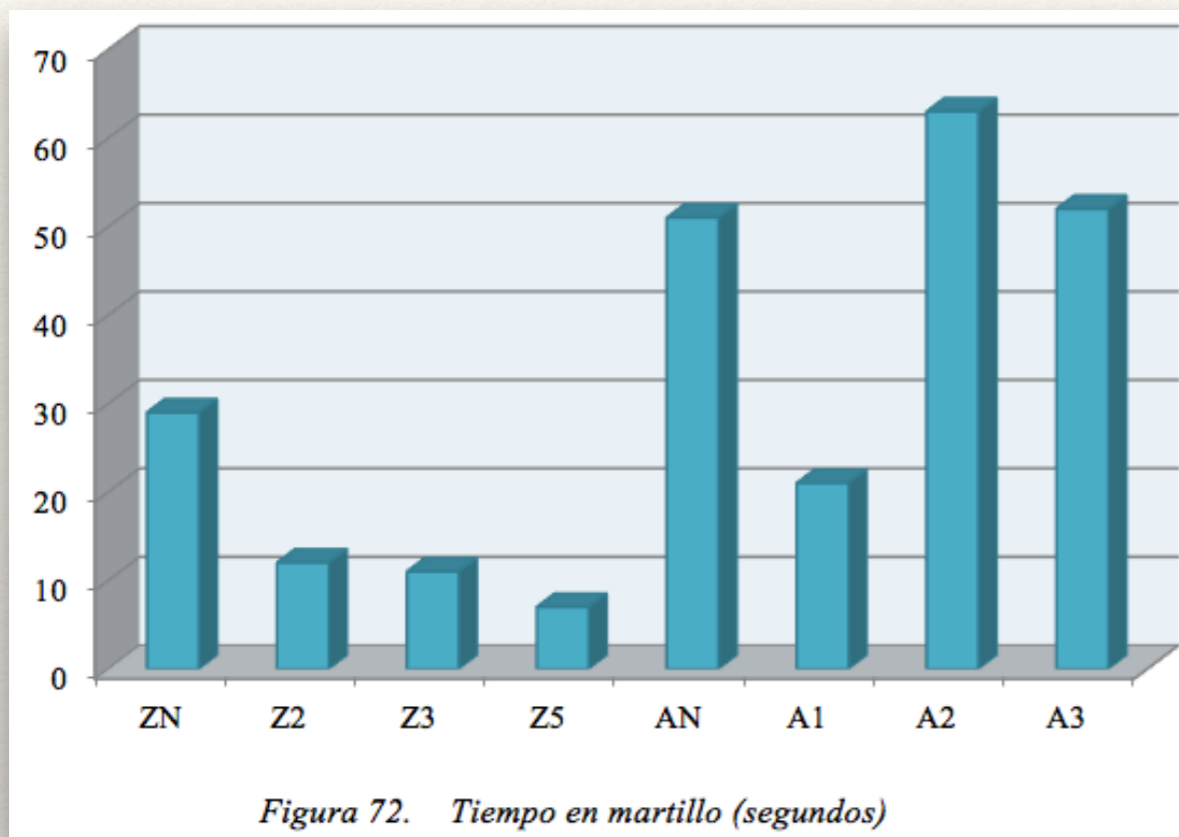


Figura 72. Tiempo en martillo (segundos)

También se puede observar (Figura 72) que los materiales naturales, necesitan un mayor tiempo de compactación que incluso algunos áridos reciclados. Este es lógico ya que se han usado áridos naturales de baja calidad, que normalmente son mezclados con cemento para mejorar sus propiedades.

Las densidades secas obtenidas en las probetas de comprobación compactadas con martillo vibrante se muestran en la Tabla 66.

	Densidad seca real	Densidad óptima Proctor	% Densidad Proctor
ZN	2,22	2,28	97,4%
Z2	2,06	2,07	99,5%
Z3	1,85	1,87	98,9%
Z5	1,98	2,00	99,0%
AN	2,07	2,12	97,6%
A1	2,08	2,14	97,2%
A2	1,92	1,94	99,0%
A3	1,95	1,99	98,0%

Tabla 66. Resultados de comprobación de la densidad Proctor

## 5.4.1.4.3. Resistencia a compresión

Los valores de resistencia a compresión obtenida tras 7 y 28 días de curado se muestran en la Tabla 67 los resultados obtenidos son la media de la rotura de 3 probetas.

	Resist, compresión (MPa)		
	7 días	28 días	Incremento (%)
ZN	1,86	2,31	24,1
Z2	3,51	4,71	34,1
Z3	3,97	4,17	5,0
Z5	2,85	3,56	24,9
AN	2,59	2,92	12,7
A1	3,05	3,64	19,3
A2	3,58	4,63	29,3
A3	3,83	4,16	8,6

Tabla 67. Valores de resistencia a compresión a 7 y 28 días



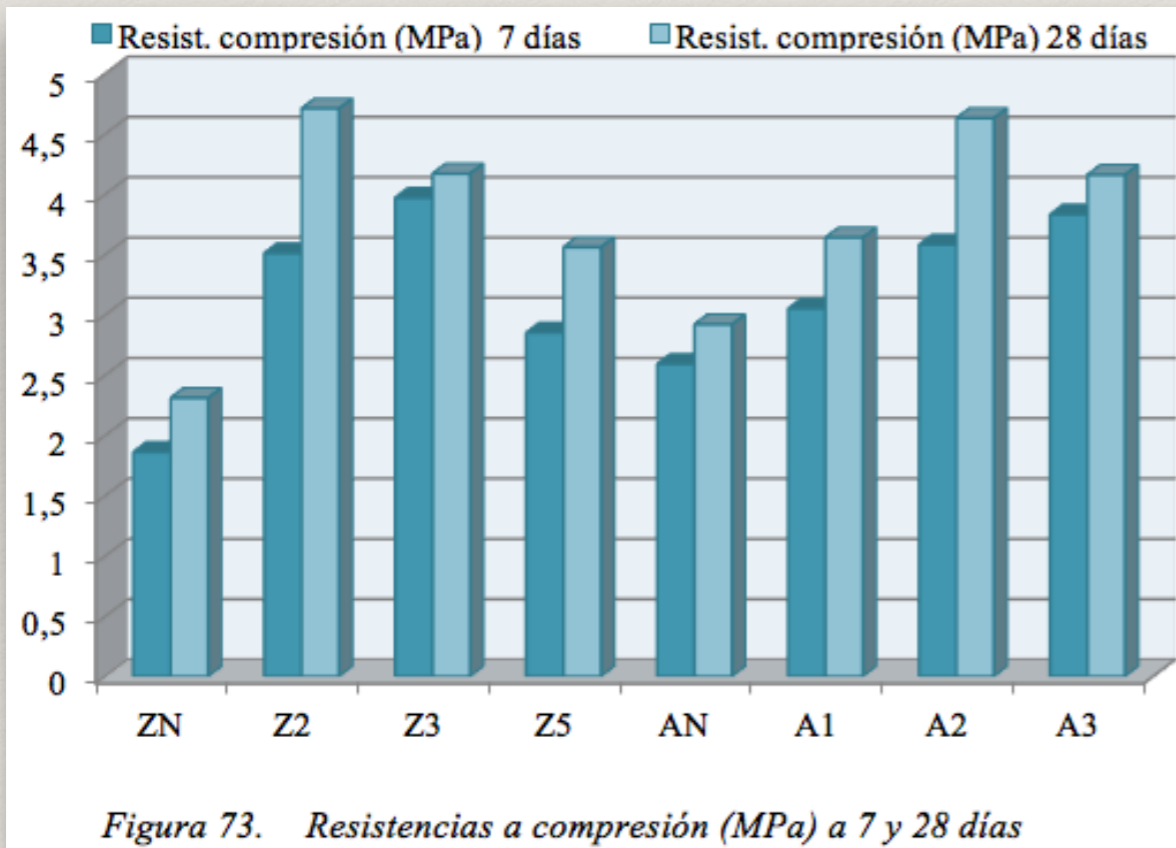
# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Se observa que en todos los casos, excepto en la ZN la resistencia a compresión a 7 días se encuentra comprendida entre los 2.5 y 4.5 MPa exigidos por el PG-3, para su uso como suelo-cemento en calzada y arceles. En el caso de la ZN utilizada, posee unas características propias más de un suelo que de una zahorra: plasticidad, granulometría... etc, de ahí su baja resistencia a compresión. Sin embargo, ésta fue elegida como referencia ya que está siendo usada en una obra real supervisada por la Agencia de Obra Pública de Andalucía, a pesar de requerir un mayor contenido de cemento.

Además, se observa que los materiales que presentan mayor contenido de sulfatos (medido por el porcentaje de compuestos totales de azufre), que son la Z3 (2.22% SO<sub>3</sub>), Z5 (2.65% SO<sub>3</sub>) y A2 (1.15% SO<sub>3</sub>) no presentaron pérdidas significativas de resistencia a compresión a 28 días en comparación con aquellos con menor contenido como los materiales naturales o el resto de áridos reciclados.

Los incrementos de resistencia a 28 días en relación a 7 días oscilan entre el 5% para la zahorra Z3 y el 34.1% para la zahorra Z2. Las zahorras recicladas experimentan un incremento medio del 21.3%, ligeramente superior al de las arenas recicladas (19.3%).

Asimismo, es de resaltar los excelentes resultados de resistencia de las arenas recicladas, dos de ellas mixtas (A1 y A2) y la tercera de hormigón (A3). A 7 días presentan una resistencia media de 3.49 MPa y de 4.14 MPa a 28 días. Estos resultados abren la posibilidad de utilizar estos materiales que tienen una escasa demanda en capas de suelo-cemento en firmes de vías urbanas o carreteras de escaso tráfico. Las tres arenas recicladas tienen tanto a 7 como a 28 días mayores resistencias que la arena natural, esto puede ser debido a un segundo fraguado de las partículas de mortero presentes en estos materiales.





# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Por último, las tres zahorras recicladas, dos mixtas (Z2 y Z3) y una de hormigón (Z5) tienen resistencias medias de 3.44 y 4.15 MPa a 7 y 28 días respectivamente, similares a las obtenidas por las arenas recicladas. En este caso, los resultados obtenidos por las zahorras recicladas mixtas tanto a 7 como a 28 días son superiores al conseguido por la de hormigón. Esto no concuerda con los resultados obtenidos por Xuan y col. 2012, donde se correlacionaba claramente el incremento de partículas de mampostería con el descenso de la resistencia en el material tratado con cemento. En cambio, en el trabajo realizado en el proyecto ARECO para la aplicación real en la hiperronda de Málaga, se obtenía una mayor resistencia en las mezclas que presentaban mayores contenidos de partículas cerámicas (Agrela y col., 2012).

Se puede afirmar que la aplicación de áridos reciclados mixtos o de hormigón en la fabricación de suelo-cemento es viable siempre que se posean unas propiedades adecuadas (sulfatos, granulometría, etc) dentro de los límites del PG3. Sin embargo, esta investigación ha verificado que, al menos en condiciones de laboratorio, los áridos reciclados hasta con un 2% de azufre total (en SO3) no presentan variaciones significativas en la resistencia a compresión ni han sufrido cambios dimensionales destacables a 56 días como se verá más adelante.

Ahora bien, es necesario realizar una adecuada puesta en obra de los materiales, aplicando la humedad necesaria, dejando un tiempo para que se absorba el agua necesaria por parte de los materiales reciclados, y compactando en un corto plazo, sin dejar secar las mezclas (Agrela y col., 2012).

## 5.4.1.4.4. Módulo de elasticidad

Los valores medios del módulo de elasticidad medidos sobre dos probetas, se encuentran en la Tabla 68.

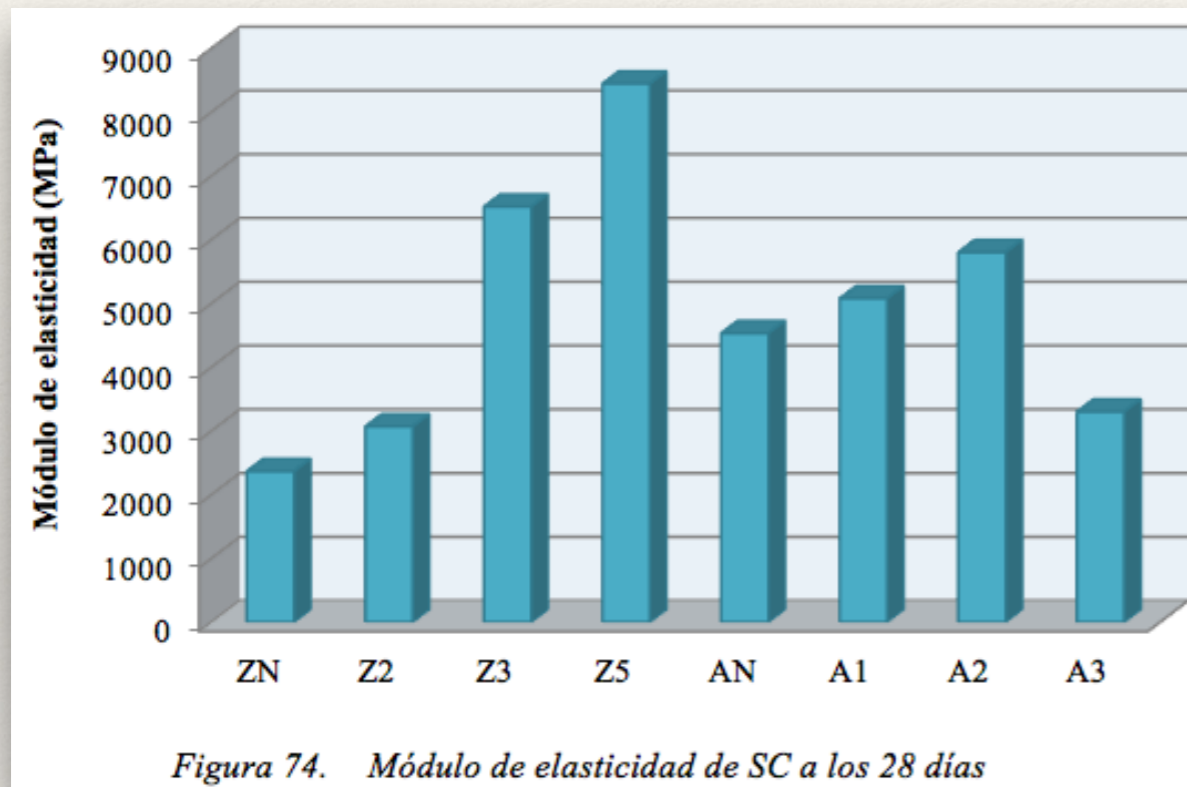
	Módulo de elasticidad (MPa)
ZN	2368
Z2	3069
Z3	6517
Z5	8447
AN	4532
A1	5078
A2	5802
A3	3301

Tabla 68. Resultados del módulo de elasticidad



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

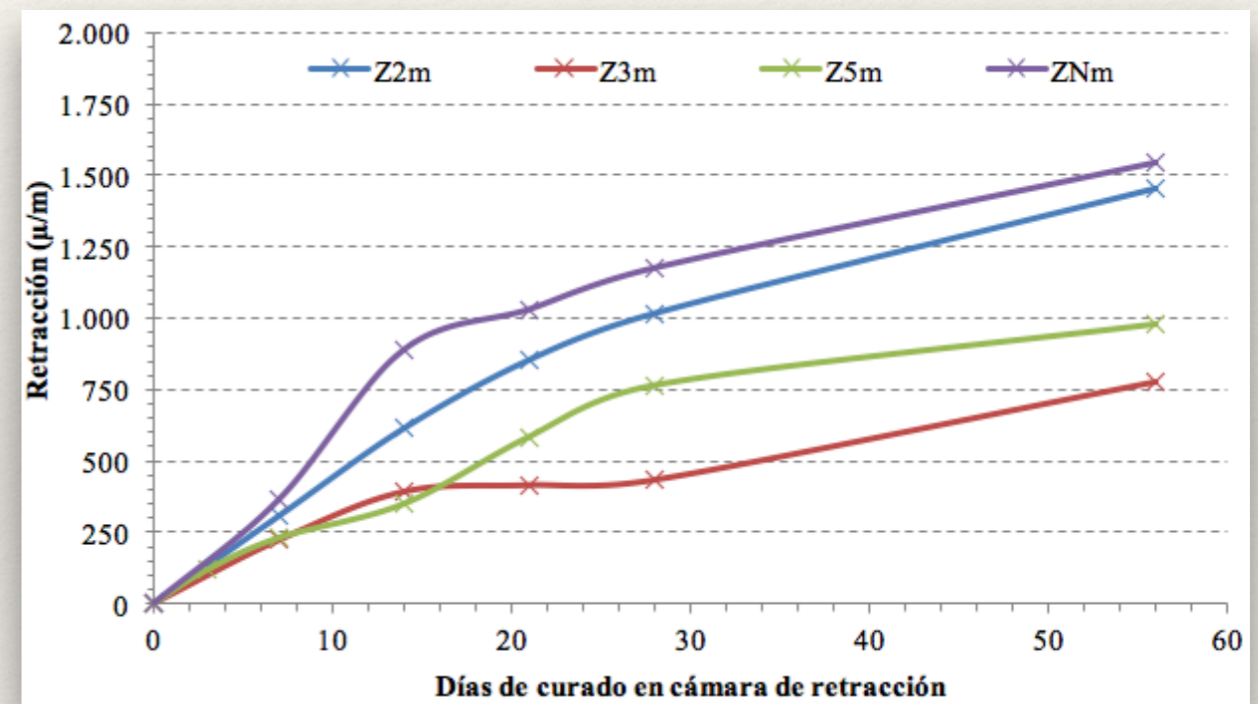
Se observa heterogeneidad en los módulos de elasticidad, no obteniendo una tendencia clara según el tipo de árido o su composición (Figura 74).



Los resultados obtenidos concuerdan con los propuestos en la bibliografía consultada (<http://www.anter.es/ACTUALIZACIONES/charlas/charla-suelocemento.pdf>), que oscilan entre 2000 y 8000 MPa a los 28 días de edad, con un valor típico de 5000 MPa.

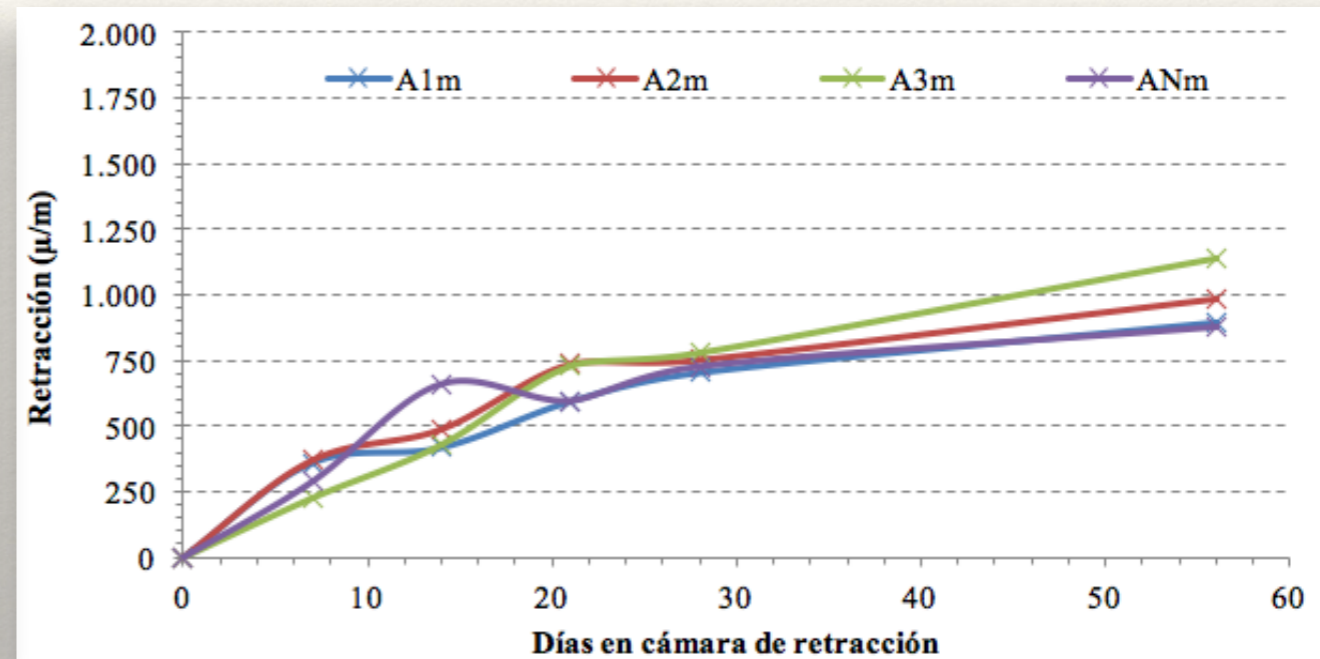
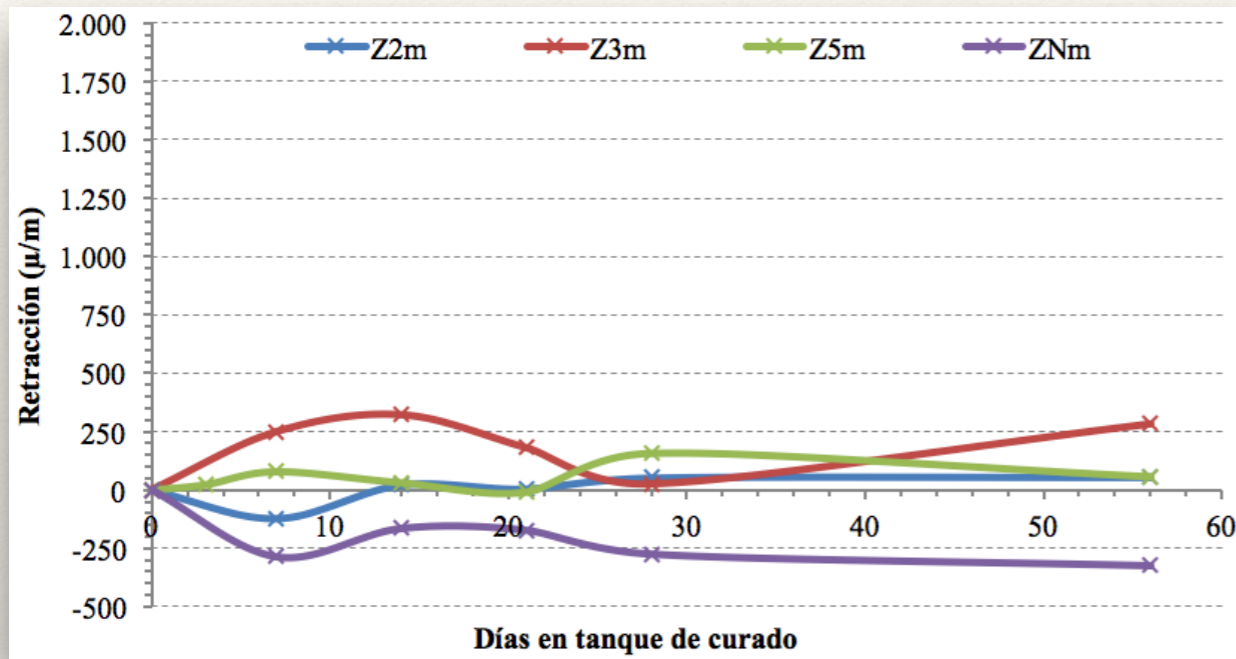
## 5.4.1.4.5. Cambios dimensionales

Las diferencias de altura observadas hasta los 56 días se muestran en la Figura 75, para el caso de las zahorras y en la Figura 76, para las arenas.





# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD



Del análisis de las gráficas correspondientes a las zahorras se pueden realizar las siguientes apreciaciones:

- En las condiciones ambientales correspondientes a la cámara de retracción, se producen retracciones crecientes con el tiempo que a 56 días oscilan entre los 778.78  $\mu/m$  para el Z3 y los 1544.22  $\mu/m$  para la ZN.
- En las condiciones ambientales correspondientes al tanque de curado, prácticamente no se producen cambios dimensionales a 56 días en la Z2 y Z5 teniendo ambos materiales una considerable estabilidad dimensional en el tiempo. La ZN presenta una tendencia a la expansión alcanzando a los 56 días un valor de 322.91  $\mu/m$ . Sin embargo la Z3 tiene una tendencia a experimentar retracciones que a 56 días son de 283.31  $\mu/m$ .

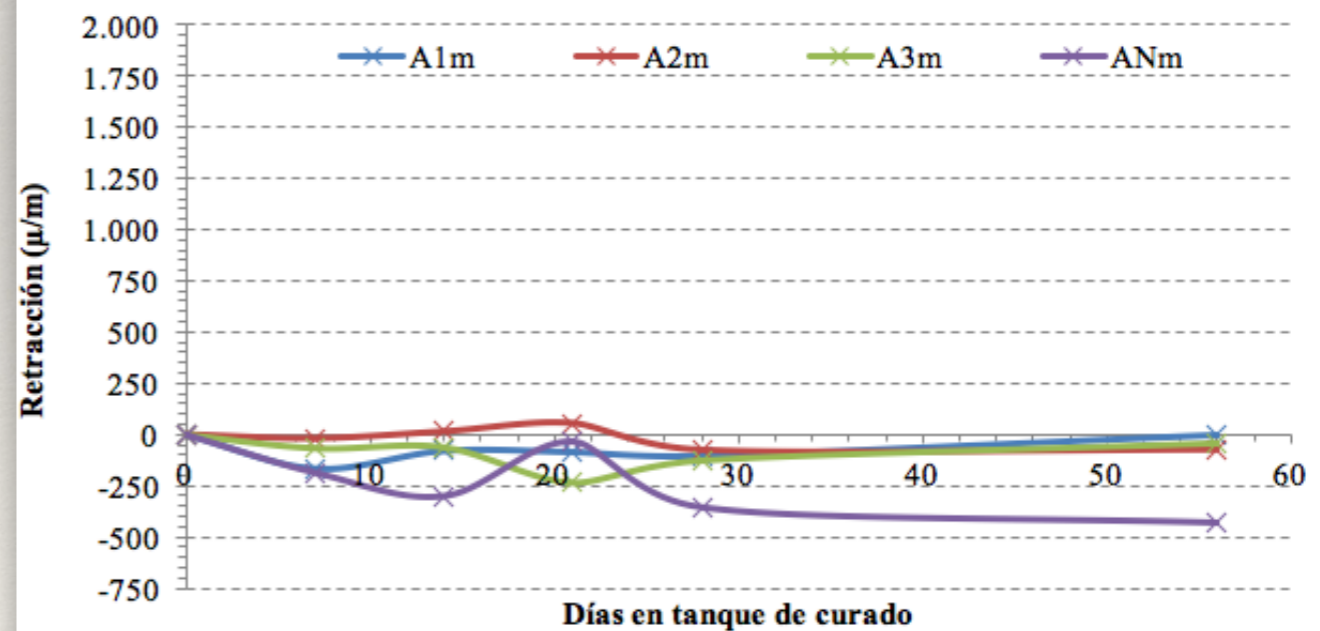


Figura 76. Comparativa de la retracción del SC20 según diferentes condiciones ambientales



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

En las gráficas de la Figura 76 correspondientes a las arenas, se observa lo siguiente:

- En las condiciones ambientales correspondientes a la cámara de retracción, se producen retracciones que, a 56 días, oscilan entre los 873.78  $\mu/m$  para el AN (y 892.33  $\mu/m$  del A1) y los 1136.50  $\mu/m$  para el A3. Estos valores son más homogéneos que los correspondientes a las zahorras que presentan una mayor dispersión.
- En las condiciones ambientales correspondientes al tanque de curado, prácticamente no se producen cambios dimensionales a 56 días en las arenas recicladas, apreciándose una considerable estabilidad dimensional en el tiempo. Sin embargo, la AN experimenta una expansión de 432.21 $\mu/m$ .

En general se muestra la importancia de la presencia del agua necesaria en la fabricación y curado del suelo-cemento reciclado. Se observa que al aplicar unas condiciones de baja humedad relativa, las probetas experimentan mayores retracciones, llegando a valores de 1mm/m a los 56 días. Por tanto se debe recomendar que tras la fabricación y puesta en obra de un suelo-cemento reciclado, se debe aplicar algún sistema de curado, ya sea un riego oportuno, o una imprimación, para evitar la pérdida del agua necesaria en el endurecimiento de las mezclas.

Este hecho se corrobora con las deformaciones obtenidas en las muestras curadas en tanque, ya que en todo momento han estado en un medio saturado, lo cual ha evitado la pérdida de humedad por procesos de desecación, reduciendo las deformaciones producidas en las probetas de suelo-cemento, tanto recicladas como naturales.

Estos valores coinciden con los obtenidos en la Tesis Doctoral de Dongxing Xuan (2012b), que afirma que cuando la muestra es sometida a condiciones de alta humedad, mediante de aplicación de niebla, las muestras reducían su retracción, incluso llegaban a expandir.

Por otra parte, no se han obtenido correlaciones lineales significativas entre el contenido de sulfatos (ya sean solubles en ácido o en contenido de azufre total) y los cambios dimensionales observados a 56 días.

Por último, conviene resaltar que los materiales reciclados estudiados presentan unos cambios dimensionales similares a los fabricados con materiales naturales, demostrando de esta manera que presentan un comportamiento similar, y que hay que cuidar en especial, tanto la puesta en obra, como los procesos de curado de las capas de suelo-cemento reciclado.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

### 5.4.1.5. Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las resistencias a compresión a 7 días obtenidas con los 6 materiales reciclados (3 zahorras y 3 arenas) se encuentran comprendidas entre 2,5 y 4,5 MPa exigidos por el PG3, con tan solo un 3% de cemento añadido que es el mínimo que indica el PG3.
- Una aportación importante de este trabajo de investigación, es que los resultados obtenidos en laboratorio para las arenas recicladas tanto mixtas como de hormigón indican que estos materiales pueden utilizarse como capas de suelo cemento tipo SC20, proporcionando una aplicación a estos materiales que tienen una más difícil comercialización.
- Los áridos reciclados con contenidos de compuestos totales de azufre y sulfatos superiores a los límites impuestos por el PG3, como son la zahorra Z3 y la arena A2, no presentan pérdidas de resistencia ni cambios dimensionales apreciables en comparación con los otros materiales reciclados que cumplen los requisitos del PG3 en relación al contenido de sulfatos. Esto indica que

contenidos de sulfatos superiores a los establecidos por el PG3 no afectan a la resistencia a compresión ni a la estabilidad dimensional de forma significativa.

- Los módulos de elasticidad a 28 días de edad oscilan entre 3000 y algo más de 8000 MPa, siendo similares para las zahorras y las arenas recicladas.
- Los valores medios de retracción a los 56 días son de 1 mm/m. Para disminuir, este efecto, es recomendable que tras la fabricación y puesta en obra de una capa de suelo-cemento reciclado, se aplique algún sistema de curado como puede ser un riego asfáltico, que evite la pérdida de humedad favoreciendo un correcto endurecimiento del material. No obstante, las retracciones medidas en los materiales reciclados no difieren mucho de las obtenidas en los materiales naturales estudiados.

En resumen, se puede concluir que es posible realizar capas de suelo cemento tipo SC40 con zahorras recicladas y tipo SC20 con arenas recicladas tanto mixtas como de hormigón, incluso con materiales que tengan un contenido de compuestos totales de azufre y de sulfatos solubles en ácido superiores a los establecidos en el PG3 con un porcentaje de cemento del 3% ya que presentan unas resistencias y estabilidad dimensional adecuadas. Se hace necesario realizar una correcta puesta en



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

obra, siendo recomendable la aplicación de un riego asfáltico o cualquier otra técnica que evite la pérdida de humedad durante el curado del suelo-cemento con el fin de disminuir los posibles cambios dimensionales.

No obstante, en el caso de las arenas recicladas, se hace necesario la realización de un tramo experimental para poder evaluar las dificultades de su puesta en obra, así como comparar el comportamiento real de estos materiales in situ, con los resultados obtenidos en laboratorio.

## 5.4.1.6. Recomendaciones de uso de áridos reciclados en capas de suelo-cemento y grava-cemento

Para su uso como material ligado con cemento, los áridos reciclados deberán cumplir las características mostradas en las siguientes tablas. Las limitaciones impuestas para su uso como grava-cemento proceden de estudios previos realizados por la Agencia de la Obras Pública de la Junta de Andalucía (AOPA).

		SC40	SC20	Grava-cemento
<b>Composición</b> UNE-EN 933-11:2009	X	< 1%		< 1%
	FL	< 1 cm <sup>3</sup> /kg <sup>(1)</sup>		< 2 cm <sup>3</sup> /kg
	Rc + Ru	-		≥ 90%
	Rb	-		≤ 5%
	Ra	-		≤ 5%

<sup>(1)</sup> Se rebajará a 0,5 cm<sup>3</sup>/kg cuando el suelo no vaya a ser cubierto por ninguna otra capa,

Tabla 69. Clasificación de suelo-cemento reciclado según ensayo de composición

		SC40	SC20	GC32	GC20
<b>Granulometría</b> UNE-EN 933-1:2012	54 mm	100	100	100	100
	40 mm	80-100	100	100	100
	32 mm	75-100	100	88-100	100
	20 mm	62-100	92-100	67-91	80-100
	12,5 mm	53-100	76-100	52-77	62-84
	8 mm	45-89	63-100	38-63	44-68
	4 mm	30-65	48-100	25-48	28-51
	2 mm	20-52	36-94	16-37	19-39
	0,5 mm	5-37	18-65	6-21	7-22
	0,063 mm	2-20	2-35	1-7	1-7

Tabla 70. Requisitos granulométricos del suelo-cemento reciclado

		SC40	SC20	Grava-cemento		
				Calzada T2	Calzada T3-T4	Arcén
<b>Equivalente de arena</b> UNE-EN 933-8:2012+A1:2015		-		> 40 para GC 20		
				> 35 para GC 32		
<b>Plasticidad</b>	UNE 103103:1994	LL < 30		No plástico	LL < 25	-
	UNE 103104:1993	IP < 12			IP < 6	-
<b>Partículas total y parcialmente trituradas</b> UNE-EN 933-5:1999				≥ 50 %	≥ 30 %	≥ 30 %
<b>Partículas totalmente redondeadas</b> UNE-EN 933-5:1999+A1:2005				≤ 10 %	≤ 30	≤ 30%
<b>Índice de lajas</b> UNE-EN 933-3:2012		-		≤ 30	≤ 35	≤ 40
<b>Desgaste los Ángeles</b> UNE-EN 1097-2:2010		-		≤ 35	≤ 40	≤ 40

Tabla 71. Requisitos físicos-geométricos del suelo-cemento reciclado



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

		SC40	SC20	Grava-cemento
<b>Materia Orgánica</b> UNE 103204:1993		≤ 1 %	≤ 2% <sup>(2)</sup>	-
<b>Materia orgánica</b> UNE-EN 1744-1:2010	Aumento tiempo de fraguado	-	-	< 120 min
	Pérdida resistencia a compresión (28 días)	-	-	< 20 %
<b>Compuestos totales de azufre (SO<sub>3</sub>)</b> UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013, Punto 11		< 1 %		
<b>Sulfatos solubles en ácido (SO<sub>3</sub>)</b> UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013, Punto 12		< 0,8 % <sup>(3)</sup>		
<b>Reactividad</b> UNE 146508 EX (Áridos silíceos) UNE 146507-2 EX (áridos calizos)		No reactivo		

<sup>(2)</sup> Siempre que se justifique que la materia orgánica provenga de materiales bituminosos  
<sup>(3)</sup> Si sulfatos solubles (UNE 103201) > 0,5% en SO<sub>3</sub>, el uso de cemento SR es OBLIGATORIO

Tabla 72. Requisitos químicos del suelo-cemento reciclado

El contenido mínimo de cemento tanto del suelo-cemento como de la grava-cemento será tal que permita la consecución de las resistencias indicadas en la Tabla 73. En cualquier caso dicho contenido no será inferior al tres por ciento (< 3%) en masa, respecto del total del material granular en seco.

Las aplicaciones posibles del suelo-cemento reciclado son las mostradas en la Tabla 73:

	Resistencia media a compresión (7 días) UNE-EN 13286-41			
	Suelo-cemento		Grava-cemento	
	Calzada	Arcenes	Calzada	Arcenes
Mínima (MPa)	2,5	4,5	4,5	4,5
Máxima (MPa)	4,5	7,0	6,0	6,0

Tabla 73. Aplicaciones del suelo-cemento reciclado

## 5.4.2. Hormigón reciclado

### 5.4.2.1. Introducción

Se entiende por hormigón reciclado aquel que es fabricado con árido reciclado o una mezcla de árido reciclado y árido natural. Para evaluar el comportamiento de este hormigón reciclado es preciso una comparación con un hormigón de control, fabricado con la misma dosificación pero empleando árido natural.

Existen estudios previos que afirman que el uso de árido reciclado empeora las propiedades del hormigón reciclado. Sin embargo, otras investigaciones concluyen que, siguiendo una serie de recomendaciones, sólo las propiedades de durabilidad se ven afectadas. Esta variabilidad de resultados se debe principalmente a la gran heterogeneidad que presentan los áridos reciclados (Ministerio de Fomento, 2012).

Algunos países ya disponen de normativa o recomendaciones para el empleo de estos áridos en hormigón estructural, en las que se limitan algunas propiedades como el porcentaje de absorción de agua (Ministerio de Fomento, 2012).

En España, la EHE-08 recoge una serie de requisitos que debe cumplir el árido reciclado para su uso en aplicaciones estructurales y no estructurales (Tabla 74).



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

		ARIDO RECICLADO
Contenido en partículas < 4 mm		≤ 5 %
Contenido de terrones de arcilla		≤ 0,6 %
Absorción		≤ 7 %
Impurezas	Material cerámico	≤ 5 %
	Partículas ligeras	≤ 1 %
	Asfalto	≤ 1 %
	Otros materiales (vidrio, plásticos, metales, etc.)	≤ 1 %
Cloruros		≤ 0,05 %
Sulfatos solubles en ácido (SO <sub>3</sub> )		≤ 0,8 %
Compuestos totales de azufre (SO <sub>3</sub> )		≤ 1 %
Sulfuros (S)		≤ 0,1 %
Materia orgánica	Aumento del tiempo de fraguado	< 120
	Disminución de la resistencia a compresión a 28 días	< 20 %
Reactividad álcali-árido		No reactivo

Tabla 74. Especificaciones del árido reciclado de hormigón

Así, la EHE-08 establece que la resistencia característica mínima de los hormigones para uso no estructural sea de 15 N/mm<sup>2</sup> y el contenido mínimo de cemento sea de 150 kg/m<sup>3</sup>. Debido a que los hormigones no estructurales no contienen armadura de acero la EHE-08 no hace en su designación ningún tipo de referencia al ambiente. En este sentido, lhobe (2011), propone aumentar el límite establecido en la EHE-08 para el contenido de sulfatos solubles en ácido de los áridos del 0,8% expresado en SO<sub>3</sub> al 1%, equiparándolo al valor fijado por la mayoría de las normativas internacionales.

Así mismo, lhobe (2011), indica que:

- En el hormigón reciclado se pueden utilizar los mismos métodos de dosificación que habitualmente se utilizan en un hormigón convencional para aplicaciones no estructurales.
- Como orden de magnitud, la resistencia a compresión de un hormigón con árido reciclado mixto suele estar comprendida entre 12 y 30 N/mm<sup>2</sup>.

La Instrucción EHE-08 en el Anejo 18 "Hormigón no estructural" indica que para este tipo de hormigones se puede llegar a sustituir hasta el 100% de la grava natural por grava reciclada siempre que esta proceda de hormigón.

De igual forma, la mayor parte de los estudios afirman que la fracción fina empeora las propiedades del hormigón por lo que se recomienda el uso de sólo la fracción gruesa de estos áridos reciclados de hormigón.

Este documento, y casi todos los estudios y experiencias, coinciden en que el uso del árido reciclado en hormigón estructural debe limitarse a áridos reciclados de hormigón, ya que los mixtos poseen materiales cerámicos y otros elementos como el yeso procedente de revestimientos que pueden afectar a las características mecánicas y de durabilidad del hormigón.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

No obstante, en España, entre el 70 y el 80% de la producción de áridos reciclados producidos en las plantas de gestión y tratamiento de RCD son áridos reciclados mixtos, que se definen como aquellos que presenta un porcentaje en peso de áridos de origen cerámico comprendido entre el 5% y el 65% (CEDEX, 2010).

Según estudios realizados por diversos autores la calidad de los áridos reciclados viene determinada por el contenido de impurezas (madera, yeso y vidrio entre otros), lo que a su vez es función del sistema de gestión y tratamiento de los RCD en la planta de reciclado.

Existen varios estudios que aceptan la viabilidad de emplear los áridos reciclados mixtos como materia prima en la fabricación de hormigones no estructurales (Ihobe, 2011; Mas B. y col., 2012). Los hormigones así fabricados presentan una mayor porosidad, absorción y permeabilidad que en el caso de utilizar áridos naturales con las mismas dosificaciones (Bustillo, M. 2010). Esto, ha dado lugar a que la normativa de muchos países permita el uso de áridos reciclados mixtos en la fabricación de hormigón no estructural siempre que cumplan una serie de requisitos (Tabla 75) (Sánchez M., 2011).

Sin embargo, en la mayoría de los trabajos realizados tanto en España como a nivel internacional la cantidad de cemento utilizada oscila entre 250 kg/m<sup>3</sup> y más de 300 kg/m<sup>3</sup> (Brito, J., 2005; Mas B. y col., 2012; Mas B. y col., 2012.b), con el consiguiente incremento de precio que conlleva. En este trabajo, se pretende obtener una dosificación con un contenido de cemento igual o inferior a 200 kg/m<sup>3</sup> que tenga una resistencia igual o superior a 15 MPa, que sea trabajable (consistencia blanda), utilizando el mayor grado de sustitución posible de grava natural por áridos reciclados mixtos. Esto representa un aspecto innovador ya que daría lugar a una aplicación de los ARM con un mayor valor añadido que las actuales.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

	AR Cerámico				AR Mixto			AR de hormigón
	Rilem	Bélgica	Reino Unido	Alemania	Reino Unido	Brasil	Alemania	España EHE-08
Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	≥1500	>1600	-	≥1800	-	-	≥2000	-
Absorción (%)	≤ 20	< 18	-	≤ 20	-	≤12	≤ 15	≤ 7
Material de densidad ≤ 1800 kg/m <sup>3</sup>	≤ 10%	≤ 10%	-	-	-	-	-	-
Material de densidad ≤ 1000 kg/m <sup>3</sup>	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%	-	≤ 1%	-	-	≤ 1 %
Contenido de metales, vidrios, materiales blandos, betún (%)	≤ 5	≤ 1	≤ 5	(*)	≤ 1	≤ 3	(*)	< 1
Contenido de asfalto (%)	-	-	≤ 5	≤ 1	≤ 10	-	≤ 1	≤ 1
Contenido de material cerámico (%)	≤ 100	≤ 100	≤100	≥ 80	≤100	-	≤ 30	≤ 5
% de finos (<0,063 mm)	≤ 3	< 5	-	< 4	≤ 3	-	< 4	-
% de arena (<4 mm)	≤ 5	-	-	-	-	-	-	≤ 5
Desclasificados inferiores (%)	-	-	-	-	-	-	-	≤ 10
Contenido de sulfatos (% SO <sub>3</sub> )	≤ 1	< 1	≤ 1	-	≤ 1	≤ 1	-	< 0,8
Contenido de cloruros (%)	-	< 0,06	-	< 0,15	-	≤ 1	< 0,04	≤ 0,05
Aplicación en hormigón (fcm) 16 (N/mm <sup>2</sup> )	16	16	20	-	20	-	20	25

(\*) Para el árido reciclado cerámico (>80% de cerámicos), se especifica un límite de componentes minerales (vidrio etc.) del 2% y un límite de contenidos no minerales (plástico, madera, papel etc.) del 0,5%. Para el árido reciclado mixto (mezcla de RCD con más del 80% de árido de hormigón), se fija en un 20% el límite del conjunto de compuestos minerales, asfalto, hormigón ligero, cerámicos etc. y en un 0,5% el contenido de materiales no minerales

Tabla 75. Normativa internacional sobre hormigón reciclado



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

## 5.4.2.2. Objetivos

En esta tarea se pretende verificar si es posible utilizar diferentes grados de sustitución de grava natural por grava reciclada mixta y establecer recomendaciones para su uso en la fabricación de hormigones no estructurales con una resistencia a compresión superior a 15 MPa (a 28 días) minimizando la cantidad de cemento necesaria.

## 5.4.2.3. Materiales

Para la consecución de este objetivo se han utilizado los siguientes materiales:

### a) Arena natural

Se trata de una arena natural (AN) procedente de la planta de Prebesur (Córdoba), usada de forma habitual en la fabricación de hormigones en dicha empresa. Su granulometría está comprendida entre 0.125-4 mm entrando dentro del huso impuesto por la EHE-08 para áridos finos, tal y como muestra la Figura 77.

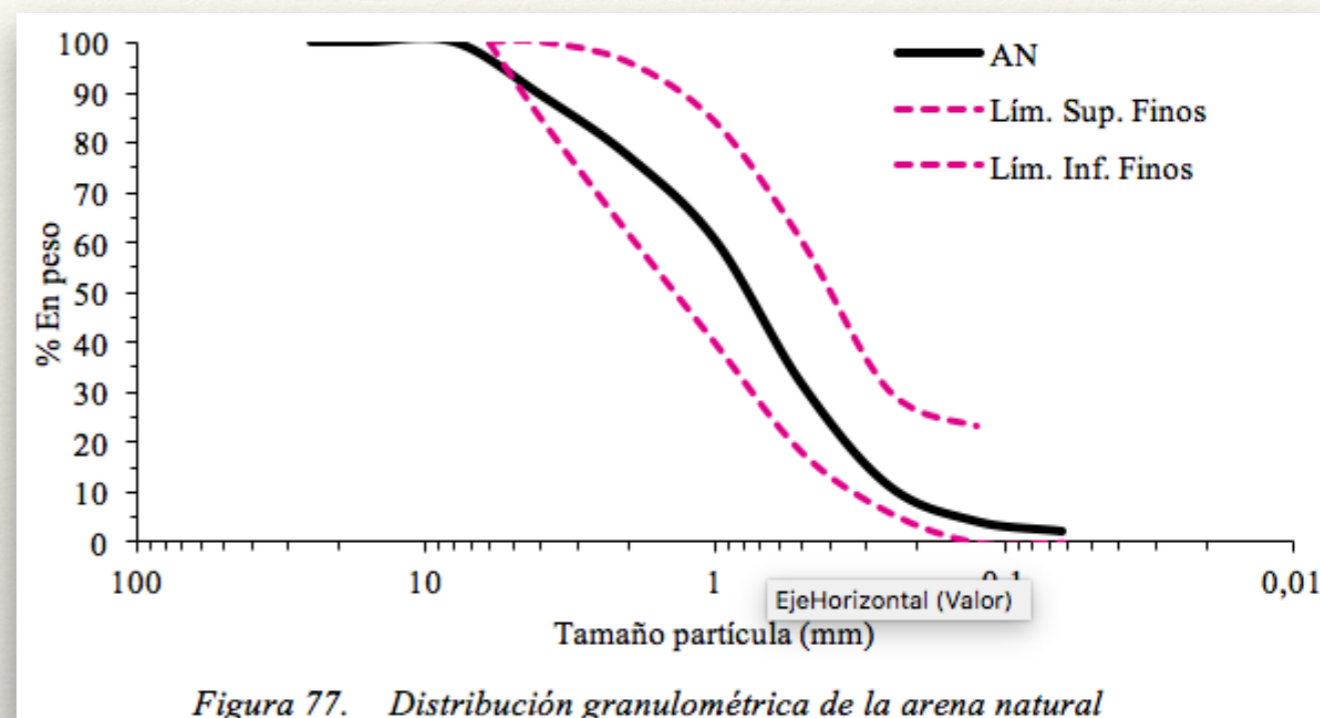


Figura 77. Distribución granulométrica de la arena natural

Las principales características de este material se encuentran resumidas en la Tabla 76, cumpliendo todas las exigencias de la EHE-08.

Planta Origen		AN
Prebesur (Córdoba)		
Equivalente de arena	UNE-EN 933-8	74
Terrones de arcilla	UNE 7133	0,04 %
Friabilidad	UNE 83115:89	12,4
Absorción	UNE 1097-6	0,92 %
Sulfatos solubles en ácido (SO <sub>3</sub> )	UNE-EN 1744-1	0,17 %
Comp. totales de azufre (SO <sub>3</sub> )		0,36 %
Cloruros		0,0014 %
Materia orgánica		Más claro

Tabla 76. Caracterización de la arena natural



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

## b) Grava natural

Es una grava natural (GN) también usada en la fabricación de hormigones en la planta de hormigonado de Prebesur. Se trata de un árido de tamaño 6-25 mm, tal y como se observa en la Figura 78. Así mismo, la distribución del tamaño de partículas se ajusta a la impuesta por la EHE-08 para áridos gruesos. El resto de características, tanto físicas como químicas, se muestran en la Tabla 77, cumpliendo todos los requisitos de la EHE-08.

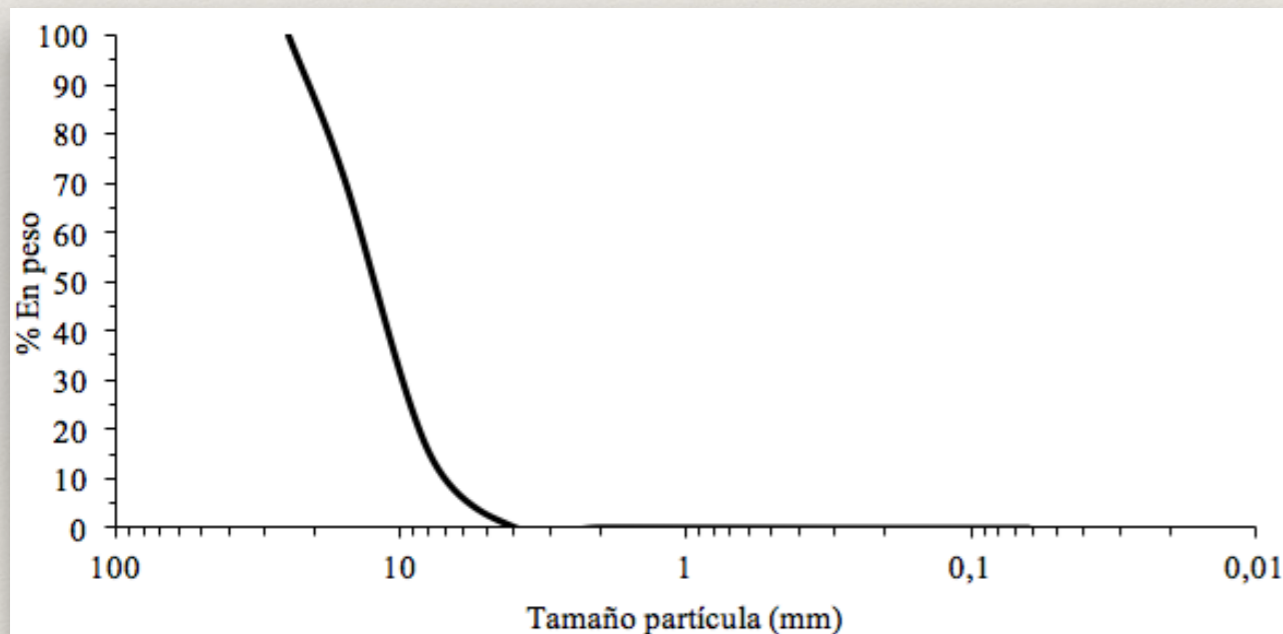


Figura 78. Distribución granulométrica

Planta Origen		GN
		Prebesur (Córdoba)
Terrones de arcilla	UNE 7133	0,00 %
Absorción	UNE 1097-6	0,73 %
Los Ángeles	UNE-EN 1097-2	18,1
Resistencia a heladas	UNE-EN 1367-2	-
Índice de lajas	UNE-EN 933-3	20,6
Sulfatos solubles en ácido (SO <sub>3</sub> )	UNE-EN 1744-1	0,51 %
Comp. totales de azufre (SO <sub>3</sub> )		0,57 %
Cloruros		0,00036 %
Materia orgánica		-

Tabla 77. Caracterización de la grava natural

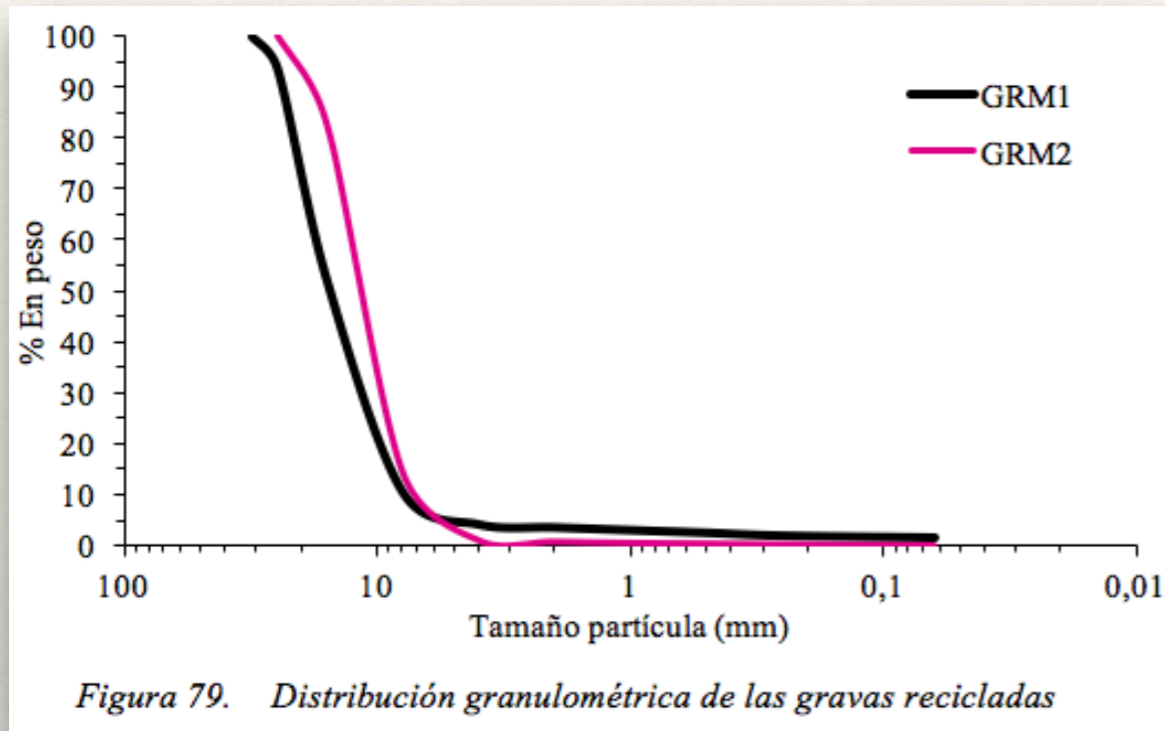
## c) Gravas recicladas mixtas

Son dos gravas recicladas mixtas (GRM) procedentes de plantas de tratamiento de RCD, con diferentes contenidos de partículas cerámicas y con tamaño 6-25 mm, tal y como se observa en la Figura 79.

En cuanto a las exigencias granulométricas de la EHE-08, tan sólo limita al 5% el contenido de partículas inferiores a 4 mm, por lo que ambas gravas cumplen con este requisito.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD



Las principales características de dichas gravas recicladas se encuentran resumidas en la Tabla 78.

En cuanto a los requisitos de la EHE-08 de composición, las dos muestras estudiadas cumplen la limitación del 1% de partículas asfálticas. Sin embargo, la muestra GRM1 tiene un porcentaje de impurezas levemente superior al 1% exigido en la EHE-08 (1.09%).

Por otro lado, las dos muestras (GRM1 y GRM2) exceden con creces el 5 % de partículas cerámicas impuesto por la EHE-08, pero este es uno de los principales objetivos del presente estudio: estudiar la viabilidad de los hormigones reciclados con

altos contenidos de partículas cerámicas para su uso como hormigón no estructural.

			GRM 1	GRM 2
Planta Origen			Barea (Córdoba)	Gecorsa (Córdoba)
Composición	Asfalto	UNE-EN 933-1	0,88 %	0,45 %
	Cerámicos		13,89 %	30,24 %
	Morteros y hormigón		49,02 %	44,55 %
	Áridos naturales		37,70 %	24,03 %
	Vidrio		0,19 %	0,05 %
	Flotantes		0,19 %	0,06 %
	Otros		1,09 %	0,45 %
Absorción		UNE 7133	6,13 %	9,01 %
Terrones de arcilla		UNE 7133	No contiene	No contiene
Los Ángeles		UNE-EN 1097-2	35,6	22,3
Partículas ligeras		UNE-EN 1744-1	10,3%	14,8%
Resistencia a heladas		UNE-EN 1367-2	5,2 %	14%
Índice de lajas		UNE-EN 933-3	10,8	14,7
Sulfatos solubles en ácido (SO <sub>3</sub> )		UNE-EN 1744-1	0,65 %	0,62 %
Comp. totales de azufre (SO <sub>3</sub> )			1,02 %	0,96 %
Cloruros			0,0028 %	0,0096 %
Materia orgánica			-	-

Tabla 78. Caracterización de áridos reciclados

En cuanto a la absorción de agua, tan sólo la GRM2 excede el 7% exigido por la EHE-08, aunque este valor deja de ser significativo cuando esta agua es compensada a lo largo de la fabricación de la amasada mediante la adición de dicha cantidad o bien mediante la pre-saturación de los áridos reciclados antes de su incorporación.

Además, ninguna de las dos muestras presentaron terrones de arcilla, tal y como se les exige para fabricación de hormigón. El coeficiente de LA es inferior a 40 en ambos materiales.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

El contenido de partículas ligeras que flotan en una disolución de densidad 2,0 está comprendido entre 10-14%, superior al 1% exigido en la EHE-08. Sin embargo, las partículas flotantes en una disolución de densidad 1,0 (agua destilada) obtenidas en el ensayo de composición, sí se encuentran dentro de este límite.

La pérdida de masa para el cálculo de la resistencia tras ciclos de hielo y deshielo es menor para GRM1 que para GRM2, pero en ambos casos, inferior al 18%, y el índice de lajas es inferior a 35, tal y como exige la EHE-08.

En las dos muestras el contenido total de azufre es cercano al 1% impuesto por la EHE-08, pero la GRM1 lo supera levemente (1,02%). El contenido de sulfatos solubles en ácido es inferior al 0.80 % en los dos materiales. El contenido de cloruros es inferior al 0.05% de la EHE-08 en ambos materiales.

### d) Cemento

El cemento utilizado fue un CEM II-42.5 A/V.

### e) Aditivos

Se han utilizado dos tipos de aditivos reductores de agua, un plastificante y un superplastificante, cuyas propiedades se detallan a continuación.

- Plastificante

El aditivo plastificante utilizado es un Conplast MR 260. Es un plastificante multifuncional formulado a base de una mezcla de polímeros sintéticos y naturales, que puede ser utilizado como plastificante o como superplastificante según la dosis empleada. Las principales propiedades de este aditivo se muestran en la Figura 79.

<b>Aspecto</b>	Líquido marrón
<b>Densidad</b>	1,20 + 0,01 kg/l
<b>pH</b>	7 + 1,0
<b>Contenido en cloruros solubles en agua (Cl-)</b>	< 0,10%
<b>Contenido en alcalinos (Na<sub>2</sub>O equivalente)</b>	Máx. 5% en masa
<b>Función principal</b>	Incrementar la trabajabilidad
<b>Función secundaria</b>	Incrementar las resistencias mecánicas

Tabla 79. Propiedades del plastificante usado

- Superplastificante

El superplastificante es del tipo Conplast SP 420. Se trata de un aditivo, que mantiene la trabajabilidad y está basado en polímeros orgánicos seleccionados. Se suministra como una solución marrón que se dispersa instantáneamente en agua. La Tabla 80, muestra las propiedades más significativas (a una temperatura de 20°C):



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

<b>Aspecto</b>	Líquido marrón oscuro
<b>Densidad</b>	1,198 + 0,01 kg/l
<b>pH</b>	8,0 + 1,0
<b>Contenido en cloruros solubles en agua (Cl-)</b>	≤ 0,10%
<b>Contenido en alcalinos (Na<sub>2</sub>O equivalente)</b>	Máx. 6% en masa
<b>Función principal</b>	Reducción de agua
<b>Función secundaria</b>	Mantenimiento de la trabajabilidad

Tabla 80. Propiedades del superplastificante usado

	HR-180	HR-200
<b>Arena (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1070	1070
<b>Grava (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1046	1021
<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	180	200
<b>Agua hidratación (kg/m<sup>3</sup>)</b>	117	130
<b>Plastificante (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1,92	2,13
<b>Suplerplastificante (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2,15	2,39
<b>Consistencia (cm)</b>	15	14
<b>Resistencia media a 28 días</b>	20,83 MPa	25,61 MPa

Tabla 81. Dosificación y consistencia de amasadas de referencia con árido natural (kg/m<sup>3</sup>)

## 5.4.2.4. Métodos

a) Estudio y determinación de la dosificación.

Se realizaron diferentes amasadas con árido natural variando la cantidad de cemento hasta determinar la cantidad mínima de éste necesaria para obtener resistencias a compresión a los 28 días de curado entre 15 y 20 MPa. La dosificación fue diseñada por el personal técnico de la empresa Prebesur y se muestra en la Tabla 81. Esta tabla recoge las resistencias a compresión a los 28 días de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura.

En ambas amasadas se mantuvo la relación agua/cemento igual a 0.65, y un 0.9% y 1% en masa de la cantidad de cemento de plastificante y superplastificante, respectivamente. Así mismo, las gravas recicladas se pre-humedecieron durante una hora.

A la vista de los resultados, y en previsión de una pérdida de resistencia al incorporar árido reciclado [18], se decidió utilizar 200 kg de cemento, para asegurar que los hormigones reciclados alcanzasen los 15 MPa.

Una vez fijada esta cantidad de cemento, se probó con diferentes porcentajes de sustitución de GN por GRM, tratando siempre de obtener una consistencia blanda (6-9 cm) en su puesta en obra. Para ello, y según experiencias previas de la empresa Prebesur, el descenso de cono de Abrams debe incrementarse en al menos cuatro unidades, ya que es habitual dicha pérdida desde su fabricación hasta su puesta en obra. Por lo tanto, se intentó que los hormigones fabricados en el laboratorio tuviesen una consistencia fluida (10-15 cm) para compensar dicha pérdida.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Para conseguirlo, los áridos reciclados fueron presaturados antes de su incorporación. De esta forma, las dosificaciones aplicadas por m<sup>3</sup> de hormigón se muestran a continuación en la Tabla 82.

Nomenclatura	Hormigón referencia (HR)	Grava Barea (GRM1)			Grava Gecorsa (GRM2)		
	HR	20% GRM1	40% GRM1	100% GRM1	20% GRM2	40% GRM2	100% GRM2
Arena	1175	1175	1175	1175	1175	1175	1175
Grava natural	1021	817	613	0	817	613	0
Grava reciclada	0	170	341	851	158	317	792
Cemento	200	200	200	200	200	200	200
Agua hidratación	130	130	130	130	130	130	130
Plastificante	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13
Suplerplastificante	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39

Tabla 82. Dosificación y consistencia de amasadas de hormigón reciclado (kg/m<sup>3</sup>)

## b) Caracterización de hormigones no estructurales

A cada una de las amasadas se le realizaron los siguientes ensayos:

Ensayo	Norma
Consistencia	UNE-EN 12350-2
Densidad	UNE-EN 12390-7
Resistencia a compresión	UNE-EN 12390-3
Módulo de elasticidad	UNE 83316:1996
Resistencia a tracción indirecta	UNE-EN 12390-6:2009
Penetración de agua	UNE-EN 12390-8
Absorción capilar	UNE 83982:2008
Porosidad abierta	UNE-EN 993-1:1996

Tabla 83. Ensayos sobre hormigones reciclados no estructurales

## 5.4.2.5. Resultados

### 5.4.2.5.1. Consistencia

La Tabla 84 y la Figura 80, muestran los resultados obtenidos en el ensayo con el cono de Abrams para medir la consistencia del hormigón fresco:

	Asiento (cm)
HR	14
20% GRM1	10
40% GRM1	13,5
100% GRM1	12
20% GRM2	14
40% GRM2	10
100% GRM2	13

Tabla 84. Valores de la consistencia del hormigón medida en el Cono de Abrams



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

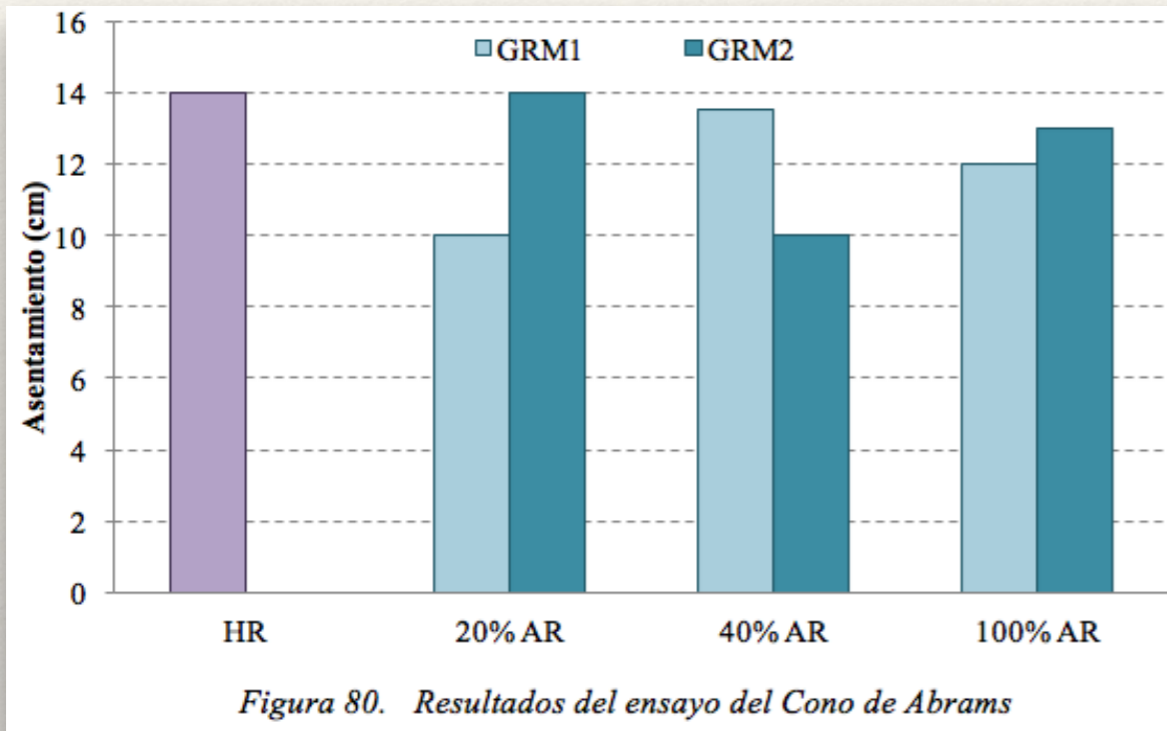


Figura 80. Resultados del ensayo del Cono de Abrams

Los valores obtenidos muestran que la consistencia de todas las amasadas es fluida (cono entre 10 y 15 cm). Considerando la pérdida de consistencia que se produce desde la finalización de la amasada hasta la puesta en obra del hormigón (entre 4 y 5 cm), daría lugar a una consistencia blanda (cono entre 6 y 9) durante la colocación del hormigón.

## 5.4.2.5.2. Densidad

La Tabla 85 y Figura 81 muestran los resultados del ensayo para medir la densidad del hormigón endurecido:

	Densidad sat. sup. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Dens. tras secado (gr/cm <sup>3</sup> )
HR	2,375	2,303
20% GRM1	2,357	2,266
40% GRM1	2,327	2,216
100% GRM1	2,254	2,125
20% GRM2	2,301	2,204
40% GRM2	2,286	2,170
100% GRM2	2,248	2,074

Tabla 85. Resultados del ensayo de densidad del hormigón endurecido

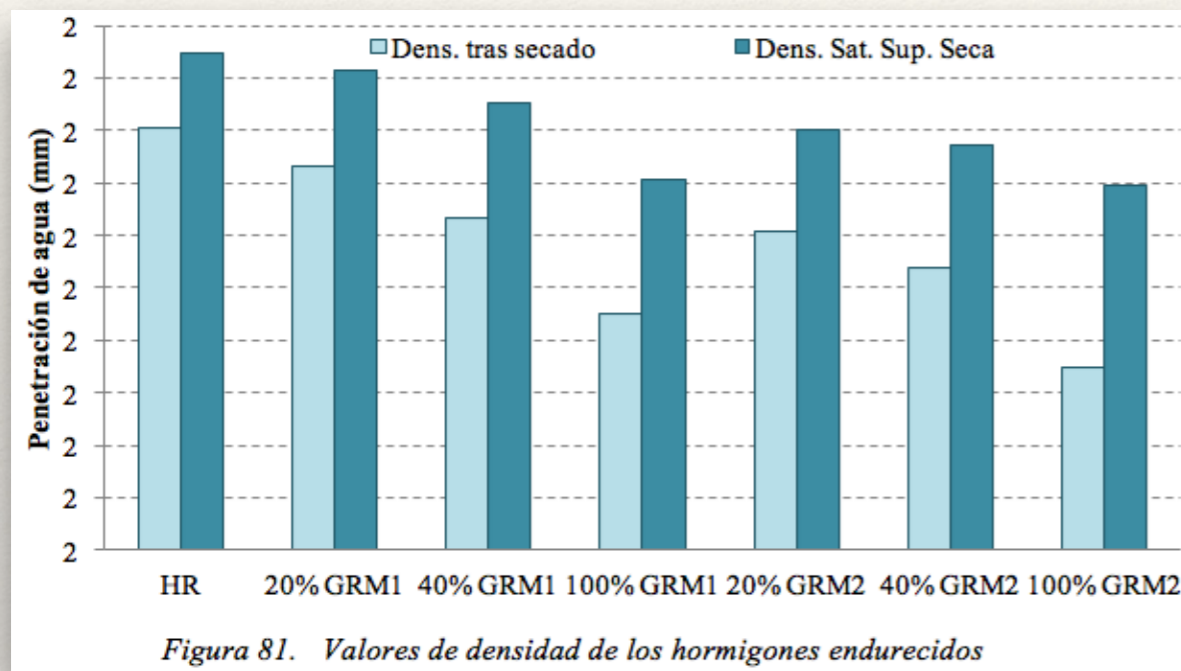
Se observa que conforme aumenta el porcentaje de árido reciclado, la densidad del hormigón endurecido obtenida disminuye, tal y como era de esperar. La pérdida para la densidad tras secado en estufa oscila para la GRM1 entre un 1,6% y un 7,7% para un 20% y un 100% de sustitución respectivamente. Para la GRM2 las pérdidas son algo mayores oscilando entre un 4,3% y el 9,7% respectivamente para los mismos porcentajes de sustitución. Estos resultados son similares a los propuestos por IHOBE [6] que para el 100% de sustitución es del 10%.

Además, para los hormigones fabricados con GRM2 se obtuvieron valores algo más bajos que para GRM1, lo cual puede



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

ser debido al mayor porcentaje de partículas cerámicas de la GRM2.

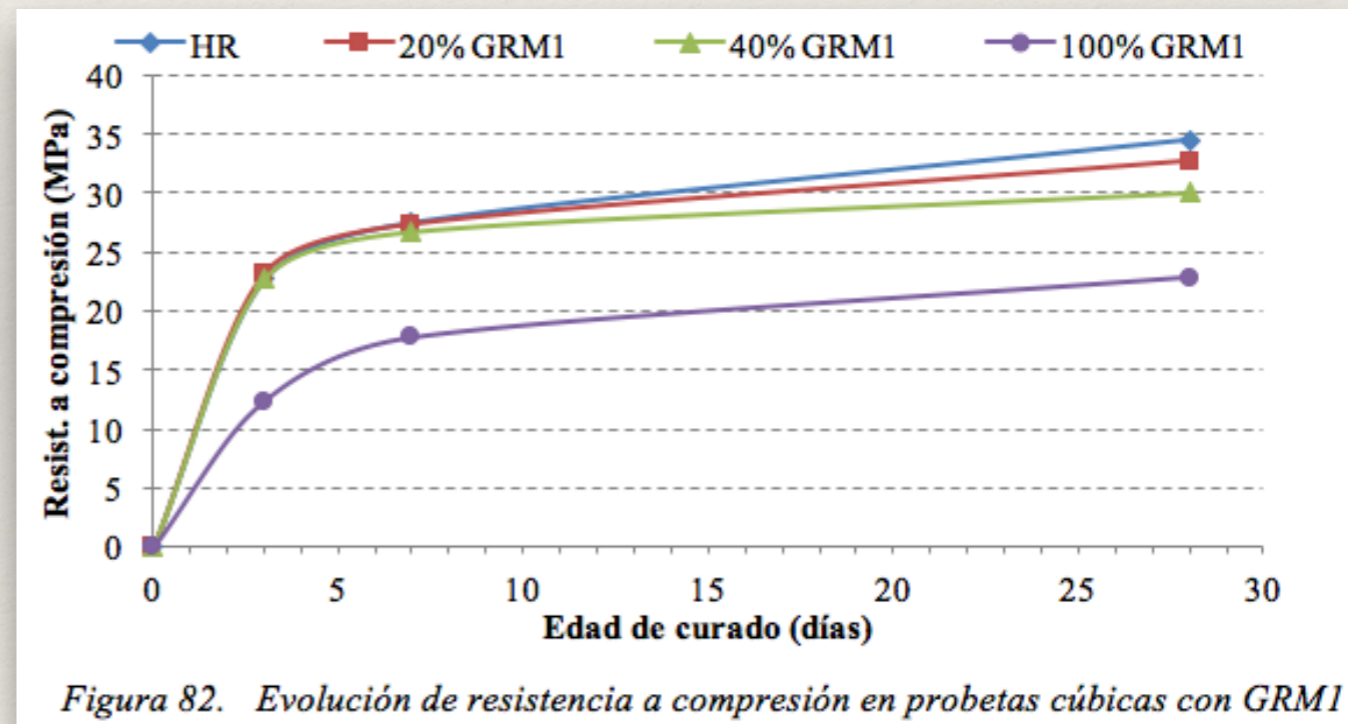


### 5.4.2.5.3. Resistencia a compresión

La Tabla 86 recoge los resultados de resistencia a compresión de probetas cúbicas de 100 mm de lado a 3, 7 y 28 días y de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura a 28 días. Los resultados son la media de tres probetas. Así mismo, las Figura 82 y 83 muestran la evolución temporal de la resistencia a compresión de las probetas cúbicas.

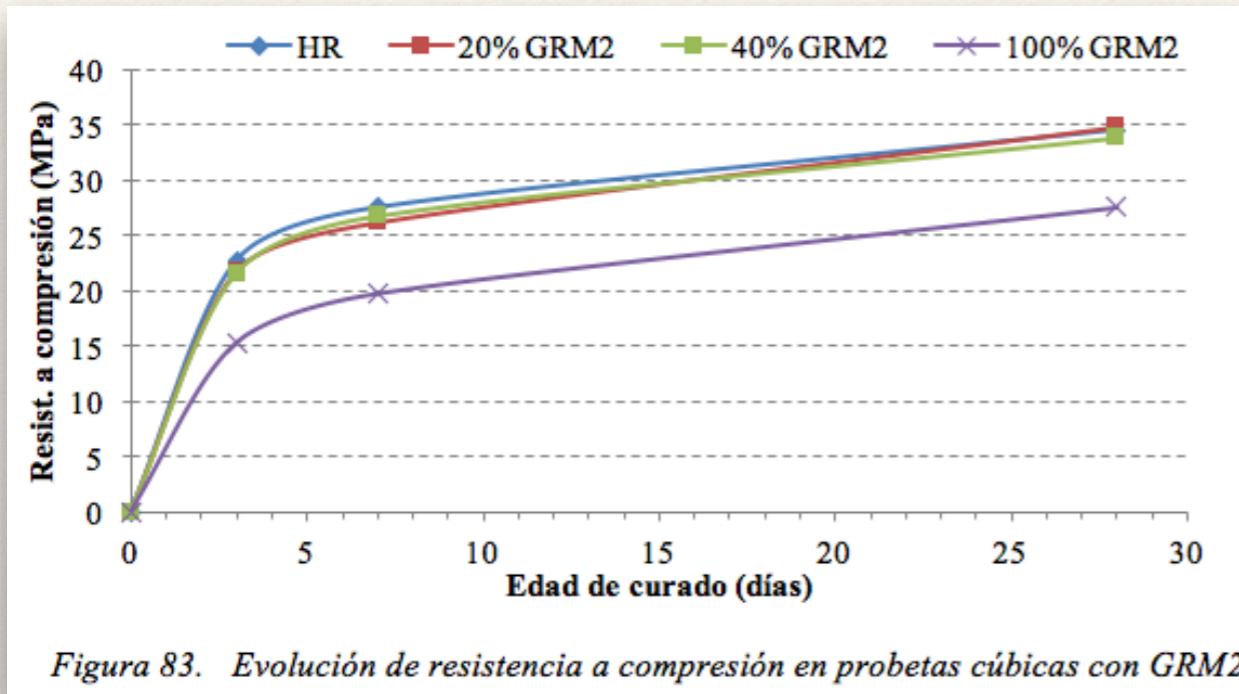
		HR	20% GRM1	40% GRM1	100% GRM1	20% GRM2	40% GRM2	100% GRM2
Probetas 100x100x100	3 días	22,70	23,17	22,76	12,35	21,77	21,58	15,30
	7 días	27,52	27,33	26,77	17,74	26,20	26,74	19,76
	28 días	34,55	32,68	30,07	22,82	34,88	33,82	27,58
Probetas Ø150x300	28 días	25,75	24,82	23,55	20,54	25,04	24,51	23,43
Relación entre R <sub>c</sub> a 28 días en probeta cilíndrica y cúbica		0,75	0,76	0,78	0,90	0,72	0,72	0,85

Tabla 86. Valores de resistencia a compresión (MPa)





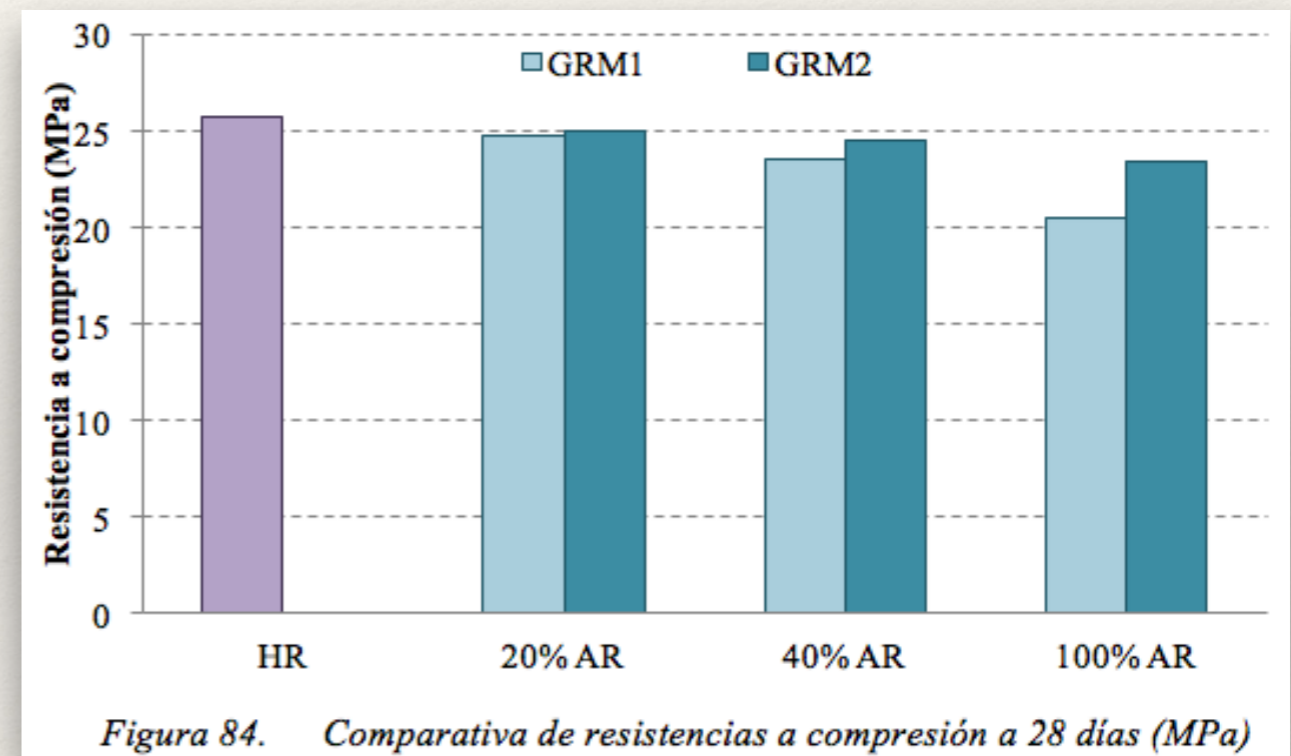
# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD



La relación entre Rc a 28 días en probeta cilíndrica y cúbica, se muestra en la Tabla 86. Oscila entre 0.75 y 0.90, apreciándose valores crecientes a medida que aumenta el grado de sustitución.

La Figura 84, muestra los valores de resistencia a compresión simple correspondientes a probetas cilíndricas a los 28 días. Se aprecia que hay una pérdida de resistencia, creciente con el grado de sustitución, que es ligeramente mayor en la GRM1. La pérdida, oscila en la GRM1 entre el 3,6% y el 20,2% para el 20% y el 100% de sustitución, mientras que para la GRM2 oscila entre el 2,8% y el 9% para los mismos porcentajes de sustitución (Figura 85). Estas pérdidas son inferiores a los obtenidos por

lhobe [6] que para el 100% de sustitución de árido reciclado mixto fueron del 25% para una dosificación de 250 kg de cemento CEM I 42,5 por m<sup>3</sup>. Las menores pérdidas obtenidas pueden estar motivadas por la menor cantidad de cemento y por el diferente tipo de cemento utilizado.





# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

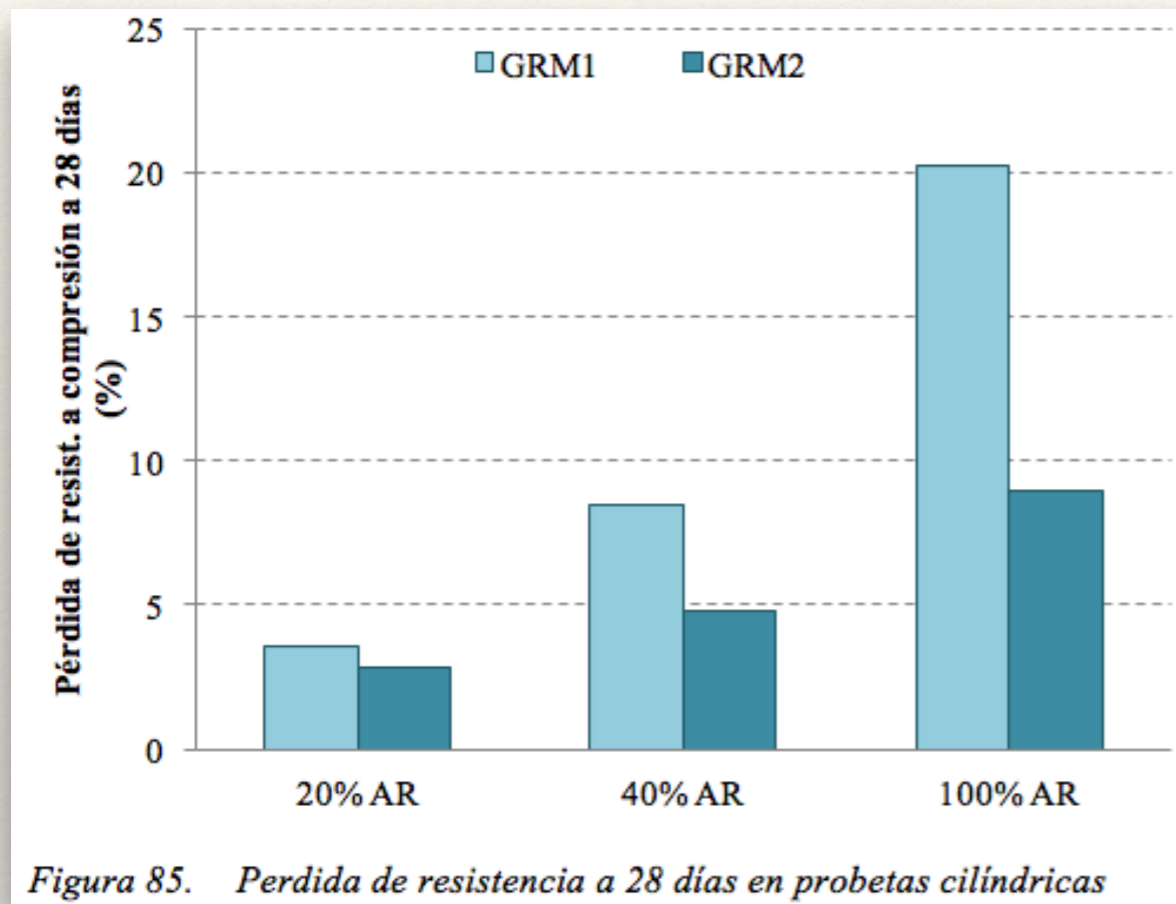


Figura 85. Pérdida de resistencia a 28 días en probetas cilíndricas

Según el Código ACI 318S-08 la resistencia media requerida  $f_{cm}$  a 28 días para hormigones con una resistencia característica  $f_{ck}$  inferior a 21 MPa, cuando no hay datos suficientes para establecer una desviación estándar de la muestra viene dada por la siguiente expresión:

$$f_{cm} = f_{ck} + 7$$

La Tabla 87, muestra la resistencia característica estimada para las siete masas a partir de esta expresión.

	HR	20% GRM1	40% GRM1	100% GRM1	20% GRM2	40% GRM2	100% GRM2
Resistencia media a compresión a 28 días Probetas Ø150x300	25,75	24,82	23,55	20,54	25,04	24,51	23,43
Resistencia característica estimada	18,75	17,82	16,55	13,54	18,04	17,51	16,43

Tabla 87. Resistencia característica estimada para las siete masas según Código ACI 318-08

A la vista de los datos de la Tabla 87, la resistencia característica de seis de las siete masas realizadas es superior a 15 MPa cumpliendo por lo tanto los requisitos de la EHE-08 para hormigón no estructural con tan solo 200 kg de cemento por m<sup>3</sup>. Tan solo la masa realizada con el 100% de sustitución de la GRM1 tiene una resistencia característica ligeramente inferior (13.54 MPa).

### 5.4.2.5.4. Módulo de elasticidad

La Tabla 88 y la Figura 86, muestran los valores del módulo de elasticidad para el hormigón convencional y para los hormigones con diferentes grados de sustitución de áridos reciclados. Al igual que con la resistencia a compresión, se aprecia un descenso creciente con el porcentaje de sustitución que es ligeramente mayor en la GRM1. Las diferencias oscilan en la GRM1 entre el 10.6% y el 33.9% para el 20% y el 100% de sustitución, mientras que para la GRM2 oscilan entre el 5.4% y el 25.7% para los mismos porcentajes de sustitución. Estas



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

pérdidas son similares a las obtenidas por Ihobe [6] que para el 100% de sustitución de árido reciclado mixto fueron del 28%.

	Módulo de elasticidad
HR	17621
20% GRM1	15753
40% GRM1	15452
100% GRM1	11642
20% GRM2	16669
40% GRM2	16153
100% GRM2	13090

Tabla 88. Valores de módulo de elasticidad (28 días)

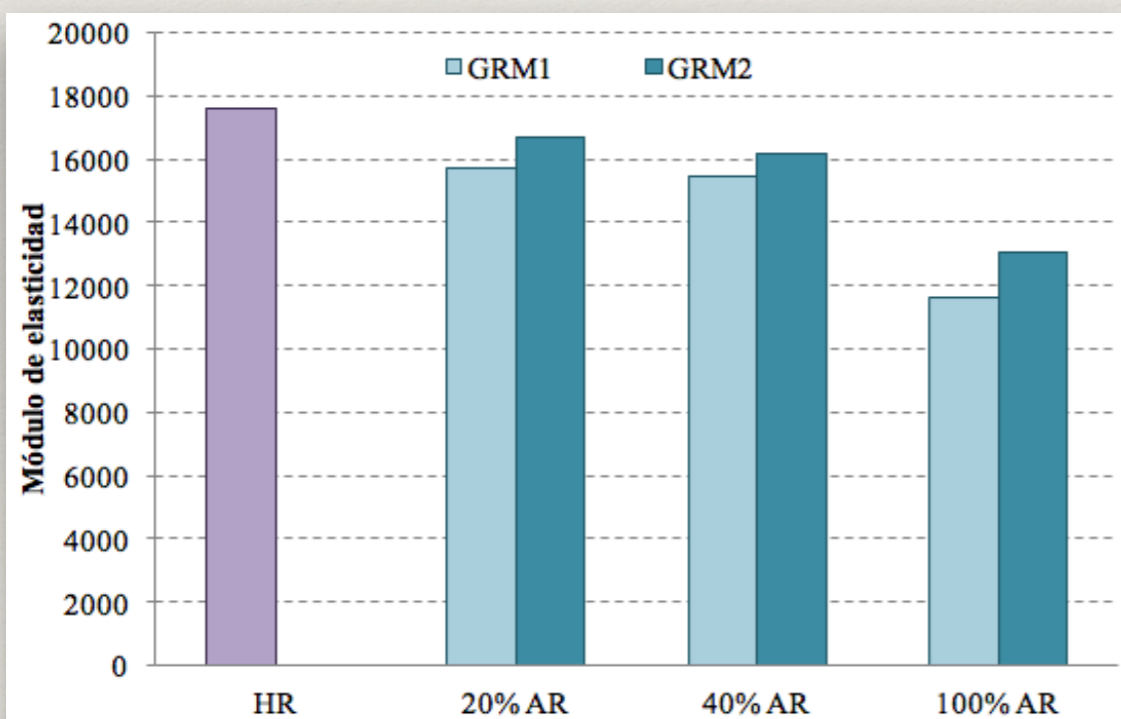


Figura 86. Módulo de elasticidad a 28 días en probetas cilíndricas

## 5.4.2.5.5. Resistencia a tracción indirecta

La Tabla 89 y la Figura 87 muestran los resultados de resistencia a tracción indirecta correspondientes a cada una de las siete amasadas.

	Resistencia tracción indirecta (MPa)	
	7 días	28 días
HR	2,14	2,81
20% GRM1	2,07	2,60
40% GRM1	1,86	2,36
100% GRM1	1,41	2,13
20% GRM2	1,97	2,63
40% GRM2	1,79	2,35
100% GRM2	1,78	2,21

Tabla 89. Valores de resistencia a tracción indirecta

Los valores obtenidos para la grava reciclada GRM2 fueron levemente superiores a los de la GRM1 a los 28 días de curado.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

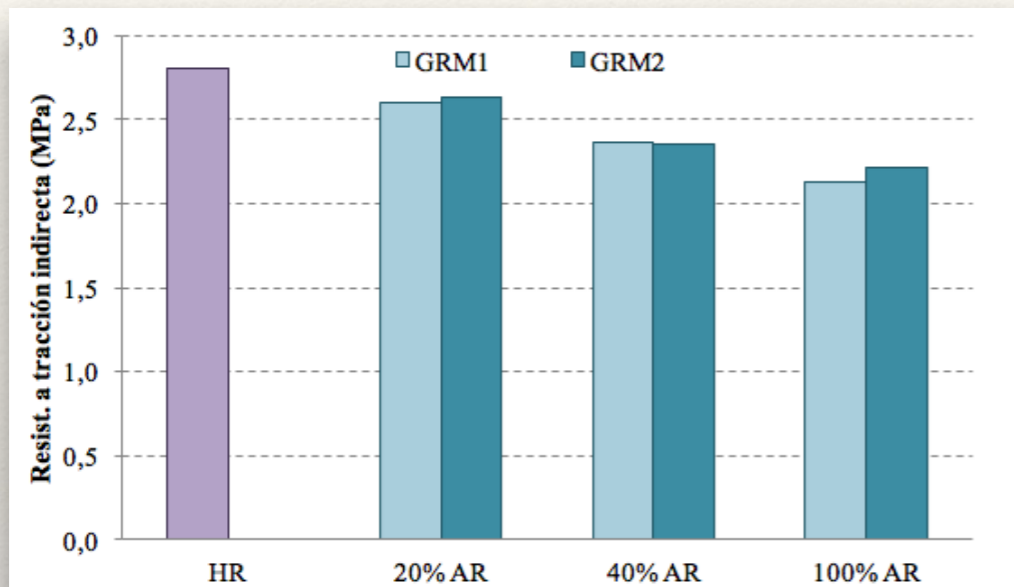


Figura 87. Diagrama de barras con valores de resistencia a tracción indirecta a 28 días

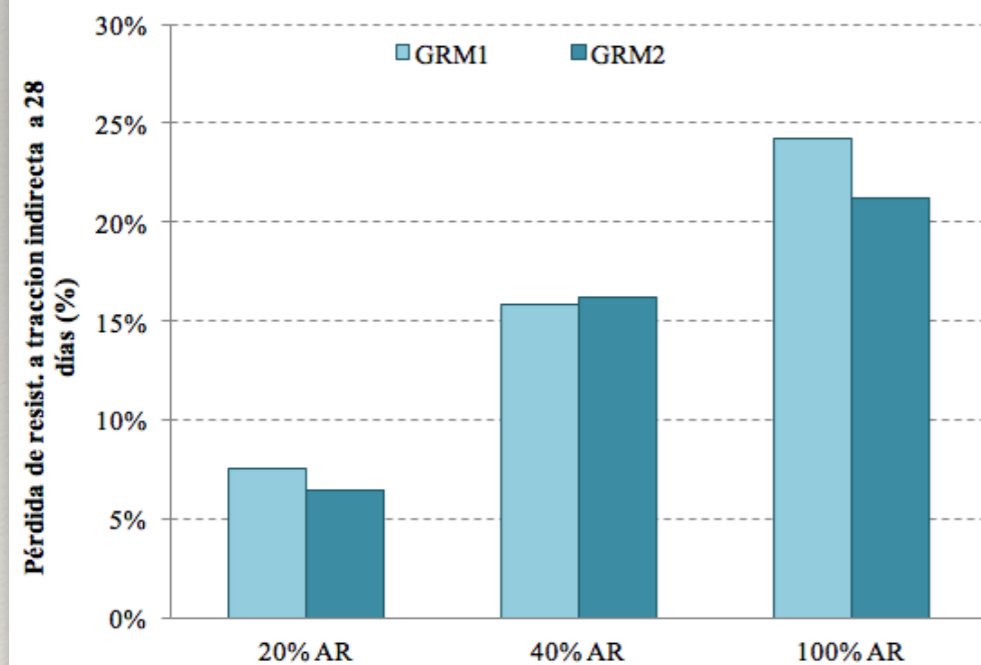


Figura 88. Pérdidas de resistencia a tracción indirecta a los 28 días de curado

Se aprecia que hay una pérdida de resistencia, creciente con el grado de sustitución, que es ligeramente mayor en la GRM1. La pérdida, oscila en la GRM1 entre el 7.6% y el 24.2% para el 20% y el 100% de sustitución, mientras que para la GRM2 oscila entre el 6.4% y el 21.2% para los mismos porcentajes de sustitución (Figura 88).

## 5.4.2.5.6. Penetración de agua

La Tabla 90 y la Figura 89 muestran los resultados de penetración máxima de agua correspondientes a las siete amasadas realizadas. Se aprecia un aumento de la penetración máxima de agua con el grado de sustitución, siendo éste mayor en la GRM1. Esto es debido a que el hormigón realizado con este material debe tener un mayor tamaño de poros que el realizado con la GRM2. Los incrementos oscilan en la GRM1 entre el 33.3% y el 129.4% para el 20% y el 100% de sustitución, mientras que para la GRM2 oscilan entre el 11.8% y el 33.3% para los mismos porcentajes de sustitución. Estos aumentos son mayores a los obtenidos por Ihobe [6] que para el 100% de sustitución de árido reciclado mixto fueron del 17%.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

	Penetración máxima de agua (mm)
HR	34,0
20% GRM1	45,3
40% GRM1	52,7
100% GRM1	78,0
20% GRM2	38,0
40% GRM2	36,3
100% GRM2	45,3

Tabla 90. Valores de penetración de agua

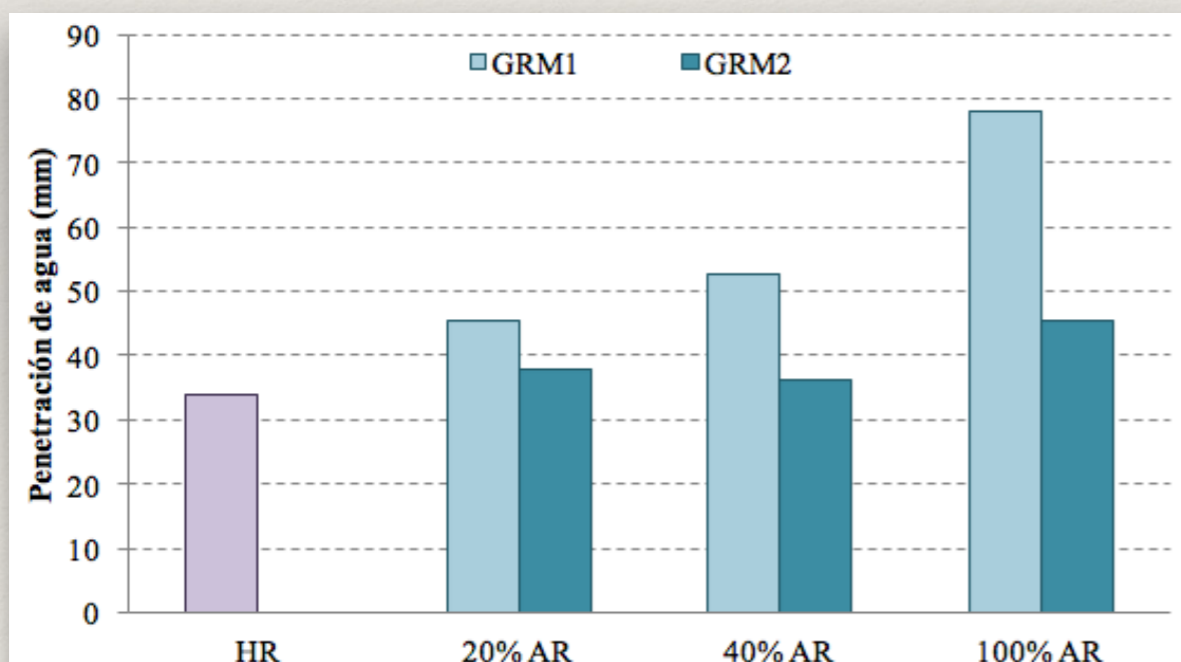


Figura 89. Diagrama de barras con valores de penetración de agua

## 5.4.2.5.7. Absorción capilar

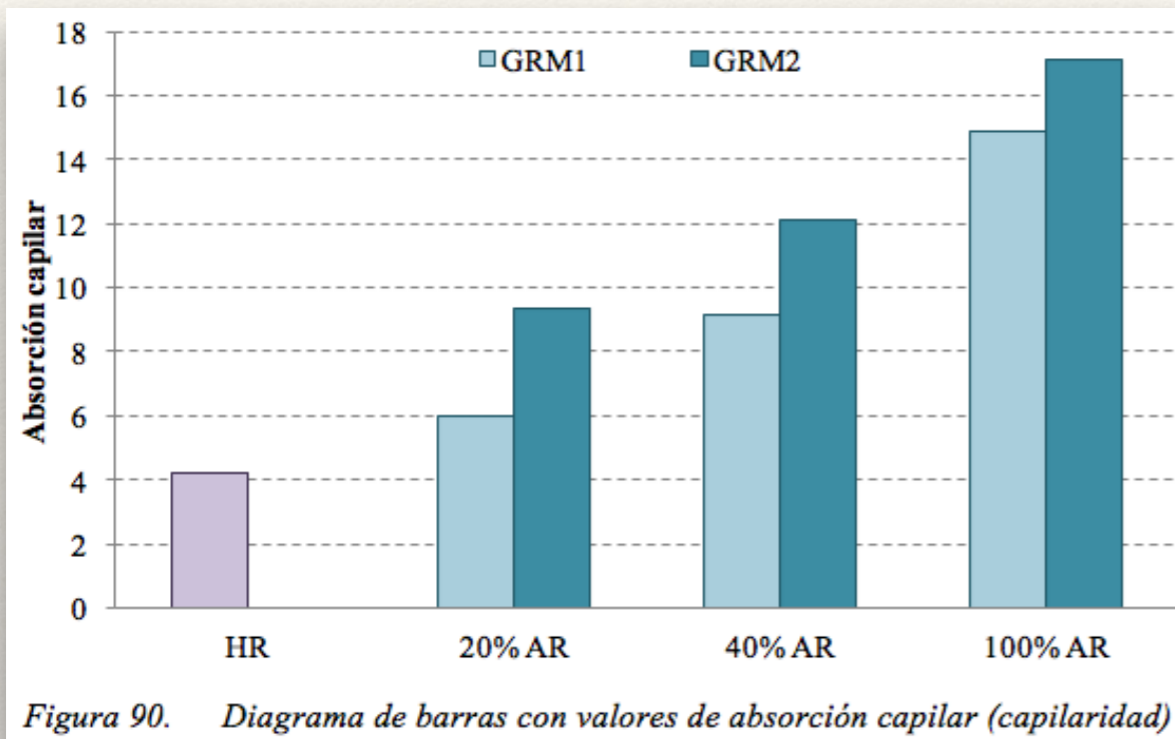
La tasa de absorción capilar, más que la absorción total, es la que más se ve afectada por la estructura y distribución del tamaño de poros, pues una pasta con una estructura de poros más fina exhibe una mayor tasa de absorción capilar que otra que posea la misma porosidad, pero una estructura de poros más gruesa [12]. La Tabla 91 y la Figura 90 muestran los resultados de absorción capilar correspondientes a las siete amasadas. Se aprecia una tendencia creciente con el grado de sustitución, siendo mayor esta tendencia para la GRM2. Estos resultados indican que los hormigones reciclados con la GRM2 tienen una estructura de poros más fina que los realizados con la GRM1.

	Absorción capilar (g/m <sup>2</sup> ,s <sup>1/2</sup> )
HR	4,24
20% GRM1	5,96
40% GRM1	9,17
100% GRM1	14,89
20% GRM2	9,38
40% GRM2	12,09
100% GRM2	17,11

Tabla 91. Valores de absorción capilar



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD



	Porosidad abierta
HR	10,93 %
20% GRM1	11,28 %
40% GRM1	13,17 %
100% GRM1	13,88 %
20% GRM2	11,46 %
40% GRM2	13,05 %
100% GRM2	13,53 %

Tabla 92. Valores de porosidad abierta

## 5.4.2.5.8. Porosidad abierta

La Tabla 92 y la Figura 91 muestran los resultados de porosidad abierta correspondientes a las siete amasadas. Se aprecia una tendencia creciente con el grado de sustitución, siendo los resultados similares para las dos gravas recicladas mixtas utilizadas. Los incrementos oscilan en la GRM1 entre el 3.2% y el 27% para el 20% y el 100% de sustitución, mientras que para la GRM2 oscilan entre el 4.8% y el 23.8% para los mismos porcentajes de sustitución.

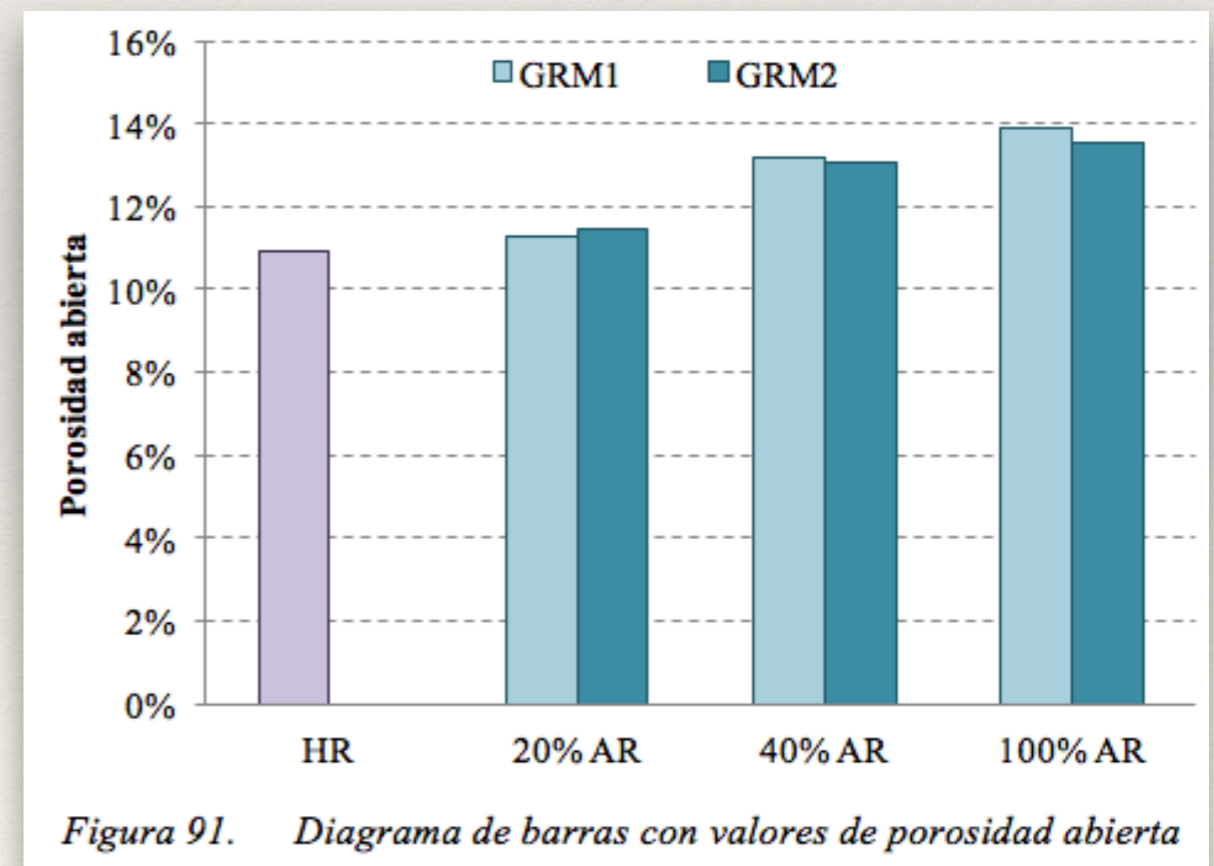


Figura 91. Diagrama de barras con valores de porosidad abierta



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

## 5.4.2.6. Conclusiones

La Tabla 93 muestra un resumen de los resultados obtenidos en las siete amasadas realizadas. Así mismo, se indica la variación experimentada en los hormigones realizados con áridos reciclados mixtos en relación al hormigón convencional para todas las propiedades estudiadas. De la misma, así como del análisis de todos los resultados obtenidos, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

Propiedad	HR	HR GRM1				HR GRM2			
		Mínimo		Máximo		Intervalo		Variación	
Densidad tras secado en estufa (gr/cm <sup>3</sup> )	2,303	2,266	-1,6%	2,216	-7,7%	2,204	-4,7%	2,074	-9,7%
Resistencia a compresión a 28 días en probeta cilíndrica (MPa)	25,75	24,82	-3,6%	20,54	-20,2%	25,04	-2,8%	23,43	-9,0%
Módulo de elasticidad a 28 días en probeta cilíndrica (MPa)	17621	15753	-10,6%	11642	-33,9%	16669	-5,4%	13090	-25,7%
Resistencia a tracción indirecta a 28 días (MPa)	2,81	2,60	-7,6%	2,13	-24,2%	2,63	-6,4%	2,21	-21,2%
Penetración máxima de agua (mm)	34	45,3	+33,3%	78,0	+129,4%	38	+11,8%	45,3	+33,3%
Absorción capilar (g/m <sup>2</sup> ,s <sup>1/2</sup> )	4,24	5,96	+40,6%	14,89	+116,3%	9,38	+121,2%	17,11	+303,5%
Porosidad abierta (%)	10,93	11,88	+3,2%	13,28	+27,0%	11,46	+4,8%	13,53	+23,8%

Tabla 93. Resumen de resultados de las propiedades físicas y mecánicas

a) La pérdida de densidad de los hormigones reciclados mixtos en relación al hormigón convencional oscila entre el 1,6 y el 9,7% creciendo a medida que aumenta el porcentaje de sustitución.

b) La disminución de la resistencia a compresión a 28 días en probeta cilíndrica oscila entre el 2,8 y el 20,2%, siendo muy pequeñas las pérdidas para el 20% de sustitución (2,8 y del 3,6%) en los dos áridos reciclados mixtos utilizados.

c) Las resistencias a compresión a 28 días en probeta cilíndrica con el 100% de sustitución superan los 20 MPa, siendo por lo tanto aptos para su utilización como hormigón no estructural.

d) El módulo de elasticidad disminuye entre un 5,4 y un 33,9%

e) La resistencia a tracción indirecta a 28 días disminuye entre el 6,4 y el 24,2%, creciendo las diferencias con el grado de sustitución.

f) En la penetración máxima de agua y en la absorción capilar se producen grandes diferencias entre los hormigones reciclados y el hormigón convencional consecuencia de la mayor porosidad y menor densidad de los hormigones reciclados. Pero al ser el objetivo de este apartado la fabricación de hormigones no estructurales sin la presencia de armadura, estos datos no tienen unas graves consecuencias.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

En resumen, se puede decir, que es factible la elaboración de hormigones no estructurales con incluso el 100% de sustitución de la grava natural por grava reciclada mixta empleando bajas cantidades de cemento de tan solo 200 kg/m<sup>3</sup>.

## 5.4.2.7. Recomendaciones de uso de gravas recicladas

Las gravas recicladas se podrán utilizar en la fabricación de hormigones y grava-cemento, siempre que cumplan las especificaciones indicadas en las Tablas 94 a 97.

		Hormigón Estructural	Hormigón No Estructural
<b>Composición</b> UNE-EN 933-11:2009	Rc+Ru+Ra	-	≥ 70 %
	Rb		≤ 5 %
	X		< 1 %
	Ra	≤ 1 %	≤ 5 %
<b>Partículas ligeras</b> UNE-EN 1744-1:2009		< 1 %	< 2 %

Tabla 94. Clasificación de las gravas recicladas según su composición

		Hormigón Estructural	Hormigón No Estructural
<b>Granulometría</b> UNE 933-1:2012	<b>Partículas &lt; 4 mm</b>	≤ 5 %	
<b>Índice de lajas</b> UNE-EN 933-3:2012		< 35	< 40

Tabla 95. Requisitos geométricos de las gravas recicladas

		Hormigón Estructural	Hormigón No Estructural
<b>Absorción</b> UNE-EN 1097-6:2000	≥ 4 mm	< 7 %	< 9 %
<b>Terrones de arcilla</b> UNE 7133:1958		≤ 0,6 %	
<b>Desgaste Los Ángeles</b> UNE-EN 1097-2:2010		< 40	
<b>Resistencia a heladas</b> UNE-EN 1367-2:2010		< 18 %	

Tabla 96. Requisitos físico-mecánicos de las gravas recicladas

		Hormigón Estructural	Hormigón No Estructural
<b>Sulfatos solubles en ácido (SO<sub>3</sub>)</b> UNE-EN 1744-1:2009		< 0,80 %	< 1 %
<b>Compuestos totales de azufre (SO<sub>3</sub>)</b> UNE-EN 1744-1:2009		< 1 %	
<b>Materia orgánica</b> UNE-EN 1744-1:2009		Aumento tiempo de fraguado < 120 min Pérdida resistencia a compresión (28 días) < 20%	
<b>Reactividad</b> UNE-EN 146508 EX (áridos silíceos) UNE-EN 146507-2 EX (áridos calizos)		NO reactivo	
<b>Cloruros totales (Cl<sup>-</sup>)</b> <sup>(1)</sup> UNE-EN 196-2:2006		≤ 0,05 %	-

<sup>(1)</sup> Sólo para los casos de hormigón armado

Tabla 97. Requisitos químicos de las gravas recicladas



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

## 5.4.3. Hormigón compactado con rodillo

### 5.4.3.1. Introducción

La tasa de reciclado de RCD en España es muy inferior a lo exigido por la normativa europea y nacional. Para conseguir que se incremente el empleo de los áridos de RCD en las obras de construcción es necesaria una actuación más activa de los distintos actores del sector.

Las Administraciones Públicas deben cumplir con lo exigido por la legislación vigente:

- Normativa técnica:
  - Empleando normativa técnica específica para áridos de RCD en los proyectos de las obras.
  - Exigiendo su aplicación en la ejecución de las obras.
- Fomentando el empleo de los áridos de RCD
  - Proponiendo el empleo de los áridos de RCD en los proyectos.
  - Aceptando el empleo de áridos de RCD en las obras cuyos proyectos no los hubieran contemplado.

Los productores no están obligados a fabricar áridos de RCD de la máxima calidad, pero deben certificar y garantizar, la calidad

real de los productos que venden, el control de producción de los áridos de RCD se tiene que realizar en la planta de tratamiento y no en las obras.

Pero con tener una normativa adecuada y garantizada la calidad del árido de RCD que se reciba en la obra no es suficiente, es necesario, teniendo en cuenta el escenario de crisis económica de España, que el empleo de los áridos de RCD no suponga un incremento de los costos en la ejecución de las obras.

Las Administraciones y los constructores deberían apostar, por cuestiones de sostenibilidad en la construcción, por los áridos reciclados, pero no se les puede exigir que incrementen los costos solo por razones ecológicas.

Por ello, para el fomento del empleo de áridos RCD, los investigadores deben tener como uno de sus objetivos principales que el uso de un determinado producto fabricado a partir de RCD debe ser lo más competitivo posible con los áridos naturales, y no limitarse a investigar los posibles usos de estos materiales única y exclusivamente desde un punto de vista técnico, deben valorar el costo real del producto en la obra, han de ser conscientes que si se proponen materiales de RCD con un coste muy superior al fabricado con áridos naturales será muy difícil, por no decir un fracaso, su empleo real.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

En el caso de los materiales de RCD para pavimentación se tienen que considerar los siguientes aspectos:

- Para los materiales no ligados:
  - Los suelos competitivos de RCD son los seleccionados y serán competitivos en las zonas donde sea difícil, por escasez o distancia, tener préstamos de suelos seleccionados naturales.
  - Las ahorras de RCD serán competitivas frente a las naturales en función de su calidad y de las distancias a la obra.
- Para los materiales ligados con cemento:
  - Los suelos estabilizados y el suelo-cemento se fabrican con el 100% de RCD (gruesos y finos). Estos materiales son totalmente competitivos con los naturales, el factor determinante será la distancia a obra.
  - La grava-cemento y el hormigón seco compactado con rodillo (HCR), para que sean competitivos con los naturales, solo podrán utilizar los áridos gruesos de RCD, la arena debe ser natural, de querer emplear todo el árido (grueso y fino) de RCD el sobre costo por tener que elevar la dotación de cemento elimina la competitividad.
  - Los factores determinantes para el empleo del HCR con áridos gruesos RCD y arena de cantera, frente al HCR natural son:
    - La distancia a obra.
    - Las características mecánicas solicitadas.

- Los hormigones HCR de consistencia blanda o superior es más difícil que sean competitivos con los naturales, los áridos reciclados presentan una mayor absorción de agua que los naturales, lo que eleva la relación agua/cemento del hormigón y con ello el costo del hormigón reciclado frente al natural.

Es el HCR con áridos gruesos reciclados, y baja resistencia (como se verá en este trabajo) el producto con mayor valor añadido de los expuestos en este apartado para el empleo de los áridos de RCD.

El hormigón seco compactado con rodillo (HCR) es un material con los mismos ingredientes básicos que el hormigón convencional: cemento, agua, arena y árido grueso. Pero a diferencia de éste, es lo suficientemente más seco como para ser compactado con rodillo. Por lo que se englobará como material tratado con cemento (Ayuntamiento de Valencia, 2007).

Se entiende por HCR reciclado aquel que es fabricado con árido reciclado o una mezcla de árido grueso reciclado y árido fino natural. Para evaluar el comportamiento de este hormigón reciclado es preciso una comparación con un hormigón de control, fabricado con la misma dosificación pero empleando árido natural.

Pocas son las experiencias previas en el uso de árido reciclado en hormigón seco compactado con rodillo, de estos estudios podemos destacar que a partir de 200 kg/m<sup>3</sup> de cemento la



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

resistencias bajan de manera considerable (Debied F. y col. 2009, Courard L. y col. 2010).

En Málaga se emplea de modo habitual el HCR reciclado como capa de firme de los viales urbanos. La Calle Pascal (Polígono industrial San Julián en Málaga) se ejecutó en el año 2010 como tramo de prueba para el estudio de los áridos de RCD, y tanto la zahorra como el HCR están preparados con áridos reciclados. En el HCR los áridos gruesos fueron reciclados de hormigón y la arena de cantera. Esta calle, con gran intensidad de tráfico de pesados al encontrarse en un polígono industrial, se está comportando satisfactoriamente.

En España, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) recoge una serie de requisitos que debe cumplir el árido para capas de suelo-cemento y grava-cemento (Tabla 98).

		PG-3 2015 (Art. 213)		
		SUELO-CEMENTO	GRAVA-CEMENTO	
Árido grueso	Absorción	-	-	
	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	-	-	
	Coef. de limpieza	-	-	
	Índice de Lajas	CALZADA	-	≤ 30 (T00 a T2) ≤ 35 (T3 y T4)
		ARCENES	-	≤ 40 (T00 a T4)
	Los Ángeles	CALZADA	-	≤ 35 (T1 a T4)
		ARCENES	-	≤ 40 (T00 a T4)
	Partículas Trituradas	CALZADA	-	≥ 70 (T00 a T1) ≥ 50 (T2) ≥ 30 (T3 y T4)
ARCENES		-	≥ 50 (T00 a T1) ≥ 30 (T2, T3 y T4)	
Proporción de terrones de arcilla		-	-	
Árido fino	Equivalente de Arena (SE4)	>40 Para GC 20 >35 Para GC 32		
	Proporción de terrones de arcilla	-	-	
	Límite Líquido	< 30	< 25	
	Índice Plástico	< 15	< 6	
Reactividad álcali-árido		NO REACTIVO	NO REACTIVO	
Materia orgánica		≤ 1 %	Estudio variación de los tiempos de fraguado y disminución de la resistencia a compresión	
Sulfuros oxidables		-	-	
Sulfatos solubles en ácido (SO <sub>3</sub> )		-	≤ 0,8 %	
Compuestos totales de azufre (S)		-	≤ 1 % (*)	
Compuestos solubles en agua		-	-	

(\*) Si en la descripción petrográfica (norma UNE-EN 932-3) se apreciara presencia de pirrotina en el árido para la grava-cemento, el contenido ponderal en azufre total (S) deberá limitarse a cuatro décimas porcentuales (≤ 0,4%),

Tabla 98. Requisitos de los áridos (PG-3, 2015)



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

La Tabla 99 recoge los requisitos del HCR exigidos por diferentes entidades.

	Especificaciones	
	Capa de rodadura	Base de pavimento
PG-3	CBR recién compactado > 65 Dosificación de conglomerante > 10%, en peso, del total de materiales secos, Tracción indirecta $\geq 3,3$ MPa	
Guía GEAR	Contenido de cemento entre 12 y 17%, en peso, del total de materiales secos,	
	Resistencia media a tracción indirecta > 4 MPa a 28 días (si se aumentara la capa de HCR en 2 cm, > 3,5 MPa)	Resistencia media a compresión > 20 MPa a 28 días, Resistencia media a tracción indirecta > 3,3 MPa a 28 días,
Catálogo de firmes y pavimentos de la ciudad de Valencia	Dosificación de conglomerante $\geq 280$ Kg/ m <sup>3</sup> Resistencia media a tracción indirecta $\geq 2,8$ MPa a 28 días,	
CEMOSA-AGRECA (Excmo. Ayuntamiento de Málaga)	Resistencia media a compresión $\geq 10$ MPa a 28 días	

Tabla 99. Especificaciones de las características del HCR

En resumen estas normativas contemplan dos tipos de HCR, uno de alta resistencia (especificada como tracción indirecta) y otro de baja resistencia (especificada como resistencia a compresión).

En base a la gran experiencia de empleo en la ciudad de Málaga, el HCR es un material muy útil como capa de firme de viales urbanos, ya que es fácil de colocar, aporta una elevada capacidad soporte y, en este caso, al presentar una baja resistencia a compresión permite fácilmente la actuación para reparación o introducción de nuevos servicios o canalizaciones en las calles ya pavimentadas.

## 5.4.3.2. Objetivos

Como se ha indicado en las normativas citadas para la fabricación de HCR con áridos reciclados se permite el empleo al 100% de áridos gruesos de RCD siempre que procedan de la trituración de hormigones.

Pero no se puede olvidar que los residuos procedentes de la trituración de hormigones suponen solo el 10 / 15% de los existentes en la plantas de tratamientos de los RCD. Por ello, es obligado estudiar las posibilidades de empleo en este material ligado de otros residuos existentes en estas plantas como son los mixtos que contienen una proporción significativa de partículas cerámicas.

Por otro lado, muchas de las obras de mantenimiento de los firmes bituminosos que se realizan en las ciudades y carreteras, dan lugar a residuos fresados de mezclas bituminosas. El PG-3 define como material para capas de firme de carreteras el reciclado in situ de las mezclas bituminosas con cemento, es por lo que se ha considerado oportuno el estudio de hormigones preparados con áridos procedentes de estos fresados.

En este trabajo, se han fabricado, ensayado y analizado HCR fabricados con áridos gruesos procedentes de la trituración de hormigones, fresado de mezclas bituminosas, mezclas de áridos



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

de hormigón con cerámicos y mezclas de áridos de hormigón con áridos de mezclas bituminosas.

El objetivo de todo ello, ha sido definir, en base a condicionantes técnicos y económicos, que áridos son adecuados para la fabricación del HCR de RCD.

En el presente trabajo, se han analizado las características de distintos HCR diferenciados por la calidad del árido grueso reciclado, teniendo como referente a un HCR con un árido natural de calidad excelente para la fabricación de hormigones compactados como es el árido de la cantera ARICOSA TARALPE de Málaga.

Se han estudiado las características técnicas y las repercusiones en el costo final de estos hormigones, que en esencia es conocer si para conseguir las prestaciones de un HCR con áridos naturales, el HCR con áridos de RCD precisa de un sobre coste de fabricación, como es el caso de los hormigones estructurales que necesitan de una muy elevada calidad del árido de RCD y de una mayor dotación de cemento para conseguir la calidad del mismo hormigón estructural con áridos naturales.

### 5.4.3.3. Materiales

#### 5.4.3.3.1. Áridos

- Áridos naturales

Se han empleado dos fracciones de árido natural, las denominadas 0/4 y 4/16. Estos áridos proceden de la cantera ARICOSA TARALPE situada en Alhaurín de la Torre. Málaga. Las características de estos materiales son las indicadas en la ficha CE del fabricante.

Compañía General de Canteras, A- 41135161

099

Compañía General de Canteras C/cta. de Almería 1,0, 8 (29720) Málaga

Cantera La. Ultera (Casares)

04

0099/CPD/A60.0028

UNE -EN 12620

ARIDOS PARA HORMIGON

REQUISITO	PRODUCTOS			UNIDADES	NORMA
	Arena 0/4	Grava 4/16	Grava 16/22		
Tamaño	0/4	4/16	16/22	d/D	-
Composición del árido	CALIZO			-	EN 932-3
Granulometría	G <sub>1,05</sub>	G <sub>2,50-15</sub>	G <sub>2,50-20</sub>	Categoría	EN 933-1
Contenido en finos	f <sub>10</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>3</sub>	Categoría	EN 933-1
Indice de lajas	N/A	Fl <sub>20</sub>	Fl <sub>15</sub>	Categoría	EN 933-3
Evaluación de la calidad de los finos (azul de metileno)	≤6 gr/kg	N/A	N/A	Declarado	EN 933-9
Resistencia a la fragmentación (ensayo de Los Angeles)	N/A	LA <sub>25</sub>		Categoría	EN 1097-2
Absorción de agua	0,88	0,85	0,47	Declarado	EN 1097-6
Densidad aparente del árido	2,73	2,84	2,73	Declarado	EN 1097-6
Cloruros	0,001			Declarado	EN 1744-1
Sulfatos solubles en ácido	AS <sub>0,2</sub>			Categoría	EN 1744-1
Compuestos totales de azufre	0,04			Declarado	EN 1744-1
Componentes que alteran el tiempo de fraguado y endurecimiento del hormigón (Materia orgánica)	SIN MATERIA ORGANICA			Declarado	EN 1744-1
Contaminantes ligeros	NO CONTIENE			Declarado	EN 1744-1
Reactividad	NO REACTIVO			Declarado	UNE 146507
Terrones de arcilla	NO CONTIENE			Declarado	UNE 7133
Partículas blandas	NO CONTIENE			Declarado	UNE 7134
Friabilidad de la arena	< 25	N/A	N/A	Declarado	UNE 83115

Figura 92. Características de los áridos naturales

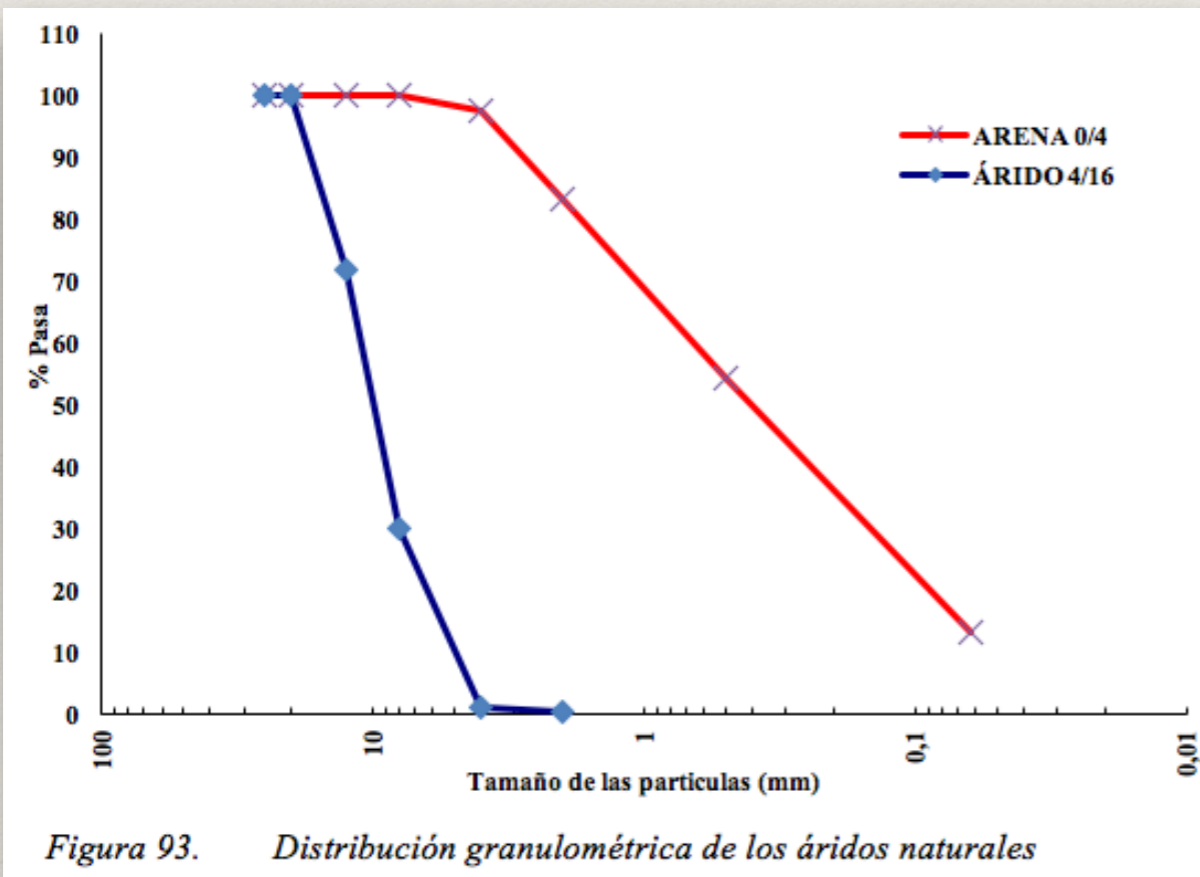


# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Las granulometrías de los áridos naturales empleados en estos hormigones son las indicadas en la Tabla 100 y en la Figura 93.

MATERIAL	PROCEDENCIA	TIPO	GRANULOMETRIA % PASA TAMIZ							
			25	20	12,5	8	4	2	0,500	0,063
CALIZO	NATURAL	4/16	100	100	71,8	30	0,9	0,1		
CALIZO	NATURAL	0/4	100	100	100	100	97,6	83,4	54,3	13,3

Tabla 100. Granulometría de los áridos naturales



- Áridos reciclados

## a. Grava reciclada de hormigón

Es una grava reciclada de hormigón (GRH) procedente de la planta de tratamiento de RCD de Gecorsa, situada en el T.M. de Córdoba. (Figura 94).



Figura 94. Grava Reciclada de Hormigón



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

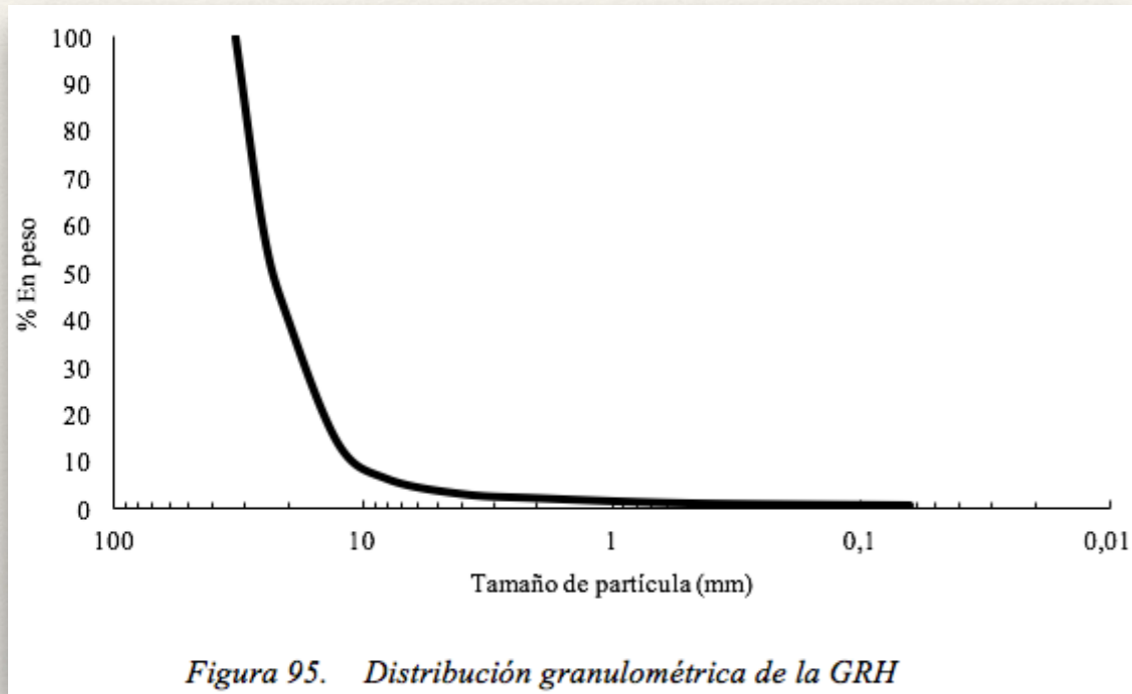


Figura 95. Distribución granulométrica de la GRH

Se trata de una grava de tamaño 8-25 mm, tal y como se observa en la Figura 95. El resto de características, tanto físicas como químicas, se muestran en la Tabla 101.

			GRH
Planta Origen			Gecorsa (Córdoba)
Composición	Asfalto	UNE-EN 933-1	1,71 %
	Cerámicos		4,24 %
	Morteros y hormigón		58,74 %
	Áridos naturales		35,40 %
	Otros		0,14 %
Absorción		UNE 7133	6,13 %
Densidad seca en estufa (g/cm³)		UNE 7133	2,223
Terrones de arcilla		UNE 7133	No contiene
Los Ángeles		UNE-EN 1097-2	36,6
Índice de lajas		UNE-EN 933-3	5,65
Sulfatos solubles en ácido (SO <sub>3</sub> )		UNE-EN 1744-1	0,1
Compuestos totales de azufre (S)			0,6

Tabla 101. Caracterización de la GRH

De los datos de la tabla anterior se puede decir que cumple todas las exigencias del PG-3 salvo el coeficiente de Los Ángeles que es superior a 35. Sin embargo cumple todas las exigencias del GEAR para Clase 1 como base de pavimento.

## b. Grava reciclada cerámica

Se trata de un material reciclado procedente de la trituración de tabiques de fábrica de ladrillo y mortero procedente de la planta de Gecorsa, (Figura 97) y con tamaño 4-25 mm, tal y como se observa en la gráfica de la Figura 96.

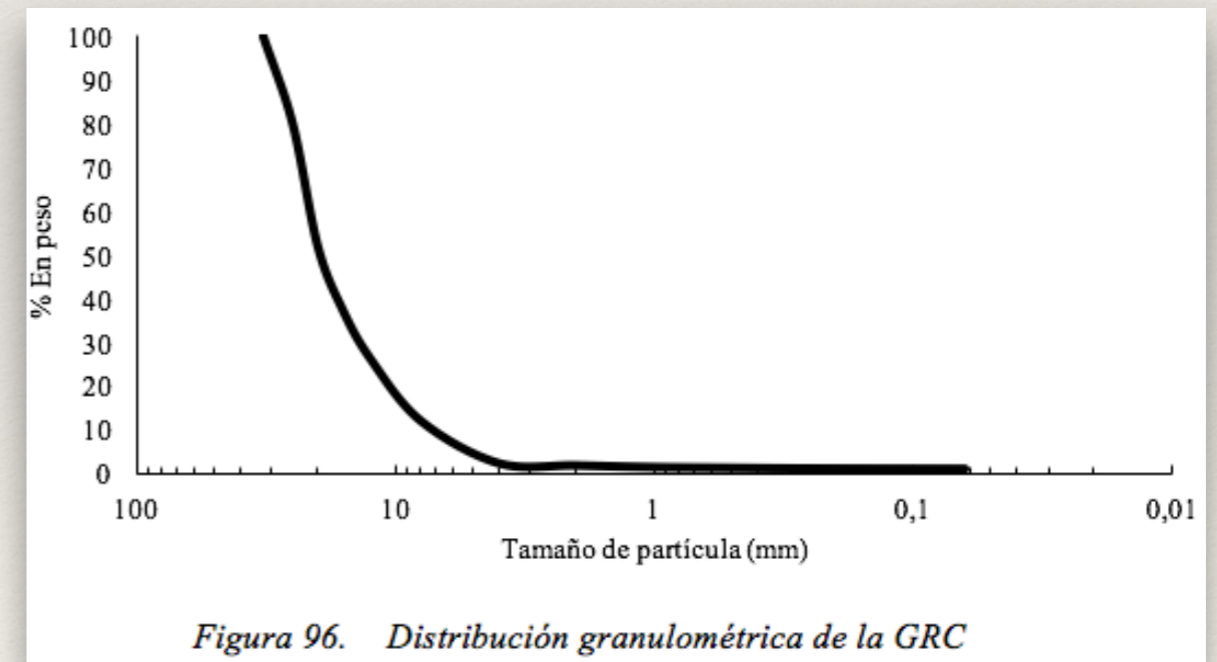


Figura 96. Distribución granulométrica de la GRC



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD



Figura 97. Grava reciclada cerámica

Las principales características de este material se muestran en la Tabla 102. Se puede observar que el material está constituido aproximadamente por un tercio de mortero y dos tercios de partículas cerámicas.

			GRC
Planta Origen			Gecorsa (Córdoba)
Composición	Asfalto	UNE-EN 933-1	0,00 %
	Cerámicos		62,61 %
	Morteros y hormigón		36,82 %
	Áridos naturales		0,50 %
	Otros		0,04 %
Absorción		UNE 7133	14,90 %
Densidad seca en estufa (g/cm <sup>3</sup> )		UNE 7133	1,826
Terrones de arcilla		UNE 7133	No contiene
Los Ángeles		UNE-EN 1097-2	37,8
Índice de lajas		UNE-EN 933-3	30,3
Sulfatos solubles en ácido (SO <sub>3</sub> )		UNE-EN 1744-1	0,2
Compuestos totales de azufre (S)			0,51

Tabla 102. Caracterización de áridos reciclados

Del análisis de los datos se comprueba que este material no cumple las exigencias del PG3 por ser el coeficiente de Los Ángeles superior a 35.

### a. Grava reciclada de fresado de mezclas bituminosas (GRA)

La granulometría de este árido es la indicada en la Tabla 103 y en la Figura 98.

MATERIAL	PROCEDENCIA	TIPO	GRANULOMETRIA % PASA TAMIZ							
			25	20	12,5	8	4	2	0,500	0,063
RECICLADO	FRESADO MBC	GRA	100	94	73,9	44,7	22,6	13,3	3,8	0,2

Tabla 103. Granulometría del árido reciclado fresado de mezclas bituminosas

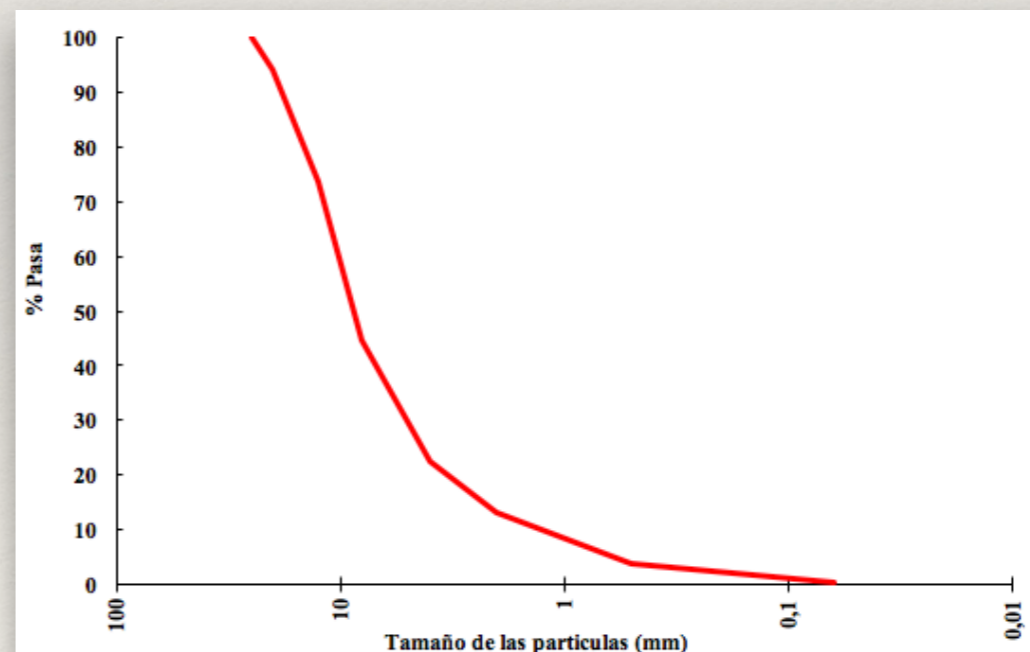


Figura 98. Distribución granulométrica del árido reciclado fresado de mezclas bituminosas



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

## 5.4.3.3.2. Cemento

El cemento utilizado ha sido un CEM II-42.5 A/V

## 5.4.3.4. Métodos

Para la elaboración de todos los HCR se ha utilizado arena natural, sólo en la fracción gruesa (grava) se han utilizado materiales reciclados de RCD.

### 5.4.3.4.1. Tipos de HCR estudiados

HCR 100% con áridos naturales (AN). Se ha utilizado como hormigón de referencia.

HCR 100% grava reciclada de hormigón (GRH)

HCR con un 85% de GRH y un 15% de GRC que aproximadamente equivale a un 90% de partículas de hormigón y un 10% de partículas cerámicas.

HCR con un 65% de GRH y un 35% de GRC que aproximadamente equivale a un 80% de partículas de hormigón y un 20% de partículas cerámicas.

HCR con un 90% de GRH y un 10% de partículas asfálticas (GRA).

HCR con el 100% grava reciclada de fresado de mezclas bituminosas (GRA).

### 5.4.3.4.2. Dosificaciones empleadas

Se han utilizado dos dosificaciones, una de baja resistencia con 150 kg de cemento (CE) por  $m^3$  ( $\approx 5\%$ ) y otra de alta resistencia con 250 kg de CE por  $m^3$  ( $\approx 10\%$ ). Las proporciones de cemento, arena y grava se han diseñado de modo que la granulometría de la mezcla se ajuste lo más posible al huso granulométrico del Catálogo de Firmes y Pavimentos de la Ciudad de Valencia (Ayuntamiento de Valencia, 2007). La cantidad de agua añadida equivale a la humedad óptima del ensayo Proctor modificado (UNE 10350). Las dosificaciones empleadas para las 12 amasadas se recogen en la Tabla 104.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

Amasada	ARN	GN	GRH	GRC	GRA	CE	Agua
100% AN + 150 Kg/m <sup>3</sup> CE	1050	1800	0	0	0	150	165
100% AN + 250 Kg/m <sup>3</sup> CE	750	1500	0	0	0	250	160
100% GRH + 150 Kg/m <sup>3</sup> CE	758	0	1246	0	0	150	151
100% GRH + 250 Kg/m <sup>3</sup> CE	655	0	1229	0	0	250	158
85% GRH-15% GRC + 150 Kg/m <sup>3</sup> CE	731	0	1028	175	0	150	171
85% GRH-15% GRC + 250 Kg/m <sup>3</sup> CE	658	0	1048	178	0	250	158
65% GRH-35% GRC + 150 Kg/m <sup>3</sup> CE	726	0	781	405	0	150	177
65% GRH-35% GRC + 250 Kg/m <sup>3</sup> CE	639	0	784	407	0	250	175
90% GRH-10% GRA + 150 Kg/m <sup>3</sup> CE	900	0	1755	0	195	150	276
90% GRH-10% GRA + 250 Kg/m <sup>3</sup> CE	500	0	1575	0	175	250	258
100% GRA + 150 Kg/m <sup>3</sup> CE	750	0	0	0	2100	150	155
100% GRA + 250 Kg/m <sup>3</sup> CE	500	0	0	0	1750	250	165

Tabla 104. Dosificaciones empleadas (Kg/m<sup>3</sup>)

Así mismo las curvas granulométricas de las dosificaciones empleadas se muestran en las Figura 99 a Figura 104.

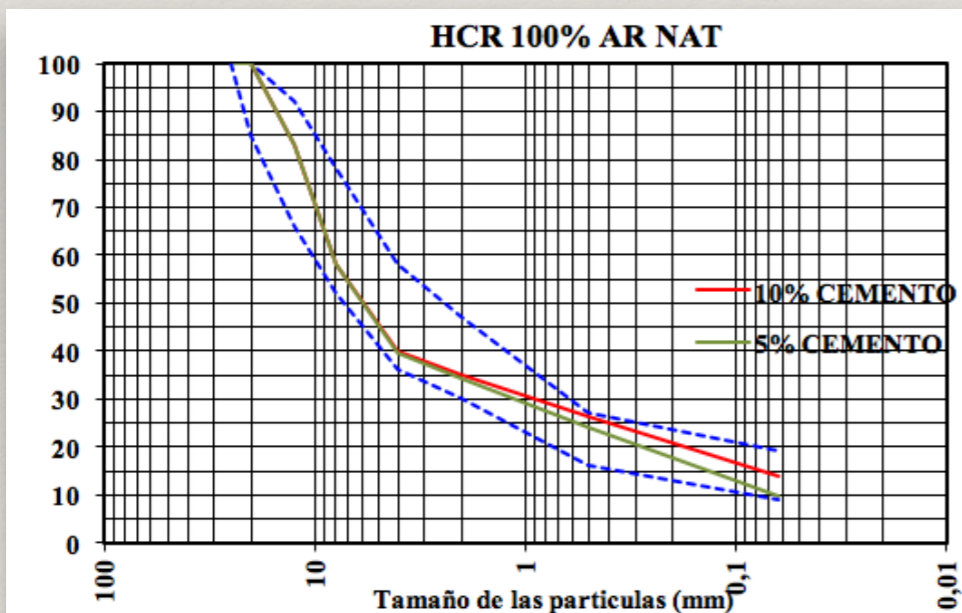


Figura 99. Esqueleto mineral del HCR fabricado con el 100% de áridos naturales.

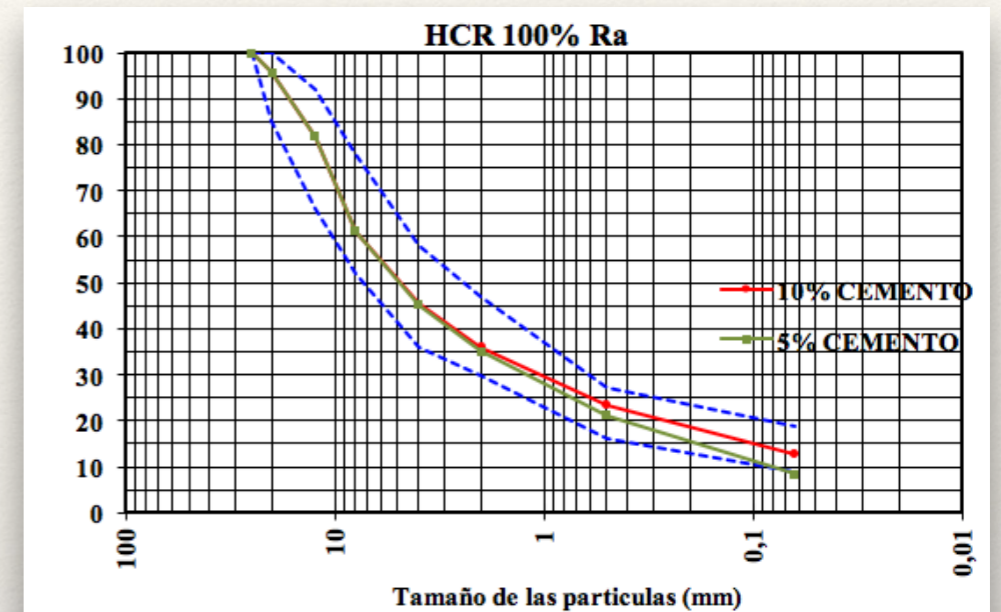


Figura 100. Esqueleto mineral del HCR fabricado con el 100% de material fresado (Ra).

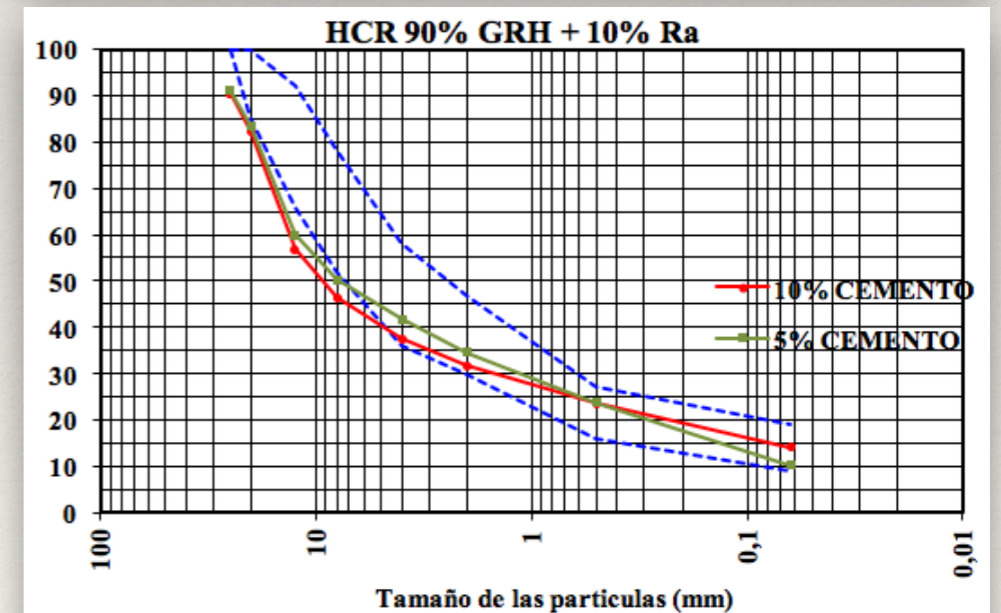


Figura 101. Esqueleto mineral del HCR fabricado con el 90% de grava reciclada de hormigón (GRH), 10% de material fresado.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

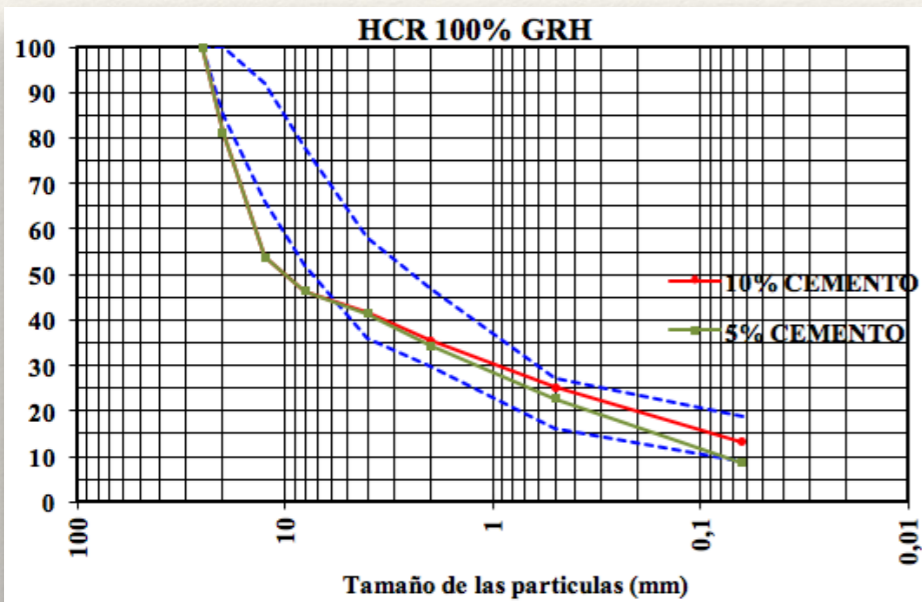


Figura 102. Esqueleto mineral del HCR fabricado con el 100% de grava reciclada de hormigón (GRH).

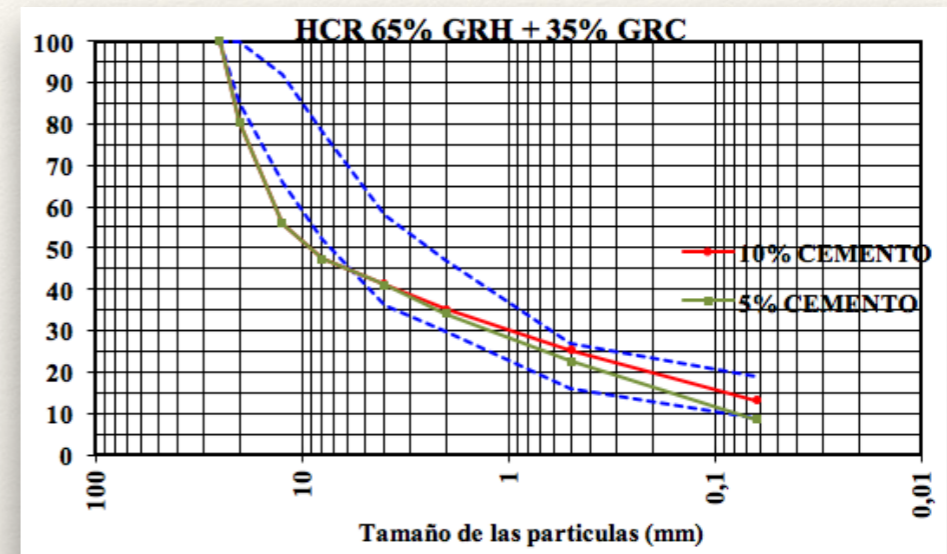


Figura 104. Esqueleto mineral del HCR fabricado con el 65% de grava reciclada de hormigón (GRH) y un 35% de grava reciclada cerámica (GRC).

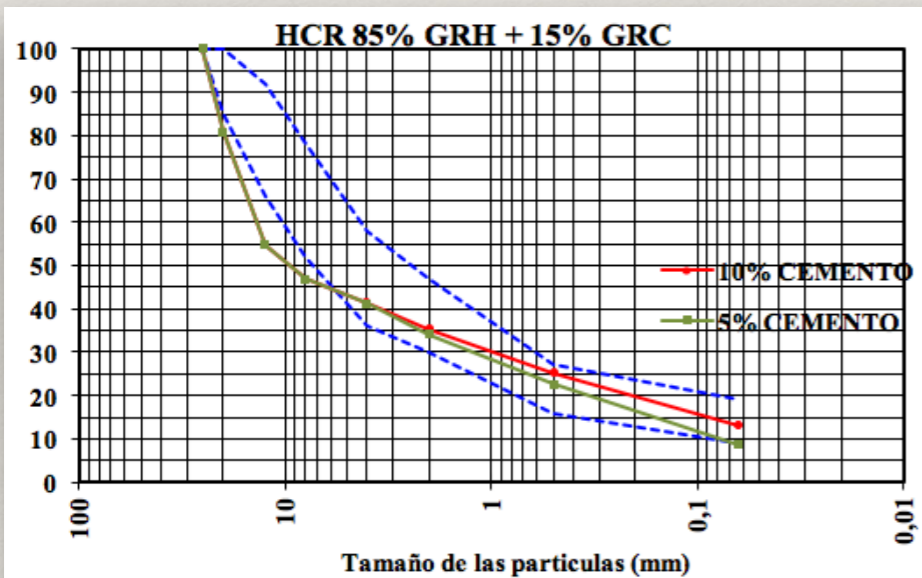


Figura 103. Esqueleto mineral del HCR fabricado con el 85% de grava reciclada de hormigón (GRH) y un 15% de grava reciclada cerámica (GRC).

## 5.4.3.4.3. Fabricación del HCR

Para la fabricación de cada una de las amasadas de HCR se siguió la metodología descrita en el protocolo del Anexo II.

## 5.4.3.4.4. Caracterización del HCR

A cada una de las amasadas se le realizaron los siguientes ensayos para determinar sus características físico- mecánicas (todos los ensayos se realizaron en probetas cilíndricas de 300 mm de longitud y 150 mm de diámetro) que se compactaron según la NLT-310, mediante el uso de martillo vibrante y con la



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

humedad óptima del ensayo Proctor modificado. Previamente se determinó el tiempo de vibración según la Norma NLT-310 cuyos resultados se muestran en la Tabla 105.

Cemento (Kg/m³)	GN (%)	RA (%)	GRH (%)	GRC (%)	Tiempo de martillo (s)
250	100	0	0	0	25
250	0	10	90	0	25
250	0	100	0	0	25
250	0	0	100	0	23
250	0	0	85	15	19
250	0	0	65	35	23
150	100	0	0	0	25
150	0	10	90	0	25
150	0	100	0	0	25
150	0	0	100	0	19
150	0	0	85	15	22
150	0	0	65	35	22

Tabla 105. Resultados del ensayo tiempo de martillo

## 5.4.3.4.4.1. Ensayo Proctor Modificado

Se determinó según la norma UNE 10350.

## 5.4.3.4.4.2. Determinación de la estabilidad volumétrica

Se han determinado las variaciones de volumen, mediante mediciones sucesivas a largo plazo en probetas cilíndricas de

300 mm de longitud y 150 mm de diámetro. Las probetas de cada una de las 12 amasadas se han mantenido en cámara de retracción con el 50% de humedad.

Una vez pasadas 24 horas después de compactadas las probetas, se desmoldan, se trazan 6 generatrices en la probeta, y se realiza la primera medición. De cada generatriz se obtendrán tres medidas y se calcula la media. El resto de mediciones se ha realizado a 7, 14, 28, 56 y 90 días.

## 5.4.3.4.4.3. Resistencia a compresión a diferentes tiempos de curado

Para determinar la resistencia a compresión de probetas de HCR se utiliza la metodología descrita en la norma UNE-EN 12390-3:2009 y UNE-EN 12390-3:2009/AC. Los tiempos de curado utilizados han sido de 7, 28 y 90 días.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD



*Figura 105. Ensayo de resistencia a compresión del HCR*

### 5.4.3.4.4.4. Módulo de elasticidad en compresión

El módulo de elasticidad estático en compresión del HCR se ha calculado como el módulo secante mediante la norma UNE-EN 13286-43: 2003 (Figura 106).



*Figura 106. Probeta preparada para el ensayo de cálculo del módulo de elasticidad*

### 5.4.3.4.4.5. Resistencia a tracción indirecta a diferentes tiempos de curado

Se ha determinado mediante la norma UNE-EN 12390-6:2010 (Tabla 113). Los tiempos de curado utilizados han sido de 7, 28 y 90 días.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD



*Figura 107. Ensayo de tracción indirecta*

### 5.4.3.4.4.6. Determinación del plazo de trabajabilidad

Está relacionado con la determinación de las condiciones de puesta en obra, se ha realizado según UNE 41240:2003.

### 5.4.3.5. Resultados

#### 5.4.3.5.1. Ensayo Proctor modificado

La Tabla 106 y Figura 108 muestran los resultados del ensayo Proctor modificado para cada una de las doce amasadas de HCR realizadas. Se observa que las densidades secas varían entre 2100 y 2440 kg/m<sup>3</sup>, correspondiendo la mayor densidad al 100% de GN con 250 kg/m<sup>3</sup> de cemento y la menor a la combinación de 65% de GRH + 35% de GRC.

De los HCR realizados con áridos reciclados el que alcanza una mayor densidad es el realizado con el 100% de áridos asfálticos, seguido del HCR con el 100% de GRH. Los que tienen una menor densidad son los que contienen GRC, siendo menor a medida que aumenta el porcentaje de partículas cerámicas, lo que es debido a la menor densidad de estas partículas en relación a las partículas de hormigón. Así mismo, se aprecia que las densidades aumentan al incrementar la dotación de cemento.

Al igual que para la densidad, la humedad óptima de compactación también depende en mayor medida de la calidad del árido empleado que del contenido de cemento.

La relación humedad óptima calidad de árido se aprecia más claramente con los HCR con 150 kg de cemento/m<sup>3</sup>.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

La humedad de compactación más baja es la de los HCR con áridos naturales, y esta humedad va aumentando con la capacidad de absorción de agua del árido, por lo tanto a continuación está el HCR con el 100% RA, seguido del HCR 100% GRH y por último los que contienen GRC aumentando con el porcentaje de esta.

Con el 10% de cemento ya no está tan claro lo anteriormente expuesto, en este caso la menor humedad óptima de compactación la presenta el HCR 100% RA, seguido del 100% NAT, y a continuación los GRH y GRC.

Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	GN (%)	RA (%)	GRH (%)	GRC (%)	Dens. Seca Máx. (Kg/m <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)
250	100	0	0	0	2440	6,4
250	0	10	90	0	2130	10,3
250	0	100	0	0	2210	5,5
250	0	0	100	0	2210	7,4
250	0	0	85	15	2180	7,4
250	0	0	65	35	2120	8,4
150	100	0	0	0	2430	5,5
150	0	10	90	0	2130	9,2
150	0	100	0	0	2210	6,2
150	0	0	100	0	2180	7,0
150	0	0	85	15	2150	8,2
150	0	0	65	35	2100	8,6

Tabla 106. Resultados del ensayo Proctor Modificado

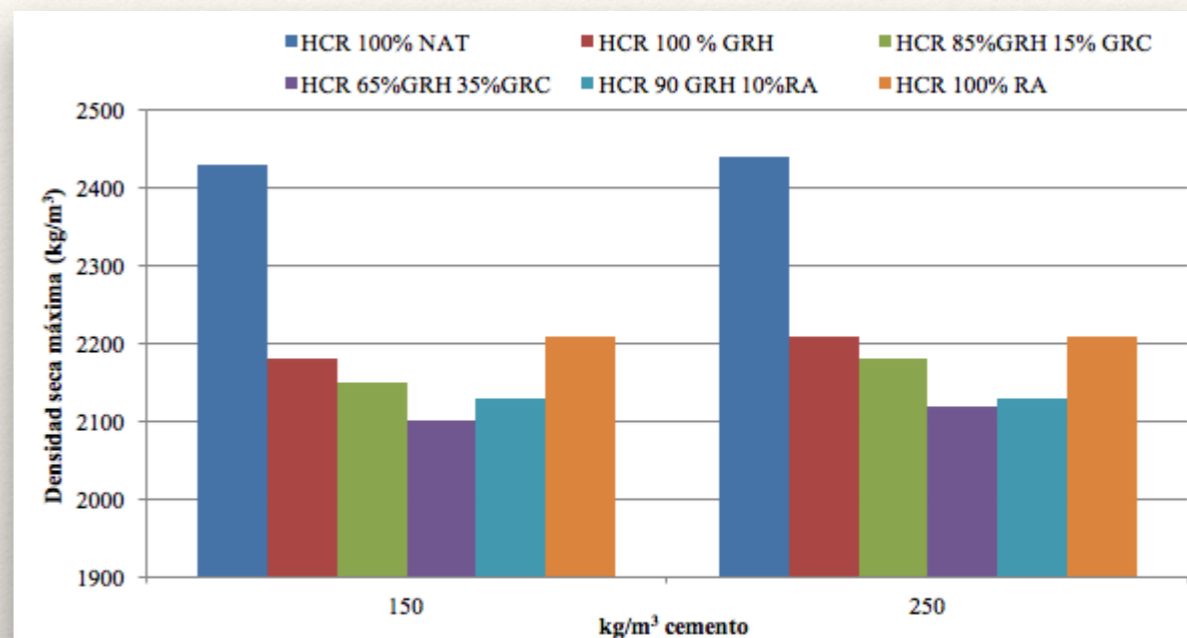


Figura 108. Valores de densidad seca para HCR

## 5.4.3.5.2. Estabilidad volumétrica en cámara de retracción

La Tabla 107 recoge los resultados de los cambios dimensionales de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura a diferentes tiempos de curado en cámara de retracción. Las Figura 109 y 110 muestran la evolución de la retracción de las probetas. Cada una de las medidas corresponde a la media de dos probetas.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

La retracción se mide a través de la siguiente expresión:

$$\epsilon = \frac{L_i - L_t}{L_i} \times 10^6$$

$\epsilon$ : Deformación unitaria, en micrómetros por metro ( $\mu\text{m/m}$ ).

$L_i$ : Longitud inicial (mm).

$L_t$ : Longitud correspondiente al día t (mm).

Se aprecia que las retracciones a 90 días son mayores en las amasadas con mayor contenido de cemento. La retracción media a 90 días para las amasadas de 250 kg de cemento es de 494,7  $\mu\text{m/m}$  y de 433,3  $\mu\text{m/m}$  para las de 150 kg de cemento, es decir un 12,4% inferior.

Así mismo, se aprecia que hay un incremento de la retracción en las probetas de HCR que tienen GRC en relación a las que solo tienen GRH. No obstante, los incrementos de retracción a medida que aumenta el contenido de partículas cerámicas son menores en las amasadas con menor contenido de cemento.

Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	GN (%)	GRA (%)	GRH (%)	GRC (%)	$\epsilon$ ( $\mu\text{m/m}$ )				
					7 días	14 días	28 días	56 días	90 días
250	100	0	0	0	170	126	244	219	236
250	0	10	90	0	868	968	1122	1530	1563
250	0	100	0	0	171	289	299	585	525
250	0	0	100	0	43	137	160	401	423
250	0	0	85	15	105	221	276	352	520
250	0	0	65	35	75	179	229	442	541
150	100	0	0	0	889	798	912	1378	1390
150	0	10	90	0	431	475	537	1028	1033
150	0	100	0	0	173	181	239	362	345
150	0	0	100	0	122	133	234	284	415
150	0	0	85	15	174	254	309	415	465
150	0	0	65	35	159	229	283	379	420

Tabla 107. Resultados del ensayo estabilidad volumétrica



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

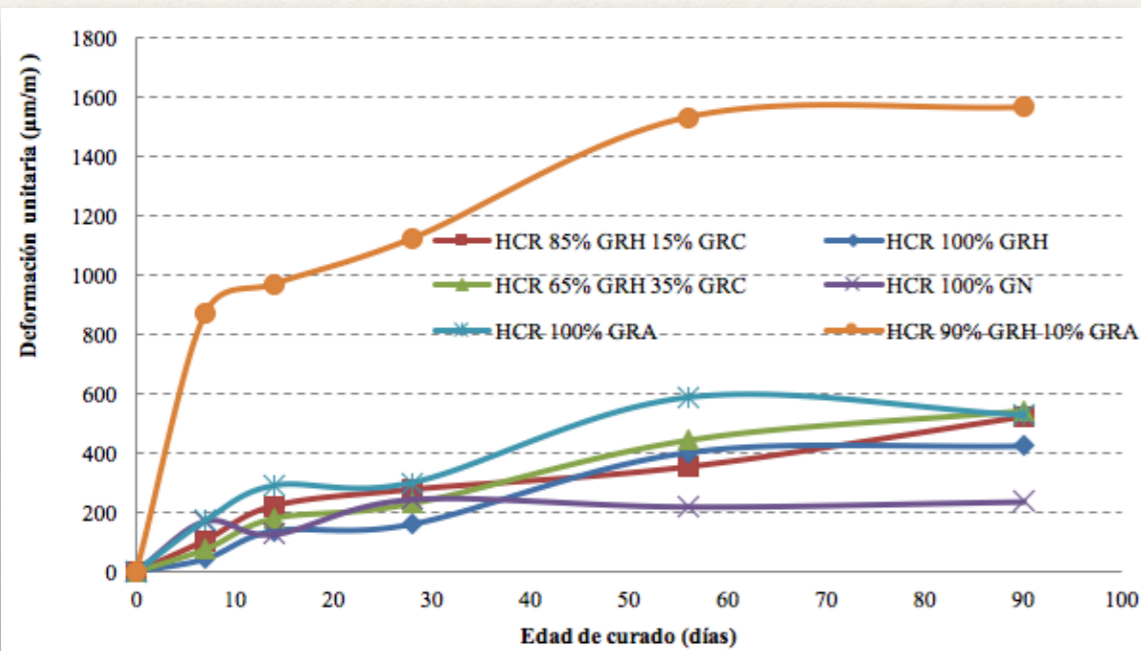


Figura 109. Evolución de la retracción con 250 kg/m<sup>3</sup> de cemento

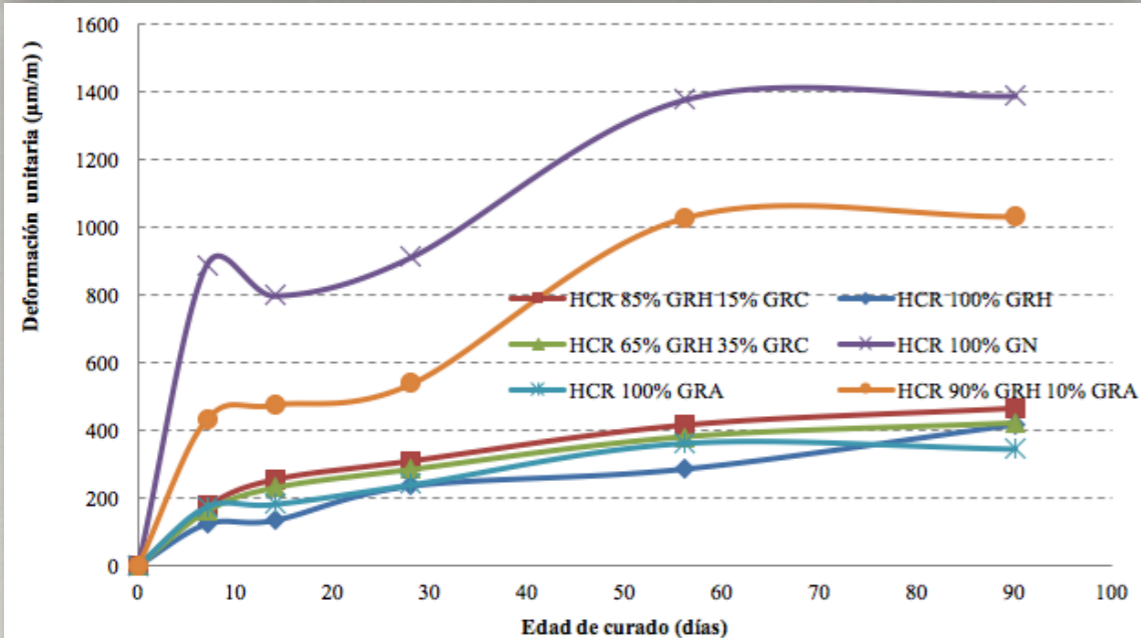


Figura 110. Evolución de la retracción con 150 kg/m<sup>3</sup> de cemento

## 5.4.3.5.4. Resistencia a compresión

La Tabla 108 recoge los resultados de resistencia a compresión de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura a 7, a 28 y a 90 días. Los resultados son la media de dos probetas. Así mismo, la Figura 111, Figura 112 a Figura 113 muestran la evolución temporal de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas.

La resistencia a 28 días de los 6 HCR con 150 kg/m<sup>3</sup> de cemento, oscila entre 5,1 y 12,9 MPa correspondiendo el valor más bajo al HCR con el 100% de GRA. Los 5 restantes tienen una resistencia a 28 días superior a 10 MPa por lo que cumplen las “Recomendaciones para la redacción de Pliegos para el uso de materiales reciclados de RCD en obras urbanas y asimilables” realizado por CEMOSA-AGRECA para el Ayuntamiento de Málaga.

Para los 6 HCR con 250 kg/m<sup>3</sup> de cemento, la resistencia a 28 días oscila entre 14,9 y 23,9 MPa correspondiendo también el valor inferior al HCR con el 100% de GRA. Tres de ellos, (HCR 100% GN, HCR 100% GRH y HCR 85% GRH - 15% GRC) tienen una resistencia superior a 20 MPa cumpliendo los requisitos del GEAR para bases de pavimentos. Por lo tanto, se puede decir que se puede elaborar HCR para bases de pavimento empleando dosificaciones de 250 kg/m<sup>3</sup> de cemento siempre que



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

que se limite el contenido de partículas cerámicas al 10% ya que la GRC tiene en su composición un 37% de mortero y un 63% de partículas cerámicas. Así mismo, se puede decir que para bases de pavimentos de vías urbanas de escaso tráfico se pueden utilizar HCR con dosis de cemento bajas (150 kg/m<sup>3</sup>) utilizando gravas recicladas mixtas con un contenido de partículas cerámicas inferior al 20%.

En los HCR con áridos reciclados se aprecia que cantidades crecientes de partículas cerámicas o asfálticas disminuyen la resistencia a compresión a 28 días en relación al HCR con 100% GRH, siendo la pérdida mayor en los HCR con partículas asfálticas. Para los HCR con GRC las pérdidas oscilan entre el 4,7% para el HCR 85% GRH-15% GRC con 150 kg/m<sup>3</sup> de cemento y el 21,4% para el HCR 65% GRH-35%GRC y 250 kg/m<sup>3</sup> de cemento. Las pérdidas son mayores con el mayor contenido de cemento.

TIPO HCR	CEMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENCIA COMPRESIÓN (MPa)		
		7	28	90
100% GN	250	19,2	23,9	30,1
100% GRA	250	11,1	14,9	15,9
100% GRH	250	16,2	23,4	26,2
85% GRH - 15% GRC	250	14,7	21,4	24,0
65% GRH - 35% GRC	250	11,0	18,4	19,5
90% GRH - 10% RA	250	15,9	17,2	18,4
100% GN	150	9,0	11,4	12,1
100% GRA	150	4,8	5,1	5,3
100% GRH	150	10,1	12,9	14,9
85% GRH - 15% GRC	150	9,7	12,3	13,9
65% GRH - 35%GRC	150	9,6	12,0	12,6
90% GRH - 10% GRA	150	6,6	11,3	13,3

Tabla 108. Resultados de las resistencias a compresión de los HCR

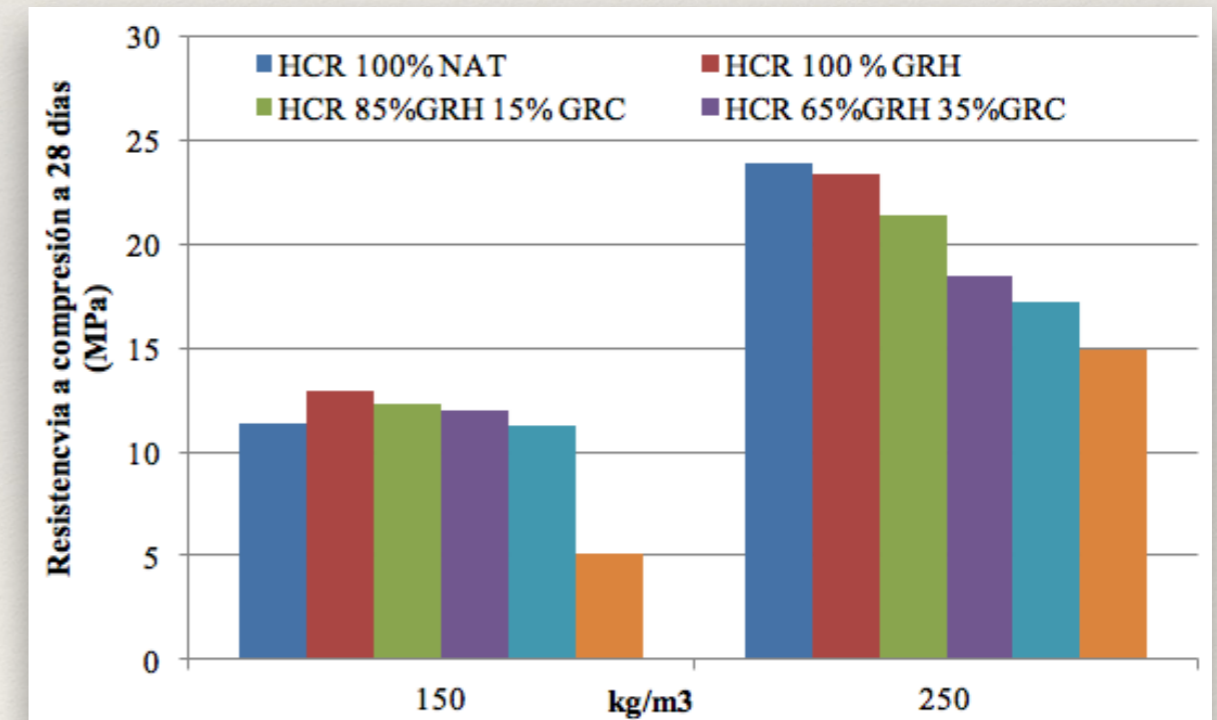


Figura 111. Valores de resistencia a compresión para los HCR



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

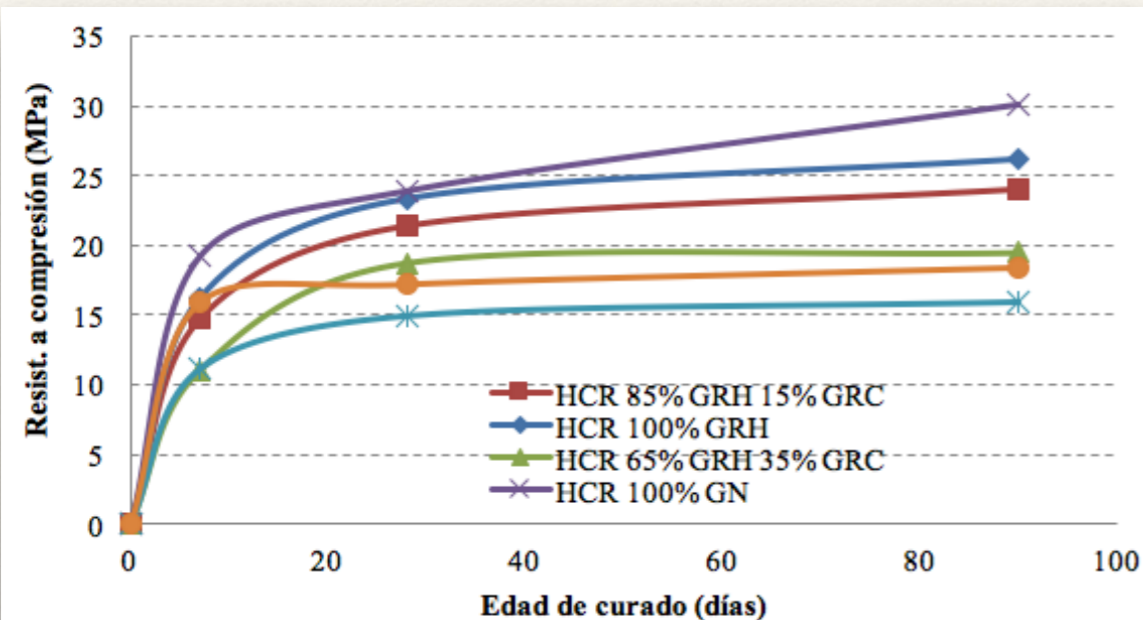
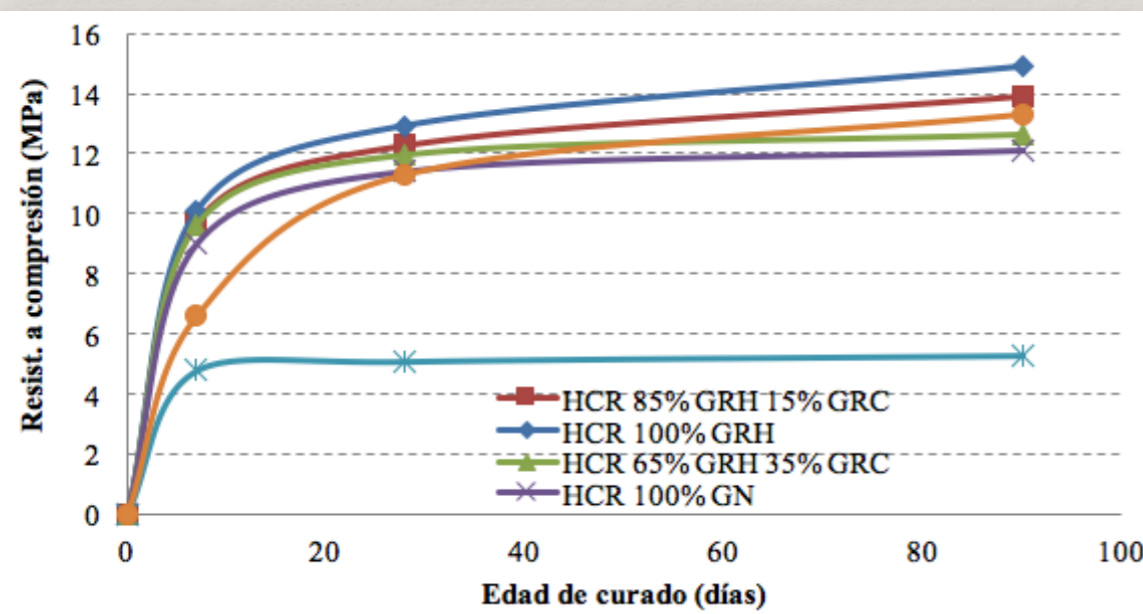


Figura 112. Evolución de resistencia a compresión con 250 kg/m<sup>3</sup> de cemento



Como conclusión del análisis:

- Como se ha mencionado, en la bibliografía se indica que al aumentar la dotación de cemento se incrementan las diferencias entre los hormigones con áridos naturales y los reciclados, lo cual es lógico, al incrementar la dotación de cemento incrementamos las resistencias a compresión y entonces importan más las resistencias a compresión propias del árido, con bajas resistencias de hormigón se rompen menos áridos en el ensayo y entonces afecta menos su resistencia a compresión.
- Este es un dato importante para seguir apostando para los áridos de RCD para hormigones de baja resistencia, como es el HCR de resistencia a compresión 10 MPa, que se puede utilizar en vías urbanas. Pero no en vías de gran capacidad.
- Para fabricar un HCR de resistencia a compresión 10 MPa, se puede optar indistintamente por cualquiera de los HCR analizados con una dotación de 150 kg/m<sup>3</sup> (≈ 5% de cemento) con la excepción del fabricado con el 100% de GRA.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

## 5.4.3.5.5. Módulo de elasticidad

La Tabla 109 y la Figura 114, muestran los valores del módulo de elasticidad a 28 días para las seis amasadas de HCR.

El módulo de elasticidad disminuye con el incremento en el contenido de partículas cerámicas y como es lógico con el descenso en el contenido de cemento. Para los HCR con 250 kg/m<sup>3</sup> de cemento los descensos por el mayor contenido de partículas cerámicas son del 2,8 y 11,6%. Para los HCR con 150 kg/m<sup>3</sup> de cemento son mayores, 7,5 y 16,4%.

TIPO HCR	% CEMENTO	MODULO ELASTICIDAD (MPa)
		28 días
100% GN	250	21070
100% GRA	250	17175
100% GRH	250	16039
85% GRH - 15% GRC	250	15590
65% GRH - 35%GRC	250	14176
90% GRH - 10% GRA	250	20125
100% GN	150	15210
100% GRA	150	4400
100% GRH	150	14211
85% GRH - 15% GRC	150	13141
65% GRH - 35% GRC	150	11886
90% GRH - 10% GRA	150	16375

Tabla 109. Resultados de los módulos elasticidad del hormigón endurecido

La gráfica resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de módulos de elasticidad a los 28 días de edad es la indicada a continuación:

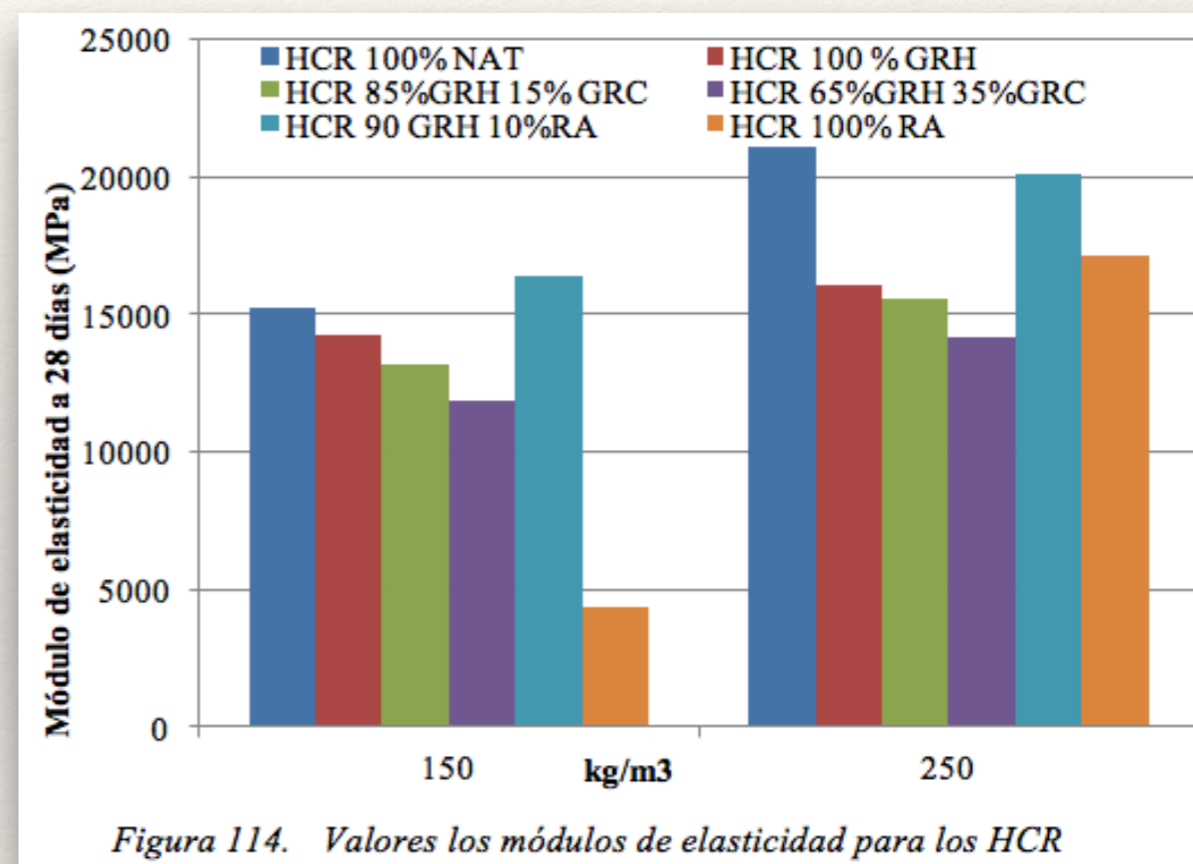


Figura 114. Valores los módulos de elasticidad para los HCR

Los módulos elásticos obtenidos están en concordancia con las resistencias a compresión, con excepción del HCR fabricado con el 90% de GRH y 10% de GRA.

Para los HCR con una dotación de 150 kg de cemento/m<sup>3</sup>, el mayor módulo, ha sido el del 90% GRH y 10% GRA, lo que no es



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

fácil de explicar, eliminando este dato, el resto de los módulos presenta la lógica de las características de los áridos, siendo el mayor el del HCR con áridos naturales y a continuación los fabricados con GRH y GRC, disminuyendo el módulo al incrementarse la proporción de GRC, por último el de menor módulo es el HCR 100% de GRA.

Cuando la dotación de cemento es de 250 kg/m<sup>3</sup>, el HCR de mayor módulo es con lógica el de los áridos naturales, a continuación los HCR con GRA, y por último los mezclas de GRH y GRC disminuyendo el módulo al incrementarse la proporción de GRC.

Atendiendo a los resultados se puede concluir:

- Con dotaciones bajas de cemento existen pequeñas diferencias entre los módulos de los HCR fabricados con áridos naturales y los fabricados con áridos RCD.
- Es interesante el comportamiento del HCR con el 100% de RA. Con dotaciones bajas de cemento se comporta como un suelo estabilizado con cemento, con bajas resistencias mecánicas y bajo módulo. Este HCR se comportaría como una grava-cemento.

- Si no se considera al HCR con el 100% de GRA, los módulos de los HCR con un 5% de cemento oscilan entre los 12000 y 15000 MPa.
- Con el 10% de cemento todos los HCR reciclados presentan características similares variando los módulos entre los 15000 y 20000 MPa.

## 5.4.3.5.6. Resistencia a tracción indirecta

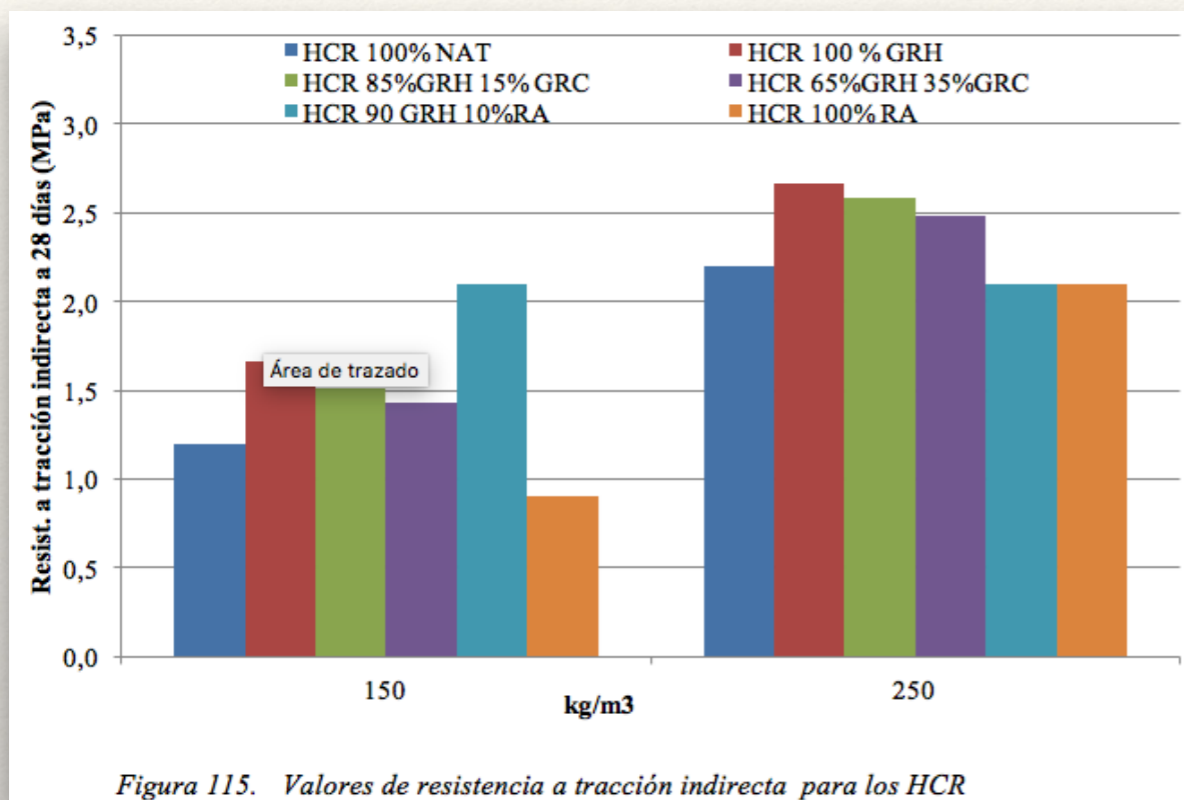
La Tabla 110 y la Figura 115 muestran los resultados de resistencia a tracción indirecta correspondientes a cada una de las doce amasadas.

TIPO HCR	CEMENTO (kg/m <sup>3</sup> )	RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (MPa)		
		7	28	90
100% GN	250	1,4	2,2	2,5
100% GRA	250	1,4	2,1	1,5
100% GRH	250	2,01	2,67	2,75
85%GRH - 15% GRC	250	1,91	2,58	2,60
65%GRH - 35%GRC	250	1,84	2,48	2,50
90% GRH - 10% GRA	250	1,7	2,1	2,4
100% GN	150	1,1	1,2	1,6
100% GRA	150	0,7	0,9	0,5
100% GRH	150	1,21	1,66	1,77
85%GRH - 15% GRC	150	1,08	1,51	1,58
65%GRH - 35%GRC	150	1,05	1,43	1,48
90% GRH - 10% GRA	150	1,4	2,1	1,8

Tabla 110. Valores de resistencia a tracción indirecta



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD



Con la dosificación de 150 kg/m<sup>3</sup> las resistencias a 28 días oscilan entre 0,9 y 2,1 MPa con un valor medio de 1,47 MPa, correspondiendo la menor al 100% GRA y la mayor al 90% GRH+10%GRA. Sin embargo, se aprecian importantes incrementos de la resistencia a 28 días al aumentar la dosis de cemento a 250 kg/m<sup>3</sup> el valor medio pasa a ser de 2,36 MPa (incremento del 61%) variando entre 2,1 para el 100% GRA y 2,67 para el 100% GRH.

Con 150 kg/m<sup>3</sup> de cemento, y con la excepción del HCR con el 100% de RA, se han obtenido mayores resistencias a tracción

indirecta con los HCR con áridos reciclados que con los naturales. Y prácticamente lo mismo puede decirse para los HCR con 250 kg/m<sup>3</sup> de cemento. Y es que para la resistencia a tracción la resistencia a compresión del árido tiene una menor importancia que para la resistencia a compresión del HCR.

Ninguna de las doce amasadas cumple las recomendaciones del GEAR (Asociación española de gestores de RCD, 2012) para bases de pavimentos ni del PG-3 que exigen una resistencia superior a 3,3 MPa a los 28 días. Esto es debido a que las cantidades de cemento empleadas han sido inferiores a las que habitualmente se utilizan en HCR que son superiores a los 300kg/m<sup>3</sup>. Así mismo, ninguno de los doce HCR cumple los requisitos del Catálogo de firmes y pavimentos de la Ciudad de Valencia (Ayuntamiento de Valencia, 2007) que exige 2,8 MPa a los 28 días.

En la Tabla 110 que hay una pérdida de resistencia a tracción indirecta a medida que aumenta el contenido de partículas cerámicas en relación al HCR con el 100% GRH para cada una de las dos dosificaciones de cemento empleadas que oscilan entre el 3,3% para el HCR con 250 kg/m<sup>3</sup> de cemento y 15% de GRC y el 13,9% para el HCR con un 35% de GRC y 150 kg/m<sup>3</sup> de cemento.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

No obstante para las resistencias exigidas por el PG-3 y el de la ciudad de Valencia si importará la calidad del árido, ya que con estas resistencias a tracción indirecta en el ensayo se rompen los áridos. Se exigen valores de 2,8 MPa en el Pliego de Valencia y de 3,3 MPa en el PG-3. Sin embargo, no se especifica resistencia a tracción indirecta para el HCR de baja resistencia, el de 10 MPa a compresión.

En la siguiente gráfica se correlacionan los resultados obtenidos a tracción indirecta y compresión a 28 días.

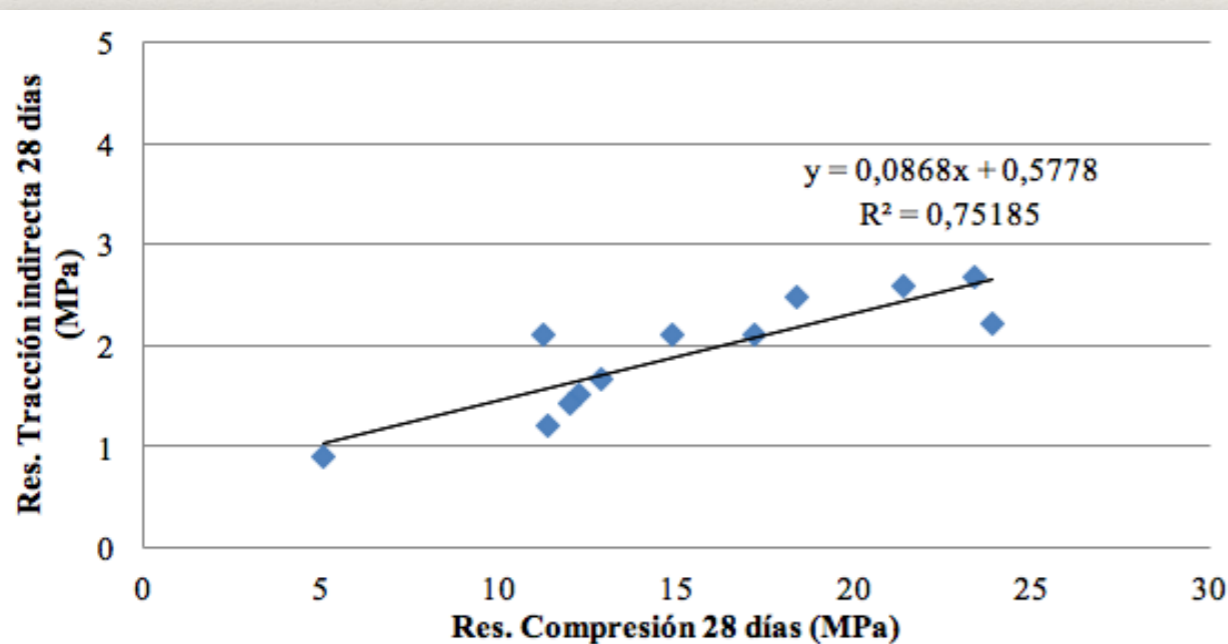


Figura 116. Correlación tracción indirecta / compresión a 28 días para los HCR

Por lo tanto:

- Los HCR de resistencia a compresión en el entorno de los 10 a 12 MPa se podrían correlacionar con resistencias a tracción indirecta en el entorno de los 1,4 a 1,6 MPa.
- Los HCR de resistencia a compresión en el entorno de los 15 a 20 MPa se podrían correlacionar con resistencias a tracción indirecta en el entorno de los 1,9 a 2,3 MPa.
- Para asegurar conseguir HCR con resistencias a tracción indirecta de 2,8 MPa se precisarían dotaciones del 12 al 15% de cemento (300 a 350 kg/m<sup>3</sup>)
- Para asegurar conseguir HCR con resistencias a tracción indirecta de 3,3 MPa se precisarían dotaciones del 15 al 20% de cemento (350 a 450 kg/m<sup>3</sup>)

### 5.4.3.5.7. Determinación del plazo de trabajabilidad

La Tabla 111 muestra los valores del plazo de trabajabilidad para cada uno de los seis materiales. Se aprecia que disminuye con el contenido de cemento y con el aumento de partículas cerámicas. Todos los plazos son inferiores a 180 minutos por lo que se recomienda utilizar un retardador de fraguado.



# 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

TIPO HCR	% CEMENTO	Plazo de trabajabilidad (min)
100% NAT	5	221
	10	195
100% GRH	5	151
	10	167
85% GRH - 15% GRC	5	137
	10	148
65% GRH - 35% GRC	5	124
	10	129
90% GRH - 10% RA	5	195
	10	188
100% RA	5	207
	10	190

Tabla 111. Valores de plazo mínimo de trabajabilidad

En base a este objetivo hay que tener presente los siguientes condicionantes:

- Proximidad de la obra  
Las obras donde se vayan a emplear los áridos RCD deben estar próximas a las plantas de tratamiento, el incremento de costo por transporte elimina la competitividad del árido RCD frente al de la cantera, por lo tanto las obras más interesantes para estos materiales serán las obras urbanas.
- Capacidad de producción  
La capacidad de producción de las plantas de RCD es muy inferior a las de cantera. Como consecuencia no se puede proponer el empleo de áridos RCD para unidades de obra que precisen de gran cantidad de material en poco tiempo. Lo que elimina como objetivos obras de infraestructuras importantes aunque se encuentre en entornos urbanos.
- Calidad del producto  
Es obvio que la calidad del árido es un factor determinante para la calidad de la unidad de obra con él fabricada. Se puede conseguir calidades de áridos RCD muy similares a los naturales.

## 5.4.3.6. Conclusiones

### 5.4.3.6.1. Consideraciones previas

En los antecedentes de este trabajo se especificó que la investigación para el fomento del empleo de los áridos RCD debe tener como un objetivo principal que el producto propuesto sea competitivo técnica y económicamente con los materiales fabricados con áridos naturales.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

- Pero la calidad del árido RCD depende en gran medida del material que se procesa, las características de esta materia prima es más heterogénea que la de un frente de cantera, es por lo que los áridos RCD siempre presentarán una heterogeneidad superior a los naturales.

Esta heterogeneidad, en el caso de la pavimentación, limita el empleo de los áridos RCD para capas de gran responsabilidad estructural.

De acuerdo con lo indicado, para los hormigones secos compactados con rodillo (HCR) el empleo más lógico es el mencionado de una capa de firme con una resistencia baja (en el entorno de los 10 MPa) cuya misión es dar suficiente capacidad soporte al vial y permitir los trabajos de mantenimiento de las instalaciones bajo el vial.

Esta capa es eminentemente urbana, los HCR definido en el Pliego de autovías o en el Pliego de la ciudad de Valencia están diseñados para carreteras con una mayor responsabilidad estructural y que además se precisan para infraestructuras de un mayor tamaño, lo que está en contra de los criterios de competitividad expuestos, tanto por calidad como por capacidad de producción.

Con áridos naturales de buena calidad, las necesidades de cemento para conseguir los 10 MPa se encuentra en el entorno del 5%.

Con la experiencia que se tiene con los áridos RCD, se podría afirmar que con los procedentes de reciclados de hormigón prácticamente se deberían obtener los mismos resultados que con los naturales, pero al querer estudiar el comportamiento de otros tipos de áridos RCD como son los cerámicos y los fresados de MBC se han analizado los distintos HCR con dos dotaciones de cemento, el 5 y 10%, el motivo de ello era garantizar obtener los 10 MPa con áridos de calidad inferior a los naturales.

### 5.4.3.6.2. Conclusión final

De acuerdo con los objetivos establecidos para el presente trabajo:

- Excepto para el HCR 100% RA, para dotaciones del 5% de cemento los HCR que se obtienen con los distintos áridos naturales o reciclados, empleados en este trabajo, son de similares características mecánicas.



## 5. Recomendaciones técnicas para el uso de áridos RCD

- Por lo tanto, para dotaciones bajas de cemento, el 5%, los áridos RCD, (excepto el 100% RA) son totalmente competitivos con áridos naturales de excelente calidad para fabricar hormigón como es el calizo de ARICOSA TARALPE.
- Al incrementar la dotación de cemento, como es el 10%, ya se observa que los HCR fabricados con áridos naturales presentan mejor calidad que los fabricados con áridos RCD.
- Al incrementar la dotación de cemento el HCR fabricado con el 100% de RA se comporta de manera similar al resto de los HCR con áridos RCD.
- La fabricación de HCR diseñados por el Pliego de Autovías o el de la ciudad de Valencia precisa de dotaciones de cemento en el entorno del 15 al 20% de cemento.
- Para estas resistencias y responsabilidad estructural de la capa no es recomendable el empleo de áridos RCD, dejan de ser competitivos:
  - Al aumentar la resistencia requerida para el HCR, con áridos naturales se precisa menos cemento que empleando áridos RCD.
  - La responsabilidad estructural de la capa exigirá garantizar de una manera importante la calidad del árido RCD, lo que supone elevar el coste de producción del árido RCD.
- Con dotaciones del 5% de cemento se obtienen a 28 días:
  - Resistencias a compresión en el entorno de 12 a 15 MPa.
  - Resistencias a tracción indirecta en el entorno de 1,0 a 1,8 MPa.
  - Módulos de elasticidad en el entorno de 12000 a 15000 MPa.
- Con dotaciones del 10% de cemento se obtienen a 28 días:
  - Resistencias a compresión en el entorno de 15 a 23 MPa.
  - Resistencias a tracción indirecta en el entorno de 2,0 a 2,5 MPa.
  - Módulos de elasticidad en el entorno de 15000 a 20000 MPa.





---

# Referencias bibliográficas



## 6. Referencias bibliográficas

AGRECA y CEMOSA (2012). Recomendaciones para la redacción de Pliegos para el uso de materiales reciclados de RCD en obras urbanas y asimilables.

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

Agrela, F.; Jiménez, J. R.; López, M.; Ayuso, J.; Caballero, A. (2006). Caracterización y posibilidades de reutilización en obras de infraestructuras de los RCD sin selección en origen y procedentes de todas las tipologías de obras. III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Zaragoza, p. 231.

Alaejos Gutiérrez P., Calvo Calzada B. (2010). Construcción sostenible. Primeras experiencias en España. Cátedra Mariano Navarro de Zaragoza.

Asociación española de gestores de RCD (2012). Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (Guía GEAR).

Ayuntamiento de Valencia (2007). Catálogo de firmes y pavimentos de la ciudad de Valencia.

Barbudo A., Agrela F., Ayuso J., Jiménez J.R., Poon C.S. (2012). Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials* 28: 129-38.

Barbudo Muñoz, A. (2012). Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba.

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

Bustillo, M. (2010). Manual de RCD y áridos reciclados. Fuego Editores, Madrid.

CEDEX (2010). Catálogo de residuos. Residuos de construcción y demolición. Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/catalogo.aspx>

CEMOSA-AGRECA (2010). Recomendaciones para la redacción de Pliegos para el uso de materiales reciclados de RCD en obras urbanas y asimilables.



## 6. Referencias bibliográficas

Courard L, Michel F., Delhez P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete. *Construction and Building Materials* 24:390–395.

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

Engelsen C, Van der Sloot HA, Wibetoe G, Justnes H, Lund W, Stoltenberg- Hansson E. (2010). Leaching characterization and geochemical modeling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research* 40:1639–49.

Galvín, A.P., Ayuso, J., Agrela, F., Barbudo, A., Jiménez, J.R. (2012). Analysis of leaching procedures for environmental risk assessment of recycled aggregate use in unpaved roads. *Construction and Building Materials* 40: 1207-1214.

Galvín, A.P., Ayuso, J., Jiménez, J.R., Agrela, F. (2012b). Comparison of bath test and influence of pH on the release of metals construction and demolition wastes. *Waste Management*, 32: 88-95.

GIASA. Consejería de Obras Públicas y Vivienda. Junta de Andalucía. (2010) Recomendaciones para la redacción de

Pliegos de Especificaciones Técnicas para el uso de materiales reciclados de RCD.

Güell Ferré, A., Vázquez i Ramonich, E., Varela Pinto, E., Serna Ros, P., Martínez Abella, F., López Gayarre, F., Barra Biznotto, M., Tirado Alonso, A., Romero Casado, A., Girbés Clari, I. (2012). "Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). Proyecto Gear". Editorial: Asociación española de gestores de Residuos de construcción y demolición (GERD), Madrid.

Hidalgo A. y Alonso C. (2005). Evaluación del impacto medioambiental debido a lixiviación de productos de base cemento. 1ª Jornadas de investigación en construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid

Hjelmar O., Pohjola V., Reuss M. & Wahlström M . (1986). Land Disposal of Solid Residues from Combustion of Coal and Peat, Environmental Research Report, 1986:1, MIL-1, Nordic Council of Ministers (In Danish, English summary).

Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental (2011). Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Gobierno Vasco.



## 6. Referencias bibliográficas

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

Jiménez J.R., Agrela F., López M., Ayuso J., González-Barrios A.J., González de Canales J. (2007). Estudio de las propiedades de reutilización de RCD en rellenos tipo terraplén y explanadas. IV Congreso Andaluz de Carreteras, tomo 2, Jaén: 1503-16.

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

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

Jiménez, J. R.; Agrela, F.; López, M.; Ayuso, J.; González, A. (2006). Caracterización y posibilidades de reutilización en obras de infraestructuras de los RCD procedentes de la prisión provincial de Córdoba. III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Zaragoza, p. 231.

Jofre, C., Kraemer, C. (2008). Manual de Estabilización de Suelos con cemento o cal. Instituto español del cemento y sus aplicaciones (IECA).

López Meza, S., Garrabrants, A.C., Van der Sloot, H.A., Kosson, D.S. (2008). Comparison of the release of constituents from granular materials under batch and column testing. *Waste Management*, 28: 1853-1867.

Department of Transport United Kingdom (2009). Manual of Contract Documents for Highway Works (2009). Volume 1 (MCHW1), Specification for Highway Works, Series 500.

Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2012). Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados.

Ministerio de Fomento, Gobierno de España (2014). Orden FOM 2523 por el que se actualizan determinados artículos del Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3).

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



## 6. Referencias bibliográficas

Mas, B., Cladera, A., Bestard, J., Muntaner, D., López, C.E. (2012.b). Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement. *Construction and building materials* 34: 430-441.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición, GERD (2012). Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD).

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y marino. IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental (2011). Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición.

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.

Sanchez M., Alaejos P.(2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials* 23: 872-7.

Sánchez de Juan, Marta (2011). Áridos reciclados para aplicaciones de hormigón no estructural. Disponible en:

[http://www.aparejadoresmadrid.es/archivos/ponencias/55/aridos\\_reciclados.pdf](http://www.aparejadoresmadrid.es/archivos/ponencias/55/aridos_reciclados.pdf)

Terrel R.L., J.A. Epps, E.J. Barenberg, J.K. Mitchell, M.R. Thompson (1979). *Soil Stabilization in Pavement Structures: A User's Manual. Volumes I and II*, FHWA.

Vegas I., Ibañez J.A., Lisbona A., Sáez de Cortazar A., Frías M. (2011). Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*; 25: 2674-82.

Vegas I., Ibañez J.A., San Jose J.T., Urzelai A. (2008). Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: a comparative technical analysis as material for road construction. *Waste Management* 28: 565-74.

Xuan D., André A. A. Molenaar, Lambert J. M. Houben, Zhonghe Shui (2011) Estimation of Mechanical Characteristics of Cement Treated Demolition Waste. *Transportation and Development Institute Congress*.

Xuan D.X., Houben L.J.M., Molenaar A.A.A., Zhui Z.H. (2012). Mixture optimization of cement treated demolition waste with recycled masonry and concrete. *Materials and structures* V. 45: pp.143-151.



# 6. Referencias bibliográficas

---

Xuan D. (2012b). Cement treated recycled crushed concrete and masonry aggregates for pavements. Doctoral Thesis. Delft University of Technology, Netherlands.





.....

# ANEXO 1

## Estudio de las condiciones de filtro



# ANEXO 1. Estudio de las condiciones de filtro

Para ver si los materiales reciclados ensayados cumplen las condiciones de filtro se han comparado con distintas tipologías de suelos obtenidos de TNS y rellenos tipo terraplén empleados en distintas obras llevadas a cabo por el Área de Ing. de la Construcción. A continuación se presentan sus granulometrías:

Tamaño de apertura del tamiz (mm)	Suelo Camino Rural (Montemayor)	Suelo natural (San Sebastián)	Suelo natural (Carril bici Rabanales)	Suelo núcleo terraplén (Lucena)
80	100	100	100	100
63	100	91,69	90,6	100
50	100	87,09	90,6	93,0
40	100	76,85	85,4	87,0
25	95,56	63,87	78,5	82,6
20	87,39	60,11	77,3	80,9
12,5	80,56	54,59	74,0	75,8
10	75,91	52,97	72,5	73,8
5	64,56	48,25	70,5	70,6
2	55,25	43,98	68,9	68,1
1,25	51,01	42,13	63,1	63,4
0,4	41,22	39,11	59,6	60,4
0,16	25,77	36,08	51,6	52,4
0,08	16,48	34,01	46,4	44,8

Tabla 112. Porcentaje cernido para cada una de los ejemplos de suelo

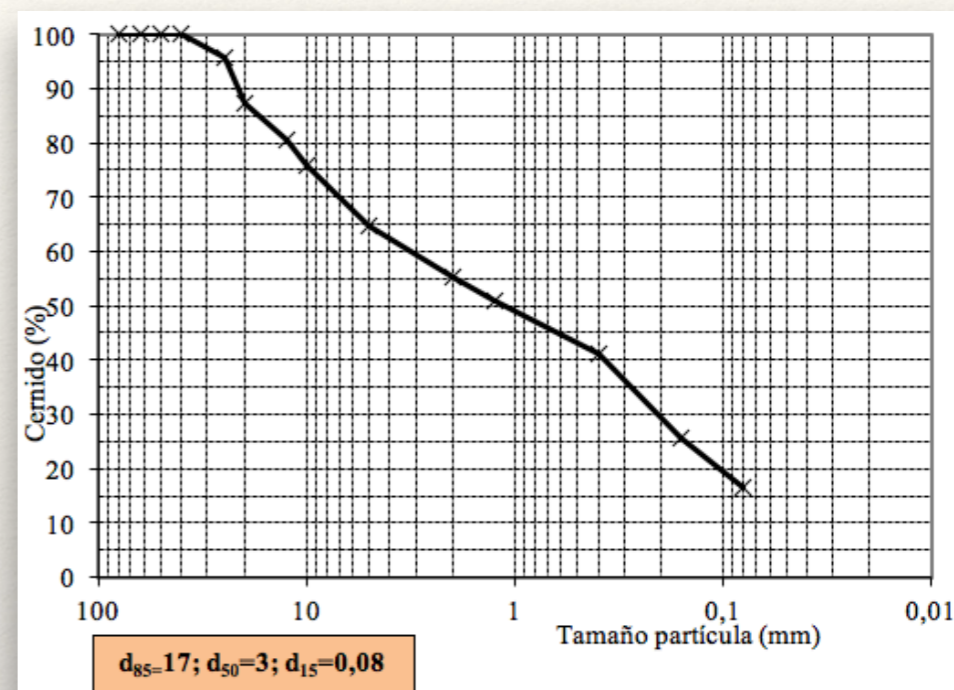


Figura 117. TNS-camino de Montemayor (Córdoba)

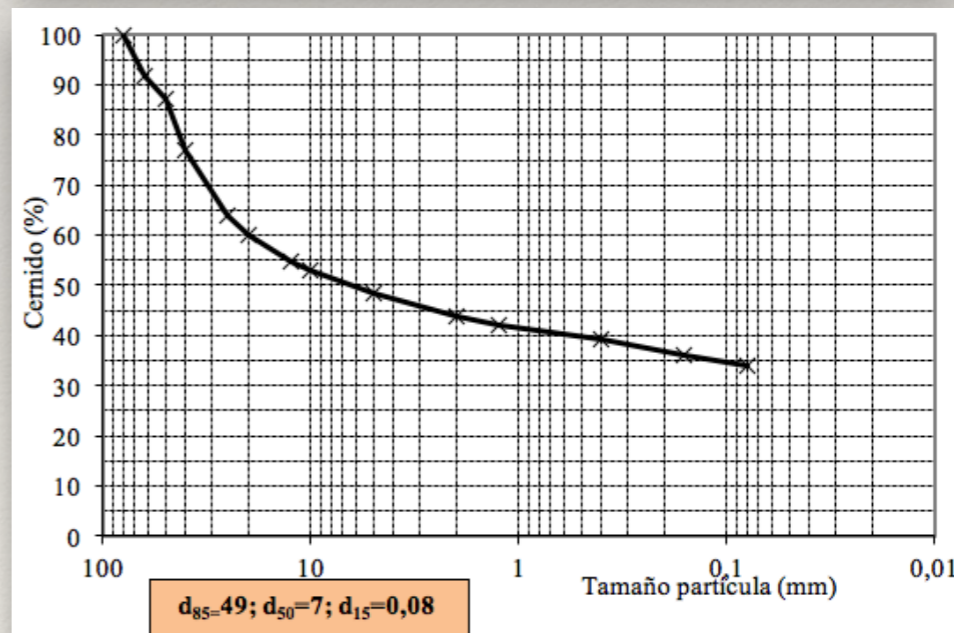


Figura 118. TNS-camino en San Sebastián de los Ballesteros (Córdoba)



# ANEXO 1. Estudio de las condiciones de filtro

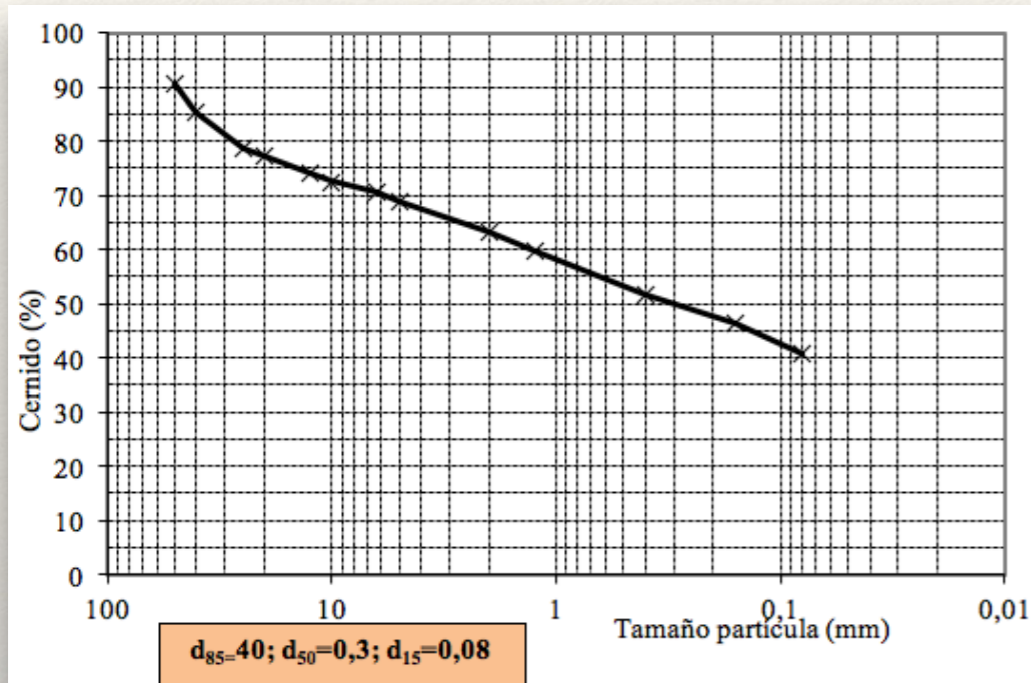


Figura 119. TNS-obra en campus de Rabanales (Córdoba)

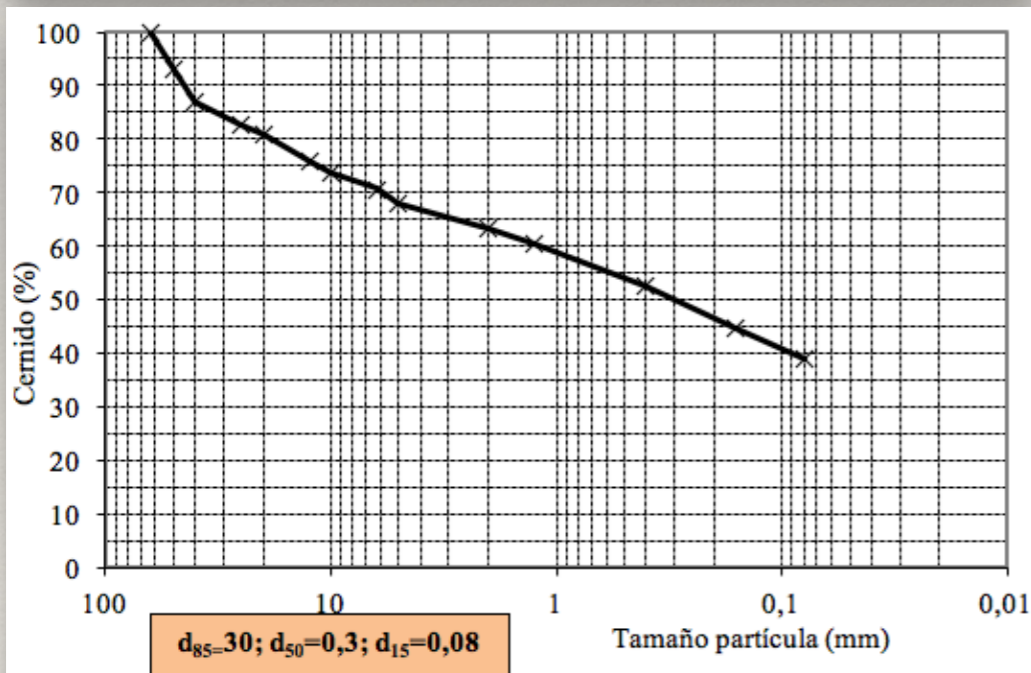


Figura 120. Suelo en núcleo terraplén-obra Lucena (Córdoba)

		Suelo natural (Montemayor)	Suelo natural (San Sebastián)	Suelo natural Campus de Rabanales	Suelo núcleo terraplén
D1	$F_{15}/d_{85} < 5$	1,94	0,67	0,82	1,1
	$F_{15}/d_{15} > 5$	412,5	412,5	412,5	412,5
	$F_{50}/d_{50} < 25$	19,33	8,28	193,33	193,33
D2	$F_{15}/d_{85} < 5$	2,35	0,81	1	1,33
	$F_{15}/d_{15} > 5$	500	500	500	500
	$F_{50}/d_{50} < 25$	16,66	7,14	166,66	166,66
D3	$F_{15}/d_{85} < 5$	1,70	0,59	0,72	0,96
	$F_{15}/d_{15} > 5$	362,5	362,5	362,5	362,5
	$F_{50}/d_{50} < 25$	14,33	6,14	143,33	143,33
D4	$F_{15}/d_{85} < 5$	2,17	0,75	0,92	1,23
	$F_{15}/d_{15} > 5$	462,5	462,5	462,5	462,5
	$F_{50}/d_{50} < 25$	16	6,85	160	160
D5	$F_{15}/d_{85} < 5$	2,35	0,81	1	1,33
	$F_{15}/d_{15} > 5$	500	500	500	500
	$F_{50}/d_{50} < 25$	18,66	8	186,66	186,66

Tabla 113. Comprobación de los requisitos del PG-3 de los materiales drenantes reciclado





---

# ANEXO 2

## Protocolo para la realización de las amasadas de HCR



## ANEXO 2. Protocolo para la realización de las amasadas de HCR

---

Para la fabricación de cada una de las amasadas de HCR, se describieron los siguientes pasos.

1. Se toma la humedad de los materiales un día antes de la fabricación del hormigón, y se almacena el resto de material de forma que no haya pérdidas ni ganancias de ésta.
2. Pesada de los materiales a utilizar y reajustamos la cantidad de material a utilizar
3. Vertemos primero el árido grueso en la mezcladora. Después de esto ya no pararemos la amasadora hasta el llenado de probetas.
4. Pasados dos minutos, se añade la arena.
5. Una vez homogeneizada la mezcla, pasados dos o tres minutos, agregamos el cemento.
6. Un minuto después, añadimos el agua.
7. Procedemos al llenado de probeta.





Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
**CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y VIVIENDA**



UNIVERSIDAD  
DE  
CÓRDOBA



**Unión Europea**

Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional



Los autores agradecen a FEDER de la Unión Europea por la financiación del proyecto “ Aplicaciones de los Áridos reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) para la construcción sostenible de infraestructuras viarias en Andalucía central”, incluido en el Programa Operativo FEDER de Andalucía 2007-2013, así como a la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía y a la Consejería de Fomento y Vivienda.