GUÍA ESPAÑOLA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

GUÍA ESPAÑOLA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

Proyecto GEAR

Sumario

1. Introducción 5
2. Marco normativo 9
3. Guía de utilización 13
4. Definiciones 15
5. Los áridos reciclados en España 19
6. Clasificación de los áridos reciclados – Propuesta GEAR 57
7. Los áridos reciclados en usos no ligados 73
8. Los áridos reciclados en usos ligados 135
9. Control del impacto ambiental de los AR por lixiviación 199
10 Recomendaciones técnicas 209

GEAR-RT-01: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material granular en firmes 209

GEAR-RT-02: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material granular en rellenos y explanaciones 218

GEAR-RT-03: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como materiales tratados con ligantes hidráulicos en firmes y explanaciones 227

GEAR-RT-04: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como materiales tratados con ligantes hidráulicos en prefabricados 236

GEAR-RT-05: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como materiales tratados con ligantes hidráulicos en hormigones en masa 244

GEAR-RT-06: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como materiales tratados con ligantes hidráulicos en hormigones compactados con rodillo 251

11. Catálogo de obras 259

1. Introducción

Los residuos de construcción y demolición (en adelante, RCD) constituyen uno de los flujos de residuos más importantes de Europa, por su elevada tasa de producción per cápita y por la viabilidad técnica y económica de su reciclaje. Por esta razón, la Comisión Europea los declaró "flujo de residuos prioritario" en su política medioambiental de 1996.

En España, la publicación del Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, y la Resolución de 20 de enero de 2009, por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015, supone el inicio de una política de gestión de residuos orientada al reciclaje y minimización, y a las primeras medidas de fomento de utilización de los productos reciclados procedentes del reciclaje de RCD.

Los requisitos técnicos y medioambientales del uso de los áridos reciclados se encuentran en las normas técnicas generales existentes para los áridos naturales y artificiales. En particular, a nivel del Estado, hay que señalar las diversas órdenes del Ministerio de Fomento de actualización de los artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para las Obras de Carreteras y Puentes (conocido como PG3), que han incorporado la definición de "árido reciclado" a su articulado y han incluido alguna prevención y limitación a su uso, en concreto, el requisito exigido al árido reciclado de proceder de hormigón estructural de 35 Mpa.

Más sustancial ha sido la reciente aprobación de la nueva Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), complementada con dos anejos que incluyen el uso de áridos reciclados en la producción de hormigones, que se ha basado en las investigaciones llevadas a cabo en el proyecto RECNHOR (2004).

Es de significar que en ambos casos se circunscribe el uso de áridos reciclados a los áridos reciclados de hormigón (con más de un 90% de hormigón triturado y piedra natural sin mortero) material que apenas representa el 15% de la producción total. La casi totalidad de los áridos reciclados que se producen en España (así como en los otros países europeos) son materiales mixtos formados en proporciones variables de hormigón triturado, piedra sin mortero adherido, materiales cerámicos y de obra de fábrica, asfalto y otros materiales de origen pétreo.

El objetivo prioritario del "Proyecto GEAR" ha sido investigar y experimentar sistemáticamente con los áridos reciclados procedentes de materiales inorgánicos previamente utilizados en la construcción, actualmente fabricados en nuestro país en una amplia muestra de instalaciones de reciclaje. La mayoría de investigaciones, ensayos y aplicaciones se han centrado en los áridos reciclados mixtos, con un porcentaje de fracción cerámica entre el 10% y el 70% en peso y de asfalto hasta el 5% (y en algún caso, hasta el 30% como máximo).

A pesar de que se están llevando a cabo diversas acciones en el ámbito tanto de la investigación como de la experimentación de los usos de áridos reciclados en obra civil y en usos de carácter privado, este proyecto ha realizado un intenso esfuerzo de coordinación y recopilación de experiencias e investigaciones, y de experimentación directa,

orientada a proponer recomendaciones técnicas y directrices de uso y aplicación específicamente elaboradas para los áridos reciclados procedentes de RCD.

Según datos elaborados por la asociación GERD, obtenidos de la "Estadística anual de precios y tarifas del sector", la producción de RCD el año 2008 fue estimada en unos 35 millones de toneladas. Aproximadamente un 15% de estos residuos fueron reciclados y transformados en materiales secundarios para la construcción, bien como árido reciclado o como material inerte para ser utilizado de relleno y para restauración.

Aunque la producción de RCD se ha reducido drásticamente en los años de realización del proyecto, el objetivo es crear los instrumentos para favorecer una mejora en la calidad de los productos reciclados y en las vías de comercialización de los mismos.

El Proyecto "Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición" (Proyecto GEAR) fue una iniciativa de la Asociación Española de Empresas de Reciclaje de RCD (GERD), cuyo desarrollo como proyecto técnico-científico logró la subvención del Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino del Gobierno de España, en el marco del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica.

Coordinado por el GERD (Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición) entre 2008 y 2011, el Proyecto GEAR se ha convertido en un aglutinador de aquellos agentes del sector de la construcción, implicados e interesados en la consolidación de las actividades del reciclaje de RCD en nuestro país.

En ese sentido, el proyecto se ha realizado con la participación directa de 24 empresas de reciclaje de RCD de toda España, 4 universidades y 3 centros de investigación.

Además, la creación de la Red de Entidades Colaboradoras del Proyecto GEAR ha permitido incorporar en el mismo cerca de 40 nuevas plantas de reciclaje, cinco nuevas Universidades y un buen número de organismos públicos, empresas constructoras, laboratorios y despachos de ingeniería, que han sometido al procedimiento de seguimiento y análisis del proyecto a más de 80 obras de construcción en las que se ha utilizado árido reciclado caracterizado.

Como resultado, esta Guía comprende, en el marco de este proyecto, un conjunto de propuestas de recomendaciones técnicas particulares referidas a las principales aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de RCD en España.

Es autor de este documento el equipo de investigación científica del Proyecto GEAR, formado por las siguientes entidades: GERD, AIDICO, AITEMIN, INTROMAC, Universidad de A Coruña, Universidad de Oviedo, Universitat Politècnica de Catalunya y Universitat Politècnica de Valencia.

La función de estas recomendaciones es la de presentar los requisitos detallados que deben cumplir los áridos reciclados que van a ser utilizados en las distintas aplicaciones recomendadas, y describir las condiciones de su aplicación y los controles de calidad que se deben establecer.

Para la realización de este documento, el proyecto contempló diversas etapas, desarrolladas a lo largo de los 36 meses de duración:

- Estudio técnico y estadístico de campo para caracterizar los productos reciclados comercializados actualmente en las plantas de reciclaje de España y para analizar el comportamiento de las obras realizadas en el país con esos materiales;
- Estudios científicos específicos para completar el análisis técnico de los áridos reciclados y sus posibles aplicaciones en España;
- Estudio científico de análisis de impacto ambiental de los áridos reciclados producidos en España, para poder establecer métodos e indicadores de control de calidad ambiental adecuados a estos materiales y a la realidad española;
- Estudios de aplicación experimental del conocimiento para analizar el comportamiento real de los áridos reciclados en las obras, y comprobar la viabilidad de su uso; así como testar la adecuación de los indicadores de control y calidad ambiental propuestos.

Los trabajos se realizaron aprovechando toda la experiencia práctica de producción y aplicación existente en España y generando nuevos datos y conocimientos derivados de la experimentación complementaria que se realizaron durante la duración del proyecto. A su vez se tomaron en consideración, tanto las especificaciones técnicas españolas, como el análisis comparativo de especificaciones aplicadas en otros países de nuestro entorno.

En ese sentido, el proyecto ha considerado tanto la normativa vigente en España referente al uso de áridos, como las buenas prácticas realizadas en el sector (la experiencia recogida en España de utilización de áridos reciclados de RCD como zahorras artificiales y como suelos, así como al tratamiento y especificaciones establecidos y plenamente aceptados en otros países de nuestro entorno). Además, ha incorporado en el estudio las normas y parámetros actualmente en discusión en los organismos nacionales e internacionales de normalización.

Es importante resaltar que, en la actualidad, si se desea proponer un nuevo material de construcción

o ampliar el campo de aplicaciones de un material anteriormente restringido, es necesario, entre otros aspectos, garantizar el control de calidad técnico y ambiental de su producción. Por eso, las presentes recomendaciones se han redactado teniendo en cuenta los requisitos del Marcado CE de los áridos, así como en la distinta reglamentación técnica que regula el empleo de los áridos reciclados en distintas aplicaciones constructivas.

Atendiendo a la experiencia recogida en España de control de producción de áridos reciclados de RCD, así como al tratamiento y límites establecidos por las especificaciones técnicas de otros países europeos, en algún caso se ha modificado el margen de frecuencia de ensayos o de los tipos de control necesarios, siempre dentro de los márgenes de seguridad, con el fin de proporcionar a los áridos reciclados posibilidades reales de ser utilizados en las aplicaciones propuestas. En estos casos, se han tomado como referencia las normativas existentes en otros países europeos, en los cuales se utiliza este tipo de materiales ampliamente y con resultados positivos.

Como resultado, el Proyecto GEAR presenta por la primera vez en España un estudio exhaustivo, sistemático y completo de la producción y utilización de los áridos reciclados procedentes de materiales previamente utilizados en la construcción.

El objetivo del Proyecto ha sido:

- Esclarecer las incertidumbres que actualmente existen en España respecto de los criterios técnicos del uso de áridos reciclados en la construcción;
- Posibilitar que el reciclaje de los RCD sea realizado de un modo más reglamentado y dirigido a las aplicaciones reales que actualmente son dadas a los áridos reciclados en el país.
- Promover nuevas aplicaciones de mayor valor añadido para los áridos reciclados

En definitiva, se trata de un primer paso, completo en las propuestas de recomendaciones que se desarrollen, para crear instrumentos de comercialización y verificación de la calidad de los áridos reciclados en España.

2. Marco Normativo

2.1 Antecedentes

Desde su fundación en 1994, la Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición, GERD, ha tenido como uno de sus objetivos prioritarios la normalización y promoción de los áridos reciclados procedentes de materiales previamente utilizados en la construcción. El GERD ha participado a través de la investigación y la experimentación en la creación de documentos técnicos destinados a mejorar la calidad de los áridos reciclados y garantizar la adecuación de sus aplicaciones y usos, con el objetivo final de desarrollar y consolidar en España un mercado de los áridos reciclados en el marco de la construcción sostenible, a semejanza de los existentes en la mayoría de países de nuestro entorno.

En el año 1998 el GERD se incorporó como miembro corporativo de AENOR al Subcomité Técnico de áridos reciclados del AEN/CTN 146 "Áridos", y en 2000 se incorporó también al Subcomité 3 SC-3 "Carreteras", liderado por el Ministerio de Fomento.

El primer intento de elaborar una recomendación técnica sobre el uso de áridos reciclados en España se remonta al año 1995, con la "Propuesta de norma sobre la utilización de granulados procedentes del machaqueo de residuos de construcción", elaborado por el Institut de Tecnología de la Construcción de Catalunya (ITeC), en colaboración con la Universitat Politécnica de Catalunya.

La Agencia Española de Normalización AENOR creó en 1996 el grupo Ad Hoc "Áridos Reciclados" dentro del Comité Técnico de Normalización AEN/TCN-146 "Áridos". En mayo de 1999 culminaron los trabajos de este grupo de trabajo con la aprobación de la propuesta de Norma PNE 146131 "Áridos para mezclas con y sin ligantes hidráulicos para aplicar en trabajos de ingeniería civil y construcción de carreteras".

Posteriormente, desde el SC-3, se trabaja en la propuesta de norma armonizada UNE-EN 13242 "Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de carreteras", y a continuación con las siguientes normas armonizadas que se irán publicando.

En el año 2002, la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente publica el "Catálogo de residuos utilizables en la construcción", en los que se considera, entre otros, los residuos de construcción y demolición.

En el año 2003 el ITeC publica la "Guía de Evaluación de los áridos reciclados precedentes de residuos de construcción" por encargo de la Junta de Residuos de Catalunya, cuyo objeto es recopilar los requisitos exigibles al material reciclado procedente de residuos de construcción, los métodos de verificación y los criterios de conformidad que se deben considerar para comprobar la adecuación de los áridos reciclados al uso que se le destina.

En el año 2005 el GERD elaboró para el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas – CEDEX, del Ministerio de Fomento y del Ministerio de Medio Ambiente, un Estudio sobre la Utilización de Áridos Reciclados en la Construcción de Carreteras en Alemania, Austria, Holanda y Suiza, y la situación actual en España.

En España, el profesor Enric Vàzquez (UPC; Barcelona), investigador principal del proyecto, es el primero en abordar el estudio de hormigones reciclados en la década de los '80, que se impulsa con más decisión en los '90 y con gran fuerza a partir del siglo XXI. En España, no obstante, se investiga fundamentalmente el árido procedente del residuo de hormigón: los proyectos FEDER del año 1998 abren la reciente explosión de estudios, proyectos y trabajos, que quizá cristalizan definitivamente con el proyecto RECNHOR del Ministerio de Medio Ambiente (principios de siglo) y con el grupo de trabajo a él vinculado que desarrolla el Anejo de Hormigón reciclado de la EHE-08.

En el periodo de 2004 a 2007, se realiza un estudio pre-normativo sobre la utilización de los residuos de construcción y derribo en hormigón reciclado de aplicación estructural. Financiado por el Ministerio de Medio Ambiente y coordinado por el CEDEX, el proyecto RECNHOR fue desarrollado con la participación de diversas entidades universitarias y de investigación españolas.

Los organismos participantes forman parte del Grupo de Trabajo "Hormigón Reciclado" de la ACHE (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural), creado a instancias de la Comisión Permanente del Hormigón (órgano responsable por la redacción de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE). El objetivo ha sido elaborar un Estado del Arte sobre el tema y una propuesta de anejo para la referida instrucción. Como resultado se publicó la monografía M-11 de ACHE, y se elevó la propuesta de anejo a la Comisión Permanente del Hormigón. La propuesta fue considerada en la revisión de la Instrucción EHE del año de 2008.

En el periodo de 2007 y 2010, se desarrolla el Proyecto CLEAM. Bajo la iniciativa de la Plataforma Tecnológica Española de la Construcción (PTEC), este proyecto fue financiado por el CDTI, a través del Programa CENIT (Consorcios Estratégicos Nacionales de Investigación Técnica), y comprendió la participación de más de 50 miembros, entre empresas, departamentos universitarios, centros de investigación y centros tecnológicos españoles. Dentro del ámbito del uso de áridos reciclados en la construcción, presentó, entre sus tareas específicas, el análisis del reciclado de RCD como áridos de hormigones estructurales y no estructurales.

En 2010, GIASA y la Junta de Andalucía publican las "Recomendaciones Técnicas para la Utilización de RCD en Firmes de Carreteras".

El mismo año IHOBE, organismo del gobierno vasco, publica la "Guía de Utilización de Áridos Reciclados en Carreteras" y el 2011 los resultados de la investigación pre-normativa "Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición".

2.2 Marco normativo, descripción y referencias

En 1985, la Unión Europea decidió establecer en el marco de un mercado único unas especificaciones técnicas comunes a todos los países miembros, que afectan también a los materiales reutilizados.

La legislación de referencia está formada por la Directiva 89/106/CEE de Producto de Construcción, y las Normas Armonizadas siguientes, publicadas hasta la fecha:

- UNE-EN 12620 "Áridos para hormigón";
- UNE-EN 13043 "Áridos para mezclas bituminosas y tratamiento superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas";
- UNE-EN 13055-1"Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigones, morteros y lechadas";
- UNE-EN 13139 "Áridos para morteros";
- UNE-EN 13242 "Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes de carreteras";
- UNE-EN 13383-1 "Escolleras. Parte 1: Especificaciones";
- UNE-EN 13450 "Áridos para balasto".

Como marco legal básico a nivel nacional, se puede considerar el del Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006, aprobado en Consejo de Ministros el 1 de junio de 2001, en el que se establecían unos principios de gestión de estos residuos y sus posibilidades de reutilización.

Posteriormente, el Ministerio de Medio Ambiente ha elaborado el nuevo Plan Nacional Integrado de Residuos (PNRI), 2008-2015, que contiene en el Anexo 6 el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (IIPNRCD).

La primera modificación dentro del marco legal apuntado, y teniendo en cuenta las Directivas del Parlamento Europeo, se produce en el ámbito de las mezclas bituminosas, donde el Ministerio de Fomento, con fecha 27 de diciembre de 2001, aprobó la Orden Circular 8/2001 sobre reciclado de firmes, que incluye en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4).

Reconocen por primera vez (aunque en el ámbito de los materiales bituminosos) la existencia de áridos reciclados y su viabilidad de uso en distintas aplicaciones en el área de obras de carreteras y conservación de carreteras.

Como consecuencia de la necesidad de adaptación de la normativa técnica española a las nuevas normas armonizadas, desde 2001 se han ido actua-

lizando una serie de artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para las Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), haciendo mención expresa a la utilización en las capas de firme de materiales granulares reciclados.

En el marco del PG-3, se presentan las siguientes modificaciones:

- Orden Circular 8/2001, sobre reciclado de firmes.
- Orden Circular 10/2002, sobre secciones de firmes y capas estructurales de firmes.
- Orden FOM/475/2002, de 13 de febrero, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes relativos a hormigones y aceros.
- Orden FOM/1382/2002, de 16 de mayo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes relativos a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones.
- Orden FOM/3459/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la Norma 6.3-IC "Rehabilitación de firmes" de la Instrucción de Carreteras.
- Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC "Secciones de firme" de la Instrucción de Carreteras.
- Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos. En esta Orden se autoriza el uso de áridos reciclados como componentes de zahorras, para categorías de tráfico pesado T2 a T4, y materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento), siempre que cumplan con los requisitos especificados para los áridos y que, en caso de provenir de demoliciones de hormigones, éstos tengan una resistencia a compresión final superior a 35 MPa (para el caso de los materiales tratados con cemento, las características y las condiciones para su utilización deberán venir fijadas por el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares). Además, se admiten áridos reciclados con resistencias al desgaste superiores a lo especificado para áridos naturales. Para el caso de áridos procedentes del reciclado de mezclas bituminosas (áridos de asfalto), se autoriza su uso como áridos para mezclas bituminosas en caliente, hasta un máximo del 10% en peso y siempre que cumplan con los requisitos especificados para los áridos en dicha aplicación, y no provengan del reciclado de mezclas bituminosas que presenten deformaciones plásticas.
- Orden Circular 24/2008, de 30 de julio de 2008, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso y a mezclas bituminosas para capas de rodadura.

En detalle, en el campo de los firmes, los artículos actualizados, que contemplan la posibilidad de uso de estos materiales reciclados, son los siguientes:

- Artículo 510. Zahorras. (OM FOM 891/2004)
- Artículo 513. Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento). (OM FOM 891/2004)
- Artículo 540. Lechadas bituminosas. (OM FOM 891/2004)
- Artículo 542. Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso. (OC 24/2008)
- Artículo 543. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. (OC 24/2008)
- Artículo 550. Pavimentos de hormigón. (OM FOM 891/2004)
- Artículo 551. Hormigón magro vibrado. (OM FOM 891/2004)

Con relación a la incorporación a las mezclas bituminosas de caucho procedente de neumáticos, el CEDEX, en colaboración con los Ministerios de Fomento y de Medio Ambiente, ha publicado en mayo de 2007 el "Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas".

En la misma línea, la Dirección General de Carreteras aprobó en julio del mismo año la OC 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU).

La edición más reciente de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), publicada en año 2008, fue complementada con dos anejos que indican el uso de áridos reciclados en la producción de hormigones:

- Anejo 15 ("Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados"), donde se indica el uso de la fracción gruesa del árido reciclado de hormigón hasta un límite máximo de 20% de sustitución del árido grueso convencional, para la producción de hormigón estructural.
- Anejo 18 ("Hormigones de uso no estructural"), donde se indica el uso de la fracción gruesa del árido reciclado de hormigón hasta un 100% de sustitución del árido grueso convencional, para la producción de hormigón no estructural.

- Anejo 13 ("Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad", que valora positivamente el empleo de áridos reciclados en las estructuras de hormigón)

2.3 Marco normativo en otros países europeos

En paralelo, varios países europeos han desarrollado normativas específicas relacionadas al uso de áridos reciclados como materiales de construcción.

En Alemania, el documento de referencia para la utilización de áridos reciclados no bituminosos en la construcción de carreteras es el RuA-StB, Directiva para la utilización compatible con el medioambiente de residuos industriales y materiales de construcción reciclados en la construcción de carreteras.

Este documento, que regula los aspectos de calidad medioambiental de los materiales de construcción y de calidad de los áridos reciclados en la construcción de carreteras, se utiliza en combinación con las normas técnicas generales de construcción:

- TL Gestein-StB, Prescripciones técnicas de suministro para los áridos utilizados en la construcción de carreteras y caminos.
- TL SoB-StB, Prescripciones técnicas de suministro para mezclas de material de construcción y suelos utilizados en capas no ligadas en la construcción de carreteras y caminos.
- TP Min-StB, Regulaciones de los ensayos técnicos de los áridos minerales para la construcción de carreteras y caminos.
- La serie de normas y estándares de calidad DIN, elaborados por el Deutsches Institut für Normung eV (DIN 4226-100).

En Holanda, los documentos de referencia para la utilización de áridos reciclados son:

- Decreto de Materiales de Construcción (para la protección del suelo y el agua superficial), que regula la utilización de materiales pétreos y tierras en la construcción.
- BRL 2506, Directiva Nacional de Evaluación para la certificación de producto KOMO de áridos reciclados procedentes de RCD.

Estos documentos se utilizan en combinación con las normas técnicas generales de construcción:

- RAW (Racionalización y automatización de la construcción de carreteras).
- NEN (Especialmente las referidas a hormigón, como la NEN 5905 "Áridos para hormigón. Materiales con densidad superior a 2.000 kg/m^3").
- Recomendaciones CUR 4: Áridos reciclados de hormigón como árido para hormigón, y CUR 5: Áridos reciclados cerámicos como árido para hormigón.

En Austria, los documentos de referencia para la utilización de áridos reciclados son:

- El estudio elaborado por la Umweltbundesamt (Agencia Federal del Medio Ambiente), dependiente del Ministerio de Medio Ambiente austriaco, "Materiales Reciclados de Construcción, regulación relacionada con la compatibilidad ambiental", de diciembre de 2002.
- Las normas que publica la Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe ÖGSV (Asociación Austriaca de Protección de la Calidad de los Materiales Reciclados de Construcción): Guía para los materiales reciclados de construcción, Guía para los materiales reciclados de construcción procedentes de edificación: usos ligados, Guía para los materiales reciclados de construcción procedentes de edificación: usos no ligados, Guía para los suelos reciclados de materiales cerámicos de construcción y Guía para el tratamiento de suelos y materiales de construcción contaminados.
- La serie de normas RVS, como prescripciones técnicas generales, elaboradas por la Österreichische Forschungsgemeinschaft Srtasse und Verkehr, y ÖNORM, elaboradas por el Österreichische Normungsinstitut (Instituto Austriaco de Normalización).

En Portugal, se han identificado las siguientes normativas, desarrolladlas por el MOPTC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil:

- E 471 – 2006. Especificação LNEC: Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos
- E 472 – 2006. Especificação LNEC: Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central
- E 473 – 2006. Especificação LNEC: Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos
- E 474 – 2006. Especificação LNEC: Guia para a utilização de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte

Sin citarlos expresamente, hay otros países que han desarrollado normativa técnica sobre la utilización de áridos reciclados que también resultan de interés (Dinamarca, Países Nórdicos, etc).

3. Guía de utilización

Las recomendaciones técnicas y fichas de uso que conforman la Guía Española de Áridos Reciclados se aplican a todos los áridos procedentes del reciclaje de residuos de construcción y demolición que vayan a ser utilizados como materiales de construcción.

En ellas, se establecen desde los requisitos de control de calidad de producción de esos materiales hasta los requisitos técnicos específicos: geométricos, físico-mecánicos, químicos y ambientales que éstos deben cumplir para ser utilizados en las aplicaciones en la construcción para el cual tienen potencial de uso.

Las recomendaciones de esta Guía son:

- GEAR-RT-01: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material granular en firmes.
- GEAR-RT-02: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material granular en rellenos y explanaciones.
- GEAR-RT-03: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en firmes y explanaciones.
- GEAR-RT-04: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en prefabricados.
- GEAR-RT-05: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigones en masa.
- GEAR-RT-06: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigones compactados con rodillo.

Cada recomendación técnica presenta los siguientes puntos:

- Ámbito de aplicación: indicación de las aplicaciones relacionadas con la referida prescripción técnica.
- Clases de áridos utilizables y de aplicaciones: indicación de las categorías de áridos reciclados definidas en la GEAR y su correlación con las aplicaciones contempladas en la referida prescripción técnica. Las categorías son definidas y caracterizadas por la composición del material. Los requisitos de composición para cada uno de estos tipos de áridos procedentes del tratamiento de RCD serán indicados en este punto.
- Requisitos de los áridos:
  - Requisitos Generales: indicación de los requisitos generales previos a la producción de los áridos reciclados (actividades previas de recuperación, entrega, admisión, clasificación, tratamiento y almacenaje de los RCD a tratar);
  - Propiedades técnicas: indicación de los requisitos geométricos, fisico-mecánicos y químicos que deberán ser cumplidos por los áridos que

sean sometidos al uso en las aplicaciones previstas en la referida prescripción técnica.

- Ejecución en obra: En este punto se indican los procedimientos y recomendaciones para ejecución de obras utilizando los áridos reciclados en las aplicaciones indicadas en la referida prescripción técnica.

Las recomendaciones que conforman esta Guía señalan requisitos técnicos y valores que deben cumplir las respectivas clases de áridos reciclados para ser adecuados a los distintos usos contemplados. Para redactar las presentes recomendaciones técnicas se han tenido en cuenta los requisitos recogidos en la legislación y normativa técnica vigente relativa al control de producción de áridos (Marcado CE) y a la calidad de los materiales en obras de construcción (EHE y PG-3).

El Marcado CE fue introducido por la Comisión Europea, quien establece las condiciones de uso del Marcado CE dentro de las distintas directivas comunitarias. El Marcado CE sobre un producto indica que éste cumple con todos los requisitos esenciales que son de aplicación, en virtud de sus respectivas directivas comunitarias. El Marcado CE no es una marca de calidad, sino que se trata de un certificado que declara la conformidad de un determinado producto con las normas armonizadas (EN) que establecen su colocación.

La Guía Española de Áridos Reciclados propone estándares de calidad que determinan la adecuación a determinados usos de cada calidad de material reciclado, así como el tipo y la extensión de las evaluaciones que deben ser llevadas a cabo en los materiales de construcción reciclados.

Las exigencias técnicas propuestas por la GEAR provienen de una adaptación de la normativa técnica vigente en función de las características de los áridos reciclados.

Para esta adaptación, se ha considerado principalmente las necesidades especiales del sector: el cuidado necesario con la segregación y preparación del material de entrada, el incentivo a la aplicación de los áridos reciclados producidos en obra pública, la necesidad de gestionar los contaminantes, la trazabilidad de los RCD (referente a movimientos de tierras y a obras de construcción y demolición), y la necesidad de garantizar una calidad constante del producto reciclado.

En algún caso se ha ampliado el margen de tolerancia de algún requisito técnico o las posibilidades de aplicación de un determinado producto, siempre dentro de los márgenes de seguridad y basado en los estudios de investigación realizados.

El objetivo ha sido proporcionar a los áridos reciclados posibilidades reales de ser utilizados en los niveles necesarios. En varios casos, se han tomado como referencia normativas no armonizadas existentes en otros países europeos, en los cuales se utiliza este tipo de materiales ampliamente y con resultados positivos.

4. Definiciones

A efectos de las Recomendaciones Técnicas propuestas se aplicarán las siguientes definiciones:

Almacenamiento: depósito temporal de RCD valorizables con carácter previo a su tratamiento, o de residuos ya tratados para la producción de áridos.
Ámbito de aplicación: conjunto de elementos constructivos que presentan funcionalidades similares dentro del campo de la construcción, y distintos niveles de exigencias, según su uso específico.
Aplicación: empleo de una determinada cantidad de árido reciclado en un sistema de producción de la industria de la construcción a fin de producir un elemento constructivo o unidad de obra específico.
Árido: material granular utilizado en la construcción. Los áridos pueden ser naturales, artificiales o reciclados.
Árido artificial: árido de origen mineral resultante de un proceso industrial que conlleva modificaciones térmicas o de otro tipo.
Árido combinado: árido compuesto por una mezcla de áridos gruesos y finos.
Árido fino: denominación dada a los tamaños de árido con D igual o inferior a 4 mm.
Árido grueso: denominación dada a los tamaños de árido con d igual o superior a 4 mm.
Árido natural: árido de origen mineral que únicamente ha sido sometido a procesos mecánicos.
Árido reciclado: producto reciclado producido en los centros de valorizacion y que cumple con los requisitos técnicos para una aplicación determinada.
Categoría de áridos reciclados: clasificación de áridos reciclados basada en características comunes de composición del material, establecida a partir de rangos predefinidos de porcentajes máximos y/o mínimos de todos los elementos que componen una muestra de árido reciclado.
Categoría ARH: clasificación dada a áridos reciclados con características específicas de composición del material, denominada de Áridos Reciclados de Hormigón.
Categoría ARMa: clasificación dada a los áridos reciclados con características específicas de composición del material, denominada de Áridos Reciclados Mixtos con Asfalto.
Categoría ARMc: clasificación dada a los áridos reciclados con características específicas de composición del material, denominada de Áridos Reciclados Mixtos de Cerámicos.
Categoría ARMh: clasificación dada a áridos reciclados con características específicas de composición del material, denominada de Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón.
Centro de eliminación: lugar donde se desarrolla cualquier operación de gestión de residuos, que no sea la valorización, incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía.
Centro de valorización: lugar donde se desarrolla cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general.

Clases de uso: clasificación de elementos constructivos de un determinado ámbito de aplicación, a partir de su nivel de exigencia técnica.
Deconstrucción: conjunto de operaciones coordinadas durante el proceso de demolición, orientadas a conseguir la máxima recuperación y reciclaje, disminuyendo al máximo la fracción destinada a vertedero.
Desclasificados inferiores: parte del árido que pasa por el menor de los tamices empleados para la descripción del tamaño del árido.
Desclasificados superiores: parte del árido retenido por el mayor de los tamices empleados para la descripción del tamaño del árido.
Especificación: documento que establece los requisitos que debe cumplir un producto o servicio para que sea conforme.
Gestión de residuos de construcción y demolición: la recogida, el transporte y tratamiento de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente.
Gestor de residuos de construcción y demolición: la persona o entidad, pública o privada, registrada mediante autorización o comunicación que realice cualquiera de las operaciones que componen la gestión de los residuos, sea o no el productor de los mismos.
Impropios: materiales y sustancias que generalmente se encuentran mezclados con los áridos reciclados, tales como maderas, plásticos, metales, y que pueden resultar perjudiciales para las distintas aplicaciones de los áridos
Material reciclado: producto reciclado producido en los centros de valorizacion y que no cumple con la normativa técnica aplicable de uso como árido, pero que sí puede tener otras aplicaciones dentro del sector de la construcción.
Producto reciclado: resultante del proceso de valorización de los RCD y que engloba tanto a los áridos reciclados como a los materiales reciclados.
Residuos de construcción y demolición (RCD): material procedente de los procesos de construcción y deconstrucción (obra nueva, demolición, vías de comunicación, sobrantes de ejecución, o procedente de la fabricación de elementos de construcción).
Residuos no peligrosos: conjunto de materiales, incluidos en la Lista Europea de Residuos (LER) como "no peligrosos", presentes en los escombros, tales como plásticos, vidrio, madera y cualquier otro material asimilable a residuo sólido urbano, que se separa en el proceso de pre tratamiento y de producción en la planta, para su eliminación en vertedero controlado de residuos no peligrosos.
Residuos peligrosos: conjunto de materiales, incluidos en la Lista Europea de Residuos (LER) como "peligrosos", presentes en los escombros, tales como amianto, PVC, envases contaminados y cualquier otro material o sustancia caracterizada como residuo peligroso que, mezclado en pequeñas cantidades en el material de entrada admitido, se separa en el proceso de pre tratamiento y de producción en la planta, para su tratamiento externo por un gestor autorizado o eliminación en vertedero controlado de residuos peligrosos.
Subproductos: conjunto de materiales, incluidos en la Lista Europea de Residuos (LER) como "no peligrosos", presentes en los escombros, tales como plásticos, cartón, madera y metales que, mezclados con bajas proporciones en las cargas admitidas, se separan en el proceso de pre tratamiento y de producción en la planta, y se entregan a una empresa de reciclaje externa para su valorización.

A efectos de las Recomendaciones Técnicas propuestas se aplicarán las siguientes definiciones referentes a los ensayos a realizar:

Absorción: incremento de la masa del árido seco debido a la penetración de agua en los huecos accesibles, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-6.
Asiento en ensayo de colapso: disminución de altura que experimenta una probeta de suelo en unas determinadas condiciones de estado (densidad y humedad), confinada lateralmente y sometida a una presión vertical constante, al ser inundada; se mide por el índice de colapso determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la NLT 254.
Azufre: compuestos totales de azufre expresados en porcentaje de SO_3 o S, referidos al árido seco, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1744-1.
Azul de metileno: valor expresado en gramos de colorante por kilogramo de la fracción granulométrica 0/2 mm, que indica la calidad de los finos de un árido. Determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 933-9.
Base: capa del firme situada debajo del pavimento cuya misión es eminentemente estructural.
Categorías de tráfico pesado: intervalos que se establecen, a los efectos de dimensionamiento de la sección estructural del firme, para la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp).
Cimiento: es la parte inferior del terraplén en contacto con la superficie de apoyo. Su espesor será como mínimo de un metro.
Coeficiente de limpieza: coeficiente que indica la cantidad de partículas de naturaleza orgánica, polvo

o arcillas en el material analizado. Es determinado por el ensayo NLT 172.

Coeficiente Los Ángeles: medida de la resistencia a la fragmentación de los áridos de acuerdo con la norma UNE EN 1097-2.

Composición: porcentaje en peso de los componentes que están presentes en una determinada muestra de árido reciclado, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 933-11.

Contaminantes orgánicos: indica la presencia de compuestos orgánicos existentes en una muestra de árido, obtenido a través del método de determinación del contenido de humus, de acuerdo con la norma UNE-EN 1744-1 Apdo. 15.1.

Coronación: es la parte superior del relleno tipo terraplén, sobre la que se apoya el firme, con un espesor mínimo de dos tongadas y siempre mayor de cincuenta centímetros.

Densidad: relación entre la masa y el volumen de un árido, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-6.

Equivalente de arena: parámetro que evalúa la calidad de los finos presentes en los áridos, según el ensayo indicado en la UNE EN 933-8.

Espaldón: es la parte exterior del relleno tipo terraplén que, ocasionalmente, constituirá o formará parte de los taludes del mismo. No se considerarán parte del espaldón los revestimientos sin misión estructural en el relleno entre los que se consideran, plantaciones, cubierta de tierra vegetal, encachados, protecciones anti-erosión, etc.

Explanada: superficie sobre la que se apoya el firme, no perteneciente a su estructura.

Finos (polvo mineral, filler): fracción granulométrica de un árido que pasa a través del tamiz de 0,063 mm.

Firme: estructura de una carretera, formada por un conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados, colocados sobre la explanada para permitir la circulación en las debidas condiciones de seguridad y comodidad. Consta de pavimento, base y subbase, pudiendo no existir una o las dos últimas capas.

Granulometría: relación de porcentajes en que se encuentran los distintos tamaños de partículas de un árido respecto al total, determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 933-1.

Gravacemento: material resultante de la mezcla homogénea y uniforme de áridos, cemento, agua y, eventualmente, aditivos, realizada en central con un contenido de cemento reducido (del 3 al 5% de la masa seca de los áridos) y un contenido de humedad que permite el paso de rodillos sobre ella. A dicha mezcla, convenientemente compactada, se le exige una determinada resistencia mecánica que la hace apta para ser utilizada como capa de base.

Hinchamiento libre: hinchamiento libre del suelo en edómetro, sobre muestras inalteradas, y en su defecto, remoldeadas y compactadas con la densidad y humedad de referencia, con una presión vertical normalizada, o bien igual a la prevista bajo la calzada al nivel de la muestra. Es determinado por el ensayo UNE 103601.

Humedad óptima: humedad con la que se obtendría la máxima densidad de compactación en ensayo.

Índice CBR: medida de la capacidad portante, bajo condiciones de densidad y humedad controladas, determinado por el ensayo UNE 103502.

Índice de lajas: porcentaje en peso de áridos considerados como lajas respecto al total, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 933-3.

Índice de plasticidad: parámetro físico que se relaciona con la trabajabilidad del material, por una parte, y con el contenido y tipo de arcilla presente en el material, por otra. Se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Es determinado por el ensayo indicado en la UNE 1031104.

Límite líquido: humedad expresada como porcentaje de la masa de un material seco en el límite entre los estados líquido y plástico, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE 1031103.

Material tratado con cemento: se define como material tratado con cemento la mezcla homogénea, en las proporciones adecuadas, de material granular, cemento, agua y, eventualmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada se utiliza como capa estructural en firmes de carretera.

Módulo de elasticidad: en un material de comportamiento esencialmente elástico es el cociente entre la tensión aplicada en un ensayo uniaxial y la deformación unitaria producida en el mismo eje, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 83.316.

Núcleo: es la parte del relleno tipo terraplén comprendida entre el cimiento y la coronación.

Peso específico: parámetro que indica la relación entre el peso de un material y el volumen que este ocupa, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-6.

Porcentaje de partículas trituradas: porcentaje de partículas de una muestra con más del 50% de caras de fractura, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 933-5.

Próctor Modificado: ensayo que determina las condiciones óptimas de compactación y densidad de referencia de los suelos, mediante el método indicado por la norma UNE 103501.

Rellenos localizados de material drenante: 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.

Rellenos localizados: esta unidad consiste en la extensión y compactación de suelos, procedentes de excavaciones o préstamos, en relleno de zanjas, trasdós de obras de fábrica, cimentación o apoyo de estribos o cualquier otra zona, que por su reducida extensión, compromiso estructural u otra causa no permita la utilización de los mismos equipos de maquinaria con que se lleva a cabo la ejecución del resto del relleno, o bien exija unos cuidados especiales en su construcción.

Sales: sales solubles de los suelos, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en la NLT 114.

Subbase: cimiento del firme, que complementa la función resistente de las capas superiores y al que se asignan otras funciones complementarias. Puede constar de una o dos capas, e incluso no existir.

Suelocemento: material para capa de firme, resultante de la mezcla homogénea de un suelo, cemento, agua y, eventualmente, aditivos, como un retardador de fraguado, realizada en central y en ocasiones in situ y debidamente compactada, a la que se le exige una determinada resistencia mecánica y unas ciertas características de acabado. La utilización típica del suelocemento es como subbase, e incluso como base, en vías de tráficos pesados de intensidades medias o reducidas.

Sulfatos en ácido: sulfatos solubles en ácidos, expresados en SO_3^{2-} y referidos al árido seco, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1744-1.

Sulfatos en agua: sulfatos solubles en agua, expresados en SO_3^{2-} y referidos al árido seco, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1744-1.

Tamaño del árido: denominación del árido, expresada en función de los tamaños de los tamices inferior (d) y superior (D), expresada en forma d/D. Esta denominación admite la presencia de algunas partículas que sean retenidas por el tamiz superior (desclasificados superiores) o que pasen a través del tamiz inferior (desclasificados inferiores). El límite inferior (d) puede ser cero.

Terraplén: parte de la explanación situada sobre el terreno original y por encima de su nivel, para constituir un plano de apoyo adecuado a la obra.

Yeso: contenido de yeso en los suelos, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en la NLT 115.

Zahorra artificial: material granular de granulometría continua utilizado como capa de firme, constituido por partículas total o parcialmente trituradas, en la proporción mínima que se especifique en cada caso.

5. Los áridos reciclados en España

5.1 Universo y metodología de la investigación

El primer paso necesario para elaborar una Guía de Áridos Reciclados para su uso práctico, conforme a las condiciones técnicas, normativas y económicas de España, es conocer la realidad actual del reciclaje de RCD en el país. Esta etapa es fundamental para tener un conocimiento detallado de los productos y su forma de producción para, finalmente, proponer soluciones adecuadas y reales para su uso. Partiendo de esa premisa el Proyecto GEAR ha realizado un diagnóstico de la situación del reciclaje y de los áridos reciclados en España a partir de una amplia muestra de las plantas de reciclaje ubicadas en todas las comunidades autónomas.

Los resultados que se presentan en esta Guía incorporan los datos y documentos facilitados desde el año 2008 al 2011 por 74 plantas de reciclaje, 35 de las cuales pertenecen a empresas participantes en el proyecto de investigación subvencionado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, y las 39 plantas restantes han colaborado desinteresadamente con el proyecto.

Esta colaboración se ha instrumentalizado a través de la Red de Entidades Colaboradoras del Proyecto GEAR, plataforma de colaboración entre los diversos agentes del sector de los áridos reciclados (recicladores, fabricantes de materiales, empresas constructoras, organismos promotores y prescriptores de normativa técnica, laboratorios, facultativos de obras y administraciones públicas), que se ha creado al amparo de la investigación.

De acuerdo con los datos obtenidos por el equipo coordinador del GERD, Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición, se identificaron inicialmente 156 empresas de reciclaje autorizadas (con número de gestor activo o, al menos, solicitado) repartidas por todas las comunidades españolas. Se intentó contactar con todas ellas logrando visitar un centenar de plantas. Finalmente, se han recopilado un conjunto suficiente de datos de 74 instalaciones, que se han utilizado para elaborar el "Diagnóstico de la Situación del Reciclaje de RCD en España".

La distribución de las plantas por Comunidades se muestra en el siguiente cuadro (Figura 5.1).

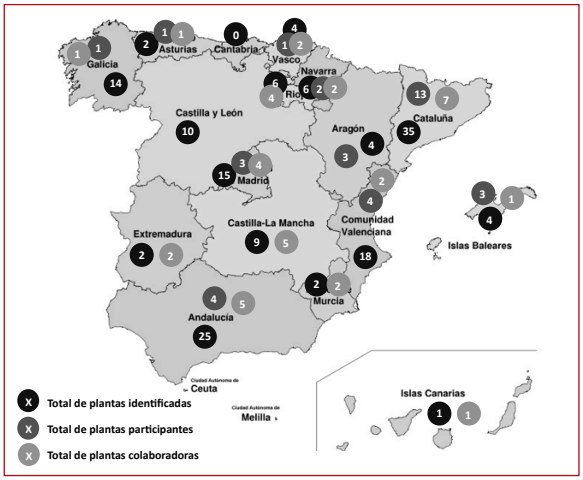


Figura 5.1. Mapa de participación de las empresas de reciclaje.

Durante la realización de las visitas se elaboraron fichas técnicas que han permitido obtener un cono-

cimiento homogéneo y comparable de las plantas respecto a:

- Su tipología y complejidad tecnológica (control y separación manual de entrada, trituración, clasificación, limpieza, pre cribado y cribado) (capítulo 4.2);
- Las características generales de los productos comercializados y los usos comúnmente aplicados (capítulo 4.3).
- A partir de este conocimiento, el Proyecto GEAR implementó un plan específico de ensayos en esas empresas con el objetivo de caracterizar sus productos en detalle, con rigor científico y normativo:
- Los ensayos y la frecuencia de su realización se definieron en función de las necesidades del proyecto y las condiciones de producción de cada planta.
- Todos los materiales analizados fueron obtenidos a partir de un plan específico de toma de muestras de carácter representativo (especificando ensayos y frecuencia). La toma de las muestras para los ensayos siguió el procedimiento indicado en la norma UNE EN 932-2.
- Todos los ensayos se realizaron en laboratorios acreditados o universitarios de acuerdo con las normas y los requisitos definidos por el Proyecto GEAR.

Este plan de caracterización se realizó sobre los productos clasificados como "árido reciclado mixto y de granulometría continua 0/<40 mm" producidos en las plantas (AR con >10% albañilería). Este producto fue escogido para su caracterización por haber sido diagnosticado como el principal producto de las plantas de reciclaje españolas (capítulo 4.3). En los casos especiales donde la planta no produce este tipo de producto, los ensayos fueron realizados con el material de la planta clasificado como árido todo uno de hormigón.

Los resultados obtenidos con este plan de caracterización se presentan en el capítulo 4.4 de la Guía. El análisis de los datos ha permitido identificar los puntos técnicos críticos de los áridos reciclados producidos en España y los factores relacionados con su producción que afectan la calidad de sus productos.

5.2. Producción de los áridos reciclados

Las plantas o instalaciones de reciclaje analizadas en este proyecto presentan una elevada variación de procesos, equipos y características técnicas, que van desde una simple unidad móvil de machaqueo, hasta instalaciones con varias líneas de producción y múltiples sistemas de limpieza capaces de producir una amplia gama de productos y calidades.

La gran mayoría de las 74 instalaciones analizadas corresponden al modelo "típico" de planta fija, con control de admisión de cargas (báscula y registro de documentación), separación previa (manual o mecánica), trituración (con separación de férricos), sistema de limpieza (por aire o por agua) y cribado final.

Utilizando la clasificación de las plantas de reciclaje en los tres niveles tecnológicos definidos en su momento en el informe Symonds[1], el 90% de plantas analizadas en este proyecto corresponden a la segunda o tercera categoría (nivel tecnológico 2 y 3).

Las instalaciones de nivel uno, unidades móviles de trituración que reciclan en obra materiales previamente seleccionados, son las más numerosas en el mercado pero no han sido objeto de estudio aquí. Procesan áridos procedentes de demolición para ser reutilizados en la misma obra, generalmente en un uso de menor nivel cualitativo que el original de los materiales reciclados.

Como instalaciones de nivel dos, se consideran las que disponen de un emplazamiento fijo y un proceso productivo completo, pero con una única línea de producción. En algunos casos, la misma línea productiva sirve para tratar alternativamente materiales de características diferentes. La mayoría de las plantas analizadas pueden considerarse pertenecientes a esta categoría.

Finalmente las instalaciones de tercer nivel son las que disponen de líneas de proceso múltiples y un amplio abanico de productos. Este grupo representa una minoría cualificada de las plantas de reciclaje españolas.

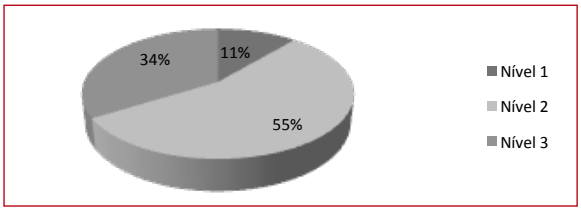


Figura 5.1a. Plantas según nivel tecnológico.

A diferencia de los procesos productivos de áridos naturales o artificiales, el reciclaje requiere la utilización más intensiva de técnicas de clasificación –para optimizar la homogeneización del material procesado- y de limpieza – para reducir el contenido de impropios (materiales no pétreos) y de contaminantes.

Sin embargo, el nivel de complejidad de los procesos dependerá tanto de las características y varia-

1 SYMONDS. Construction and demolition waste management practices and their economic impact. 1999. Disponible en http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_chapter1-6.pdf.

bilidad del material recibido en planta, como de los usos a los que se destine el material procesado. La gama y las características de las plantas y los procesos de reciclaje son muy amplios y responden a situaciones y objetivos muy diversos. En los siguientes apartados se analizan los factores que pueden resultar claves en la caracterización y calidad de los productos obtenidos.

FACTOR 1. COMPLEJIDAD DEL PROCESO

La condición de residuo de la materia prima del proceso de reciclaje requiere de la incorporación o intensificación de determinadas etapas en el proceso productivo, cuando se persigue garantizar una determinada calidad y composición del producto reciclado.

Este proceso de producción completo requiere de los siguientes procesos básicos:

- Control de admisión: conjunto de procedimientos de control de documentación, registro e identificación/evaluación que permiten realizar una clasificación inicial de la materia prima y garantizar la trazabilidad del material aceptado en planta.
- Clasificación: proceso de separación mecánica o manual de los elementos considerados contaminantes de los RCD;
- Reducción de tamaño: proceso mecánico de reducción del tamaño de las partículas y de separación de componentes de diferentes fracciones del material procesado;
- Limpieza: proceso de separación más refinado de las partículas de residuos producidas que utiliza métodos de separación por gravedad, a través del uso de agua o aire, permitiendo también la eliminación de sustancias peligrosas);
- Cribado: proceso de separación de las partículas por usos granulométricos específicos, que otorgan las características finales al producto (uso granulométrico).

El esquema de producción de las plantas de reciclaje se compone normalmente de todas o algunas de las etapas presentadas en la tabla 5.1. Puede, además, comprender una o más líneas de producción, trómeles, cribas, trituración primaria y/o secundaria, clasificación mecánica y/o manual, cabinas de triaje, limpieza por aspiración y/o fase acuosa, y/o separación de férricos.

Etapa	Tipo de proceso	Proceso
Control de admmisión	Manual	Control organoléptico inicial (color, olor y textura)
	Manual y/o informático	Documentación de origen
	Manual	Identificación de contaminaciones
	Manual y/o informático	Pesaje
	Manual	Definición de acopios específicos por material de entrada
Pre tratamiento (separación de entrada)	Manual	Separación manual en acopio
	Mecánico	Separación mecánica en acopio (uso de martillos, palas y retroexcavadoras)
Precribado	Mecánico	Alimentador precribador
		Trómel
Clasificación y limpieza	Manual	Cabina de triaje
	Mecánico	Trómel
		Electroimanes
		Lavadoras
		Sopladores
		Ciclón
Trituración primaria o secundaria	Mecánico	Mandíbulas
		Impacto
		Conos
Cribado	Mecánico	Cintas y criba

Tabla 5.1. Esquema general de procesos de una planta de reciclaje.

Como resultados más significativos del análisis de las instalaciones estudiadas:

- El 77% de las plantas presenta algún sistema de limpieza, sea por aire, agua o ambos, mientras que todas (menos una) dispone de al menos un electroimán en el proceso.
- El 14% de las plantas analizadas no realizan el pesaje en el control de admisión por carecer de báscula. Se incluyen aquí todas las plantas móviles estudiadas.
- El 5% de las plantas analizadas no dispone de una unidad de trituración en su proceso normal de producción (en este caso utilizan exclusivamente sistemas de clasificación y limpieza) que genera material reciclado destinado a rellenos, capas drenantes y restauración.

FACTOR 2. MOVILIDAD DE LOS EQUIPOS

El proceso de reciclado puede hacerse en instalaciones fijas, a veces ubicadas en los mismos depósitos de residuos inertes, o en instalaciones móviles que se desplazan hasta la propia obra generadora del residuo.

Las instalaciones semi-móviles son aquellas que disponen de al menos un equipo móvil que puede desplazarse a operar fuera de la planta. No se consideran aquí los equipos móviles "fijados" en la instalación (que nunca se desplazan fuera de la planta).

La mayoría de las plantas de reciclaje analizadas en el Proyecto GEAR se consideran fijas. Del total de las plantas visitadas el 60% son fijas, un 30% son semi-móviles y han sido visitadas un 10% de plantas móviles (Figura 5.2).

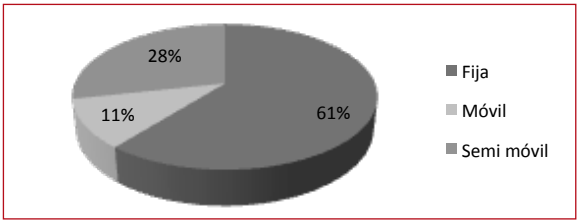


Figura 5.2. Plantas de reciclaje por tipo de movilidad.

Hay que tener presente en estos datos que el universo del estudio son plantas de reciclaje autorizadas como "gestores recicladores de RCD" y quedan fuera del ámbito de estudio los equipos de machaqueo o molienda destinados a la trituración de escombros en obra propiedad de las actividades constructivas. Al analizar los datos obtenidos por comunidades autónomas, se observa que todas las plantas móviles visitadas se ubican en Cataluña, Madrid, Murcia y Valencia (Figura 5.3).

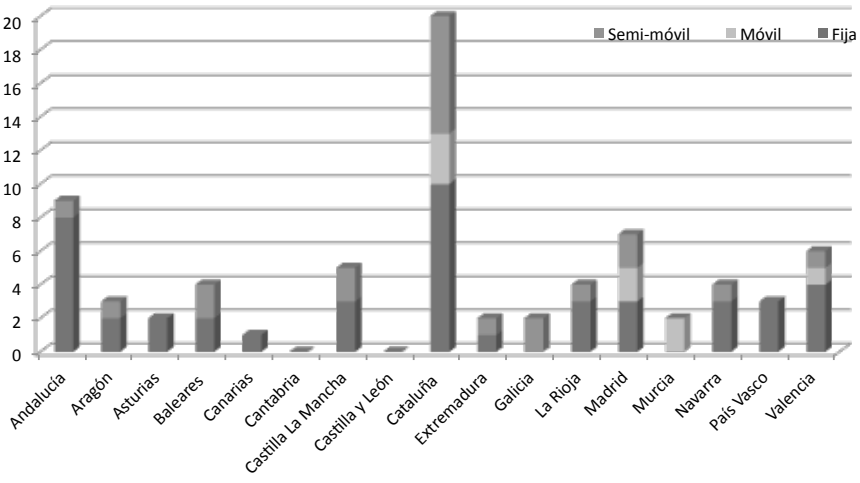


Figura 5.3. Plantas de reciclaje por comunidad y tipo de movilidad.

En principio la movilidad de las plantas puede ser un factor limitativo de las posibilidades de producción y de incremento de la calidad final del producto, aunque la tecnología actual mejora continuamente las prestaciones y rendimientos de los equipos y maquinarias móviles. Hendriks[2] señala su capacidad de especialización y de seleccionar previamente el material a reciclar en las operaciones con equipos móviles.

Por razones logísticas y económicas una planta móvil dispone del mínimo set de equipos y maquinaria necesario para desplazarse a una obra. Tenderá a limitar la composición del material a tratar, utilizará pocos equipos de clasificación y, corrientemente, generarán un único tipo de producto.

La figura 5.4 indica la complejidad de las plantas analizadas en función de su movilidad o no. En

2 HENDRICKS. A new vision in a building cycle. 2004. Delft University of Technology

ella se pone de manifiesto que la gran mayoría de las plantas fijas y semimóviles presentan sistemas de trituración y de clasificación y limpieza. Los sistemas de limpieza son los de menor implantación pero aún así el 85% de las plantas fijas y cerca del 75% de las plantas semimóviles presentan algún sistema de limpieza en su proceso.

En cambio, entre las plantas analizadas consideradas como móviles, todas presentan sistemas de trituración y clasificación pero no se han detectado la existencia de procesos de limpieza.

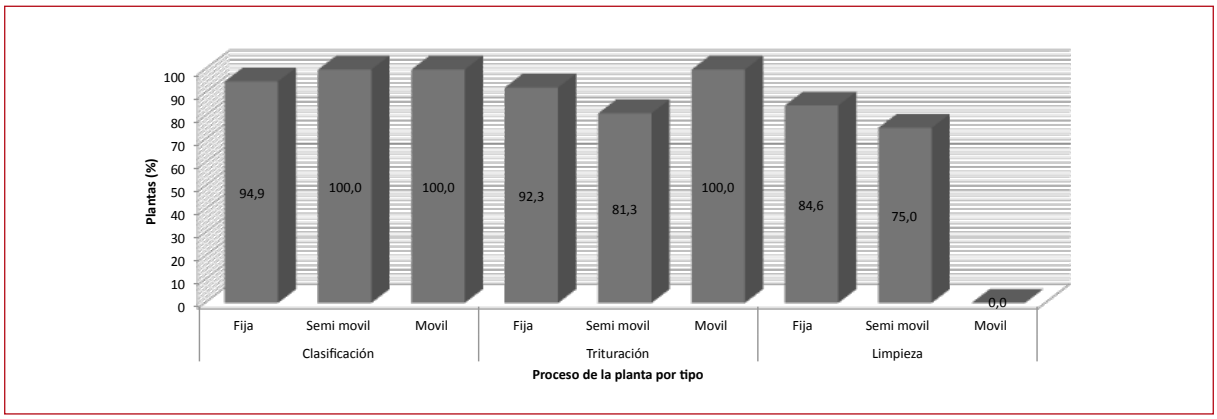


Figura 5.4. Número de plantas que presentan sistemas de clasificación, trituración y/o limpieza (%).

En definitiva, la configuración de la planta móvil se diseña para cada operación en particular. Hay que poner atención a la calidad de la materia prima que será tratada, visto que los sistemas de clasificación de plantas móviles son, en general, más limitados.

Del total de las 8 plantas móviles identificadas se observa que el 33% presentan sistemas de separación magnética y de separación manual mientras que las demás presentan solo separación magnética.

En ese contexto también debe ser considerado el control y separación en la entrada de la planta del material que será tratado. La mayoría de las plantas móviles restringen su control de entrada al control visual (100%) y el pesaje del material (67%), conforme a lo indicado en la figura 5.5. Respecto a la separación de entrada la mayor parte (67%) se limita a separar los elementos reutilizables de gran porte.

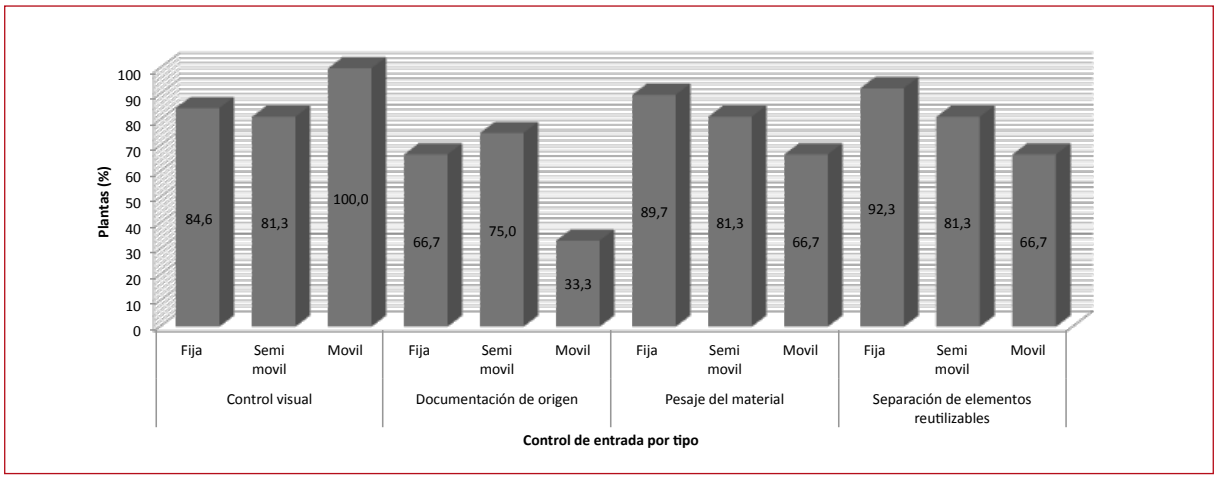


Figura 5.5. Número de plantas por procesos de control de entrada utilizados (%).

La figura 5.6 indica el procedimiento realizado por las plantas en lo referido al control de recepción de los elementos contaminantes no reutilizables. En ese caso, se observa que la mayor parte de las plantas móviles acepta el material sin identificar y/o separar contaminantes, mientras la mayor parte de las plantas fijas y semimóviles realiza procedimientos de identificación y/o separación o no aceptación de contaminantes.

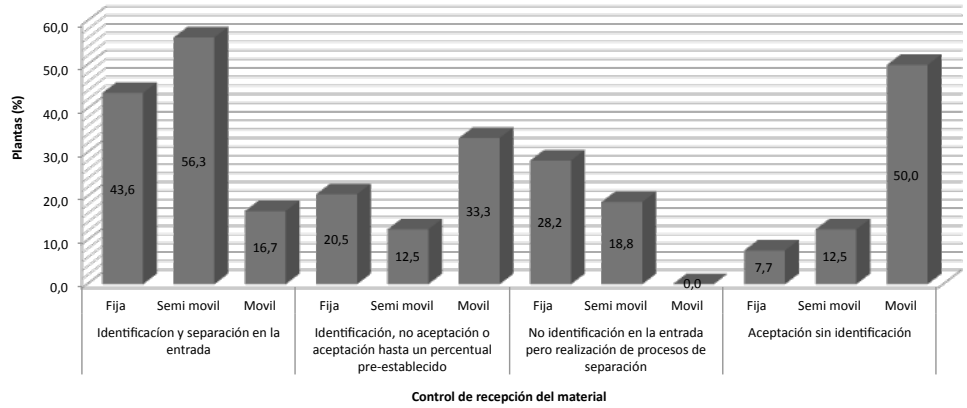


Figura 5.6. Número de plantas por procesos de control de recepción utilizados (%).

Finalmente, en prácticamente todos los casos de plantas móviles analizadas, el acopio del material de entrada es un acopio único (ver Factor 3).

Es importante resaltar que, en general, las plantas móviles suelen reciclar un residuo más limpio y homogéneo originado por demoliciones selectivas o de obras específicas que mantienen procesos de gestión de residuos.

FACTOR 3. CONTROL Y SEPARACIÓN DE ENTRADA

El control de admisión es un factor determinante para conseguir un proceso productivo adecuado y garantizar productos de calidad. Un buen control de admisión permite un buen dominio sobre todo el proceso productivo, sobre sus ajustes y reglajes y, finalmente, sobre los productos, minimizando así riesgos e incertidumbres en la calidad.

Las plantas de reciclaje analizadas realizan en su mayoría el control de recepción mediante la inspección visual (85%) y el pesaje (85%). También realizan el control con registros documentados (66%). Sin embargo, se evidencia la necesidad de empleo de albaranes más detallados que indiquen claramente un control de origen y cantidad de residuos.

Cerca de 64% de las plantas realizan operaciones para la identificación de contaminantes en la entrada del residuo en la planta. El 69% de éstas (el 44% del total de las plantas analizadas) realizan la identificación para separar el material en la planta mientras que el 31% (20% del total de las plantas analizadas) realizan la identificación para aceptar o no aceptar el residuo en función de los criterios de aceptación pre establecidos en la instalación.

Cerca del 13% del total de plantas analizadas acepta todo tipo de residuo que llega a la instalación.

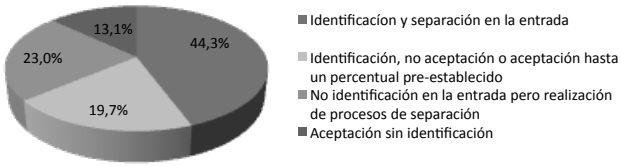


Figura 5.7. Control de contaminantes existente en las plantas de reciclaje analizadas.

En general, el proceso de clasificación del material a la entrada de la planta (separación de elementos reutilizables y elementos contaminantes) consiste en descargar el RCD mixto sobre la zona de descarga. En este momento las piezas mayores de madera, paredes aislantes, metales y otros elementos son extraídos con cargadoras y retroexcavadoras. Los grandes bloques son fraccionados hasta un tamaño adecuado mediante un martillo neumático.

La gran mayoría de las plantas almacenan los materiales impropios separados en contenedores específicos debidamente señalados según el tipo de material. Estos residuos se envían posteriormente a gestores de residuos externos autorizados.

El 65% de plantas analizadas tiene más de un acopio de entrada del RCD. Pueden clasificarse según (Figura 5.8):

- La calidad del material recibido (RCD limpio o sucio),
- La composición (RCD predominantemente de hormigón o mixto),
- La granulometría (el tamaño de los RCD recibidos),
- La procedencia (origen del RCD).

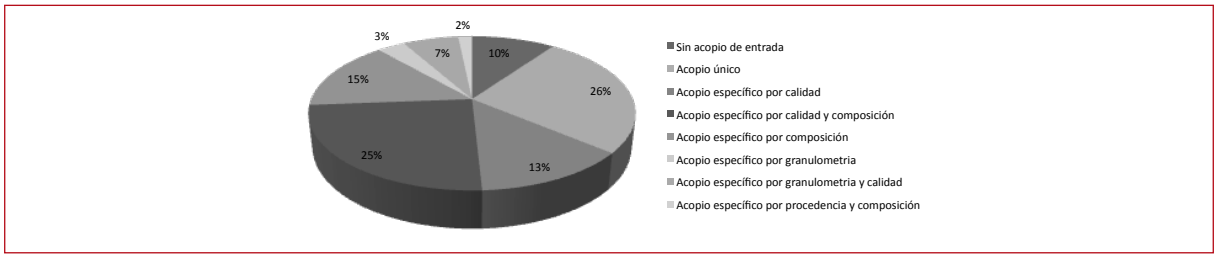


Figura 5.8. Tipos de acopio de entrada existentes en las plantas de reciclaje analizadas.

El uso de acopios específicos de entrada está relacionado con las líneas de producción de la planta y la demanda de áridos de la región.

Este aspecto también está relacionado con la movilidad de la planta, ya que las plantas móviles suelen tener solo una línea de producción, generando una media de 3 productos como máximo, variando únicamente su granulometría. La figura 5.9 indica que el 83% de las plantas móviles presentan acopio único. Los acopios específicos identificados en las plantas móviles del estudio se clasifican según la calidad del material (si el material es considerado "limpio" o "sucio").

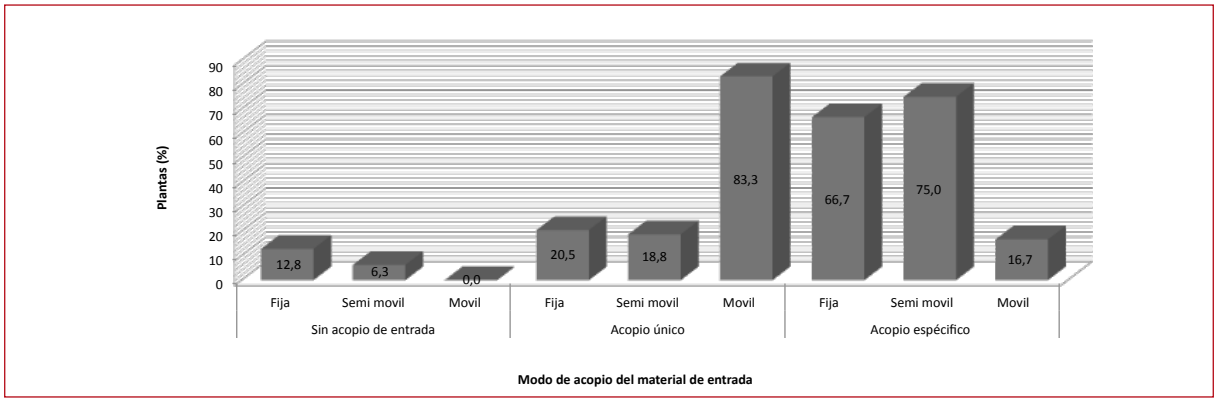


Figura 5.9. Tipos de acopio de entrada existentes por movilidad de la planta.

Por último, para las plantas fijas y semimóviles, se observa que el modo de acopio del material de entrada más común es a través de acopios específicos (el 67% de las plantas fijas y el 75% de las plantas semimóviles).

FACTOR 4. PRE TRATAMIENTO

El precribado consiste en la separación de los áridos de excesivo tamaño o de tamaño demasiado pequeño. Este procedimiento previo al proceso de trituración y clasificación puede tener como objetivo:

- Precribado de alimentación o cribado pre alimentador: Controla el tamaño de entrada de materiales al triturador primario. En este caso el sistema, en general, está compuesto por un alimentador precribador. El material que pasa por la primera criba es la alimentación de la línea de clasificación o del molino primario, mientras que el rechazo es acopiado para su posterior reducción con auxilio de martillos neumáticos.
- Precribado de finos: Separa los materiales con granulometría más fina que no necesiten pasar por trituración y clasificación. En este caso, el sistema en general está constituido por una criba de corte. El material que pasa por la primera criba es acopiado como un producto final mientras que el rechazo sigue la línea de clasificación o del molino primario. Normalmente, el todo uno o el fino generado a partir del precribado son considerados de calidad inferior al material de la misma granulometría producido al final del proceso de trituración, ya que presentan un gran contenido de tierra y arena. El material precribado es acopiado y separado de su material equivalente triturado y se comercializa para aplicaciones menos exigentes.

Mientras el cribado prealimentador es un procedimiento que contribuye a la optimización del uso y el mantenimiento de los equipos de clasificación y trituración de la planta, el precribado de finos contribuye directamente a la calidad de los productos generados. El precribado de finos sirve para diferenciar los finos considerados sucios y/o de calidad inferior de los finos generados por el proceso de machaqueo del RCD clasificado y limpio.

Este proceso puede ser considerado como una limpieza del material de entrada. En ese contexto se considera que la existencia del precribado de finos

en una planta de reciclaje es muy importante para la obtención de productos finales que incluyen fracciones finas de buena calidad como puede ser la zahorra reciclada.

Cerca del 64% del total de las plantas analizadas presentan sistema de precribado para la separación de finos, mientras que el 31% presenta sistema de cribado con prealimentador (figura 5.10).

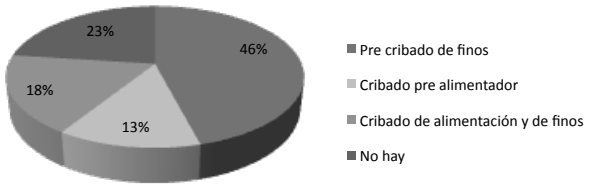


Figura 5.10. Existencia de precribado de finos y de alimentación.

FACTOR 5. CLASIFICACIÓN Y LIMPIEZA

En la etapa de clasificación tiene lugar la adecuada separación de los materiales heterogéneos que componen los residuos. En este proceso se separan los materiales pétreos (hormigón, ladrillo, albañilería y cerámica) de los no pétreos (metales, madera, plásticos, etc.).

La Tabla 5.2 presenta los contaminantes más usuales existentes en los RCD y sus principales características.

Tipo de material	Componentes perjudiciales	Propiedades Específicas	Concepto para clasificación
Material ligero	Madera, papel y plásticos	Ligeros y, generalmente, grandes	Peso, tamaño y densidad
Material fino	Tierra y arena	Fracción fina (<4mm) lavable	Tamaño de la partícula
	Contaminantes orgánicos	Ligero	Hidrofilia de la partícula y densidad
	Sal soluble	Soluble en agua	Solubilidad
Material férrico	Hierro y acero	Magnético	Susceptibilidad magnética
Material no-férrico	Al, Cu, Zn, Pb y latón	Metal no magnético	Propiedad no magnética
Yeso	Sulfato	Mas pesado que el hormigón y la cerámica	Densidad

Tabla 5.2. Componentes perjudiciales de los RCD.

Para separar los materiales perjudiciales de los residuos minerales existen diversos tipos de dispositivos. La Tabla 5.3 presenta un resumen de los principales métodos de separación de impurezas relacionadas con diferencias específicas entre el residuo de hormigón y cerámico y los demás materiales.

Técnica de clasificación	Tipo	Material de entrada	Diferencia existente	Parámetros
Aquamotor system	Base de agua	Materiales ligeros y pesados	Peso / Densidad	Rápido flujo de agua
Coal-spiral	Base de agua	Materiales con distintas densidades (<3mm)	Densidad	Rápido flujo de agua / cantidad de alimentación
Separación por color	En seco	Materiales con distintas colores	Color	Separación visual
Machacadora asociada a corrientes de Foucault	En seco / Base de agua	Partículas grandes con metales no magnéticos	Tamaño de la partícula / metal no magnético	Tamaño de partícula / corriente eléctrica
Separación por cama fluida	Base de agua	Materiales con distintas densidades	Densidad	Tamaño de partícula y densidad / suministro de agua

Técnica de clasificación	Tipo	Material de entrada	Diferencia existente	Parámetros
Grab cane	En seco	Materiales ligeros y pesados	Tamaño de la partícula	Tamaño de la partícula
Separación manual	En seco	Materiales ligeros y pesados	Tamaño de la partícula	Tamaño de la partícula
Humphrey spiral	Base de agua	Materiales con distintas densidades (<3mm)	Densidad	Densidad de la partícula / cantidad de alimentación / suministro de agua
Jigging	Base de agua	Materiales con distintas densidades (<3mm)	Densidad	Densidad de la partícula / rapidez y frecuencia del flujo de agua
Detector por infrarrojo	En seco	Materiales con distintas densidades	Densidad	Densidad (identificación por infrarrojo) / separación por aire
Separación magnética	En seco	Materiales con metales férricos o oxido de acero	Susceptibilidad magnética	Corriente eletríca
Cribado	En seco / Base de agua	Materiales con distintos tamaños	Tamaño de la partícula	Tamaño de la partícula a ser removida
Método térmico	Base de agua	-	Propiedad térmica (retracción)	Temperatura o tiempo
Tamizado por viento	Base de agua	Materiales ligeros	Peso	Fuerza del viento

Tabla 5.3. Técnicas de clasificación de los RCD.

Entre las plantas de reciclaje analizadas por el Proyecto GEAR los sistemas de clasificación y limpieza identificados han sido los trómeles, cribas, cabinas de triaje, electroimanes, sopladores, lavadoras y ciclones.

Los sistemas de clasificación más usuales son la separación magnética (cerca del 90% del total de las plantas), y la separación en cabina de triaje (cerca del 70% del total de las plantas).

La separación magnética se emplea básicamente para separar los materiales férricos. En la mayoría de los casos se realiza justo después del machaqueo, tanto en la trituración primaria como en la secundaria, para evitar que los pequeños trozos de metales férricos que queden sueltos dañen las cintas transportadoras. El sistema corresponde al envío por cinta del material machacado hasta un electroimán con una cinta rotatoria o fija.

En ese contexto, considerando el conjunto de las plantas de reciclaje que incorporan sistemas de trituración, es posible verificar que (figura 5.11):

- Todas las plantas con proceso de machaqueo tienen algún sistema de clasificación en la línea de producción de la planta, ya sean sistemas sencillos, que consisten solo en la separación magnética después del proceso de trituración, ya sean sistemas más complejos que incluyen separadores magnéticos y cabinas de triaje antes y después del proceso de machaqueo.
- Cerca del 45% de las plantas de reciclaje con sistemas de trituración incorporan sistemas de clasificación antes y después del proceso de machaqueo. En general, los procesos de clasificación observados por machaqueo se limitan a separadores magnéticos ubicados a la salida de la trituración.

Respecto a los sistemas de limpieza, la mayoría de las plantas de reciclaje analizadas poseen un dispositivo mediante flujo de aire y/o a base de agua para la separación (alrededor del 74% de las plantas analizadas).

Gran parte de las plantas de reciclaje españolas solo utiliza dispositivos basados en la separación mediante flujo de aire (cerca de 48% de las plantas analizadas), aunque la técnica de separación a base de agua proporciona una calidad mejor. Esto se debe a la complejidad de los sistemas hidráulicos y al mayor coste que supone.

El 13% de las plantas presentan sistemas de limpieza en seco y en agua, mientras otro porcentaje similar solo presentan sistemas de procesamiento en agua (figura 5.12).

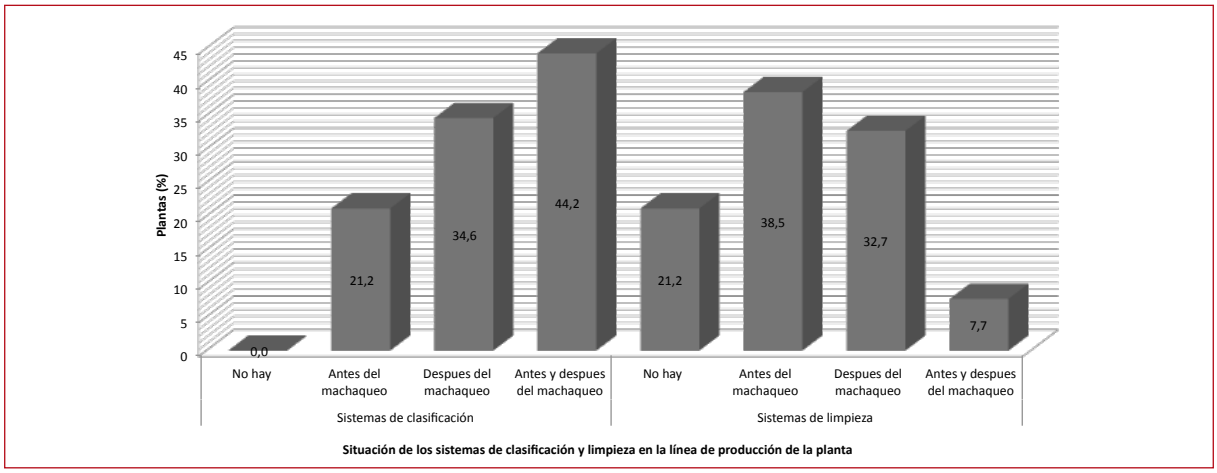


Figura 5.11. Ubicación de los sistemas de clasificación y limpieza en las plantas de reciclaje con sistemas de machaqueo.

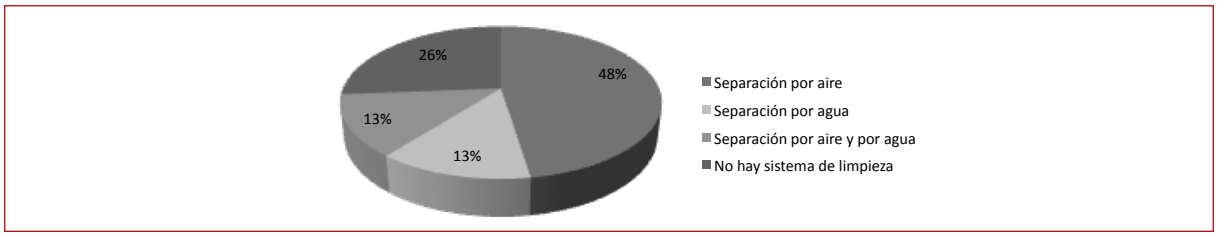


Figura 5.12. Sistemas de limpieza existentes en las plantas de reciclaje analizadas.

Un 39% de las plantas tienen los sistemas de limpieza ubicados antes del proceso de trituración mientras que el 33% de ellas los tienen situados después. Un 8% de las plantas presentan sistemas de limpieza complejos situados antes y después del machaqueo (figura 5.11).

Al analizar con más detalle las técnicas de limpieza empleadas en las plantas en función de su movilidad (figura 5.13), se observa que:

- Tanto las plantas fijas como las semi móviles incorporan más sistemas de limpieza por aire que por agua.
- Un porcentual relevante de plantas semi móviles (25%) no presenta ningún sistema de limpieza.
- Las plantas móviles no presentan sistemas de limpieza.

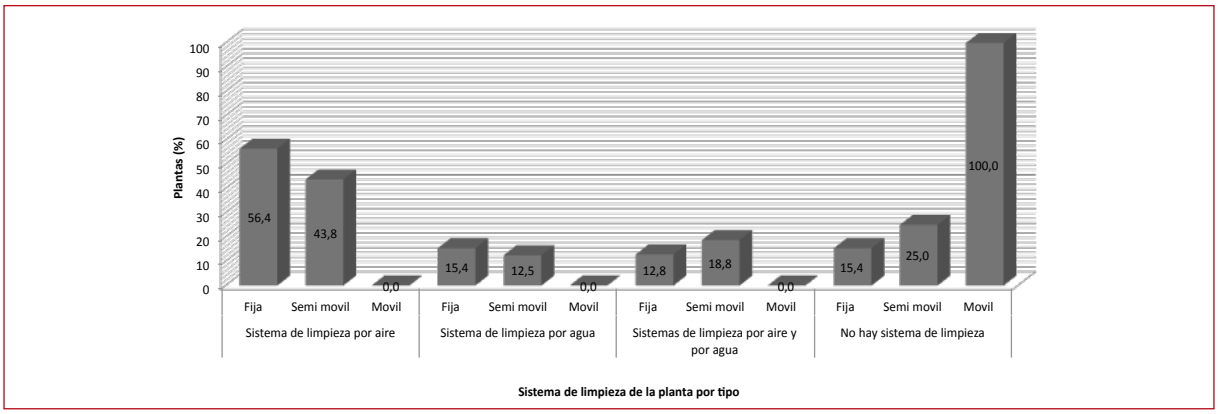


Figura 5.13. Sistemas de limpieza existentes en las plantas de reciclaje según su movilidad.

FACTOR 6. TRITURACIÓN

Un sistema de reciclaje de áridos puede utilizar diferentes sistemas de trituración que, además, pueden combinarse en el diseño de la planta. Generalmente, la elección del sistema de trituración a emplear depende principalmente de tres factores: consumo de energía, coste de producción y calidad del producto. La tabla 5.4 presenta un resumen comparativo de las prestaciones que proporciona cada uno de ellos.

Propiedad	Mandíbulas	Conos	Impacto
Capacidad	Alta	Media	Bajo
Coste de producción	Bajo	Medio	Alto
Desgaste	Bajo	Bajo	Alto
Calidad del árido	Baja	Medio	Alto
Contenido de finos	Bajo	Medio	Alto
Consumo de energía	Bajo	Medio	Alto

Tabla 5.4. Propiedades de los equipos de machaqueo existentes.

Según el sistema de trituración adoptado, una planta de reciclaje se puede clasificar en los siguientes tipos:

- Sin sistema de trituración: En este caso la línea de producción no incorpora sistema de trituración alguno y se limita a clasificar, limpiar y/o tamizar el RCD.
- Tratamiento primario: El RCD valorizado en planta pasa por un único proceso de trituración dentro de la línea de producción.
- Tratamiento primario y secundario: El RCD valorizado en planta pasa por dos procesos de trituración dentro de la línea de producción. Puede llevarse a cabo por dos equipos distintos o por el mismo equipo de machaqueo a través de la recirculación por cinta del triturador

En la figura 5.14 se puede observar el porcentaje de plantas visitadas agrupadas según el sistema de trituración que incorporan. Cerca de 46% de las plantas se caracteriza por incorporar una trituración primaria, que en casi todos los casos analizados es una machacadora de mandíbulas, y una trituración secundaria a base, en la práctica totalidad de las plantas analizadas, de un molino de impactos. Solo el 10% de las plantas analizadas no presentan sistema de trituración alguno, disponiendo solamente de cabinas de triaje.

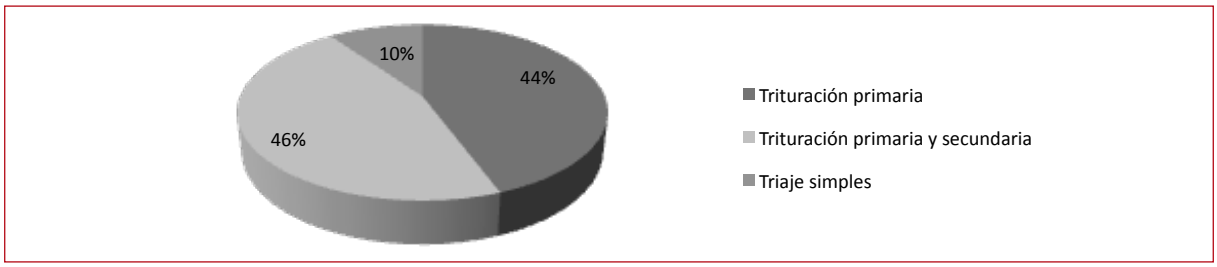


Figura 5.14. Sistemas de trituración existentes en las plantas de reciclaje analizadas.

Al analizar los procesos de trituración utilizados en las plantas clasificadas según su movilidad (figura 5.15), se observa que:

- La mayoría de las plantas fijas, aproximadamente el 54%, incorporan sistema de trituración primario y secundario.
- Los sistemas de triaje simples son más propios de las plantas semi móviles (el 19% de las plantas visitadas presentan esta tipología).
- Todas las plantas móviles incorporan sistemas de machaqueo: El 67% disponen de trituración primaria y el 33% tienen trituración primaria y secundaria.

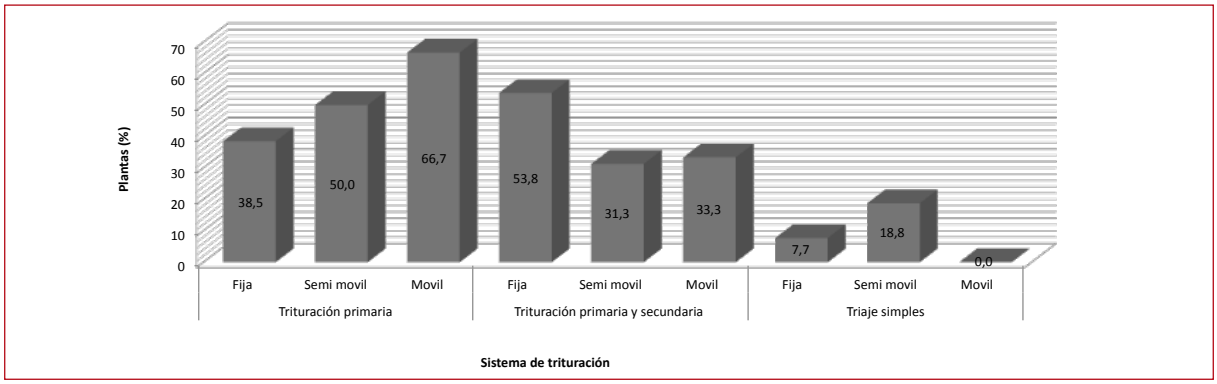


Figura 5.15. Sistemas de trituración existentes en las plantas de reciclaje analizadas.

La elección y combinación del sistema de trituración es un factor muy importante en el diseño de una planta de reciclaje de áridos, ya que los procesos de trituración contribuyen a obtener un árido de mejor calidad.

El tipo de trituración empleado durante el proceso de producción tiene influencia en el coeficiente de forma, el índice de lajas y la granulometría de esos materiales.

De modo general se puede establecer que:

- Los molinos de impacto producen áridos de buena calidad y forma. Este tipo de molino tiene gran capacidad para optimizar la separación del árido original del mortero adherido por la fractura intergranular. Con ellos se consiguen áridos reciclados con muy buenos valores del índice de lajas.
- Las machacadoras de mandíbulas y los molinos de conos producen áridos reciclados con bajo contenido en finos (menor del 10%) pero con una forma más angulosa (incremento del índice de lajas). Estos tipos de trituración son considerados los más apropiados para obtener áridos reciclados con bajo contenido en finos y, en consecuencia, con una menor absorción. Para las aplicaciones previstas en la Guía, lo más adecuado es emplear este último tipo de molinos, ya que proporcionan mejores resultados.

La adopción de sucesivos procesos de machaqueo, por otra parte, puede reducir considerablemente la cantidad de mortero adherido en los áridos reciclados de hormigón, y mejorar la forma laminar y angulosa de los áridos reciclados cerámicos dejándolo más esférico y menos laminar.

Estudios japoneses[3] indican que mediante un proceso de trituración utilizando un molino de impactos, el árido grueso de hormigón resultante puede presentar del 35 al 40% de mortero adherido. Con una segunda trituración, realizada con molino de rodillos, el porcentaje anterior puede reducirse de un 17 a un 26%, mientras que con una tercera etapa de trituración se puede obtener finalmente un árido con solo 7% a 10% de mortero adherido.

Por otro lado, aunque la aplicación de más de un nivel de machaqueo produzca áridos de mejor calidad, la cantidad de finos se incrementa notablemente. Nagataki[4] ha verificado que aquellos procesos llevados a cabo únicamente con la trituración primaria generan una cantidad final del 60% de áridos gruesos en relación a la totalidad de los residuos de hormigón reciclados. Ya los procesos que incorporan dos o tres niveles de trituración generan solo 35% y 45% de áridos gruesos, respectivamente.

Es importante destacar que la selección y la complejidad del sistema de reciclaje utilizado dependerá del grado necesario de procesamiento de los RCD. Viene determinado por:

- La aplicación final del material reciclado. El diseño del proceso de producción de áridos reciclados para su utilización en hormigón, por ejemplo, es diferente del que requiere el proceso de producción de áridos reciclados para utilizarse en rellenos o subbases en firmes para carreteras;
- La cantidad de impurezas que contiene el residuo a ser procesado. La calidad del residuo recibido en la planta deberá indicar hasta que punto los mecanismos de eliminación de impurezas deberán ser utilizados en el procesamiento.

Finalmente, la calidad del hormigón original también puede influir sobre el valor del módulo granulométrico del árido reciclado. En general, considerando el mismo sistema de trituración, los áridos reciclados obtenidos a partir de hormigones de mayor resistencia presentan módulos granulométricos ligeramente superiores a los obtenidos a partir de hormigones menos resistentes[5].

5.3 Tendencia del mercado del reciclaje: productos y usos

Para analizar las principales características y tendencias del mercado de los áridos reciclados en España se han utilizado las fichas normalizadas de productos y de obras ejecutadas con materiales reciclados. Estos datos se han obtenido a través de las 74 plantas de reciclaje incluidas en el estudio.

Los datos corresponden a los años 2008 y 2009. Se presentan sin ponderar, con la producción individual de cada planta. Por este motivo no deben considerarse representativos de la producción total sino solamente de las plantas de reciclaje analizadas.

3 YAGISHITA, F., SANO, M., YAMADA, M.: "Behaviour of Reinforced Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregate". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium. Edited by Erik K. Lauritzen p. 331-342. 1993.

4 NAGATAKI, S.; GOKCE, A.; SAEKI, T.: "Effects of recycled aggregate characteristics on the performance parameters of recycled aggregate concrete". Proceedings of the Fifth Canmet/ACI International Conference on Durability of Concrete, p.p. 51-71 June 4-9, 2000, Barcelona.

5 KAGA, H.; KASAI, Y.; TAKEDA, K.; KEMI, T.: "Properties of Recycled from Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, November 1988, Japan; Ed. Y. Kasai, pp. 690-698 Noviembre 1988.

KAKIZAKI, M.; HARADA, M.; SOSHIRODA, T.; KUBOTA, S.; IKEDA, T.; KASAI, Y.: "Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, November 1988, Japan; Ed. Y. Kasai, pp. 565-574, Noviembre 1988.

KIKUCHI, M.; DOSHO, Y.; NARIKAWA, M.; MIURA, T.; "Application of recycled aggregate concrete for structural concrete. Part. 1 Experimental study on the quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete"; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; pp 55–68, 1998.

NISHBAYASHI, S.; YAMURA, K.: "Mechanical Properties and Durability of Concrete from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushing Concrete". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2. Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, pp. 652-659, November 1988, Japan

5.3.1 Productos reciclados disponibles en el mercado

Se solicitó a todas las plantas que proporcionaran una relación de los productos que comercializaban, señalando la composición (según su propio criterio) y la granulometría.

Con carácter general se ha observado una amplia aceptación entre los productores de una clasificación básica de los áridos reciclados en dos categorías diferentes: los áridos de hormigón y los mixtos (o cerámicos). Los primeros son aquellos que en su composición no incorporan materiales de mampostería y obra de fábrica, mientras que los segundos contienen residuos cerámicos.

De las plantas de reciclaje analizadas el 55% producen exclusivamente áridos mixtos, el 30% produce las dos categorías de áridos reciclados y, finalmente, solo el 15% produce exclusivamente áridos de hormigón.

Estimaciones realizadas, a partir de los datos de producción facilitados por las plantas para cada tipo de producto y referenciados al año 2009, cifran aproximadamente en un 30% la producción española de áridos reciclados de hormigón y en un 70% la producción de áridos reciclados de categoría mixta.

En la figura 5.16 se puede observar la oferta de plantas de reciclaje por comunidades autónomas según la composición de los áridos reciclados producidos. Aunque en muchos casos el producto con predominancia de material cerámico se comercializa en la planta con el nombre de árido cerámico se observa una importante presencia de áridos reciclados de hormigón y áridos no ligados en este tipo de producto. En estos casos, y a efectos de análisis del material, a dichos productos se les ha denominado áridos mixtos.

Al analizar los datos por comunidades autónomas, se observa que prácticamente en todas las plantas de reciclaje visitadas disponen de áridos reciclados mixtos. En Andalucía, Aragón, Asturias, Baleares, Castilla La Mancha, Cataluña, Galicia, La Rioja, Madrid y Valencia se dispone de oferta tanto de áridos reciclados mixtos como de hormigón.

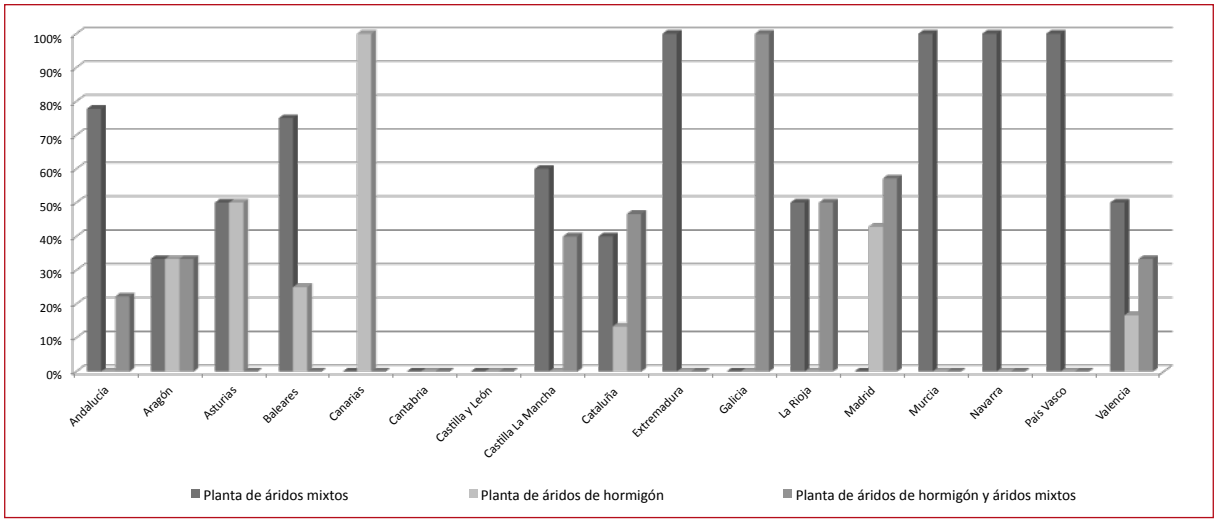


Figura 5.16. Plantas de reciclaje según la situación geográfica y el tipo de árido producido.

Al analizar los productos generados en las plantas de reciclaje clasificándolas según su movilidad (figura 5.17), se observa que la mayoría de las plantas fijas, aproximadamente el 57%, producen árido reciclado mixto.

Las plantas móviles solo producen un tipo de producto. El 50% de la totalidad de las plantas producen áridos reciclados de hormigón y el 50% de las plantas producen áridos reciclados exclusivamente mixtos.

Esta información refleja que la mayor parte de las plantas móviles estudiadas almacenan sus residuos de entrada en acopios únicos. Las plantas móviles del estudio con acopios específicos realizan la separación en función de la calidad del material, si el material es considerado “limpio” o “sucio”, y no de su composición.

Respecto a la cantidad de productos ofertados por planta se observa que la mayor parte de ellas (84%) produce un máximo de 6 productos distintos independiente de su granulometría y/o composición. La variedad en los productos comercializados queda, como es lógico, condicionada principalmente por la demanda existente en la región de influencia de la planta (figura 5.18).

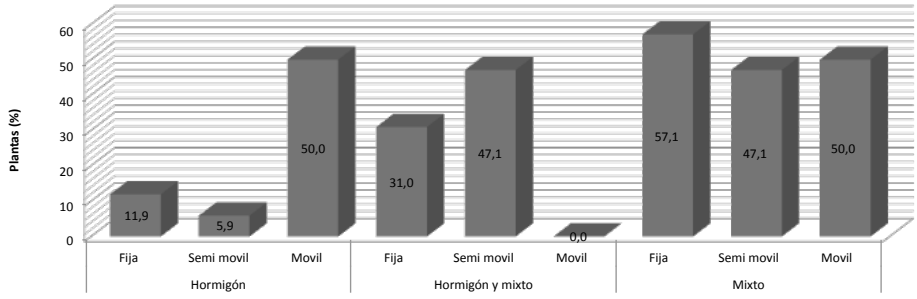


Figura 5.17. Tipos de áridos producidos en las plantas según su movilidad.

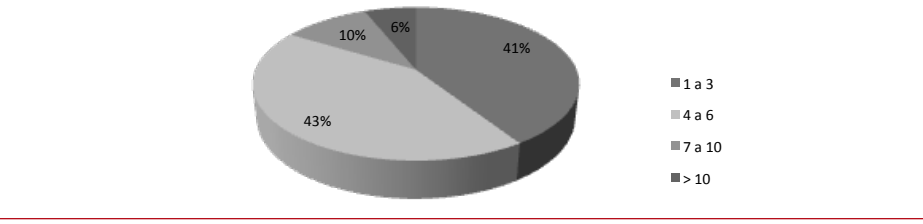
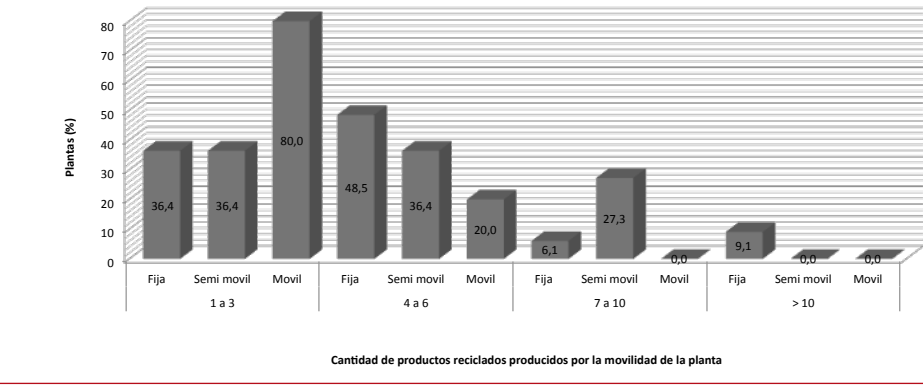


Figura 5.18. Productos comercializados en las plantas de reciclaje.

En función de la movilidad de la planta, se observa que:

- La mayor parte de las plantas móviles (cerca de 80%) produce de 1 a 3 productos reciclados distintos. Considerando que todas las plantas móviles analizadas presentan solo una línea de producción, de áridos reciclados de hormigón o de áridos reciclados mixtos, la diferencia entre los productos es exclusivamente función de su granulometría (figura 5.19a).
- Las plantas que producen mayor variedad de productos son plantas fijas que presentan más de una línea de producción. Este dato refleja la mayor complejidad de este tipo de plantas (figura 5.19a y figura 5.19b).



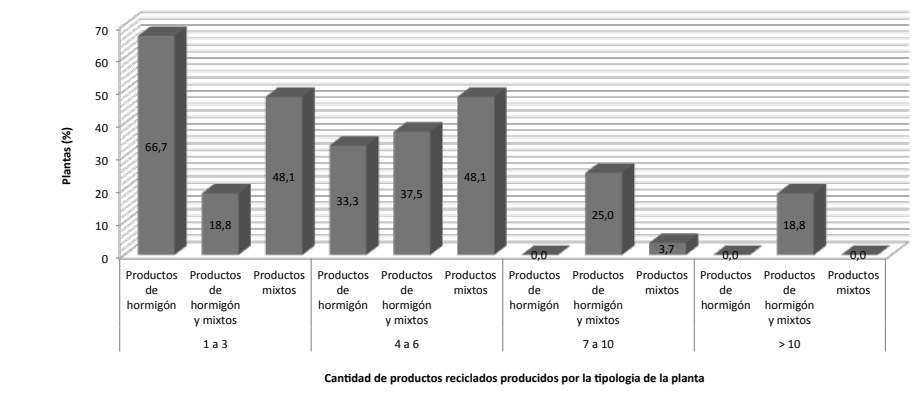


Figura 5.19. Productos comercializados en las plantas de reciclaje por su movilidad (a) y tipología (b).

Al analizar la información correspondiente a las fracciones de áridos comercializadas (figura 5.20), se observa que la mayor oferta de árido reciclado mixto y árido reciclado de hormigón se da en las fracciones todo uno y en la fracción media (material sin finos, cuyos tamaños de los áridos pueden variar entre 4 y 80 mm y es popularmente comercializado como grava o gravilla).

Del total de plantas analizadas en el diagnóstico el 82% produce áridos reciclados mixtos en la fracción todo uno y el 67% en la fracción media (material sin finos, cuyos tamaños de los áridos pueden variar entre 4 y 80 mm y es popularmente comercializado como grava o gravilla). En el 45% de las plantas analizadas se comercializa todo uno procedente de áridos reciclados de hormigón.

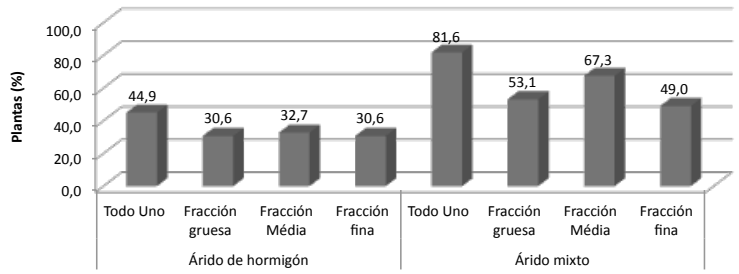


Figura 5.20. Plantas de reciclaje según la composición y la granulometría de los áridos reciclados que producen.

En la figura 5.21 se observa la distribución de plantas por comunidades autónomas según la composición y la granulometría de los productos que comercializan. A través de la figura puede identificarse la oferta de áridos reciclados existente en cada comunidad autónoma. Se puede observar que el todo uno de árido reciclado mixto es el producto más comercializado en España.

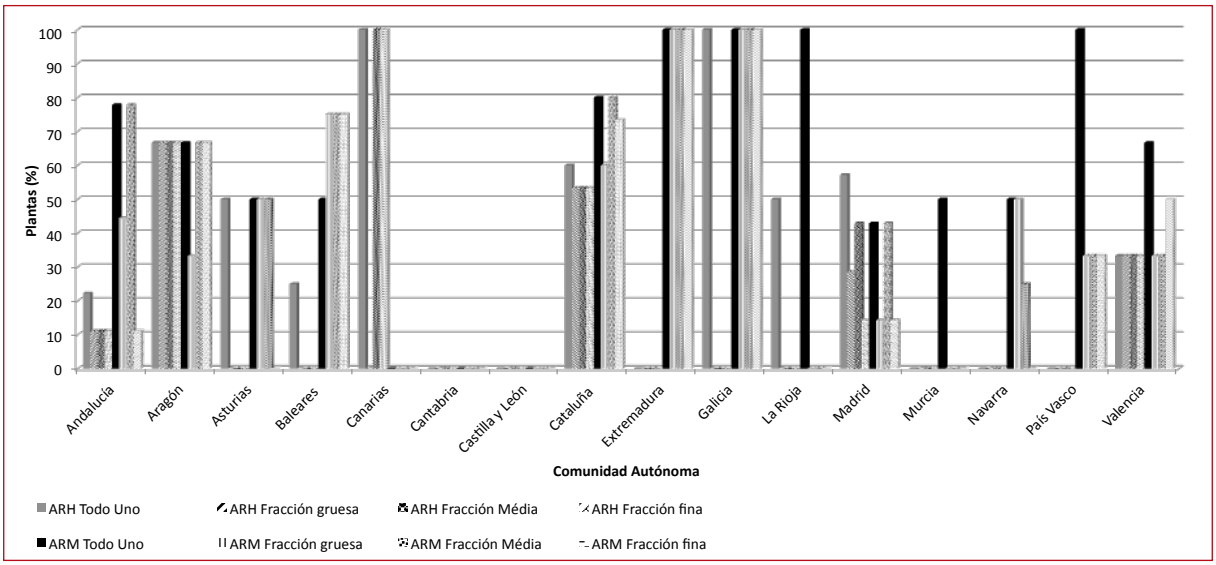


Figura 5.21. Plantas de reciclaje según situación geográfica, composición y fracción granulométrica que comercializan.

5.3.2 Usos de los áridos reciclados en la actualidad

En este estudio se han analizado datos históricos sobre la experiencia práctica del uso de áridos reciclados en España. A través de las informaciones técnicas correspondientes a las obras realizadas con áridos reciclados suministrados por 14 empresas de reciclaje españolas se ha realizado un análisis de la tendencia comercial de los áridos reciclados en el país.

También se han recopilado informaciones básicas sobre productos y tipos de aplicaciones en todas las obras realizadas durante el año 2008 con áridos reciclados suministrados por las plantas de reciclaje que han colaborado en este apartado específico del estudio.

En conjunto suman un total de 566.510 toneladas comercializadas (aproximadamente el 10% de la producción total estimada de áridos reciclados en el año de 2008). El 70% de los áridos comercializados corresponde a material de carácter mixto mientras que el 28% corresponde a material procedente de residuos de hormigón.

El producto reciclado más utilizado ha sido el árido reciclado mixto en la fracción todo uno (47,1% del total de las toneladas comercializadas en 2008 objeto de este análisis), seguido del árido reciclado de hormigón, también en la fracción todo uno (17,95% del total).

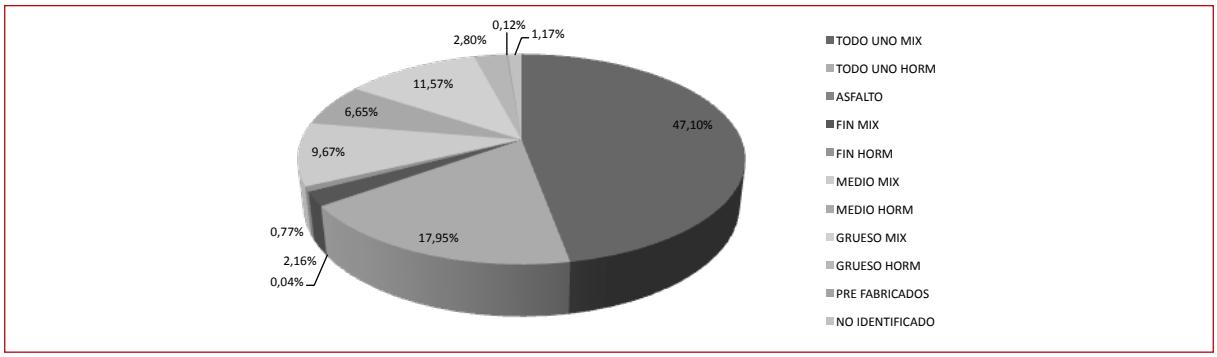


Figura 5.22. Áridos reciclados comercializados en 2008 según su composición y fracción.

El resto de tipos de áridos reciclados, producidos en fracciones distintas, son menos comercializados.

Se observa la comercialización de productos poco usuales como el árido reciclado procedente de asfalto (cerca del 3% del total de producto comercializado en 2008) y de prefabricados realizados con árido reciclado (poco más del 2%).

La figura 5.23 indica el rango de los valores máximos y mínimos de tamaño de los áridos reciclados que se suelen comercializar en las plantas. Mientras la oferta de la fracción todo uno mixta puede llegar a presentar un tamaño máximo del árido de 100 mm, la fracción todo uno de hormigón puede llegar a presentar un tamaño máximo de 50 mm.

Los áridos comercializados como finos suelen presentarse entre 0 y 5 mm, mientras el árido medio (gravilla) suelen presentarse entre 4 y 80 mm, sean áridos reciclados de hormigón o mixtos.

Finalmente, el árido reciclado comercializado como árido grueso o grava puede variar entre 4 y 250 mm para áridos reciclados mixtos, y entre 32 y 200 mm para áridos reciclados de hormigón.

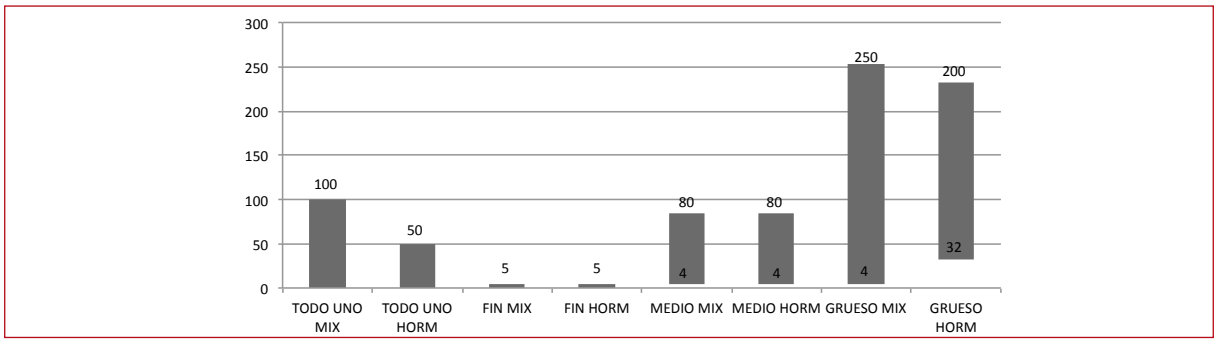


Figura 5.23. Rangos máximos y mínimos de los áridos reciclados.

La figura 5.24 refleja la cantidad de áridos comercializados de cada tipo de producto (composición y fracción) según el tipo de obra. Los datos corresponden al año 2008.

Aunque está más extendido su empleo en usos no ligados como bases, sub bases, explanadas y rellenos, los áridos reciclados han sido utilizados en más de 16 tipos de aplicaciones diferentes (carreteras, caminos, servicios, urbanizaciones, jardines, y otros).

Del total de las obras realizadas en 2008 con todo uno mixto, cerca de 25% del total de toneladas comercializadas han sido destinadas a explanadas diversas, mientras 16% han sido utilizadas como áridos no ligados para bases y/o sub bases de caminos rurales, forestales y particulares. Aproximadamente 6% han sido destinados a usos puntuales y específicos, sin carácter representativo (otros usos). Por fin, cerca de 23% del total de toneladas comercializadas han sido destinadas a obras pequeñas, cuyo uso dado al árido no ha sido identificado en el momento de compra.

Respecto a los datos presentados para los áridos reciclados de hormigón con fracción todo uno, se

concluye que el principal uso de este material es en bases y sub bases de carretera (cerca de 52%). Igual que en el caso del todo uno mixto, aproximadamente 6% han sido destinados a usos puntuales y específicos, sin carácter representativo (otros usos). Cerca de 18% del total de toneladas comercializadas han sido destinadas a obras no identificadas.

Se comprueba una variedad mayor de tipos de obras con el todo uno mixto, comparado con el todo uno de hormigón. Este resultado es atribuido, entre otras cosas, al rango granulométrico al cual esos materiales se encuentran disponibles en el mercado.

Respecto a las obras realizadas con los áridos reciclados clasificados como gruesos, se observa una tendencia mayor al uso de áridos gruesos de hormigón en rellenos diversos (cerca de 42%) y de adecuación de caminos (cerca de 35%). El árido grueso mixto comercializado en 2008 ha sido destinado a diversos tipos de obras. Se destaca el uso de este material en trasdós de muros (cerca de 19%) y rellenos diversos (cerca de 15%).

Los áridos gruesos también han presentado alto porcentaje de toneladas destinadas a obras pequeñas y sin identificación. El árido grueso mixto presenta el 35% de su total (comercializado en 2008) destinado a usos no identificados, mientras el árido grueso de hormigón presenta el 22%.

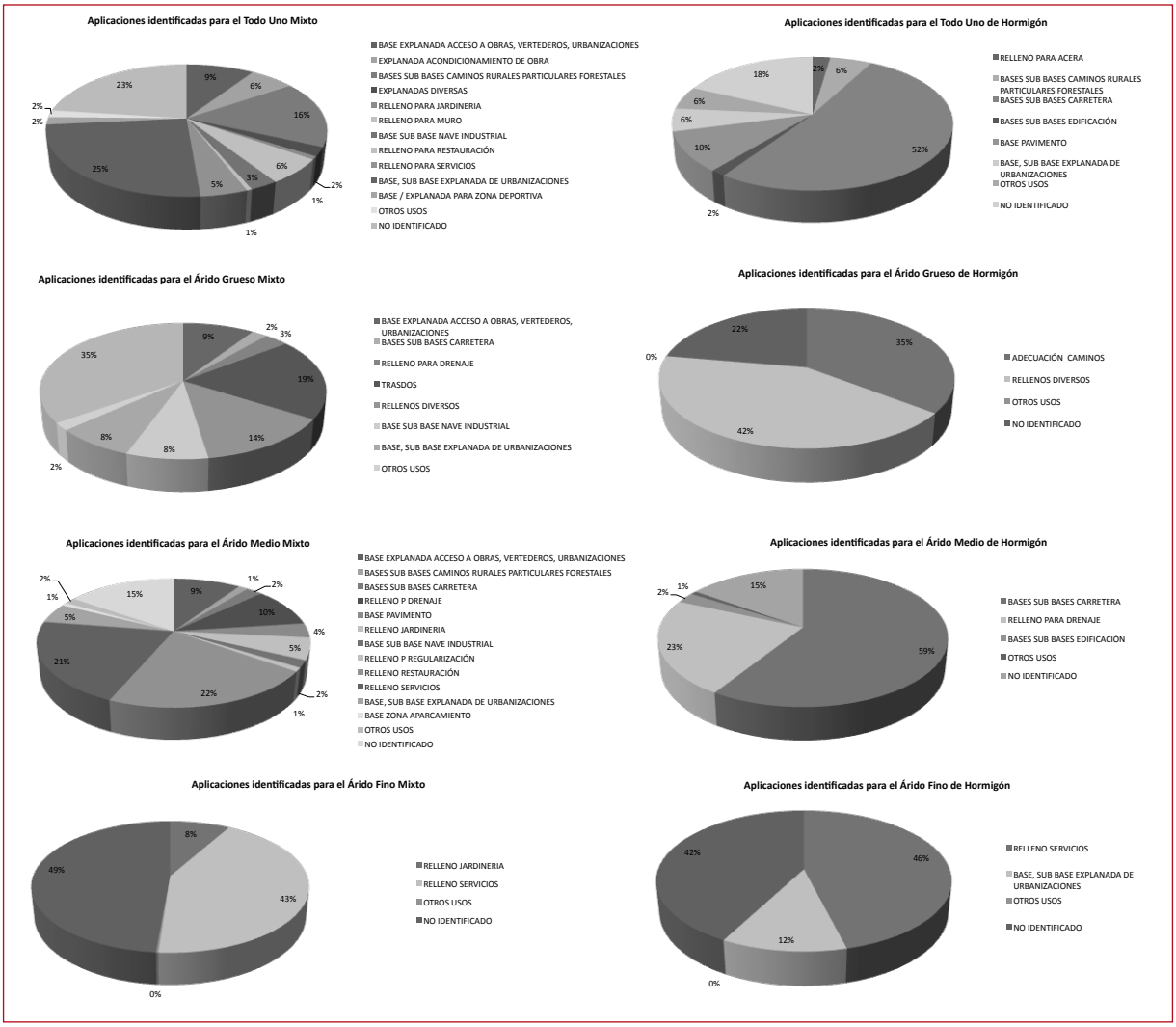


Figura 5.24. Porcentajes de áridos reciclados comercializados en 2008 según el tipo de producto (composición y fracción) y la aplicación.

Los áridos reciclados de fracción media se comercializan como grava y gravilla.

Los principales usos del árido medio mixto son rellenos de restauraciones y rellenos de servicios (el 22% y el 21% del total de toneladas de árido medio mixto comercializadas en 2008, respectivamente). Aproximadamente el 15% del total han sido destinadas a obras pequeñas, cuyo uso dado al árido no ha sido identificado en el momento de compra.

Ya para el árido de hormigón de fracción media, el principal uso es como áridos no ligados para bases y sub bases de carretera (cerca de 59%). Este porcentaje es similar al presentado por el todo uno de hormigón, confirmando una vez más el uso de este

tipo de árido en obras de este carácter. Igual que en el caso del todo uno mixto, aproximadamente el 15% del total de las toneladas comercializadas han sido destinadas a obras no identificadas.

Finalmente, respecto a los áridos reciclados de fracción fina, se observa una fuerte tendencia de uso de estos materiales en relleno de servicios. Tanto el árido fino mixto como el árido fino de hormigón tienen este tipo de obra como principal destino (cerca de 43% y cerca de 46% del total de toneladas comercializadas en 2008 para cada producto, respectivamente). Sin embargo, se observa un alto porcentaje de toneladas sin uso identificado, lo que sugiere que la comercialización de este tipo de material puede realizarse en cantidad pequeñas.

5.4 Características de los áridos reciclados producidos en España

Este estudio de caracterización de los áridos reciclados en España se basa en los datos obtenidos de la aplicación del plan de ensayos de autocontrol en planta (tipo Marcado CE) implantado durante la etapa de diagnóstico del Proyecto GEAR a las plantas participantes y a las instalaciones colaboradoras, entre 2009 y 2010.

El plan, diseñado por el equipo de investigación del proyecto, buscaba datos sistemáticos, homogéneos, comparables y representativos de las zahorras mixtas (todo uno reciclado) producidas en España. El plan de ensayos ha sido implantado por las empresas bajo la supervisión y apoyo técnico del equipo investigador del proyecto, que se repartió geográficamente las plantas de reciclaje, y en colaboración con los laboratorios homologados escogidos por las propias empresas.

Se creó un plan de ensayos general (con una variante para las plantas de producción discontinua y plantas colaboradoras), con unos ensayos de control y una frecuencia determinadas. También se creó un protocolo de control de la toma de muestras, para garantizar su representatividad; y se elaboró un protocolo destinado a los laboratorios para unificar algunos procedimientos dudosos de los ensayos. Con ello, se puede garantizar un razonable nivel de representatividad, con alto rigor científico y normativo (tabla 5.5).

A través de la realización de esta campaña, se ha obtenido una base de datos con 244 caracterizaciones parciales o completas de muestras representativas, procedentes de 65 plantas de reciclaje, analizadas por laboratorios homologados independientes o universidades y centros tecnológicos participantes.

Propiedad	Ensayos de control	Norma adoptada
Geométrica	Granulometría	UNE EN 933-1:1998
	Índice de Lajas	UNE EN 933-3
Física	Absorción / Densidad	UNE EN 1097-6
	Composición	EN 933-11:2009
	Equivalente de Arena	UNE EN 933-8
	Azul de Metileno (cuando aplicable)	UNE-EN 933-9:1999
	Limpieza	UNE 146130
	Los Ángeles	UNE EN 1097-2
	Plasticidad (limites de Atterberg)	UNE 103104
Química	Azufre	UNE EN 1744-1:1999
	Contaminantes Orgánicos	UNE EN 1744-1:1999 (APDO 15.1)
	Sales	NLT 114
	Sulfatos en Agua	UNE EN 1744-1:1999
	Sulfatos en Ácido	UNE EN 1744-1:1999
	Yeso	NLT 115

Tabla 5.5. Ensayos de caracterización adoptados para la etapa de diagnóstico.

Cada planta de reciclaje ha realizado, como mínimo, una caracterización completa de sus áridos.

El primer objetivo del estudio era poder elaborar una caracterización suficientemente amplia y con continuidad de los áridos reciclados mixtos en España. Sin duda, con los datos obtenidos, este objetivo se ha logrado, ya que el universo de estudio correspondió a un 42% del total de plantas existentes en España identificadas inicialmente. Exceptuando quizás las Comunidades donde hay una mayor representación de plantas (Catalunya, Madrid, País Vasco, Andalucía), no se puede avanzar una caracterización a nivel territorial. En cambio, los análisis pueden ser más significativos en relación con el tipo de instalación y la configuración de los procesos productivos.

El segundo objetivo era proponer una clasificación global de los áridos reciclados que unificara y sistematizara la presentación de los áridos reciclados, estableciera criterios empíricos y demostrables de calidad, y permitiera una mejor capacidad de penetración e identificación en el mercado de los áridos. Ello se ha logrado con la propuesta de clasificación que se avanza en un capítulo siguiente.

Sin embargo, es necesario señalar que la composición por sí misma no es suficiente para determinar las distintas propiedades y calidades del material. Es necesario completar el análisis con los resultados de los ensayos preceptivos para cada aplicación.

Finalmente, el tercer objetivo del estudio era establecer el potencial de adecuación de los áridos reciclados mixtos a los usos regulados por la normativa técnica general en obra pública. En particular, con las prescripciones técnicas de suelos y rellenos, capas de firmes, hormigones y prefabricados.

El estudio ha comprobado cómo los áridos reciclados (de hormigón o mixtos) suelen cumplir con las especificaciones geométricas, físico-mecánicas y, con mayor dificultad, las especificaciones químicas, para la mayoría de usos regulados. Los resultados obtenidos muestran también que los puntos críticos que hay que controlar con mayor intensidad en los áridos reciclados son el contenido de yeso y los sulfatos.

La calidad del árido reciclado producido es determinada tanto por la complejidad del sistema de producción de la planta como de la calidad del RCD original.

Se puede decir que, entre los factores que intervienen en la producción de un árido reciclado de buena calidad, el de mayor repercusión tiende a ser las características del material de entrada (especialmente cuando el contenido de material de origen pétreo es menor), aunque siempre el desarrollo de procesos de tratamiento, clasificación y limpieza específicos y completos pueden mejorar la calidad final de los productos obtenidos.

Al analizar la situación de las líneas de producción de las plantas sometidas al diagnóstico, se pudo identificar que:

- A partir de la relación entre el método de limpieza y las diferentes propiedades del árido, se determina que el método más apropiado y recomendable para garantizar los valores más bajos de yeso, sulfatos y sales consiste en incorporar sistemas de limpieza mediante agua. Los procesos de obtención del árido reciclado mencionados se complementarían con un sistema de limpieza por aire.
- Para el coeficiente de limpieza, el uso de sistemas por aire se ha mostrado más eficiente. Mejores resultados son alcanzados con sistema de limpieza que incluyen métodos tanto por aire como por agua.

Finalmente, se puede establecer que el método de producción basado en un sistema de precribado de finos inicial con trituración es el mejor para conseguir buenos resultados en importantes propiedades como absorción de agua y desgaste Los Ángeles.

5.4.1 Propiedades geométricas

Granulometría

La granulometría del árido reciclado es un resultado directo del tipo de trituración y tamizado realizada en el proceso de reciclaje. Y también depende, aunque en menor grado, de la dureza/composición del material procesado.

El ensayo de granulometría realizado en la campaña experimental propuesta ha sido por vía húmeda, con el objetivo de tener una granulometría más real posible y que incluyera el contenido de finos.

La figura 5.25 presenta la media y los rangos máximo y mínimo de los resultados de granulometría encontrados para los áridos analizados en el proyecto. Se sobreponen en trazo continuo más oscuro los husos granulométricos ZA25 y ZA20 respectivamente.

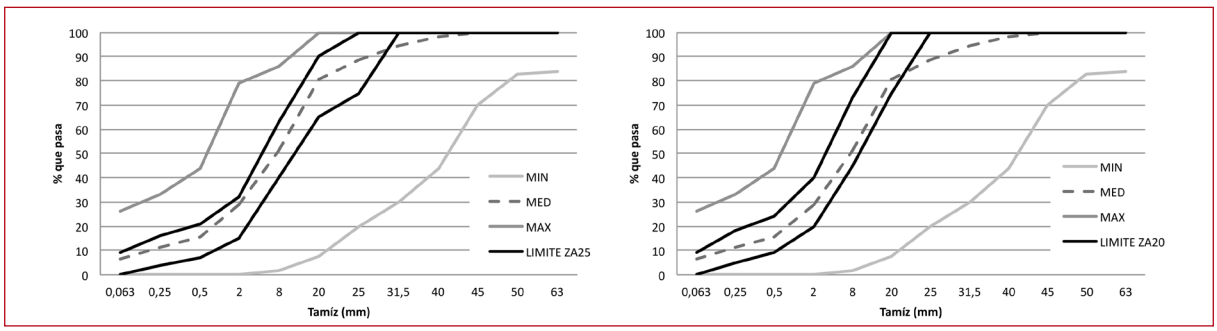


Figura 5.25. Curvas granulométricas máximas, mínimas y medias de las muestras analizadas en el diagnóstico.

A pesar de la amplitud de los husos granulométricos obtenidos en las muestras analizadas, cabe remarcar dos resultados del análisis:

- La media de las granulometrías de los áridos reciclados se encuentra dentro de los límites del PG3 tanto para el uso ZA25 como el ZA20 de la zaho-

rra artificial (en el extremo superior de la curva, está afectado por la utilización de los tamices de la norma armonizada).

- A pesar que muchos de los áridos analizados estaban destinados a uso como explanada o suelo, la mayoría de las muestras cumple los límites del PG3 para las zahorras artificiales.

Como ya se ha comentado con anterioridad, el mayor rango de variación de la curva granulométrica está relacionado con la composición del material. Cada fracción dispone de una dureza y forma característica que provoca que una misma configuración del proceso productivo pueda generar usos granulométricos suficientemente diversos modificando exclusivamente la composición del material que se procesa.

Contenido de finos

Se percibe que la mayor parte de las muestras analizadas han presentado un contenido de finos (material que pasa en el tamiz 0,063 mm) no superior a 10% (figura 5.26). El 85% de las muestras analizadas cumplen el límite máximo de 9% de finos exigidos por el PG3 para los husos granulométricos ZA25 y ZA20.

Sin embargo, algunas configuraciones determinadas de los procesos de reciclaje muestran una tendencia a generar un exceso de finos, que debe ser corregido en planta mediante procesos mecánicos específicos (pre cribado, lavado, soplado y otros).

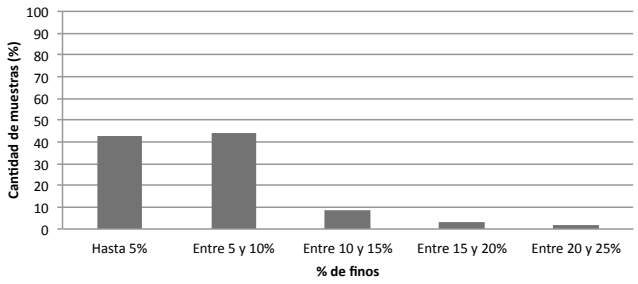


Figura 5.26. Cantidad de muestras analizadas en función del contenido de material fino que pasa en el tamiz 0,063 mm.

La cantidad de finos del material es una característica vinculada al modo de producción de la planta. Está relacionada con el tipo y cantidad de machacadoras empleadas en la línea de producción (figura 5.27):

- Plantas con trituración primaria: Las plantas de reciclaje españolas que solo presentan sistemas de trituración primario suelen utilizar machacadoras de mandíbulas. El uso de machacadoras de mandíbulas genera menos finos que los demás sistemas de trituración existentes. Por eso, esta estructura de producción suele generar menos finos que los demás sistemas.
- Plantas con trituración primaria y secundaria: este tipo de estructura generalmente está formado en España por un sistema de trituración primario compuesto por machacadora de mandíbulas y un sistema de trituración secundaria compuesto por molino de impacto. Como los molinos de impacto presentan factores de reducción mayores (al reducir más el tamaño de las partículas, generaran más finos que las machacadoras de mandíbulas), este tipo de sistema suele generar más finos que los sistemas formados solo por trituración primaria.

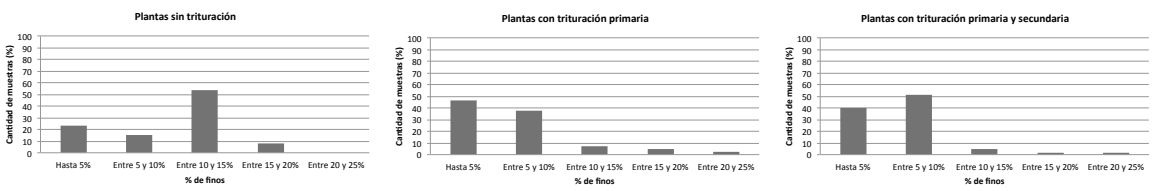


Figura 5.27. Cantidad de muestras analizadas en función del contenido de material fino que pasa en el tamiz 0,063 mm y del tipo de trituración adoptado en su producción.

La presencia de sistemas de pre cribado antes del machaqueo también se presenta como un factor influente. El sistema de cribado de finos es utilizado como un método para eliminar impurezas de pequeño tamaño, que normalmente son difíciles de clasificar / separar por métodos de clasificación manual.

La figura 5.28 indica que las plantas sin cribado de finos suelen presentar una mayor cantidad de finos que aquellas que presentan cribado.

Por lo tanto, se puede afirmar que los requisitos granulométricos exigidos por la normativa española son perfectamente aplicables para los áridos reciclados. El cumplimiento de estos requisitos tan solo exige un acondicionamiento del proceso productivo de trituración y de clasificación de las plantas recicladoras, lo que no debe suponer un problema para alcanzar los límites exigidos en la normativa.

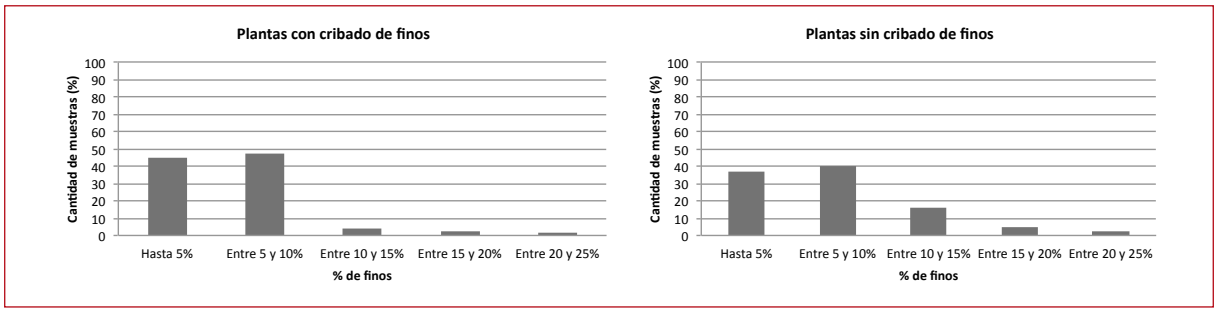


Figura 5.28. Cantidad de muestras analizadas en función del contenido de material fino que pasa en el tamiz 0,063 mm (originarias de plantas con precribado y sin precribado).

Es importante resaltar que, en los áridos en general, la presencia de finos (árido que pasa por el tamiz 0,063 mm) reduce su calidad y afecta a sus propiedades finales. En el hormigón, por ejemplo, la presencia de finos puede afectar a la trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

Por otro lado, la "granulometría óptima" depende de la aplicación a la que se vaya a dar al árido.

Los límites de finos exigidos en el PG-3, por ejemplo, pueden ser asumidos sin problemas por los productores de áridos reciclados españoles, ya que las exigencias indican:

- < 25 % de material cernido por tamiz 0,080 mm, para suelos seleccionados;
- < 35 % de material cernido por tamiz 0,080 mm, para suelos adecuados;
- < 5 % de material cernido por tamiz 0,080 mm, para rellenos localizados de material drenante.

En el caso del uso de áridos reciclados como zahorras, se debe resaltar la importancia de optimizar la compacidad del material (mínimo de huecos). La producción de granulometrías discontinuas es fundamental para alcanzar este objetivo.

En el caso de la fabricación de hormigón, la "granulometría óptima" es aquella que produce un consumo mínimo de cemento para una misma relación agua/cemento.

Forma

El análisis de la forma de los áridos depende tanto de la naturaleza del árido como el tipo de trituración utilizado en el proceso de producción del árido.

Según los resultados obtenidos en la campaña experimental, se observa un crecimiento del índice de lajas, a medida que el árido analizado presenta menos áridos reciclados pétreos y de hormigón y presenta más áridos cerámicos (figura 5.29).

Este comportamiento se debe a:

- La propia característica del material cerámico procesado en la planta, que tiene la tendencia a romperse en formas menos cúbicas.
- La propia forma original de los residuos de construcción y demolición que son procesados en la planta. Los residuos cerámicos poseen originalmente morfologías más estrechas y angulosas que en muchos casos pasan directo por la tolva de trituración. Este problema es menos visible en los áridos reciclados producidos por plantas con trituración primaria y secundaria, que suelen producir áridos menos lajosos. En la figura 5.30 se observa que las plantas de reciclaje con sistemas de trituración primaria y secundaria son los que presentan los valores más bajos de índice de lajas encontrados.

Se resalta, sin embargo, que la forma de los áridos reciclados españoles no es un limitador para su uso en la construcción civil. Prácticamente todas las muestras analizadas (todas excepto una) han presentado valores de índice de lajas inferiores al 35%, lo que indica la viabilidad del árido reciclado para uso en las aplicaciones prescritas en el PG3.

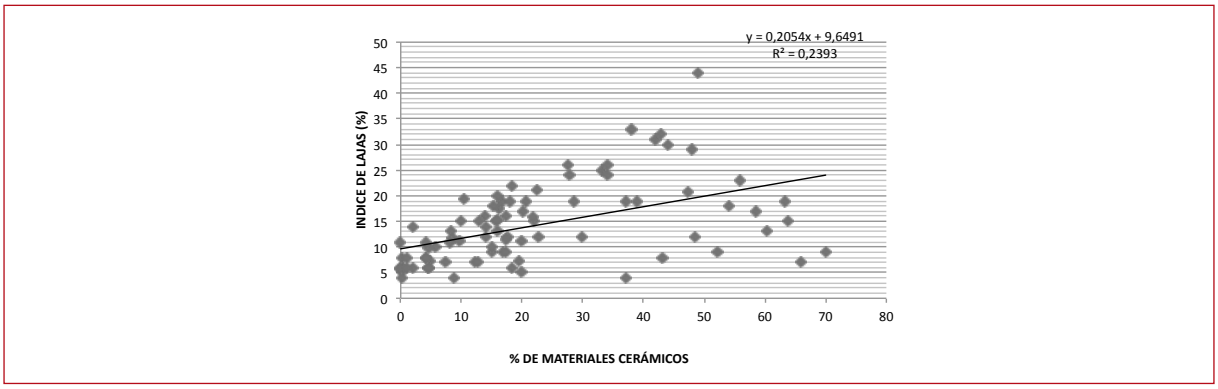


Figura 5.29. Valores de índice de lajas en función de la presencia de materiales cerámicos en las muestras analizadas.

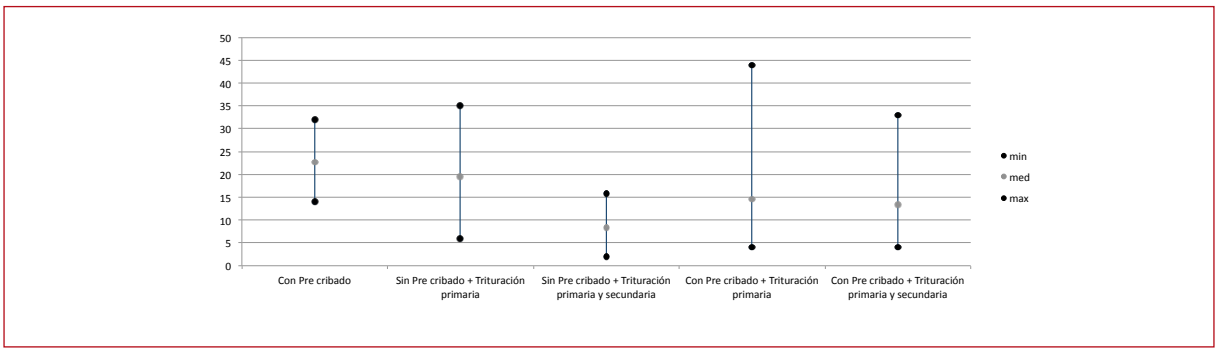


Figura 5.30. Valores de índice de lajas del árido reciclado en función de los sistemas de trituración adoptados en su producción en todas las muestras analizadas.

5.4.2 Propiedades físicas

Composición

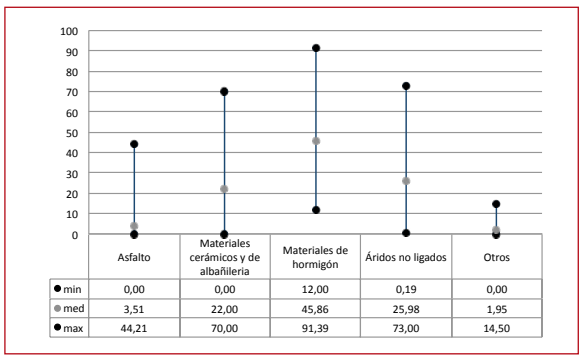
La composición (expresada en % en peso de cada fracción) por tipos de materiales de los áridos reciclados constituye una de sus características más significativas, aunque no resulta plenamente determinante de las características técnicas del producto final.

Los áridos reciclados están formados por una mezcla de los siguientes tipos de materiales: piedra (sin mortero adherido), hormigón triturado, materiales cerámicos y de albañilería, asfaltos y otros materiales que se deben considerar impropios o impurezas: yeso, plásticos, madera, metales, etc.

La figura 5.31 presenta los rangos máximo y mínimo y la media encontrados para cada tipo de material identificado en los áridos reciclados analizados en el plan de ensayos aplicado durante el proyecto de investigación.

Los resultados presentados se basan en la clasificación propuesta en la norma UNE EN 933-11:2009 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.

Las sub-categorías que comprenden la categoría B (elementos de albañilería se han suprimido y todas ellas han sido consideradas como “material cerámico” (ladrillos, tejas y azulejos).



	Asfalto	Materiales cerámicos y de albañilería	Materiales de hormigón	Áridos no ligados	Otros
min	0,00	0,00	12,00	0,19	0,00
med	3,51	22,00	45,86	25,98	1,95
max	44,21	70,00	91,39	73,00	14,50

Figura 5.31. Media y rangos máximos y mínimos de los materiales que componen los áridos reciclados analizados.

Como resultado, se ha identificado la presencia casi constante tanto de materiales pétreos como de materiales de hormigón y cerámica (figura 5.32).

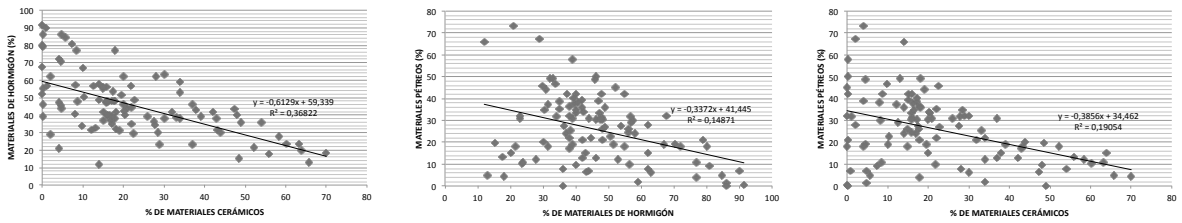


Figura 5.32. Correlación entre los materiales pétreos, de hormigón y cerámicos que componen los áridos reciclados.

A partir de este comportamiento, y haciendo un análisis de todas las situaciones identificadas, se parte de la premisa de que todo árido reciclado tiene composición mixta, con predominio según cada caso particular, de elementos pétreos, de hormigón y cerámicos:

- Solo 21 muestras (obtenidas en quince plantas distintas) han presentado una cantidad de asfalto relevante (> 5%), lo que indica que este tipo de composición es un reflejo del tipo de material de origen procesado en la época del ensayo;
- Solo 9 muestras (obtenidas en siete plantas distintas) han presentado una cantidad relevante de otros materiales (> 5%), lo que indica que este tipo de composición es un reflejo de algún problema puntual de interpretación de la norma o del sistema mecánico de clasificación.

La composición real de la zahorra reciclada producida en España contiene un porcentaje de áridos no ligados (pétreos naturales) relevante, con una media del 26% en peso. Este factor mejora, sin duda, la calidad de los áridos reciclados españoles. Diversos estudios indican que la presencia de materiales pétreos mejora las características del árido reciclado, entre ellas, la absorción de agua y densidad.

Por otra parte, los materiales cerámicos y de albañilería solo muestran un contenido medio en peso del 22%, con máximos que alcanzan el 70%. La presencia de la fracción cerámica es siempre inferior a lo que se percibe (el típico color rojizo del material magnifica su presencia).

Los buenos resultados presentados a lo largo de este capítulo, en especial los resultados de coeficiente Los Ángeles y de índice de lajas, indican que el material cerámico no puede considerarse más como el "colesterol" del árido reciclado, sino como un componente activo en la consecución de las características y comportamiento típicas del árido reciclado".

En ciertos casos, los finos pueden aportar una cierta puzolanicidad[6]

Se considera que un árido reciclado tiene composición única cuando el elemento predominante comprende más de 95% del total del material producido.

Absorción / densidad

La absorción y densidad de los áridos son parámetros muy importantes de calidad del material. Los áridos reciclados se caracterizan por tener una absorción más elevada que los áridos artificiales y, mucho mayor que los naturales.

Las repercusiones de esta mayor absorción se centran en la conveniencia de aportar una mayor cantidad de agua en la aplicación de estos materiales, tanto en el proceso de compactación de capas de firme, como en la preparación de las mezclas de hormigón. En este caso, el valor de la absorción es un dato relevante para establecer la fórmula adecuada de la relación agua-cemento.

Aunque los materiales cerámicos suelen presentar mayor absorción de agua que los materiales de hormigón, es la presencia de materiales pétreos que ejerce más influencia en los valores de estos parámetros. Tanto la presencia de elementos de hormigón y mortero como de elementos cerámicos contribuyen para el aumento de la absorción de agua del árido reciclado (figura 5.33).

Un comportamiento similar es observado para la propiedad de densidad de los áridos reciclados (figura 5.34).

Se ha observado que las plantas que presentan sistemas más complejos de limpieza que incluyen sistemas por agua y por aire han presentado, en general, áridos reciclados con valores más bajos de absorción de agua (figura 5.35).

El método de producción, basado en un sistema de cribado inicial de finos con trituración, es identificado como el mejor para conseguir los valores de absorción más bajos (figura 5.36). Se percibe que el valor medio de la absorción del árido reciclado se mantiene alrededor del 7% en los métodos productivos con cribado y trituración, aunque en algunas ocasiones los valores pueden superar el límite establecido y llegar hasta el 14% de absorción.

6 IHOBE. Uso de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Investigación Prenormativa. Bilbao: IHOBE, 2011.

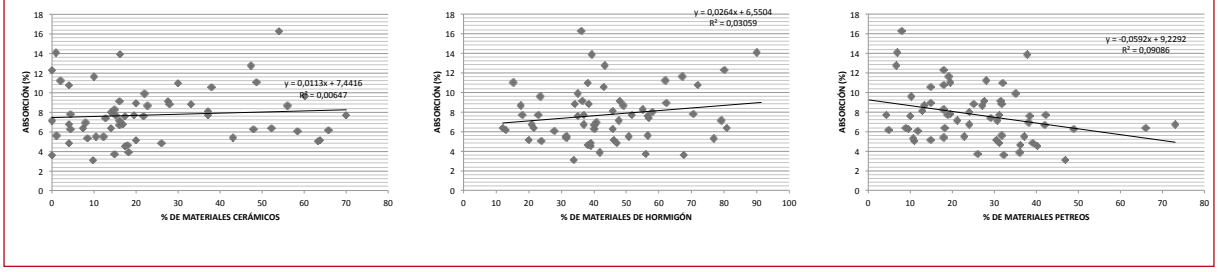


Figura 5.33. Valores de absorción de agua en función de la composición del árido reciclado.

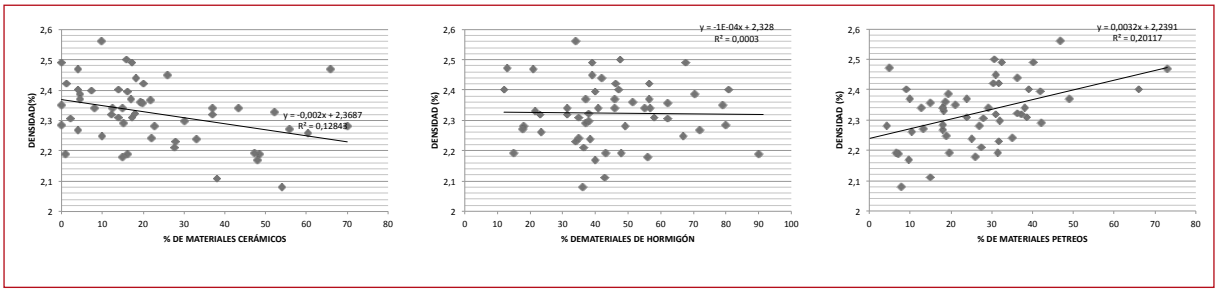


Figura 5.34. Valores de densidad en función de la composición del árido reciclado.

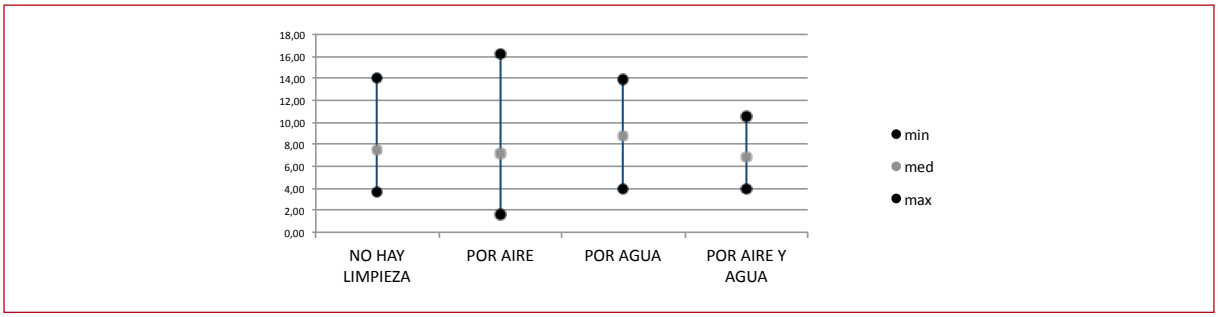


Figura 5.35. Valores de absorción de agua del árido reciclado en función de los sistemas de limpieza adoptado en su producción.

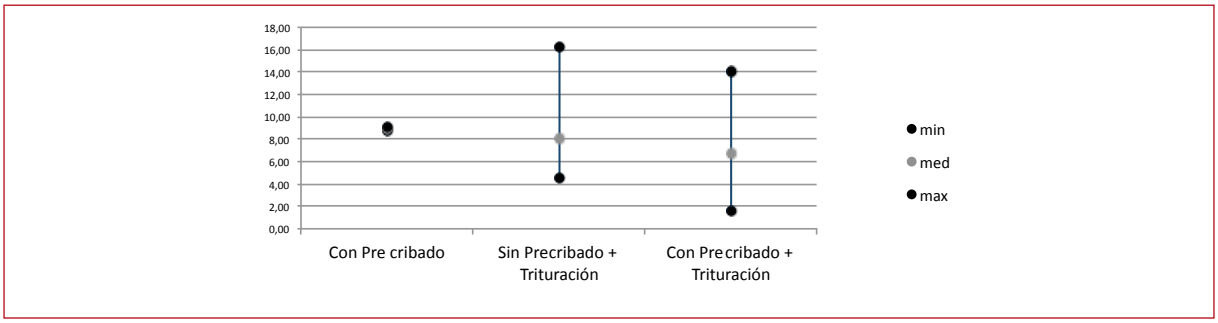


Figura 5.36. Valores de absorción de agua del árido reciclado en función de los sistemas de cribado de finos y trituración adoptado en su producción.

Por último, se destaca que la mayor parte de todas las muestras analizadas (un 65%) han presentado valores de absorción entre 5 y 10%, lo que indica su viabilidad, con posibles restricciones en la dosificación, para usos ligados (hormigón, suelo cemento y pre fabricados).

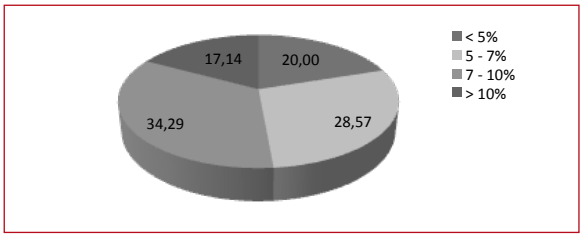


Figura 5.37. Cantidad de muestras de áridos reciclados analizados por rango de valores de absorción de agua pre establecidos (%).

Los resultados relativos a la absorción de los áridos confirman que la composición del material es un factor determinante de la calidad técnica de los áridos reciclados. La clasificación de los áridos reciclados en categorías definidas por la predominancia de áridos bien pétreos, de hormigón y/o cerámicos, puede ayudar a definir mejor las características esperadas de un determinado árido reciclado.

Resistencia a la fragmentación

Actualmente el PG3 hace la salvedad de que si se utilizan áridos reciclados procedentes de demoliciones, hormigones de resistencia a la compresión final superior a 35 MPa, el valor del coeficiente Los Ángeles podrá ser superior en 5 unidades a los valores exigidos.

Cabe destacar que estudios recientes[7] han puesto de manifiesto la baja representatividad de este ensayo, ya que, durante su ejecución, el mortero adherido de los áridos reciclados de hormigón se pulveriza. Este efecto puede ser atribuible a la naturaleza porosa del material, la existencia de grietas y la menor resistencia del mortero adherido[8].

Por otro lado, según IHOBE[9], en el caso de áridos con material cerámico, la generación de finos puede constituir un efecto favorable puesto que en proceso de consolidación del material granular, los finos cerámicos pueden contribuir a potenciar la reacción puzolánica. En estos casos, el mayor desgaste de los áridos es compensado por una mejor cohesión del material durante su compactación.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la campaña experimental, aunque los áridos reciclados presenten valores altos (con variaciones entre 30 y 50%) en comparación con el árido natural, se observa que cerca del 83% de las muestras analizadas cumplen de algún modo las exigencias del PG3 para usos en carreteras, hormigón compactado con rodillo, explanadas y rellenos y aplicaciones de suelocemento y gravacemento (figura 5.38).

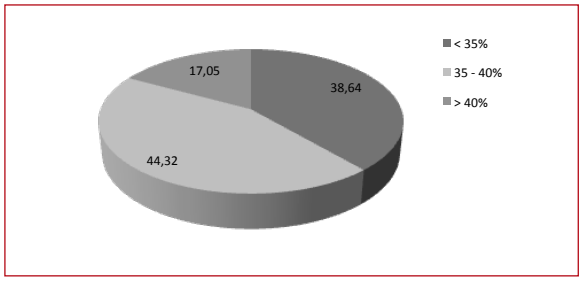


Figura 5.37. Cantidad de muestras de áridos reciclados analizados por rango de valores de coeficiente de desgaste Los Ángeles pre establecidos (%).

Con los resultados empíricos obtenidos (figura 5.39) no ha sido posible establecer una relación directa entre el contenido de materiales cerámicos y resistencia al desgaste. En cambio, el hormigón de baja resistencia puede provocar un coeficiente de desgaste Los Ángeles muy alto, y poco relacionado con la capacidad portante resultante del firme.

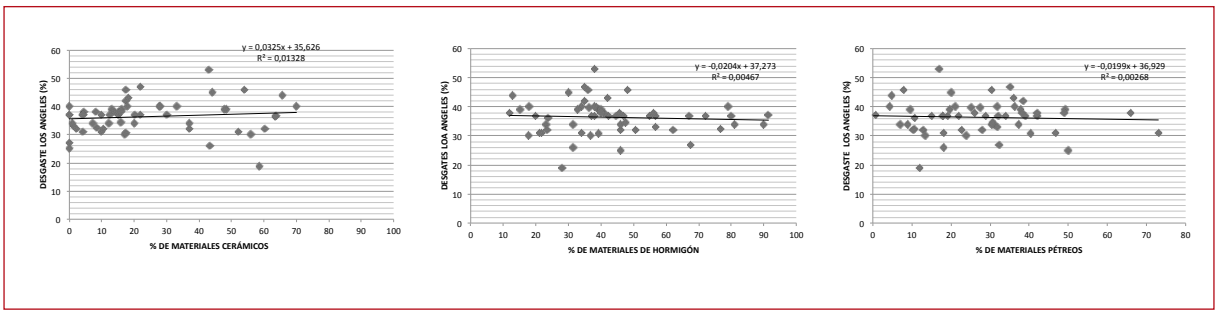


Figura 5.39. Valores de coeficiente Los Ángeles en función de la composición del árido reciclado.

La presencia de sistemas de limpieza tampoco influye en los resultados del coeficiente Los Ángeles de los áridos reciclados. No obstante, el uso de sistemas de cribado de finos asociados con trituración puede contribuir a lograr bajos valores de coeficiente de desgaste (figura 5.40). Plantas de reciclaje formadas por líneas de producción que contemplan el cribado de finos y trituración han llegado a presentar áridos reciclados con valores del coeficiente Los Ángeles por debajo del 20%, aunque en algunas ocasiones los valores han superado el límite establecido y han llegado hasta un valor del 54%.

7 Sanchez, M.; Alaejos, P.: "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate", Construction and Building Material, 23 (2009), pp. 872-877.

8 Tam, V. W.; Gao, X. F.; Tam, C. M.: "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing appro- ach", Cement and Concrete Research, 35 (2005), pp. 1195-1203.

9 IHOBE. Uso de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Investigación Prenormativa. Bilbao: IHOBE, 2011.

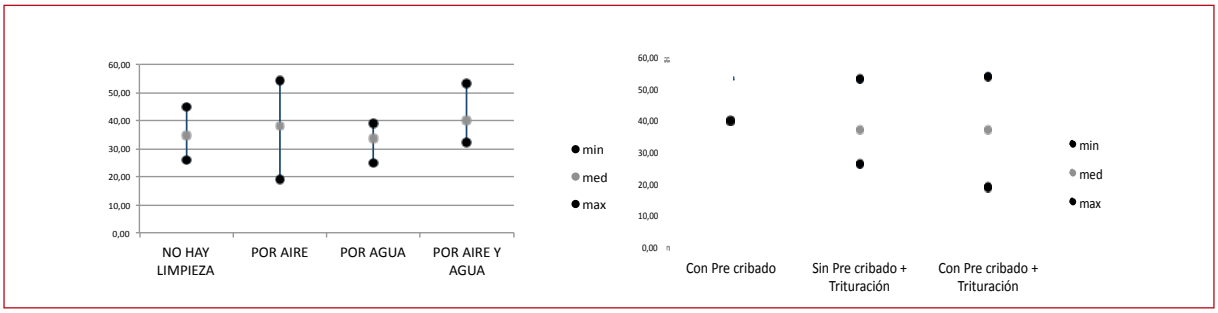


Figura 5.40. Valores de absorción de agua del árido reciclado en relación con los sistemas de cribado de finos y trituración utilizados en su producción.

Plasticidad

Todos los resultados obtenidos han indicado/confirmado la no plasticidad característica de los áridos reciclados. Este parámetro no supone un problema para el empleo de áridos reciclados para suelos reciclados y se puede asumir la normativa vigente.

Calidad de los finos

En los áridos en general, la presencia de finos (árido que pasa por el tamiz 0,063 mm) en el hormigón afecta a la trabajabilidad, resistencia y durabilidad, reduciendo su calidad y afectando a sus propiedades finales.

El ensayo de equivalente de arena ha sido realizado con el objetivo de determinar:

- La cantidad y calidad de los finos existentes en los áridos reciclados (visto que una buena cimentación de un camino necesita la menor cantidad de finos posible, sobre todo de arcillas);
- La porosidad y permeabilidad del árido, por lo que es importante saber su capacidad de infiltrar agua o su aireación.

En general, las muestras analizadas han presentado valores de acuerdo con los límites definidos por el PG3 (figura 5.41). Solo el 5% de las muestras analizadas han presentado valores de equivalente de arena que excluirían su uso para cualquiera de las aplicaciones indicadas del PG3 (equivalente de arena inferior al 25%).

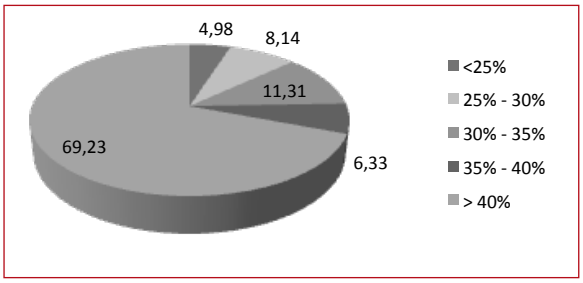


Figura 5.41. Cantidad de muestras de áridos reciclados analizados por rango de valores de equivalente de arena pre establecidos (%).

No se observa relación entre los valores de equivalente de arena encontrados con la composición de las muestras analizadas. Sin embargo, las muestras con menor contenido de finos tienden a presentar valores más altos de equivalente de arena (figura 5.42).

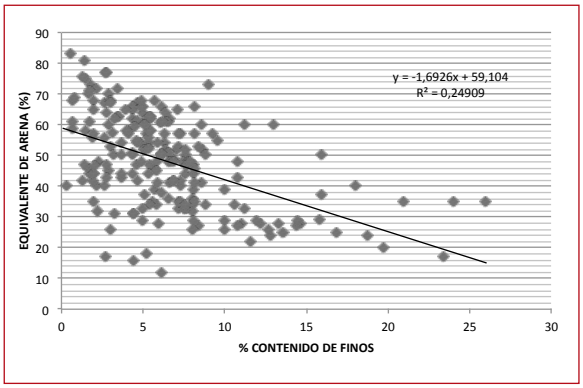


Figura 5.42. Valores de equivalente de arena en función de la presencia de finos en las muestras analizadas.

Limpieza

Uno de los factores limitantes del uso de áridos reciclados como material de construcción es la presencia de contaminantes en el residuo original. Las impurezas y contaminantes posibles en los áridos reciclados (plástico, madera, yeso, ladrillo, vidrio, materia orgánica, aluminio, asfalto, etc.), producen en todos los casos un descenso de las propiedades del material.

Dependiendo del tipo de impureza y la aplicación a la que el árido se ha destinado, se pueden presentar complicaciones como reacciones álcali-árido (vidrio), lixiviación y ataque por sulfatos (yeso), desconchados superficiales (madera o papel) y falta de compacidad (tierras arcillosas).

Solo el 52% del total de las muestras analizadas han presentado valores de coeficiente de limpieza inferiores al 2%, lo que revela que buena parte de los áridos reciclados analizados no están dentro de los límites indicados por el PG3 (El coeficiente de limpieza no deberá ser superior al 2%).

Se atribuyen los altos valores de coeficiente de limpieza tanto a los métodos de producción de la planta como a la tipología del residuo recibido. En la figura 5.43 es posible observar que los valores más bajos de coeficiente de limpieza están en los áridos reciclados producidos por:

- Plantas sin sistema de limpieza, que suelen recibir un RCD limpio, sin necesidad de procedimientos de limpieza complejos.
- Plantas con sistemas de limpieza por aire y por agua. Suelen recibir materiales más sucios que son tratados a través de sistemas de limpieza más complejos y eficientes.

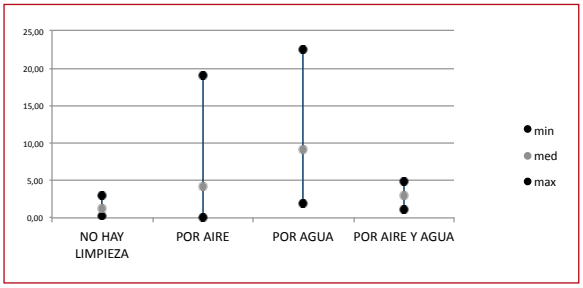


Figura 5.43. Valores de coeficiente de limpieza del árido reciclado en función de los sistemas de limpieza adoptados en su producción.

Por otro lado, los resultados del diagnóstico indican que bajos coeficientes de limpieza no necesariamente representan áridos con bajos valores de azufre, sales, sulfatos y yeso. Se percibe que materiales con bajo valor de coeficiente de limpieza también pueden presentar contenido relevante de contaminantes (figura 5.44).

El coeficiente de limpieza solo en algunos casos se relaciona con la presencia de contaminantes orgánicos. Todas las muestras con altos contenidos de materia orgánica han presentado coeficientes de limpieza superiores al 2%, pero se ha producido a la inversa.

Las muestras con altos contenidos de contaminantes orgánicos han presentado coeficientes de limpieza superiores al 2%.

De cualquier modo, las plantas con coeficientes de limpieza superiores deberán realizar estudios específicos sobre la línea de producción para identificar mejoras necesarias al sistema para reducir este problema:

- Hacer mayor control en el proceso de admisión de residuos.
- Hacer o mejorar el proceso de separación y acopio de entrada.
- Incluir o mejorar el sistema de limpieza de la planta.
- Otros.

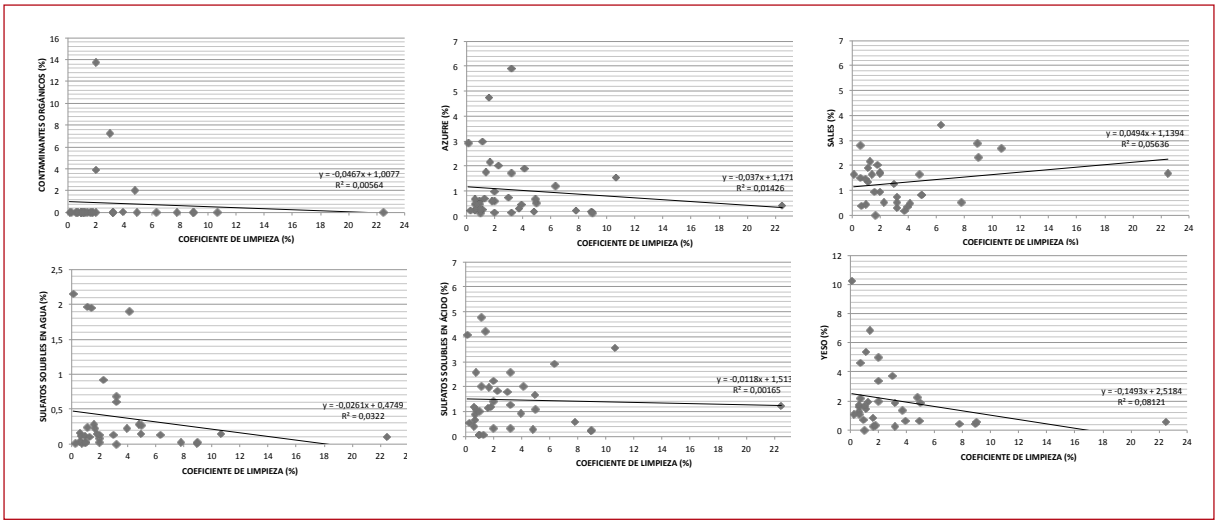


Figura 5.44. Valores de coeficiente de limpieza del árido reciclado en función de la presencia de contaminantes.

5.4.3 Propiedades químicas

Contaminantes orgánicos

La determinación de contaminantes orgánicos se ha realizado por el método de determinación del contenido de humus, de acuerdo con la norma UNE-EN 1744-1:1999 Apdo. 15.1.

Respecto a los límites de contenido de contaminantes orgánicos indicados por el PG3 para el uso de áridos en rellenos (figura 5.45):

- En el artículo 330 del PG3 para suelos seleccionados, el límite exigido es de un contenido < 0,2% (según UNE 103204), límite que lo cumple un 83% del total de las muestras analizadas;
- Para suelos adecuados el límite exigido en la normativa es de un contenido < 1% de materia orgánica (según UNE 103204). El 86% del total de las muestras analizadas de áridos reciclados cumple con este requisito, este mismo valor se exige en aplicaciones de gravacemento y suelocemento.

- El límite exigido en la normativa para suelos tolerables es de un contenido < 2% de materia orgánica (según UNE 103204). El 90% de las muestras analizadas de áridos reciclados cumple con este requisito;
- En los rellenos de zanjas para instalación de tuberías se pide que el material no tenga materia orgánica. El 92% de las muestras analizadas de áridos reciclados cumple con este requisito;
- Para rellenos localizados de material drenante, el artículo 421 del PG3 especifica que los áridos a emplear para este uso estarán exentos de arcillas, margas y otros materiales extraños.

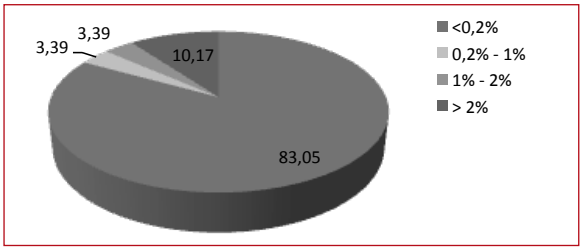


Figura 5.45. Cantidad de muestras de áridos reciclados analizados por rango de valores de contenido de materia orgánica pre establecidos (%).

Las muestras con los valores más altos (por encima del 5%) proceden de plantas fijas sin sistema de limpieza y que no reciben material pre-seleccionado (figura 5.47). Se asume, en base a los resultados, que los sistemas de limpieza por agua son más eficientes para la reducción de contaminantes orgánicos que los sistemas por aire.

Es importante destacar que los valores más elevados a los límites establecidos por el PG3 hallados en el presente estudio pueden ser acreditados a características puntuales de un material de origen específico procesado en la época de realización del ensayo y/o problemas puntuales durante la realización del ensayo. En general, prácticamente todas las muestras cumplen los requisitos establecidos por el PG3.

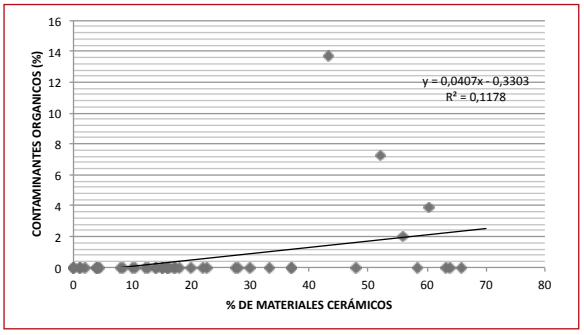


Figura 5.46. Valores de contenido de contaminantes orgánicos en función de la presencia de elementos cerámicos en las muestras analizadas.

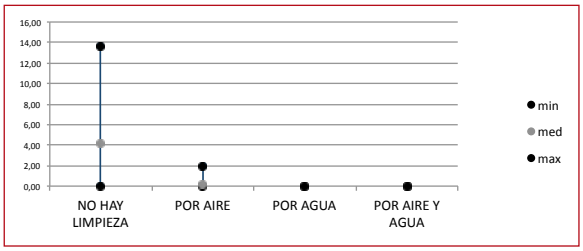


Figura 5.47. Valores de contaminantes orgánicos del árido reciclado en función de los sistemas de limpieza adoptado en su producción.

Sales

Este apartado presenta una de las principales problemáticas de uso de los áridos reciclados como materiales de construcción.

El límite para su uso en suelos seleccionados, por ejemplo, es <0,2 % de sales solubles (según NLT 114), pudiéndose admitir hasta <1% de sales solubles distintas al yeso para su empleo en el núcleo del terraplén. Para suelos tolerables, el límite vigente en la normativa actual tiene un límite máximo de sales solubles (según NLT 114) del 1%.

Con las premisas expuestas, tan solo el 5% del total de las muestras analizadas cumplen con el límite vigente de 0,2% mientras que solo el 43% cumplen con el límite vigente del 1% (figura 5.48).

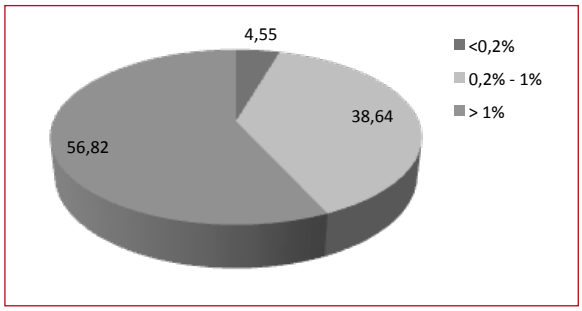


Figura 5.48. Cantidad de muestras de áridos reciclados analizados por rango de valores de contenido de sales solubles pre establecidos (%).

La composición del árido reciclado no se presenta tan influyente en esta propiedad. Tanto la presencia de elementos de hormigón como de elementos cerámicos pueden influir en la presencia de sales (figura 5.49).

Por otro lado, el contenido de sales solubles resulta ser función del contenido en yeso existente en el material reciclado (5.50).

Al analizar los datos en función de los sistemas de producción en la planta (figura 5.51), se identifica que los áridos reciclados sometidos a procesos de limpieza por agua son los que suelen presentar los valores medios de contenido de sales más bajos, pues dichos sistemas permiten eliminar las sales solubles. Por otro lado, plantas sin sistema de limpieza también pueden presentar valores bajos de conteni-

do de sales debido al propio carácter del residuo de entrada, que en general es de buena calidad.

Plantas que presenten problemas de altos contenidos de sales deben realizar estudios específicos sobre la línea de producción de las plantas para incluir o mejorar su sistema de limpieza con el objetivo de reducir este problema.

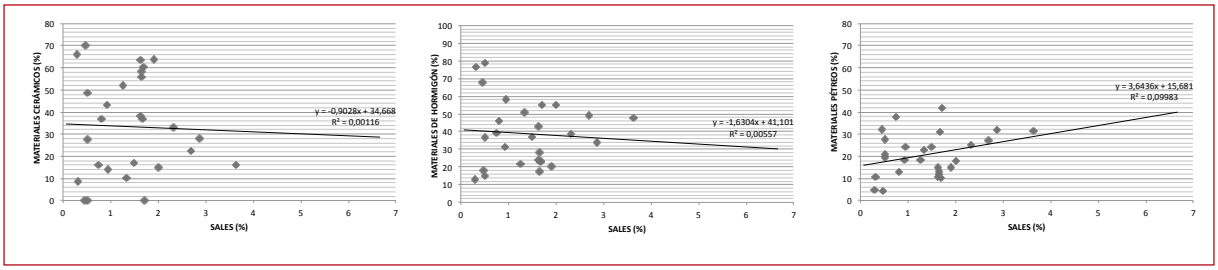


Figura 5.49. Valores de contenido de sales solubles en función de la composición del árido reciclado.

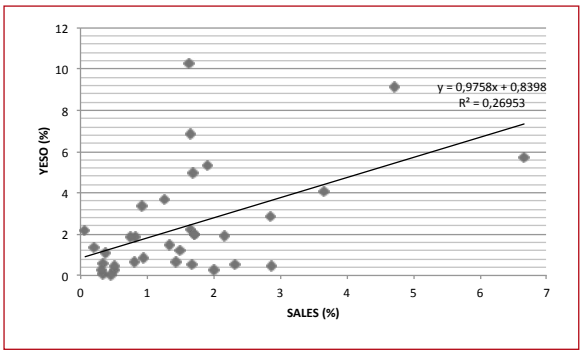


Figura 5.50. Valores de contenido de sales solubles en función del contenido de yeso del árido reciclado.

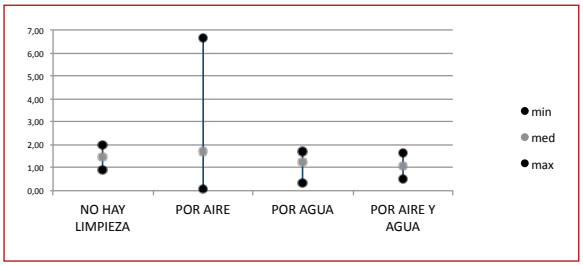


Figura 5.51. Valores de contenido de sales del árido reciclado en función de los sistemas de limpieza adoptados en su producción.

Azufre

La limitación de los compuestos de azufre en materiales aplicados a usos estructurales no ligados (explanadas y sub-bases) de firmes de carretera es determinada con arreglo a tres tipos de ensayo diferentes:

- Para explanadas, el contenido de compuestos de azufre del material granular es determinado tanto por el contenido de sulfatos solubles en agua, de acuerdo a la norma UNE 103201 (ver apartado 330.4.1.1 del PG3), como por el contenido en yeso, según la norma NLT 115 (ver apartado 330.4.4.3 del PG3).
- Para zahorras, el contenido ponderal de compuestos de azufre totales es determinado según la norma UNE-EN 1744-1 (ver apartado 510.2.2 del PG3).

Para la realización del ensayo de contenido de azufre en las muestras sometida a la campaña experimental, se ha adoptado la norma UNE-EN 1744-1. Todas las muestras sometidas al análisis experimental han sido trituradas y molidas con el objetivo de no despreciar las fracciones superiores que normalmente no serian consideradas en el análisis.

Según los resultados obtenidos, la mayor parte de las muestras analizadas (cerca de 73%) presentan valores de contenido de azufre inferiores a 1% (figura 5.52).

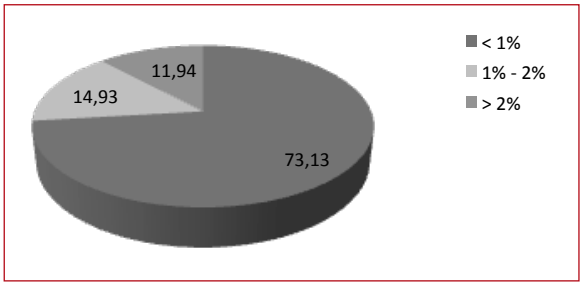


Figura 5.52. Cantidad de muestras de áridos reciclados analizados por rango de valores de contenido de azufre preestablecidos (%).

No se observa una correlación establecida entre la presencia de azufre y la composición de los áridos reciclados (figura 5.53). Por otro lado, se nota una relación entre la presencia de compuestos de azufre y la presencia de yeso y sulfatos, especialmente sulfatos solubles en ácido, en los áridos reciclados analizados por el proyecto (figura 5.54). Estos resultados refuerzan la propuesta de limitar esta propiedad.

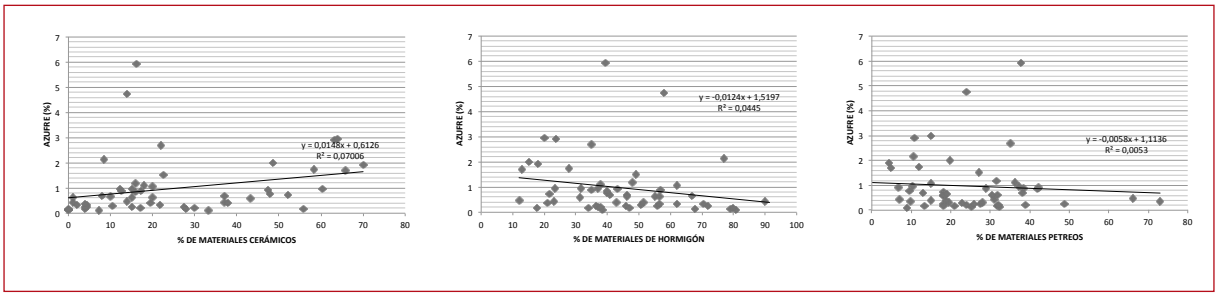


Figura 5.53. Valores de contenido de azufre en función de la composición del árido reciclado.

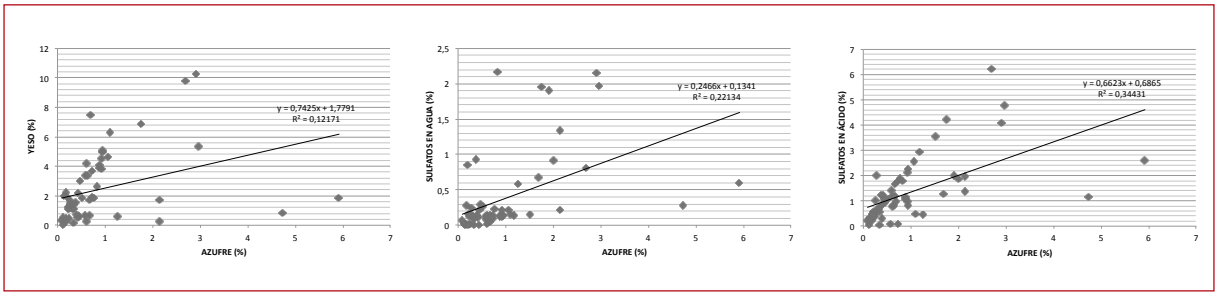


Figura 5.54. Valores de contenido de azufre en función del contenido de yeso y sulfatos en agua y ácido del árido reciclado.

Como en el caso de los resultados de sales solubles, se observa que tanto las plantas que no presentan sistemas de limpieza como las plantas que presentan sistemas más complejos han presentado los áridos reciclados con valores más bajos de contenido de azufre (figura 5.55). Este comportamiento, aunque en un primer momento indique cierta contradicción, revela que:

- Las plantas de reciclaje con sistemas de producción más simples procesan residuos de construcción y demolición más limpios y libre de azufre;
- Las plantas de reciclaje con sistemas de limpieza más complejos admiten residuos más contaminados. Sin embargo, los sistemas de limpieza por aire y agua que poseen son eficientes para alcanzar áridos reciclados con bajos contenidos de azufre.

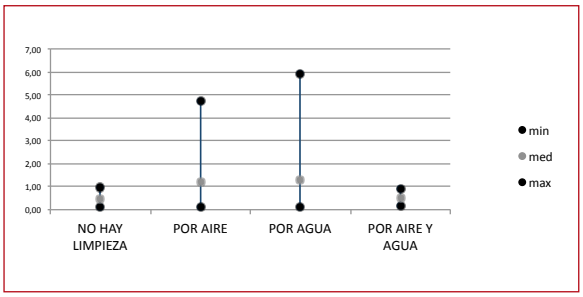


Figura 5.55. Valores de contenido de azufre del árido reciclado en función de los sistemas de limpieza adoptado en su producción.

Sulfatos solubles en agua y en ácido

En todas las muestras en que se han determinado sulfatos, sean solubles en agua o en ácido, se ha triturado y molido los materiales para no despreciar las fracciones superiores.

Para carreteras, el límite exigido por el PG3 es de un contenido < 0,5%. Cerca de 80% del total de las muestras analizadas han presentado valores de contenido de sulfatos solubles en agua que cumplen el requisito (figura 5.56).

Para explanadas, el límite exigido en la normativa es de un contenido < 1% de sulfatos solubles (se han analizado los resultados según UNE-EN 1744-1 Apdo. 10). El 91% del total de las muestras analizadas de áridos reciclados cumple con este límite.

Para hormigón compactado con rodillo y para aplicaciones de suelocemento y gravacemento el límite exigido en la normativa es de un contenido < 1% de sulfatos solubles en ácido. En este caso, solo el 50% del total de las muestras analizadas de áridos reciclados cumple con este límite.

Los valores más altos de contenidos de sulfatos solubles en agua (> 1%) se presentan, mayoritariamente, en muestras de áridos con un contenido relevante de elementos cerámicos (figura 5.57). La elevada cantidad de sulfatos en estos áridos se debe a la presencia de impurezas como el yeso, y al sulfato procedente de las arcillas originales que provocan eflorescencia.

También cabe destacar que la presencia de sulfatos solubles en agua disminuye a medida que aumenta el porcentaje de residuos de hormigón (figura 5.58). Este comportamiento se atribuye al hecho de que los áridos con contenido relevante de residuos de hormigón proceden generalmente de obras de demolición, en las que se realiza una selección más intensa previa a los procesos de clasificación y tratamiento de los residuos.

Como se ha indicado previamente (figura 5.54), el contenido de sulfatos solubles depende del contenido de compuestos de azufre y yeso (figura 5.59).

Finalmente, al analizar los datos en función de los sistemas de producción en la planta (figura 5.60), se identifica un comportamiento similar al presentado en el análisis del contenido de sales y azufre en los áridos reciclados.

Los áridos reciclados sometidos a procesos de limpieza por agua son los que suelen presentar los valores de contenido de sulfatos en agua más bajos. Las plantas sin sistema de limpieza también presentan valores bajos de contenido de sulfatos en agua y eso se debe al propio carácter del residuo de entrada, que en general es de buena calidad.

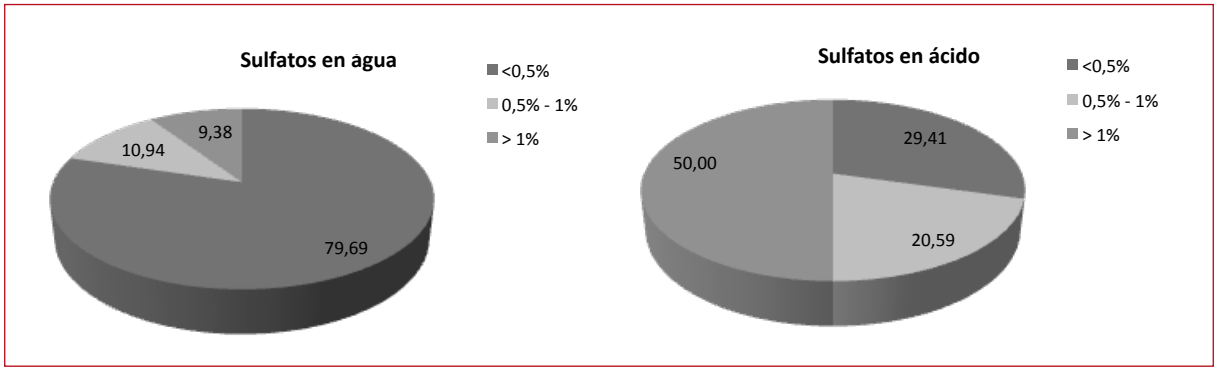


Figura 5.56. Clasificación porcentual de las muestras de áridos reciclados en función del contenido de sulfatos solubles en agua y en ácido.

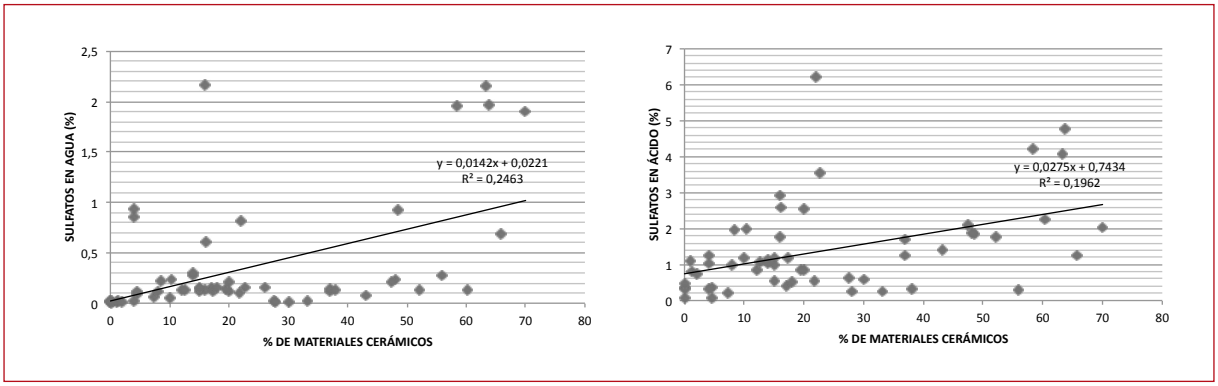


Figura 5.57. Contenido de sulfatos en agua y en ácido en función del porcentaje de elementos cerámicos en el árido reciclado.

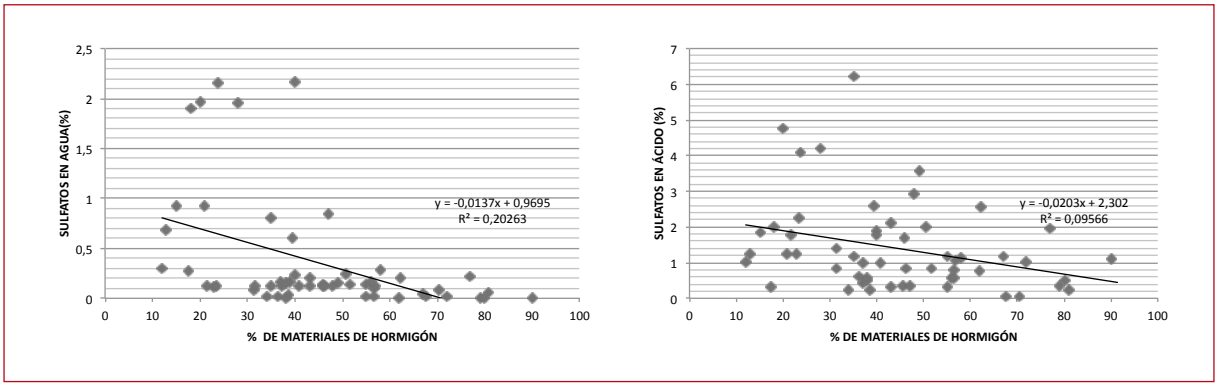


Figura 5.58. Contenido de sulfatos en agua y en ácido en función del porcentaje de residuos de hormigón en el árido reciclado.

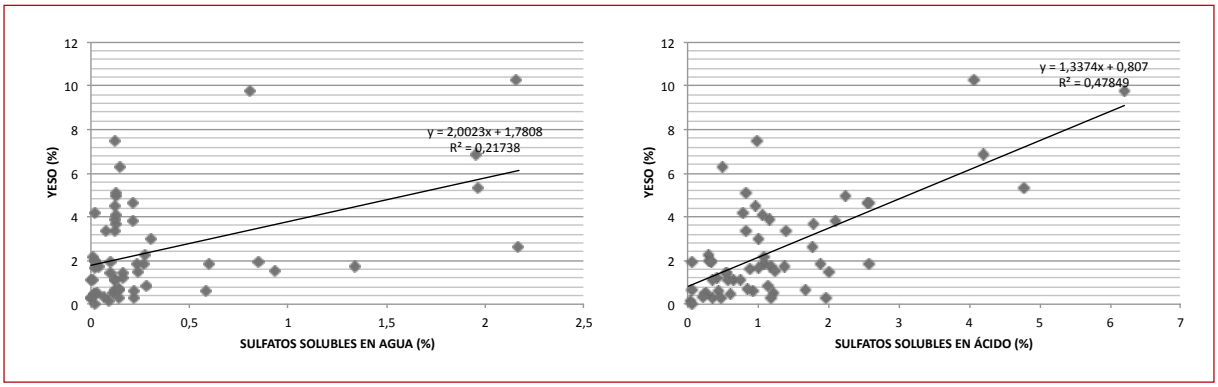


Figura 5.59. Contenido de sulfatos solubles en agua y en ácido en función del contenido de yeso en el árido reciclado.

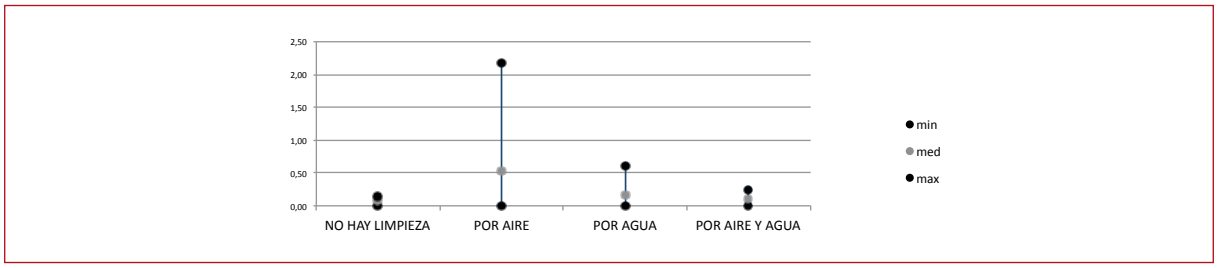


Figura 5.60. Valores de contenido de sulfatos en agua del árido reciclado en función de los sistemas de limpieza adoptados en su producción.

Es importante resaltar que el 100% de las muestras analizadas que han presentado contenidos de sulfatos solubles en agua superiores al 1% proceden de plantas que no presentan sistema de limpieza por agua. Ello indica que los casos en los que no se cumple el límite exigido por el PG3 son puntuales, y pueden ser resueltos en la planta con la implantación de un sistema de limpieza adecuado.

Yeso

Para analizar el contenido de yeso de las muestras durante la campaña experimental se ha utilizado la norma NLT115/99, que permite evaluar el contenido de yeso en suelos, y se han preparado las muestras de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NLT101/72.

La preparación inicial de la muestra ha consistido en deshacer los materiales por medio del mortero. El objetivo, como en los otros ensayos químicos, ha sido no despreciar las fracciones gruesas del material, que pueden contener yeso en partículas gruesas.

En lo que se refiere a suelos seleccionados, según NLT 115 (figura 5.61):

- Para el empleo de áridos en cualquier zona del terraplén (núcleo, cimiento, coronación o espaldones), se fija un límite de dicha sustancia inferior al 0,2%, límite que solo lo cumple el 5% del total de las muestras de áridos reciclados analizadas.
- Para el empleo en el núcleo del terraplén, se exige un contenido en yeso < 2%, límite que cumple el 58% del total de las muestras analizadas.
- Para el empleo del material en el cimiento del terraplén y para uso como suelo tolerable, el contenido en yeso debe ser menor del 5%. En este caso, el 86% del total de las muestras de áridos reciclados cumplen la referida exigencia.

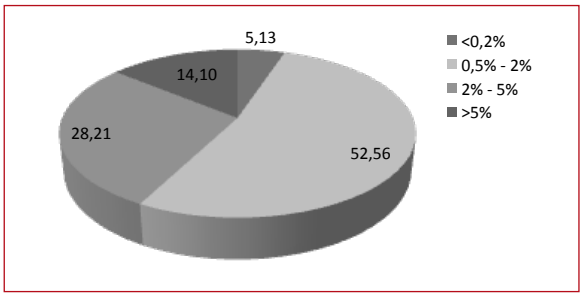


Figura 5.61. Clasificación porcentual de las muestras de áridos reciclados en función del contenido (en porcentaje) de yeso.

Los datos obtenidos son coherentes con los resultados de contenido de azufre y sulfatos solubles (figuras 5.54 y 5.59). Una vez más, se demuestra la idoneidad de establecer un único tipo de ensayo de control de áridos reciclados que determine el contenido de sulfatos del material, unificándose, por lo tanto, las determinaciones de azufre total, de sulfatos solubles y la valoración de yeso en áridos reciclados.

En coherencia con los análisis de sulfatos solubles, los resultados de contenido de yeso indican también que la mayor presencia de este elemento

se presenta en las muestras con menor contenido de áridos de hormigón (figura 5.621).

Por último, al analizar los datos en función de los sistemas de producción en la planta (figura 5.63), se identifica una situación similar a la presentada en el análisis del contenido de sales, azufre y sulfatos en los áridos reciclados.

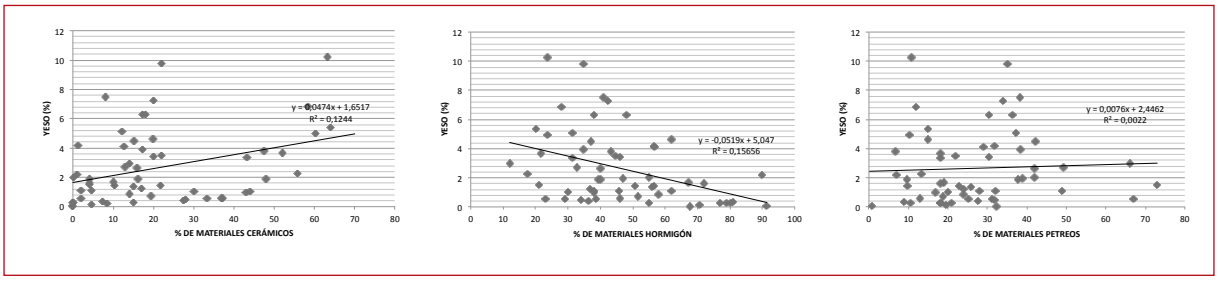


Figura 5.62. Contenido de yeso en función de la composición del árido reciclado.

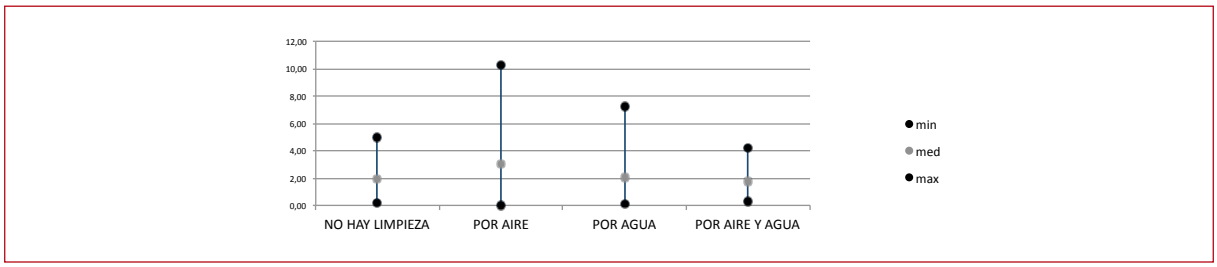


Figura 5.63. Contenido de yeso del árido reciclado en función de los sistemas de limpieza adoptados en su producción.

Se confirma, en definitiva, que los áridos reciclados sometidos a procesos de limpieza por aire y agua en general presentan menos problemas de sulfatos. Como ocurría en los apartados anteriores, las plantas sin sistema de limpieza (móviles) también presentan bajos contenidos de yeso, hecho justificado porque el residuo de entrada en estas plantas, en general, es de buena calidad.

5.5 Variabilidad en el tiempo de las características de los áridos reciclados producidos en España

Se constata que el árido reciclado producido en las plantas de reciclaje españolas tiene características muy variables. Éstas están fuertemente vinculadas al modo de producción (en especial en lo referido al tipo de trituración y a la presencia o no de sistemas de limpieza en la planta) y a la calidad del RCD original (variable tanto por los sistemas control de recepción y clasificación seguidos por la planta, como por las características específicas del RCD originado en cada comunidad autónoma del país).

Por otro lado, no es posible afirmar que una misma planta de reciclaje produce áridos reciclados con características constantes a lo largo del tiempo, aun manteniendo constantes todas las variables de producción arriba citadas.

Los residuos de construcción y demolición son materiales heterogéneos que presentan gran diversidad, variando sus características según el tipo de obra de procedencia del residuo. Esta afirmación se corrobora a partir de un estudio específico realizado por el Proyecto GEAR en cinco plantas de reciclaje con las siguientes características:

- PR1: Planta de reciclaje fija que recibe únicamente RCD de carácter mixto en acopio único. Presenta una línea de producción con precribado de finos, trituraciones primaria y secundaria realizadas con un mismo equipo (molino de impacto), sistemas de separación manual y magnética y sistemas de limpieza por aire. Como procedimiento de control de entrada, esta planta solo acepta RCD con hasta un 30% de materiales impropios sin amianto, identificado a través de control visual.
- PR2: Planta de reciclaje fija que recibe únicamente RCD de carácter mixto en acopio único, y presenta una línea de producción y procedimientos de control exactamente iguales a la planta PR1. También está ubicada en la misma región que la planta PR1.
- PR3: Planta de reciclaje semi-móvil que recibe tanto RCD de carácter mixto como de hormigón. Los residuos recogidos se clasifican según su composición y limpieza (determinada por ins-

pección visual). Presenta una línea de producción con trituración primaria por machacadora de mandíbulas y trituración secundaria por molino de impacto, sistemas de separación manual y magnética y sistemas de limpieza por aire y agua. Su línea de producción y ubicación son distintas de las presentadas para las plantas PR1 y PR2. El material analizado en este estudio ha sido producido a partir de un RCD de carácter mixto clasificado como limpio.

- PR4: Planta de reciclaje fija que recibe únicamente RCD de hormigón. Los residuos recibidos se clasifican según su limpieza (determinada por inspección visual). Para el RCD clasificado como limpio se utiliza una línea de producción con trituración primaria por machacadora de mandíbulas, y trituración secundaria por molino de impacto y sistemas de separación manual y magnética. Para el RCD clasificado como sucio se utiliza una línea de producción con cribado de finos por trómel, sistemas de separación manual y de limpieza por aire y trituración por molino de impacto. Su línea de producción y ubicación son distintas de las presentadas para las plantas PR1, PR2 y PR3. El material analizado en este estudio proviene de la línea de producción para el RCD limpio.
- PR5: Planta de reciclaje fija que recibe únicamente RCD de carácter mixto. Presenta acopio único y no tiene procedimientos de clasificación del material previos al machaqueo. Solo acepta RCD sin contaminantes, identificados a través de control visual. Presenta una línea de producción con trituración primaria por molino de impacto y sistemas de limpieza por aire, agua e infrarrojo (sistema específico de separación de yesos). Su línea de producción y ubicación son distintas de las presentadas para las plantas PR1, PR2, PR3 y PR4.

En cada planta se ha desarrollado una campaña experimental con el objetivo de analizar la variabilidad de algunas propiedades del árido reciclado en función del tiempo. Los ensayos de control han sido realizados a lo largo de un periodo aproximado de 180 días. Su frecuencia ha sido determinada en función de la productividad de cada planta.

La figura 5.63 presenta los resultados del ensayo de determinación del contenido de finos obtenidos. En ella se puede verificar que el menor rango de variación se da en la planta PR1, que presenta un valor mínimo del 4,40% y máximo del 6,50%, con una dispersión de apenas un 0,73%. Por otro lado, el mayor rango de variación lo presenta la planta PR5, que con un mínimo del 1,70% y un máximo del 10,80%, alcanza una dispersión del 2,87%. Cabe destacar que las plantas PR1 y PR2 presentan variabilidad distinta, aunque sean plantas exactamente iguales. La planta PR2 muestra un valor mínimo de contenido de finos del 3,70% y máximo del 10,80%, presentando una dispersión del 2,00%.

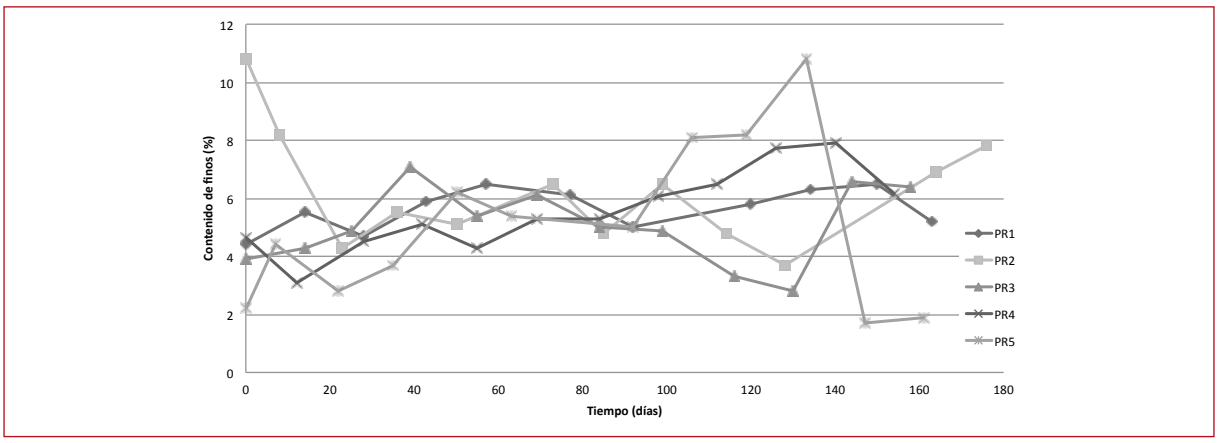


Figura 5.64. Variación en el tiempo del contenido de finos del árido reciclado para cada planta de reciclaje sometida al estudio.

La figura 5.65 presenta los resultados del ensayo de equivalente de arena. En ella se puede observar que el menor rango de variación lo ofrece la planta PR3, con valores entre el 62 y el 66% y una dispersión del 1,93%. De nuevo, el mayor rango de variación corresponde a la planta PR5, que registra equivalentes de arena de entre un 29 y un 71% y una dispersión del 13,51%. En este caso, las plantas PR1 y PR2 presentan comportamiento similar: la planta PR1 presenta valores en el rango 39%-67% con una dispersión del 8,65%, y la planta PR2 varía su rango al intervalo 27%-66% con una dispersión del 12,13%.

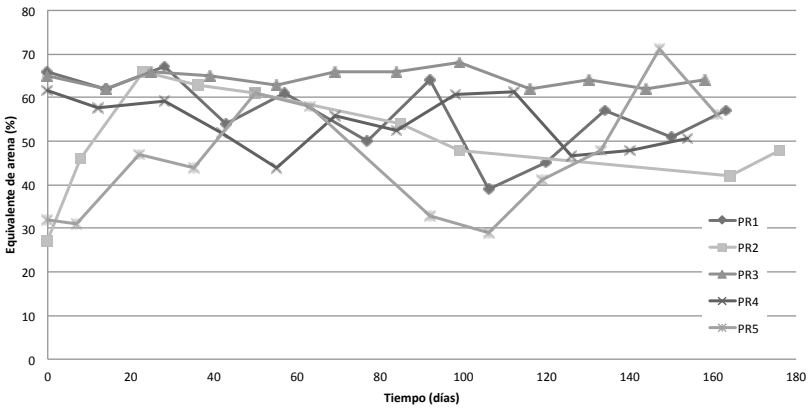


Figura 5.65. Variabilidad temporal del equivalente de arena del árido reciclado para cada planta de reciclaje sometida al estudio.

La figura 5.66 presenta los resultados de la determinación del índice de lajas. En ella se observa que el menor rango de variación corresponde a la planta PR4, con valores entre el 5,63% y el 11,69% y una dispersión del 2,48%. Por otra parte, las mayores dispersiones se presentan en las plantas PR3 y PR5, con valores del 5,49% y del 5,32%, respectivamente. En este caso, son las plantas PR1 y PR2 las que presentan un comportamiento similar: la planta PR1 aporta muestras con un índice de lajas entre el 12 y el 21%, con una dispersión del 3,42%, y la planta PR2 sitúa sus resultados entre el 13 y el 20%, con una dispersión del 3,11%.

Finalmente, la figura 5.67 presenta la evolución del porcentaje de cada tipo de material que compone las muestras de áridos reciclados sometidas a este estudio: asfalto, cerámico, hormigón, piedra y otros (plástico, metal y yeso, entre otros).

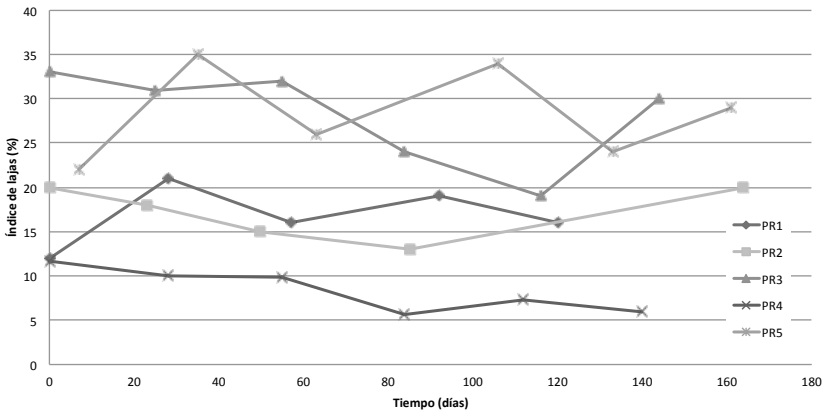


Figura 5.66. Variación en el tiempo del índice de lajas del árido reciclado para cada planta de reciclaje sometida al estudio.

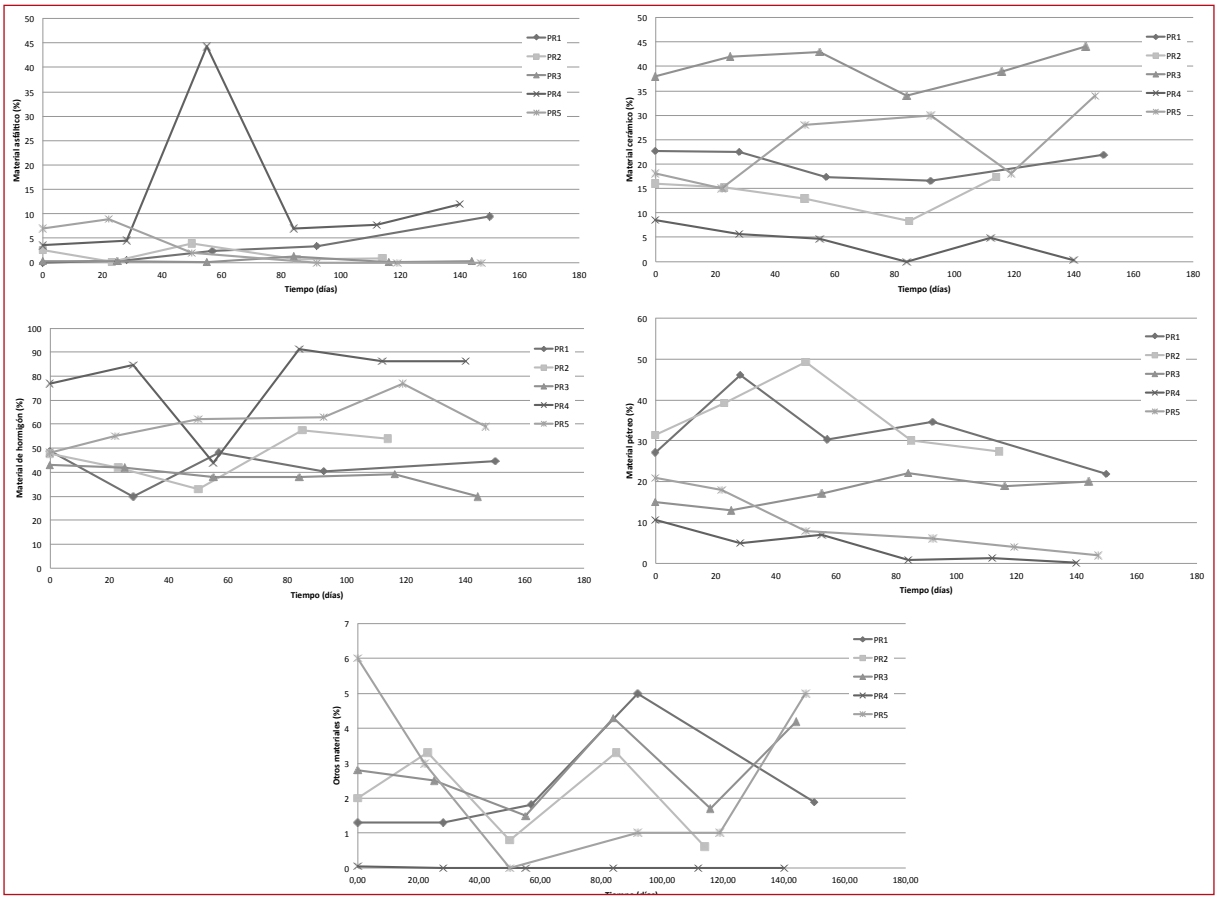


Figura 5.67. Variación en el tiempo de la composición del árido reciclado para cada planta de reciclaje sometida al estudio.

Los resultados indican:

- Material asfáltico: El menor rango de variación se identifica en la planta PR3, con valores entre el 0,04 y el 1,20% y una dispersión de apenas 0,42%. El mayor rango se produce en la planta PR4, que registra valores entre el 3,61% y el 44,21% y una dispersión del 15,48%. En esta planta la alta dispersión la provoca una única muestra, que presenta una cantidad de asfalto muy significativa, producida a partir de un material de entrada infrecuente en la planta. Las plantas PR1 y PR2 presentan poca dispersión, pero el comportamiento no es similar: la planta PR1 presenta valores entre el 0% y el 9,5% con una dispersión del 3,79%, y la planta PR2 varía entre el 0,2 y el 3,9% con una dispersión de un 1,57%.
- Material cerámico: En este caso, las plantas PR1, PR2, PR3 y PR4 presentan un rango de variación similar, con dispersiones entre el 2,99% y el 3,74%. De nuevo, el mayor rango de variación se da en la planta PR5, que registra valores entre el 15% y el 34% con una dispersión del 7,81%.
- Material de hormigón: El menor rango de variación se da en la planta PR3, con valores en el intervalo 30-43% y una dispersión del 4,59%. La planta PR4 es la que más varía, con un rango comprendido entre el 43,95% y el 91,39% y una dispersión del 17,41%. Se destaca que la línea de producción de la planta PR4 analizada en este estudio solo recibe RCD sin elementos cerámicos. La alta variación la provocó una muestra con alto contenido de material asfáltico. Las plantas PR1 y PR2 presentan comportamiento similar: la planta PR1 presenta valores entre el 29,7% y el 49% con una dispersión del 7,88%, y la planta PR2 varía entre el 32,9% y el 57,4% con una dispersión de un 9,74%.
- Material pétreo (áridos no ligados): En este caso, las plantas PR1, PR2, PR3 y PR5 presentan un rango de variación similar, con dispersiones entre el 7,88% y el 9,13%. El menor rango de variación se da en la planta PR4, que registra valores entre el 0,19% y el 10,59% y una dispersión del 4,15%.
- Otros materiales: Las plantas PR1, PR2 y PR3 muestran variaciones similares, con dispersiones entre el 1,2% y el 1,56%. El menor rango de variación se produce en la planta PR4, con valores entre el 0% y el 0,04% y una dispersión de apenas 0,02%. El mayor rango de variación se da en la planta PR5, que registra valores entre el 0% y el 6% y una dispersión del 2,42%.

Se observa coherencia entre los resultados obtenidos y los sistemas de producción de cada planta. Sistemas de acopio único que tratan el material sucio, por ejemplo, producen áridos reciclados con mayor variabilidad de elementos distintos, como plástico, metal y yeso, entre otros.

Los procedimientos de control de entrada, clasificación y pretratamiento pueden reducir el problema. Otra acción favorable es homogeneizar frecuentemente el acopio, mezclando el material de entrada antiguo con el nuevo.

En cualquier caso, es fundamental que una planta de reciclaje realice inspecciones de control de las características de sus productos a lo largo del tiempo. La inspección del material debe, como mínimo, realizarse siempre que la planta de reciclaje produzca áridos a partir de una nueva fuente de RCD, o identifique un cambio significativo, sea en la naturaleza del material de una misma fuente, sea en las condiciones de almacenamiento o tratamiento, que puedan afectar a las propiedades de los áridos.

6. Clasificación de los áridos reciclados – Propuesta GEAR

Uno de los objetivos básicos de la Guía ha sido desarrollar una clasificación de los áridos reciclados en España que permitiese homogeneizar los diferentes criterios existentes y adaptarlos a nuestro país. También se marcó como objetivo el que la Guía fuese práctica, clara e incorporase, en la medida de lo posible, criterios de calidad de los áridos reciclados.

Conocida, en definitiva, la diversidad de clasificaciones existente en los países de nuestro entorno, el objetivo era lograr una herramienta práctica que permitiera dar a conocer estos nuevos productos de forma eficiente y global.

La investigación llevada a cabo en el Proyecto GEAR ha permitido eliminar algunos prejuicios sobre los áridos reciclados y sus características y calidades. También ha permitido elaborar una clasificación basada en criterios empíricos y analíticos, que cumple con los objetivos marcados.

Sin embargo, también se han evidenciado las limitaciones de toda clasificación, y la necesidad de complementar el criterio de "composición" con otros requisitos de calidad más específicos:

- El porcentaje de "impurezas" (impropios), que da cuenta del nivel de limpieza del material reciclado.
- Los requisitos técnicos, y sus valores límite, que deben cumplirse para una aplicación determinada.

6.1 Antecedentes

El árido reciclado, según las normas europeas armonizadas establecidas por el Comité Europeo de Normalización (CEN), es "el árido resultante del tratamiento del material inorgánico previamente utilizado en construcción".

El material inorgánico citado se define como residuo de construcción y demolición y está generalmente compuesto por elementos de construcción, fabricación, demolición, reformas y reparaciones de:

- Pavimentación y de otras obras de infraestructura, incluidos los suelos provenientes de terraplenes;
- Edificaciones, incluyendo componentes cerámicos (ladrillos, bloques, tejas, placas de revestimiento etc.), mortero y hormigón;
- Piezas prefabricadas de hormigón (bloques, tubos, ladrillos, etc.).

Debido al carácter heterogéneo de este material, existen diversos criterios de clasificación de los áridos reciclados:

- Clasificación por composición: según este método, el árido reciclado se clasifica en función de rangos prestablecidos que delimitan la cantidad de los elementos, pétreos o no, que deben componer el material (material cerámico, de hormigón, asfáltico y otros). Este criterio de clasificación es bastante usual entre las normas europeas;
- Clasificación por granulometría: el árido reciclado se clasifica en función de rangos prestablecidos que delimitan el árido por tamaños máximos y mínimos del material. Generalmente se presenta asociado a otro criterio de clasificación;
- Clasificación por limpieza: el árido reciclado se clasifica en función de la limpieza del material. Ge-

neralmente, las categorías se definen en función de rangos prestablecidos que delimitan la cantidad de determinados elementos no pétreos que pueden estar presentes en el material;
- Clasificación por calidad: el árido reciclado se clasifica directamente en función de sus distintas propiedades técnicas. Las categorías se definen en función de la idoneidad técnica del material para una determinada utilización prevista;
- Clasificación por uso: según este método, para cada tipo de uso se establece una clasificación particular, bien sea por criterios de clasificación, de composición y/o de calidad.

Actualmente no existe un consenso general sobre los métodos de clasificación existentes. Cada país ha desarrollado categorías propias en función de sus necesidades particulares, con lo que, al final, pesan más los condicionantes territoriales que los aspectos técnicos. Cabe destacar que en las propuestas normativas existentes, se adopta más de un criterio de clasificación:

- Alemania: Las "Directrices para la Utilización Compatible con el Medio Ambiente de los Subproductos y Materiales de Construcción Reciclados en la Construcción de Carreteras y Caminos" (RuA-StB), edición de 2001, establecidas por la "Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen" (Sociedad de Investigación para las Carreteras y el Tráfico) y las "Oberste Straßenbauverwaltungen der Länder" (Administraciones Centrales para la Construcción de Carreteras y Caminos de los Estados Federados), clasifican los áridos reciclados por su calidad, en función de distintas posibilidades de aplicación. La utilización de la clasificación se permite únicamente a condición de que ya esté probada la idoneidad técnica del material de construcción para la utilización prevista;
- Suiza: La norma suiza 670062 Recycling - Allgemeines, registrada por la Asociación Suiza de Normalización y editada por la Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (Unión de los Profesionales Suizos de la Carretera) clasifica de modo general los áridos reciclados por su composición, indicando los criterios mínimos de calidad que cada categoría debe cumplir y las aplicaciones recomendadas. Los clasifica en general en: materiales bituminosos de demolición, materiales no bituminosos de demolición, hormigón de demolición y materiales mezclados de demolición;
- Holanda: La norma holandesa BRL 2506 (Directiva Nacional de Evaluación para la certificación de producto KOMO de áridos reciclados procedentes de RCD) clasifica los áridos reciclados por criterios generales de composición, limpieza y granulometría. Los clasifica en general en: áridos de hormigón, áridos de mezcla, áridos de mampostería, áridos de mezcla hidráulica, áridos 0/4 mm, arena cribada de machaqueo, áridos de asfalto y áridos de escombros. Además establece dos niveles para cada tipo, según la necesidad o no de aplicar medidas de aislamiento para que la estructura construida no supere valores de inmisión para componentes inorgánicos;
- Austria: La Directriz para Materiales de Construcción Reciclados publicada por la Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe ÖGSV (Asociación Austriaca de Protección de la Calidad de los Materiales Reciclados de Construcción) clasifica conjuntamente los áridos reciclados por composición, calidad y uso. La directriz propone cuatro designaciones a los materiales de construcción reciclados en función de su composición (áridos de asfalto triturado reciclado, áridos de hormigón triturado reciclado, áridos de mezcla de asfalto/hormigón triturada reciclada y áridos de mezcla de material triturado reciclado consistente en hormigón y/o asfalto y piedra natural). En paralelo, propone tres clases de uso, determinadas por criterios técnicos mínimos que deben ser cumplidos. Finalmente se establecen tres categorías de calidad, determinadas en función de la compatibilidad ambiental de uso del material en determinadas condiciones y ambiente;
- Portugal: El conjunto de normas portuguesas desarrollado por el MOPTC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) clasifica los áridos reciclados por uso, composición y calidad. Cada normativa se refiere a un ámbito de aplicación específico y, para cada una, se establecen clases específicas del material en función de su composición. Para cada clase se determinan posibilidades de aplicación dentro del ámbito propuesto y se establecen los criterios técnicos mínimos que deben ser cumplidos.

6.2 Método de clasificación propuesto

El objeto de la clasificación que se propone en el GEAR es conseguir un sistema general adecuado al mercado español, que pueda servir de referencia y proporcionar seguridad al mercado.

La estructura de clasificación propuesta y los rangos adoptados se han basado tanto en la experiencia europea como en los resultados presentados en el diagnóstico realizado. La clasificación GEAR determina categorías generales de áridos reciclados por composición, de carácter orientativo, que se aplican a todos los ámbitos de aplicación abarcados por la GEAR.

Para cada ámbito de aplicación, se determinan las clases de uso en función de la aplicación y las categorías de áridos reciclados más adecuadas para el uso en cada clase. Es decir, el que un determinado material se ajuste a una de las categorías propuestas por la GEAR indica los niveles de calidad y el potencial uso del material. En paralelo, cada recomendación técnica determina los criterios geométricos, físicos, químicos y ambientales que deben ser cumplidos por el árido reciclado en cada clase de uso.

En ese contexto, se observa que la propuesta GEAR clasifica los áridos en función tanto de criterios de composición, como de calidad y uso. Los criterios de granulometría y limpieza se determinan entre los criterios técnicos definidos para cada clase de uso.

Respecto a las categorías de árido reciclado propuestas, la GEAR parte de la premisa de que todo árido reciclado tiene composición mixta, con predominio de determinados elementos. Se considera que un árido reciclado tiene composición única cuando el elemento predominante comprende más del 95% del total del material producido.

La composición del árido reciclado se presenta inicialmente como el punto clave para determinar sus características y propiedades, así como su comportamiento o su respuesta a requerimientos:

- La principal diferencia entre los áridos reciclados de hormigón y los áridos naturales se refiere a la capa adherida de mortero que los primeros suelen presentar. Estas diferencias pueden implicar menor densidad, mayor absorción y mayor coeficiente Los Ángeles, entre otros.
- Las propiedades de los áridos reciclados cerámicos, por su parte, están determinadas por las características de su matriz cerámica. Debido a las características de la matriz cerámica, los áridos cerámicos suelen presentar baja densidad, alta porosidad y absorción de agua, además de un alto coeficiente de desgaste Los Ángeles. Sus características permiten establecer un cierto paralelismo con el árido ligero.
- La relevante presencia de áridos pétreos, por otro lado, influye en la mejora de las propiedades del árido reciclado, ya que agrega al material un porcentaje importante de áridos con características de árido natural.

Igualmente, se asume que el carácter heterogéneo del árido reciclado puede ser reducido significativamente al definirse las categorías por sus contenidos máximos y mínimos de los elementos que componen el material.

Esta clasificación refleja los tipos de productos reciclados que se producen en España, es útil para el fabricante, muy práctica y clara para el consumidor, y suficientemente simple para facilitar el conocimiento y la divulgación de estos relativamente "nuevos" productos.

Las clasificaciones utilizadas en otros países no son siempre coincidentes y dependen en buena medida de condicionantes internos de cada territorio. Mientras unos tienden a priorizar la composición, otros se orientan más a los orígenes -o el destino- del material. Sin embargo, la mayoría de ellos coinciden en establecer una categoría de áridos reciclados de hormigón (con diferentes requisitos), más una, dos o tres categorías de distintas mezclas.

Fundamento empírico y analítico.

Las normativas de Alemania (DIN 4223) y Portugal (LNEC 474) establecen una clasificación a partir de la composición, que han servido de base para la propuesta de clasificación española. Las prácticas de gestión de RCD en España provocan que la gran mayoría de la producción de áridos reciclados tengan una composición mixta, con diferentes contenidos de hormigón, piedra, albañilería y asfalto.



Figura 6.1. Composición áridos reciclados.

La clasificación que se presenta se basa en el estudio de los resultados analíticos de las muestras presentadas en el Proyecto GEAR: 230 muestras representativas que han incorporado el ensayo de clasificación (EN-933:11 Ensayo de Clasificación de Constituyentes), procedentes de 73 plantas de reciclaje en todo el territorio español.

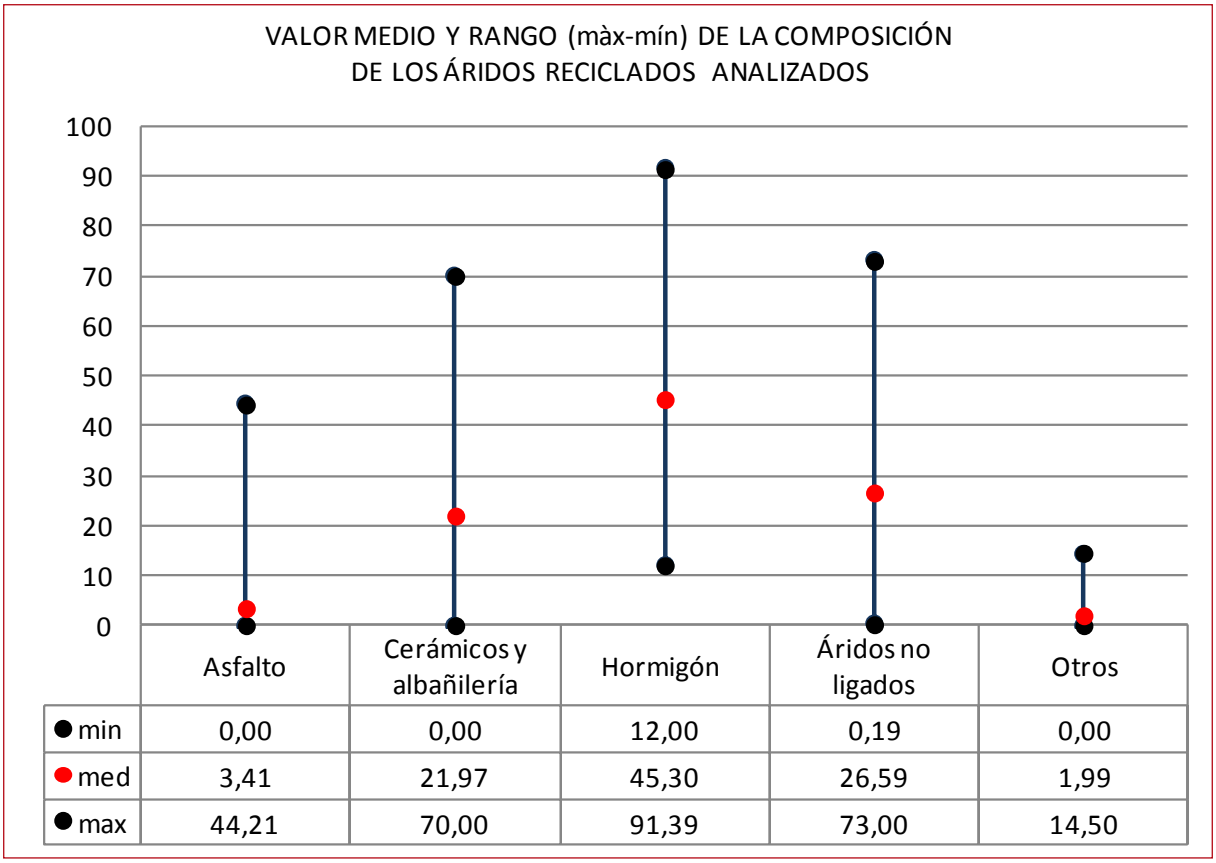
La explotación estadística de las especificaciones técnicas de las muestras analizadas, correlacionadas con la variable de composición, no ha permitido establecer más que grandes categorías de áridos reciclados, limitar sus calidades y, consecuentemente, sus campos de aplicación. Sin embargo, la composición es un criterio insuficiente para determinar por sí misma la calidad del árido reciclado.

Componentes de los áridos reciclados

La caracterización de los áridos reciclados realizada en la etapa de diagnóstico del Proyecto GEAR ha revelado el predominio de los áridos mixtos en la producción de las plantas de reciclado. Se trata de un resultado esperado dada el bajo nivel de separación en origen que se produce en España. Sin embargo, el porcentaje de reciclados de hormigón que se comercializan es superior a la producción. Ello se debe a un "abandono" de los áridos reciclados mixtos en usos de nulo valor añadido (restauración, rellenos, etc).

De la composición media sorprende un porcentaje de áridos no ligados (pétreos naturales) muy elevado, con una media superior al 25% en peso. Este factor no es comparable a ningún otro país de nuestro entorno, y tiende a mejorar la calidad de los áridos reciclados.

En cambio, los materiales cerámicos y de albañilería apenas alcanzan un contenido medio en peso del 20%, con máximos que no superan el 70%. La presencia de la fracción cerámica es siempre inferior a lo que se percibe (el típico color rojizo del material magnifica su presencia).



	Asfalto	Cerámicos y albañilería	Hormigón	Áridos no ligados	Otros
● min	0,00	0,00	12,00	0,19	0,00
● med	3,41	21,97	45,30	26,59	1,99
● max	44,21	70,00	91,39	73,00	14,50

Tabla 6.1. Composición media, mínima y máxima de los áridos reciclados.

Los materiales o fracciones que componen el árido reciclado se pueden agrupar en cinco fracciones, con comportamientos y características similares o análogas:

- Hormigón y mortero: propiedades similares a las del hormigón natural, aunque su densidad es menor y mayor su absorción. El mortero adherido penaliza los resultados del ensayo Los Ángeles, y el cemento libre contenido incrementa las propiedades autofraguantes.
- Piedra natural: propiedades en función de su clase, en general aporta mayor densidad y resistencia y menor absorción a los áridos reciclados.
- Material cerámico, albañilería y obra de fábrica: aporta menor densidad y mayor absorción a la mezcla, incrementa sus propiedades drenantes y reduce la resistencia en usos ligados.
- Asfalto y mezclas bituminosas: aporta resistencia en las capas granulares pero reduce la resistencia en los hormigones.
- Impropios: otros materiales que pueden aparecer como elementos que "ensucian" el producto (plásticos, madera, papel, textil, metales, vidrio, etc), por insuficiencia de los sistemas de limpieza y separación. Sus efectos sobre el comportamiento del material depende en cada caso.

Categorías de áridos reciclados

La clasificación en base a la composición está formada por cuatro tipos o categorías de áridos reciclados:

- Categoría ARH: Áridos Reciclados de Hormigón: el contenido de hormigón y piedra natural (sin mortero adherido) es del 90% o más en peso. Se suma el contenido de hormigón al de piedra natural, por considerar que tienen un comportamiento asimilable.
- Categoría ARMh: Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón: el contenido de hormigón y piedra es menor al 90% y el de material cerámico no alcanza el 30%.
- Categoría ARMc: Áridos Reciclados Mixtos Cerámicos: el contenido de material cerámico supera el 30%.
- Categoría ARC: Áridos Reciclados Cerámicos: el contenido de material cerámico supera el 70%.
- Habría que incluir aquí los AR con asfalto.

Esta clasificación debe completarse con la determinación del contenido de los otros dos tipos de fracciones en la mezcla, dado que su exceso determina la pérdida de la consideración de árido reciclado:

- Contenido de Asfalto: Áridos Reciclados con Asfalto: cuando el árido reciclado contiene entre un 5% y un 30% de materiales bituminosos, más del 30% se considera Mezcla Bituminosa.
- Contenido de “impropios”: se considera que con más de un 1% en peso de “impropios”, no puede definirse como árido reciclado, y debe definirse como “Material Inerte”.

Por lo tanto, no tienen la consideración de áridos reciclados los siguientes materiales que, sin embargo, pueden tener otros usos adecuados a sus características técnicas específicas:

Mezclas bituminosas (MB): aquellos materiales inorgánicos previamente utilizados en la construcción con un contenido de mezclas bituminosas superior al 30% en peso.

Nomenclatura	Nombre	Características
ARH	Áridos Reciclados de Hormigón	P + H > 90% C < 10% A < 5% X< 1%
ARMh	Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón	P + H > 70% C < 30% A < 5% X< 1%
ARC ARMc	Áridos Reciclados de Cerámicos Áridos Reciclados Mixtos de Cerámicos	P + H < 30%C < 30% A < 5% X< 1% C > 70% A < 5% X< 1%
ARC ARMc	Áridos Reciclados de Cerámicos Áridos reciclados Mixto Cerámico	P + H < 70% C < 70% A < 5% X< 1%C > 30% A < 5% X< 1%
ARMa	Áridos Reciclados mixto con asfalto	5% < A < 30% X< 1%

Tabla 6.2. Categorías de los áridos reciclados según composición del material.

Consideraciones finales

La composición y la categoría no establecen directamente la adecuación del árido a un uso determinado. Deberán ser el cumplimiento de los requisitos técnicos exigidos para cada uso determinado los que determinan finalmente su adecuación a ese uso. La calidad técnica del material, independiente de su composición, es el elemento que determina la viabilidad de uso del material en una aplicación.

La mayoría de áridos reciclados producidos en España son de carácter mixto, tanto los que predomina el hormigón (más piedra natural), como los que predomina el material de albañilería. La categoría de Áridos Reciclados de Hormigón (ARH) representan menos del 15% de la producción, y los Áridos Reciclados Cerámicos (ARC, con más del 70% de material cerámico) tienen casi exclusivamente origen industrial.

También el Proyecto GEAR ha detectado un porcentaje significativo de muestras que contienen entre el 5% y el 30% de asfalto. La importancia de detectar esta "propiedad" se debe al efecto dañino del asfalto sobre los materiales con cemento, y en particular sobre la cohesión en los hormigones. Esta categoría debe ser descartada para usos ligados, en cambio suele ser un material excelente para aplicar en las capas de firmes. Un parámetro crítico de estos materiales es el contenido de materia orgánica, derivado de los COV que contiene el asfalto.

Por encima del 30% de contenido de asfalto, estos materiales adquieren el carácter de mezcla bituminosa, lo que comporta un campo de tratamiento y aplicación distinta de los áridos reciclados.

En cambio, el material cerámico y de albañilería es una fracción "constituyente" del árido reciclado. En ningún caso se debe considerar como un elemento "contaminante" del producto. Aporta una serie de propiedades al árido reciclado que le son características (menor densidad y mayor capacidad de drenaje) y establece relaciones específicas en el material aplicado (hidratado, compactado y/o fraguado).

6.3 Características de los áridos reciclados por clasificación

En este apartado se presentan los resultados de la campaña experimental realizada con los áridos reciclados españoles sometidos a la caracterización, en función de la nueva propuesta de clasificación de áridos reciclados adoptada.

Cabe resaltar que cerca del 9,71% de las muestras analizadas en el diagnóstico no han sido consideradas en el nuevo análisis, por no cumplir las condiciones exigidas para ninguna de las categorías. La causa radica en que el contenido de otros elementos es superior al 5% (figura 6.2), excepto para una de las muestras donde el problema fue el contenido de asfalto que era superior al 30%.

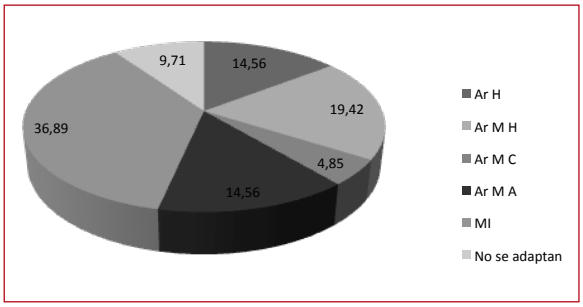


Figura 6.2. Cantidad (%) de muestras de áridos reciclados analizadas en función de las categorías propuestas por la GEAR.

6.3.1. Propiedades geométricas

Granulometría

Las figuras 6.3 a 6.7 presentan la media y los rangos (valores máximo y mínimo) de los resultados de granulometría obtenidos para los áridos analizados en el proyecto, distribuidos según las categorías propuestas (ARH, ARMh, ARMc, ARMa y MI).

Se observa que los áridos reciclados ARH presentan la curva granulométrica media más uniforme de todas las categorías presentadas.

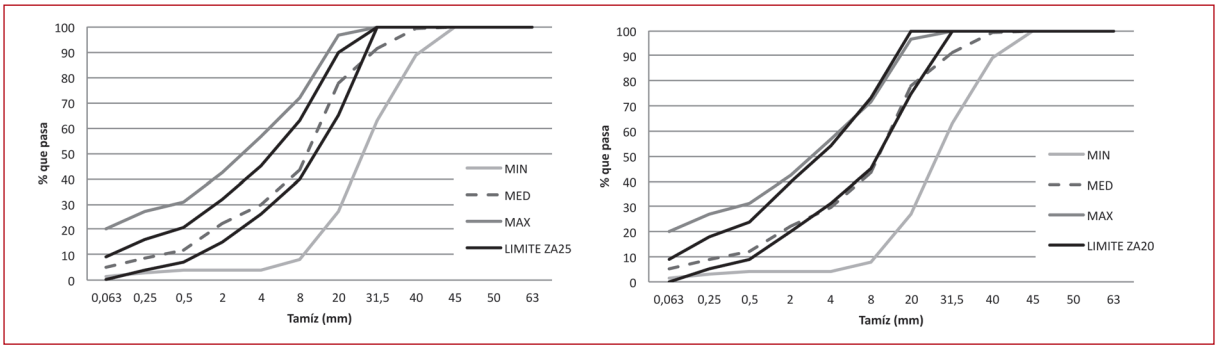


Figura 6.3. Media y valores máximos y mínimos de la granulometría de los áridos reciclados clasificados como ARH.

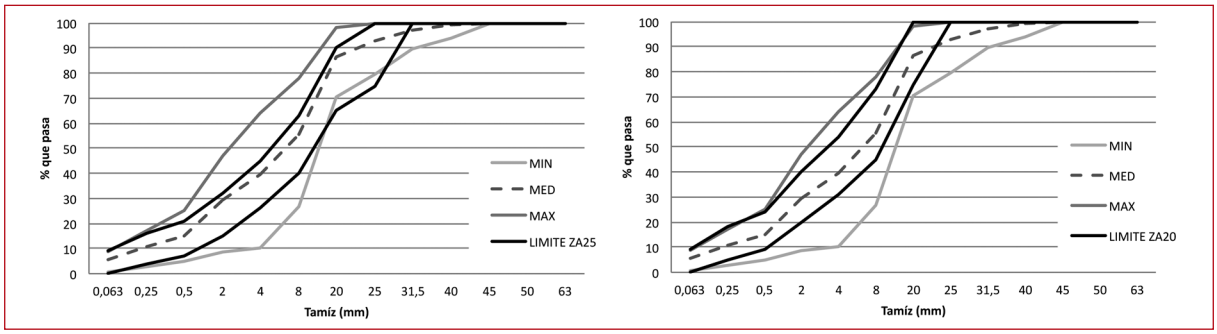


Figura 6.4. Media y valores máximos y mínimos de la granulometría de los áridos reciclados clasificados como ARMh.

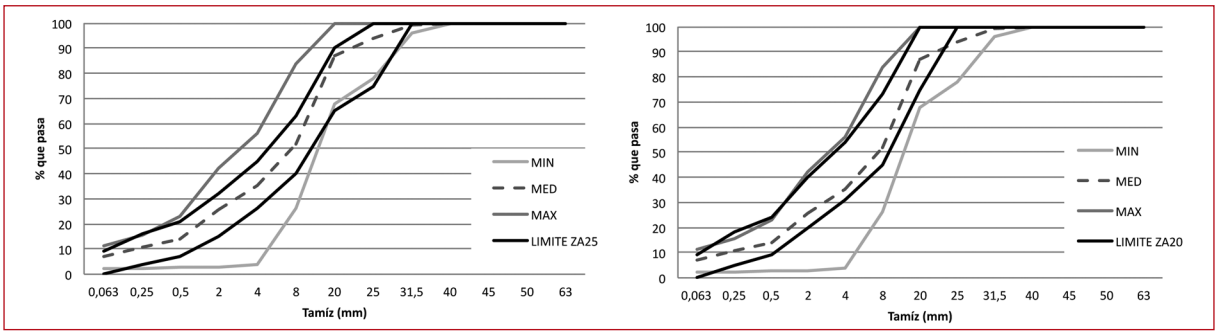


Figura 6.5 Media y valores máximos y mínimos de la granulometría de los áridos reciclados clasificados como ARMc.

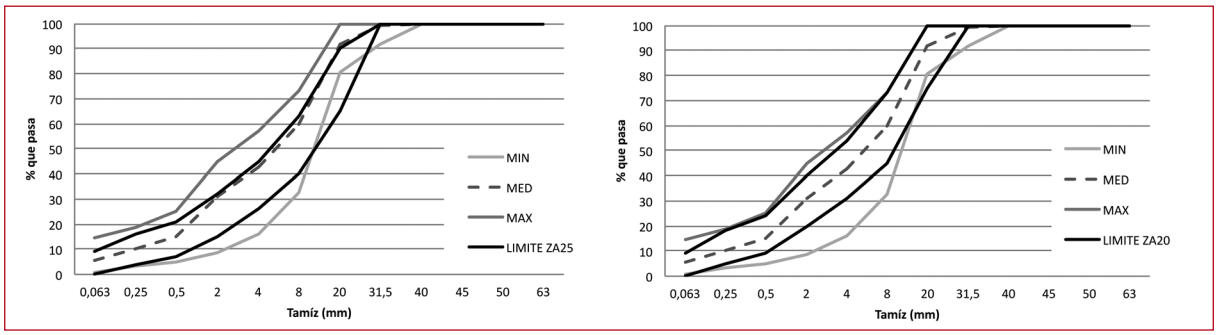


Figura 6.6 Media y valores máximos y mínimos de la granulometría de los áridos reciclados clasificados como ARMa.

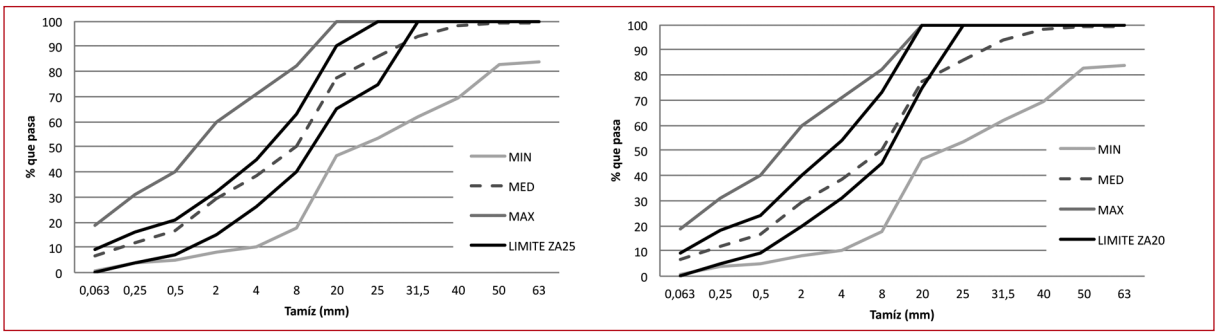


Figura 6.7. Media y valores máximos y mínimos de la granulometría de los áridos reciclados clasificados como MI.

De acuerdo con las curvas granulométricas anteriores, todos los áridos reciclados analizados presentan valores medios similares de contenido de finos (figura 6.8).

Los valores más altos para el contenido de finos se han obtenido para muestras de la categoría MI, a excepción de alguna muestra de ARH. Como esta característica está relacionada principalmente con el modo de producción del árido y no con su composición, se asume que las plantas con sistemas de producción menos complejos son más susceptibles de producir material de la categoría MI

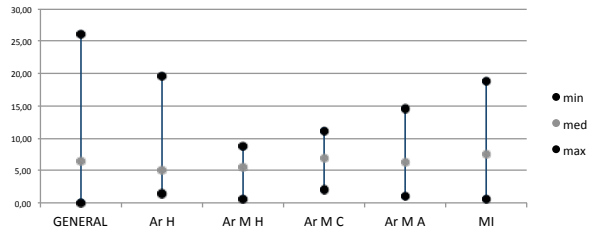


Figura 6.8. Media y valores máximos y mínimos del contenido de finos (%) en cada categoría.

La mayor parte de las muestras estudiadas han presentado un contenido de finos (material que pasa por el tamiz 0,063 mm) no superior a 10%, para todas las categorías de clasificación analizadas (figura 6.9). Los áridos clasificados como ARH son los que, en general, presentan menos finos. Para esta categoría se ha identificado un 7% de muestras que han presentado una cantidad de finos relevante (entre 15 y 20%), comportamiento considerado no generalizado.

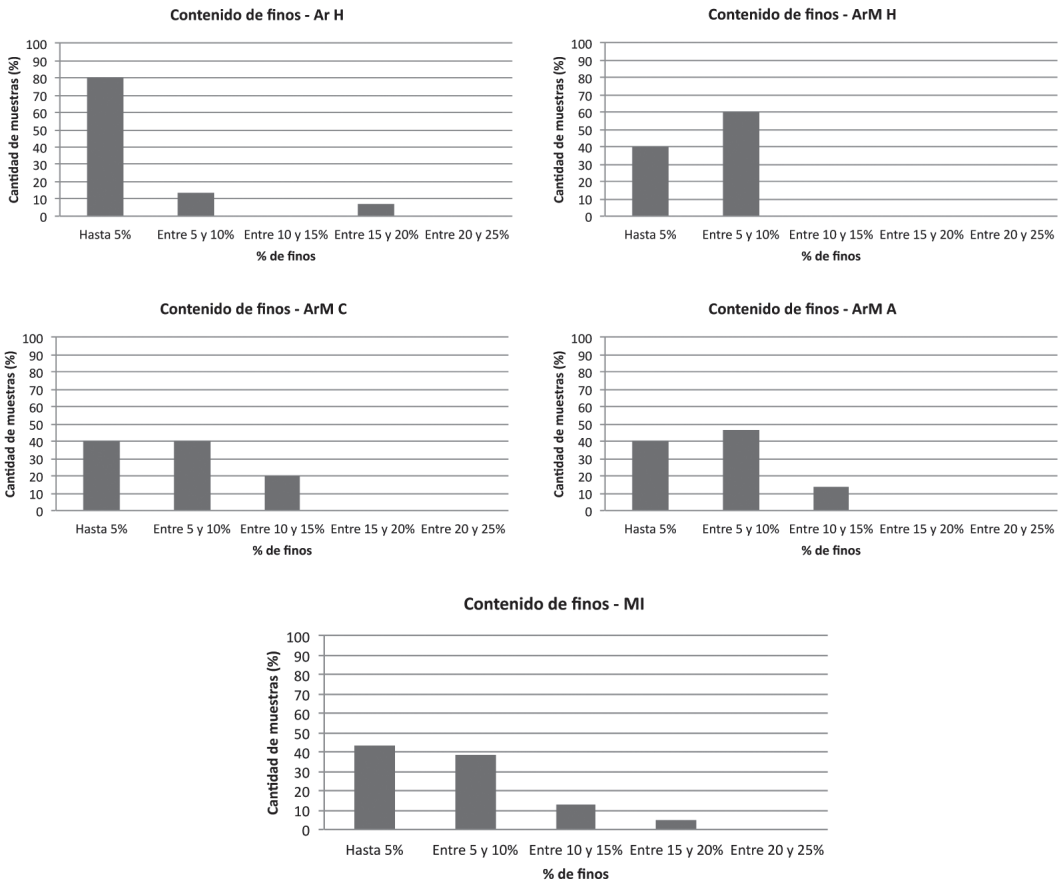


Figura 6.9. Cantidad de muestras y contenido de finos en cada categoría.

Forma

La figura 6.10 presenta la media y los valores máximo y mínimo del índice de lajas medido para los áridos analizados en el proyecto, tanto de modo general, considerando todos los resultados obtenidos, como por cada categoría de clasificación propuesta, considerando solo las muestras incluidas en cada una de ellas.

Los áridos reciclados ARMc presentan el índice medio más alto de entre las cinco categorías presentadas. Se confirma el crecimiento de los valores medidos a medida que el árido analizado presenta menos áridos reciclados pétreos y de hormigón y más áridos cerámicos.

También se observa que los valores más altos de índice de lajas identificados en las muestras anali-

zadas se presentan entre las muestras no incluidas en ninguna de las categorías propuestas (presentadas en el gráfico bajo el epígrafe GENERAL). En cualquier caso, casi todas las muestras analizadas, clasificadas o no, han presentado valores de índice de lajas inferiores al 35%. solo una muestra, no incluida en ninguna de las categorías propuestas por la GEAR, ha presentado un valor superior al exigido por el PG3.

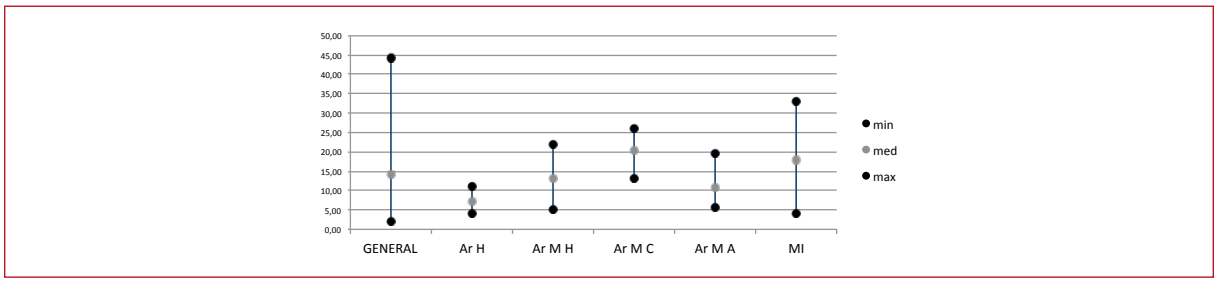


Figura 6.10. Media y valores máximos y mínimos del índice de lajas (%) para cada categoría.

6.3.2. Propiedades físicas

Composición

La figura 6.11 indica la media y los valores máximo y mínimo de los materiales que componen los áridos reciclados analizados, tanto de modo general, considerando todos los resultados obtenidos, como por cada categoría de clasificación propuesta, considerando solo las muestras incluidas en cada una de ellas.

A partir del análisis de estos gráficos, se observa que:

- La categoría ARH es bastante restrictiva. Los materiales pétreos y de hormigón aparecen en porcentajes elevados (valor medio del 95%). El valor medio del contenido de materiales cerámicos y de albañilería y de materiales asfálticos es bajo (2,52% y 1,57%, respectivamente);
- La categoría ARMh presenta un rango más amplio en la presencia de materiales cerámicos. Sin embargo, la media del contenido de materiales cerámicos y de albañilería es tan solo del 18,15%. Los elementos pétreos y de hormigón alcanzan un valor medio del 79,15%, que los materiales asfálticos se reducen al 1,77 %;
- La categoría ARMc permite un contenido importante de material cerámico, que de acuerdo con la clasificación debe ser superior al 30%. Al analizar las muestras de árido reciclado clasificado en esta categoría, se observa que el rango de variación de los materiales cerámicos es bajo (del 32% al 60,3%) y, en consecuencia, la media es del 43,84%. En contrapartida, la media del contenido de materiales pétreos y de hormigón alcanza el 50,30%, comprobándose que estos áridos deben tratarse como mixtos ya que no tienen predominio de material cerámico. Los elementos asfálticos se presentan con una media de solo el 2,52%;
- La categoría ARMa permite un contenido importante de asfalto (de acuerdo con la clasificación, debe presentarse en un rango de entre el 5% y el 30%. Al analizar las muestras de árido reciclado así clasificado, se observa que el rango de variación es bajo (entre el 5,5% y el 15% de elementos asfálticos), con una media inferior al 10% (solo del 9,20%). Por otro lado, el rango de contenido de materiales pétreos y de hormigón es bastante amplio y tiene un valor medio del 74,78%. El contenido de materiales cerámicos también es amplio, pero el valor medio se reduce al 15,75%.

A través del análisis de este gráfico se observa que el principal motivo por el que las muestras analizadas no se adaptan a las categorías ARH, ARMh, ARMc y ARMa es el contenido de otros elementos, que aparecen en porcentajes superiores al 1% delimitado por la clasificación.

La categoría MI permite un contenido importante de otros materiales (plástico, vidrio y madera, entre otros), que de acuerdo con la clasificación debe situarse en un rango de entre el 1% y el 5%. Al analizar las muestras clasificadas en esta categoría, se observa que el contenido medio de otros materiales es de solo el 2,56%. Además, el contenido medio de materiales pétreos y de hormigón alcanza el 65,06%, mientras que los materiales cerámicos suponen una media del 28,49%.

La mayor parte (cerca del 71%) de las muestras clasificadas como material inerte presenta contenidos menores al 3% de otros materiales. En este sentido, puede afirmarse que el uso y/o mejora de los sistemas de clasificación y separación en entrada, precribado y limpieza en las plantas que han producido estas muestras puede contribuir a reducir este problema, logrando que el material inerte producido pueda adaptarse a los límites impuestos por las categorías ARH, ARMh, ARMc y ARMa.

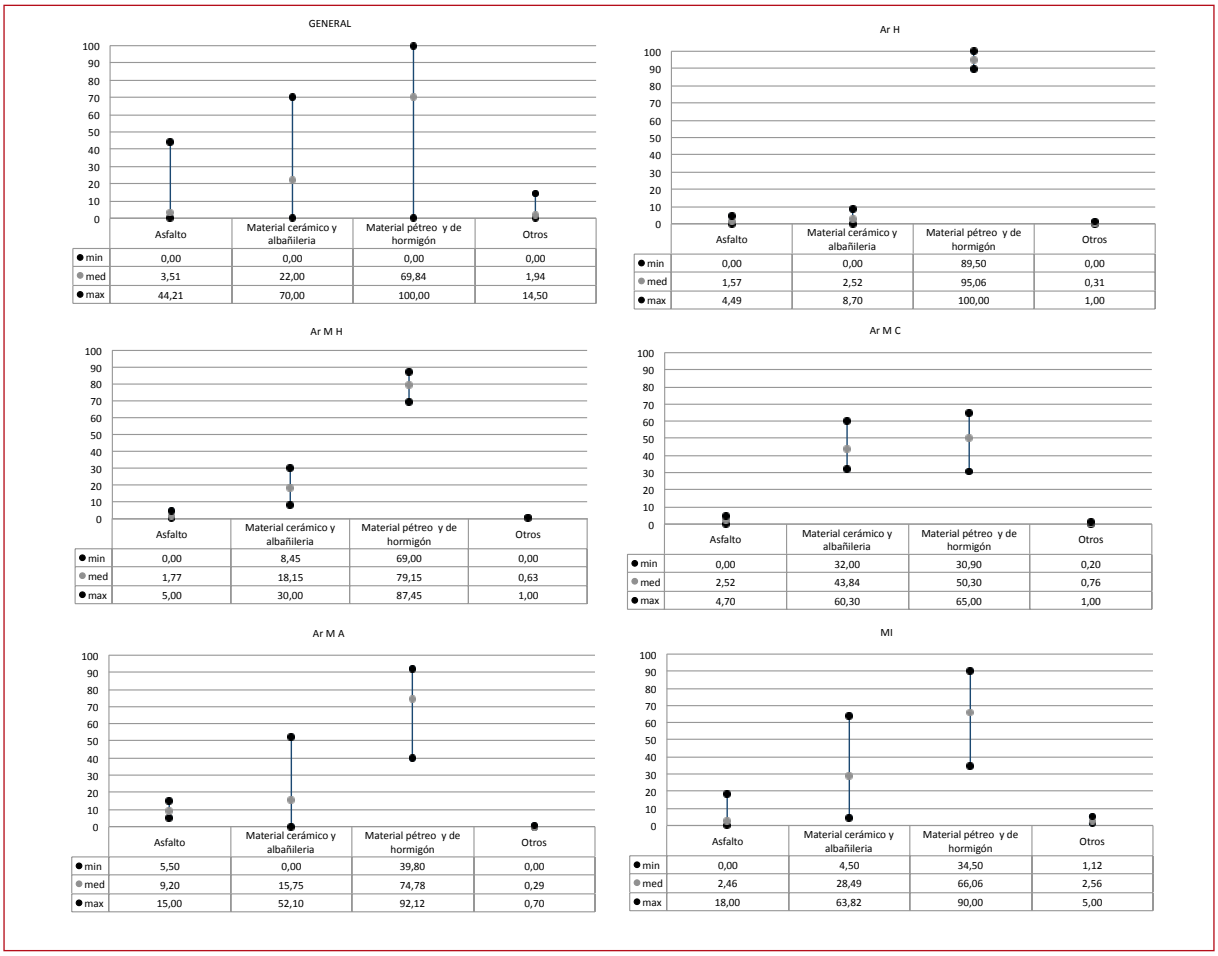


Figura 6.11. Media y valores máximos y mínimos de los componentes de los áridos reciclados para cada categoría (%).

Absorción / densidad

La figura 6.12 presenta la media y los valores máximo y mínimo de los resultados de absorción y densidad medidos en las muestras analizadas por el Proyecto GEAR. Los resultados se presentan de modo general y según las categorías propuestas (ARH, ARMh, ARMc, ARMa y MI).

Se percibe que la categoría ARMc presenta el rango menor recorrido y el menor valor medio de densidad. Los áridos clasificados como ARH y ARMh presentan variaciones similares. Además, los áridos clasificados como ARH, ARMh y ARMa presentan los valores de densidad media más altos en relación directa con el contenido de elementos pétreos y de hormigón que presentan. Los valores más bajos se identifican en las muestras clasificadas como material inerte.

En cuanto a la absorción, se observa que los valores más altos están entre las muestras clasificadas como inertes. Por otro lado, el mayor valor medio de absorción corresponde a las muestras clasificadas como ARMc, mientras que los menores valores medios se dan en las muestras clasificadas como ARMh y ARMa.

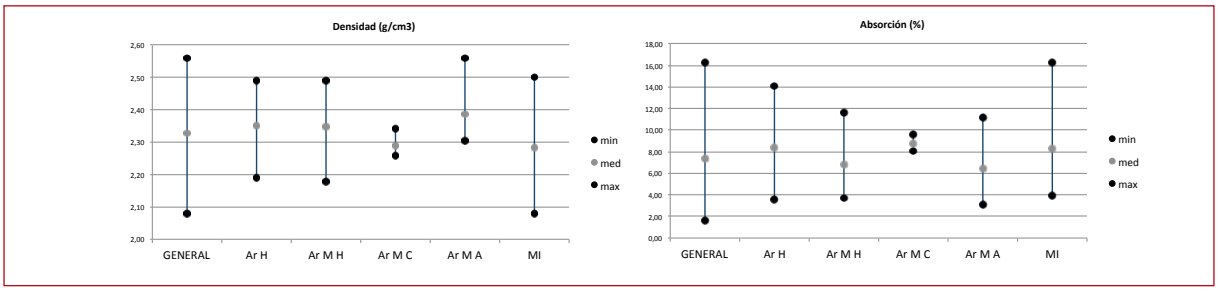


Figura 6.12. Media y valores máximos y mínimos de absorción (%) y densidad (g/cm³) para cada categoría.

Resistencia a la fragmentación

Según la figura 6.13, las muestras con mayor contenido de materiales de hormigón (ARH, ARMh y ARMa) presentan un rango de recorrido más amplio que el acotado para las muestras clasificadas como ARMc. Este comportamiento variable ocurre dado que durante el ensayo parte del mortero adherido al árido reciclado de hormigón, en función de la calidad del mortero, puede desprenderse. El árido reciclado cerámico también puede influir puntualmente en esta característica, debido a la fragilidad de algunos tipos de materiales cerámicos.

Por otro lado, para las muestras clasificadas como árido reciclado, los valores medios son similares para las cuatro categorías (cerca del 33%). Los valores del coeficiente Los Ángeles varían entre el 25% y el 40%, por lo que todas las muestras clasificadas como árido reciclado (ARH, ARMh ARMc y ARMa), presentan valores por debajo del 40% y, por lo tanto, cumplen las exigencias del PG3 para usos en carreteras, hormigón compactado con rodillo, explanadas y rellenos.

Para las muestras clasificadas como material inerte, se observa un mayor rango de variación en comparación con las demás categorías de la clasificación GEAR. Aunque algunas muestras hayan presentado bajos valores de coeficiente Los Ángeles, llegando a medirse valores del 18,90%, el valor medio de ese coeficiente es el mayor entre las categorías propuestas (38,9%). Así, se asume que los materiales clasificados como inertes pueden presentar buenos valores de coeficiente Los Ángeles, pero este comportamiento no necesariamente es una constante.

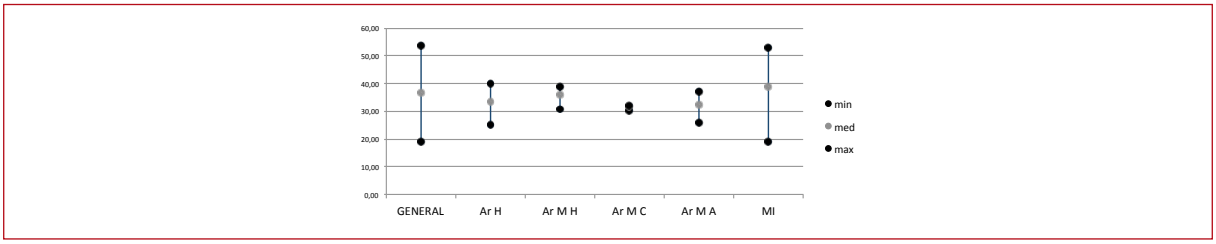


Figura 6.13. Media y rangos máximos y mínimos del coeficiente Los Ángeles (%) por clasificación propuesta.

Plasticidad

Todos las muestras, clasificadas o no, se han presentado como no plásticas. Este parámetro es una característica constante entre los áridos reciclados y los materiales inertes españoles.

Calidad de finos

A partir de la figura 6.14 se observa que:

- Los valores medios de equivalente de arena calculados para las muestras clasificadas como ARH, ARMh y ARMc son similares, confirmando que no existe relación entre este parámetro y la composición de las muestras analizadas.
- El valor medio más alto se presenta en las muestras clasificadas como ARMa, aunque el rango de variación es similar al mostrado por las categorías ARMh y ARMc.
- La mayor parte de las muestras analizadas que han presentado valores de equivalente de arena inferiores al 25% corresponden a la categoría de material inerte, aunque se identifican algunas muestras clasificadas como ARH con equivalentes de arena de entre el 20% y el 25%.

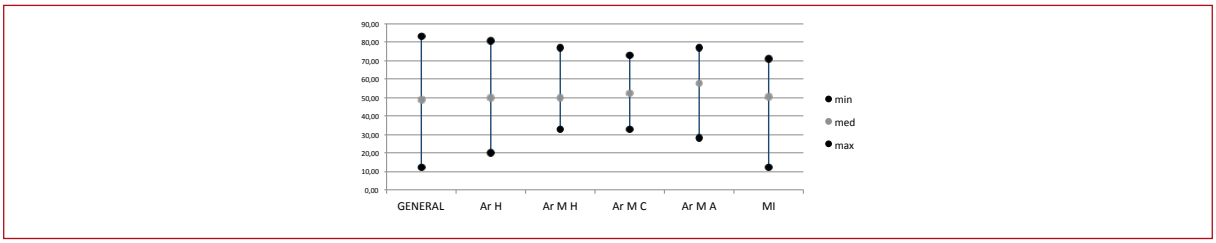


Figura 6.14. Media y valores máximos y mínimos del equivalente de arena (%) para cada categoría.

Limpieza

Al analizarse la figura 6.15, se observa que los áridos con clasificación ARMc han presentado valores medio, máximo y mínimo mayores que los áridos clasificados como ARH, ARMh y ARMa. De hecho, todas las muestras clasificadas como ARMc han presentado coeficientes de limpieza superiores al 2%.

Se asume que los áridos reciclados con gran contenido de material cerámico suelen tener su origen vinculado a residuos de construcción y demolición más sucios y sin sistemas de limpieza eficientes.

Por otra parte, los valores más altos se han identificado entre las muestras clasificadas como material inerte (MI). Se asume que buena parte del material clasificado como inerte probablemente se produce en plantas sin sistemas de limpieza adecuados.

En cualquier caso, todas las categorías, con excepción de la categoría ARMh, han presentado muestras con coeficientes de limpieza superiores al 2%, lo que indica que este parámetro no está vinculado a su composición y es un problema común entre las plantas de reciclaje españolas. Tal observación es un reflejo tanto de la suciedad de los residuos utilizados como materia prima de las muestras como de los métodos de producción adoptados.

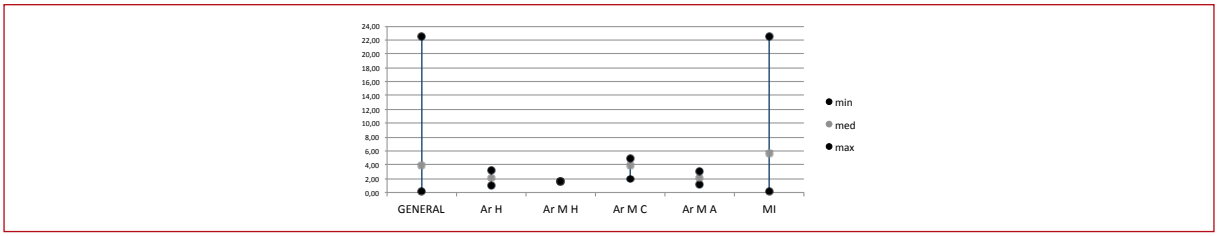


Figura 6.15. Media y valores máximos y mínimos del coeficiente de limpieza (%) para cada categoría.

6.4 Propiedades químicas

Contaminantes orgánicos

Solo los áridos reciclados clasificados como ARMc y ARMa han presentado un contenido de contaminantes orgánicos superior al 2%. Los valores medio han sido del 1,96% y 3,5%, respectivamente (figura 6.16). Por otra parte, los áridos clasificados como ARH y ARMh y MI no han presentado contenido de humus relevante.

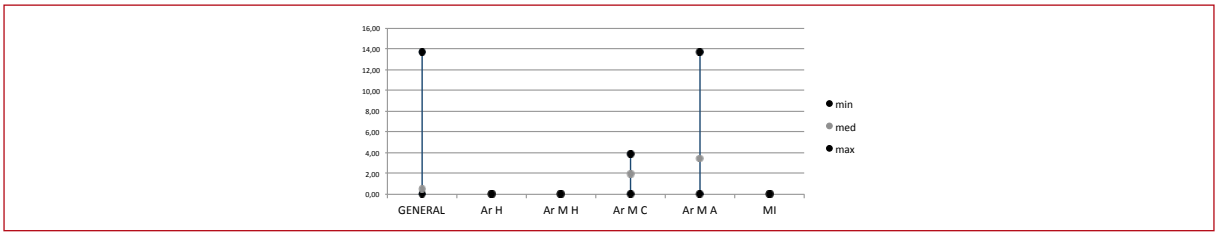


Figura 6.16. Media y valores máximos y mínimos del contenido de contaminantes orgánicos (%) para cada categoría.

Sales

Al analizarse la figura 6.17 se pueden realizar comentarios similares a los realizados para cada categoría en el estudio del coeficiente de limpieza.

Se observa que los áridos con clasificación ARMc han presentado valores medio, máximo y mínimo mayores que los áridos clasificados como ARH, ARMh y ARMa. La mayor parte de las muestras clasificadas como ARMc reflejan un contenido de sales superior al 1%.

Por otra parte, los valores más altos de este parámetro se identifican entre las muestras clasificadas como material inerte (MI).

Se supone, una vez más, que:

- Los áridos reciclados con gran contenido de material cerámico suelen tener su origen vinculado a residuos de construcción y demolición más sucios y sin sistemas de limpieza eficientes.
- Buena parte del material clasificado como inerte probablemente se produce a partir de plantas sin sistemas de limpieza adecuados.

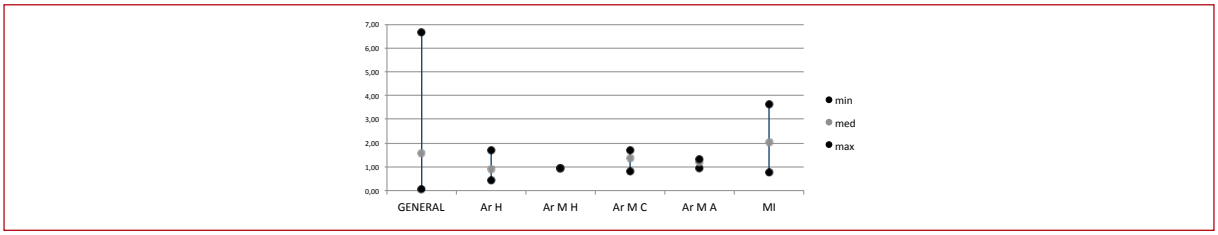


Figura 6.17. Media y valores máximos y mínimos de sales solubles (%) para cada categoría.

Se asume que el contenido de sales de un árido reciclado no está vinculado a su composición, y es un problema común entre las plantas de reciclaje españolas ya que todas las categorías, con excepción de la ARMh, contienen muestras con valores superiores al 1%.

Como se ha apuntado para el coeficiente de limpieza, esta observación da cuenta, por una parte, de la suciedad de los residuos que dan lugar a las muestras y, por otra, de los métodos de producción asociados.

Cabe destacar que solo el 39 % del total de las muestras de áridos reciclados analizadas durante la campaña experimental realizada por el Proyecto GEAR presentan un contenido de sales inferior al 1%. Al considerarse solo las muestras que se adaptan a la clasificación propuesta para la GEAR, se verifica que el porcentaje de cumplimiento de esta exigencia aumenta hasta cerca del 55%.

Azufre

Como en los análisis anteriores, los resultados de contenido de azufre se analizan de modo general y para cada una de las categorías propuestas: ARH, ARMh, ARMc, ARMa y MI (figura 6.18).

La categoría ARH presenta el menor rango de variación y el menor valor medio de contenido de azufre. Los áridos clasificados como ARMc y ARMa presentan un contenido medio porcentual de azufre similar a los áridos clasificados como ARH, y rangos de variación algo más amplios. Por otra parte, los áridos con clasificación ARMh y MI exhiben una variación importante y valores medios altos y similares.

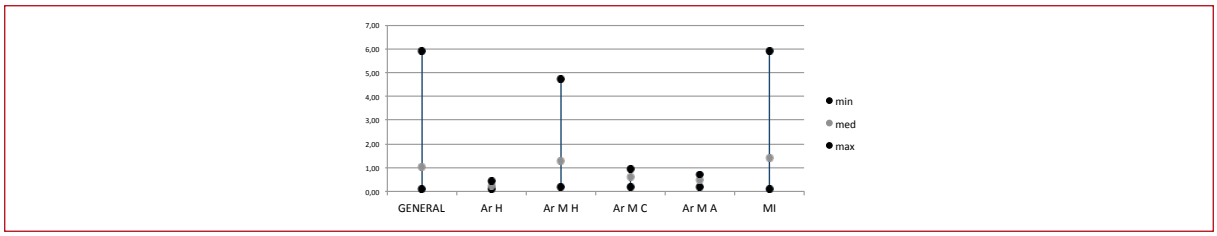


Figura 6.18. Media y valores máximos y mínimos de contenido de azufre (%) para cada categoría.

Las observaciones hechas para los áridos clasificados como ARMh pueden atribuirse a valores puntuales de algunas muestras, más elevados de lo normal en la época del año en que se realizaron los ensayos. La figura 5.52, presentada en el capítulo 5 de este documento, confirma esta observación. En ella se presentaba un gráfico que relacionaba el contenido de azufre con el porcentaje de material cerámico de las muestras clasificadas. Los valores mayores son puntuales y se encuentran entre los áridos que presentan contenido de elementos cerámicos de entre el 10% y el 30%, requisito establecido para la categoría ARMh.

Sulfatos solubles en agua y en ácido

Según la figura 6.19, de modo general puede afirmarse que el contenido medio de sulfatos en todas las categorías aumenta cuando el proceso de análisis se realiza en ácido. Este método de análisis permite identificar mejor la presencia de tales contaminantes.

En cuanto a los resultados de sulfatos solubles en agua, la categoría ARMc presenta el rango con menor recorrido. Tanto la categoría ARH como la ARMc exhiben los valores medios más bajos.

En los áridos clasificados como ARMh y ARMa, los rangos de variación son similares aunque algo más amplios. El contenido medio de sulfatos solubles en agua para los áridos ARMh, sin embargo, es inferior al calculado en los áridos ARMa.

Finalmente, se observa que el mayor rango de variación y el mayor valor medio corresponden a las muestras clasificadas como material inerte.

La mayor parte de las muestras que reflejan un contenido de sulfatos solubles en agua superior al 1% corresponden a la categoría de material inerte. Las muestras que superan tal límite enmarcadas en las categorías ARMh y ARMa se consideran resultados puntuales.

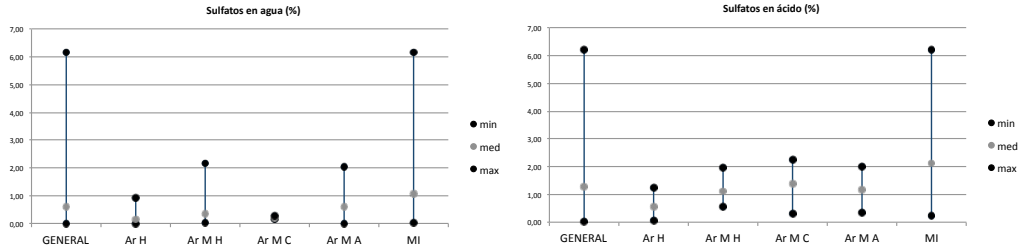


Figura 6.19. Media y valores máximos y mínimos de sulfatos solubles en agua (%) y en ácido (%) para cada categoría.

Para el contenido de sulfatos solubles en ácido se observa que los valores medios y los recorridos de los rangos de las categorías ARH, ARMh ARMc y ARMa son mayores que los análogos de sulfatos solubles en agua.

Se destaca en este apartado el alto valor presentado por la categoría ARMc, cuyo valor medio de sulfatos solubles en ácido es aproximadamente 8 veces el valor medio de sulfatos en agua. Se cree que este incremento se debe, en gran parte, a la significativa presencia de elementos cerámicos, que pueden aportar sulfatos procedentes de las arcillas originales que provocan eflorescencia.

Por lo general, los áridos de la categoría ARH presentan el menor valor medio y el menor rango de variación que los de las categorías ARMh, ARMc y ARMa.

El comportamiento de los áridos clasificados como material inerte se mantiene. Esta categoría presenta el mayor rango de variación y el mayor valor medio identificados entre los resultados de sulfatos solubles en ácido.

Finalmente, la mayor parte de las muestras cuyo contenido de sulfatos solubles en ácido supera el 1% pertenecen a la categoría de material inerte.

Yeso

La figura 6.20 presenta la media y los valores máximo y mínimo establecidos para el contenido de yeso de las muestras analizadas por el Proyecto GEAR. Los resultados se analizan de modo general y para cada una de las categorías propuestas (ARH, ARMh, ARMc, ARMa y MI).

Los resultados muestran gran coherencia con los aportados en el apartado anterior. Las muestras clasificadas ARH, ARMh, ARMc y ARMa presentan valores medios y máximos inferiores a las muestras no clasificadas o clasificadas como material inerte.

Por otra parte, los áridos de la categoría ARH reflejan el menor valor medio y el menor rango de variación, comparados con los de las categorías ARMh, ARMc y ARMa, que ofrecen valores medios y rangos de variación similares y superiores al de la categoría citada.

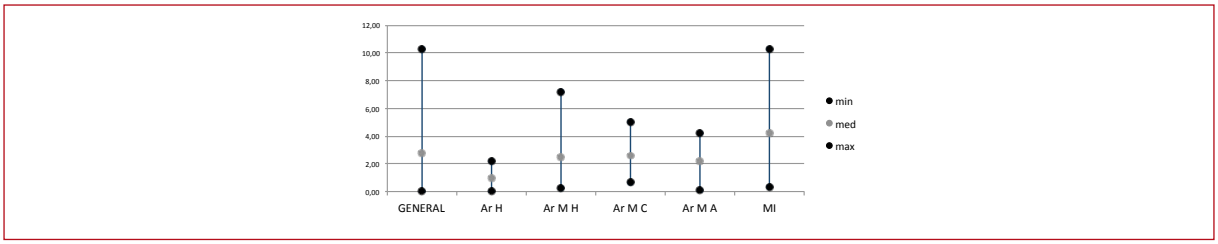


Figura 6.20. Media y valores máximos y mínimos del contenido de yeso (%) para cada categoría.

6.5 Uso de la Clasificación GEAR

Los porcentajes de composición del material adoptados en estas prescripciones y recomendaciones están basados en normativas europeas. Las portuguesas, suizas y austriacas también dividen los áridos en clases según su composición. Las categorías creadas por cada normativa presentan peculiaridades relativas a las características de composición de los RCD producidos en el país al cual se refiere. La normativa austriaca, por ejemplo, presenta una clase específica para el árido reciclado procedente de asfalto triturado, debido a la gran cantidad de residuo de asfalto producido en ese país.

Se debe resaltar que tales normativas europeas no definen límites porcentuales para indicar hasta qué punto un material debe considerarse mixto o no.

El análisis de los parámetros físicos y químicos de los áridos reciclados en función de la clasificación propuesta para la GEAR ha indicado que:

- Los límites de composición de los áridos reciclados impuestos por la clasificación son válidos. Permiten establecer, en función de su composición, una línea orientativa de calidad del material al conseguir separar los áridos reciclados con características físicas y químicas menos favorables para el uso en la construcción civil de los más favorables;
- Debido a la variabilidad de los resultados, sin embargo, aunque un árido reciclado presente una composición adscribible a una de las categorías indicadas en la clasificación de la GEAR, ello no conlleva la garantía de uso de este material en alguna de las aplicaciones considerada a priori para esa categoría. Tal posibilidad irá siempre ligada, más allá de la clasificación, a las características técnicas que ese árido presente.

En ese sentido, la clasificación no debe ser utilizada como un elemento limitador. La calidad técnica del material, independientemente de su composición, es el elemento que determina la viabilidad de uso del material en una aplicación. Si el árido reciclado no se adapta a la categoría indicada para una determinada aplicación pero, aun así, presenta características geométricas, físicas y químicas adecuadas para su uso (comprobadas por ensayos de laboratorio), el material puede ser utilizado sin problemas en la aplicación planteada.

La clasificación debe ser utilizada como un elemento orientador. Dicho de otra forma, una planta de reciclaje puede utilizar los límites indicados en las categorías para determinar e inducir la composición del material que pretende producir, en vistas a prever su posible calidad técnica y las aplicaciones posibles.

7. Los áridos reciclados en usos no ligados

En este apartado se presentan los estudios específicos realizados por los Centros Tecnológicos y Universidades participantes en el Proyecto GEAR, en cada uno de los ámbitos seleccionados siguientes:

- Zahorras para firmes de carreteras (Intromac)
- Suelos para rellenos y explanadas (Aitemin)
- Suelo cemento y grava cemento (Aidico)

Para realizar estas investigaciones, cada Centro y Universidad ha llevado a cabo un plan de investigación específico en laboratorio y se han utilizado los datos recogidos durante la etapa de diagnóstico (datos de productos y usos habituales en las plantas de reciclaje, obras históricas) y la etapa de aplicación experimental (documentos y seguimiento de las obras adscritas al proyecto).

Los principales usos no ligados para los áridos reciclados, utilizando la clasificación que establece el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes –PG3, se pueden agrupar en dos grandes grupos: explanaciones (y rellenos) y los firmes.

Del capítulo de firmes (Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes) se ha seleccionado los siguientes usos:

- Art. 510 Zahorra “material granular, de granulometría continua, utilizado como capa de firme. Se denomina zahorra artificial al constituido por partículas total o parcialmente trituradas”.
- Art. 512 Suelo estabilizado in situ “mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal o con cemento, y eventualmente agua, en la propia traza de la carretera, la cual convenientemente compactada, tiene por objeto disminuir la susceptibilidad al agua del suelo.
- Art. 513 Materiales tratados con cemento (suelo cemento y grava cemento) “mezcla homogénea, en las proporciones adecuadas, de material granular, cemento, agua y, eventualmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada, se utiliza como capa estructural en firmes de carretera”.

No se han incluido en este proyecto la investigación sobre otros usos, por haber considerado el equipo investigador que no eran prioritarios o quedaban fuera del ámbito de estudio del proyecto, los siguientes usos definidos en el PG3:

- Art. 530 Riegos de imprimación
- Art. 531 Riegos de adherencia
- Art. 532 Riegos de curado
- Art. 540 Lechadas bituminosas
- Art. 542 Mezclas bituminosas en caliente
- Art. 543 Mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura

Del capítulo de explanaciones (Orden FOM/1382/2002, de 16 de mayo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes relativos a la construcción de

explanaciones, drenajes y cimentaciones) se ha seleccionado los usos siguientes:

- Art.330 Terraplenes "extensión y compactación por tongadas de materiales definidos más adelante, en zonas de tales dimensiones que permitan la utilización de maquinaria pesada, con destino a crear una plataforma sobre la que se asiente el firme de una carretera". El terraplén se divide en diversas zonas (coronación, cimiento, núcleo). Los materiales que se pueden utilizar, según orden decreciente de exigencia, son suelos seleccionados, adecuados, tolerables y, finalmente, marginales.
- Art. 331 Pedraplenes "extensión y compactación por tongadas de materiales pétreos con destino a crear una plataforma sobre la que se asiente la explanada y el firme de una carretera. El área de trabajo será suficiente para el empleo de maquinaria pesada".
- Art.332 Rellenos localizados "extensión y compactación de suelos en rellenos de zanjas, trasdós de obras de fábrica, cimentación o apoyo de estribos o cualquier otra zona que por su reducida extensión, compromiso estructural u otra causa, no permita la utilización de los mismos equipos de maquinaria del resto del relleno". Se utilizarán exclusivamente suelos seleccionados y adecuados.
- Art. 333 Rellenos todo uno "extensión y compactación por tongadas de materiales con destino a crear una plataforma sobre la que se asiente la explanada y el firme de una carretera. El área de trabajo será suficiente para el empleo de maquinaria pesada".
- Art. 420 Zanjas drenantes "consisten en zanjas rellenas de material drenante adecuadamente compactado"
- Art. 421 Rellenos localizados drenantes "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 maquinaria pesada".

No se han incluido en este proyecto la investigación sobre otros usos, por haber considerado el equipo investigador que no eran prioritarios o quedaban fuera del ámbito de estudio del proyecto, los siguientes usos definidos en el PG3:

- Art. 658 Escollera de piedras sueltas
- Art. 659 Fábrica de gaviones

Cabe destacar que el ámbito de aplicación de los áridos reciclados en usos no ligados fue considerado de extrema relevancia.

La casi totalidad de la producción de áridos reciclados se destina a usos no ligados, que según los datos recogidos en el proyecto y referidos al año 2009, se puede estimar entre el 80% y el 95% de la producción total.

Aproximadamente la mitad de la producción se caracteriza como zahorra artificial, y se destina a capas de base o sub base en caminos, calles urbanas y carreteras (típicamente rotondas). El mismo producto, sin la fracción pequeña, suele utilizarse en capas drenantes.

Además, una parte no despreciable de este producto suele utilizarse en rellenos y restauraciones, usos de menor exigencia técnica de la que cumplen. No es extraño encontrar situaciones de rechazo del producto, por tratarse de un material "reciclado", aún cumpliendo con los requisitos técnicos exigibles, por el color rojizo del material.

Otra parte importante de la producción se caracteriza como algún tipo de suelo, tolerable o adecuado principalmente. Se destina en gran medida a los rellenos y a restauraciones.

Los áridos reciclados procedentes de material inorgánico previamente utilizado en la construcción constituyen, en realidad, una gama de productos de distintas calidades y con características que pueden ser adecuadas para ser utilizados en distintos usos. No se trata de un mismo producto. Existe una amplia variedad de calidades de los áridos reciclados e incluso la mayoría de las plantas suele producir distintos tipos de áridos reciclados, independientemente del tamaño en que se comercializa (finos, todo-uno, gravas,…).

En ese contexto, en el curso de la realización del proyecto, se ha comprobado la producción de un porcentaje importante de "material inerte" (MI), materiales reciclados que no pueden clasificarse como áridos, pero que se adecuan a otros usos constructivos que merecen ser recopilados. El material inerte puede representar entre el 30% y el 40% de la producción total del proceso de reciclaje de RCD.

El material inerte resultante, dentro de un proceso normal de reciclaje, puede ser el resultado de alguna fase del proceso productivo o estar condicionados por la materia prima utilizada, y se clasifican en los siguientes tipos:

a) Material inerte con alto contenido de plásticos, papel, madera,.. (> 1% impropios).
b) Material inerte con alta plasticidad, por presencia de arcillas y tierras.
c) Material inerte con alta materia orgánica y compuestos de azufre.
d) Material inerte con poca resistencia al desgaste (>45 LA).

Los usos en los que existe experiencia y antecedentes son:

a) Material inerte para usos constructivos en instalaciones de tratamiento de residuos (sellado de celdas, drenajes, caminos de acceso y formación de explanadas, etc).
b) Material inerte para reparación de blandones y formación de accesos provisionales en obras.
c) Material inerte para usos en jardinería y formación de parterres.
d) Material inerte para restauración de espacios degradados (por actividades extractivas o por vertederos incontrolados).

Como se pone de manifiesto en los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, y que se ratifican en las conclusiones de las investigaciones que siguen, prácticamente todo el material reciclado producido en España puede ser aplicado en usos no ligados (estimativa de 90%). La calidad del material es lo que debe determinar si el uso será en una aplicación más o menos exigente.

Los áridos reciclados en España suelen cumplir con los requisitos de la normativa técnica general vigente o tienen condiciones de cumplir con cierta facilidad con los requisitos físicos establecidos, a partir de modificaciones en el sistema operativo de producción.

En particular, como resultado del plan de control aplicado a las instalaciones participantes y colaboradoras de Proyecto GEAR, la mayoría de las muestras caracterizadas cumplen con los requisitos en una u otra categoría de uso definida en los artículos del PG3.

Respecto al coeficiente Los Ángeles, el límite exigido en el PG3 es de menos de 40. Este límite es alcanzado por más del 80% de las muestras de áridos reciclados analizadas, por lo que podría ser asumible en las prescripciones para áridos reciclados. No obstante, al igual que sucede en otros artículos del PG3 (p.e zahorras), este límite se podría incrementar para los áridos reciclados en algunos usos hasta un coeficiente Los Ángeles de 45.

Ya con relación al índice de lajas, el 99% del total de las muestras de áridos reciclados analizadas por el Proyecto GEAR cumplen las exigencias de la normativa, incluso las muestras con porcentajes de materiales cerámicos superiores al 50%.

Finalmente, el contenido de finos tiende a ser superior que en los áridos artificiales, pero el 80% de las muestras están por debajo del límite establecido en 9%.Y, en ese contexto, es importante decir que los requisitos granulométricos exigidos para los usos propuestos en la guía son perfectamente aplicables para los áridos reciclados. El cumplimiento de estos requisitos tan solo exige en algunos casos, un acondicionamiento del proceso productivo de trituración y de clasificación de las plantas recicladoras, lo que no debe suponer un problema para alcanzar los límites exigidos en la normativa.

Por otra parte es necesario señalar las diferencias de características y de comportamiento que pueden mostrar los áridos reciclados respecto de los áridos naturales o artificiales, que les colocan en según que usos y condiciones, en total igualdad, en mejor o en peor comportamiento.

Como problemas críticos se identifica la presencia de yeso (el 60% de las muestras tiene un contenido inferior al 2%), el contenido de sales (el 40% de las muestras tiene un valor inferior al 1%) y el coeficiente de limpieza (el 50% del total de las muestras tiene un valor inferior al 2%).

En general, los áridos clasificados como ArH (de hormigón) son los que presentan contenidos más bajos de yeso y sales solubles. Parece razonable por su procedencia, en su mayoría del derribo de construcciones uniformes, homogéneas y con poca presencia de elementos no pétreos de la construcción.

Independiente del origen del RCD, se puede y hay que mejorar las características del árido reciclado mediante mejoras selecciones de material en la planta recicladora, acopios selectivos, entre otros.

Tanto para las características de sales como de yeso, se observa que el uso de sistemas de limpieza por agua contribuye para reducir el contenido de dichos elementos en el producto reciclado final.

Al analizar los resultados de coeficiente de limpieza, se ha observado que la existencia conjunta de sistemas de limpieza por aire y agua en la planta contribuye para reducir las impurezas del árido reciclado relacionadas a este parámetro.

Una mejora en los procesos de pretratamiento de las plantas de reciclaje y en los sistemas de control de calidad de los procesos también podría reducir esas incidencias.

De acuerdo con todo lo señalado respecto al contenido en sales solubles y yesos, se considera que el principal problema que puede derivarse de la presencia de sales solubles y yesos en el material a emplear en los terraplenes es la disolución de material por la penetración de agua, lo que puede conllevar a la aparición de colapsos en la estructura que afecten a la estabilidad del terraplén.

Considerando que la media del contenido en yeso del total de las muestras analizadas es del 2,75% y de sales solubles es del 1,58%, sería aconsejable redefinir los límites de estos parámetros para los áridos reciclados.

Para ello se propone un análisis de control que considerara directamente la influencia de estos parámetros en la estabilidad de la estructura (terra-

plén). La propuesta consiste en proponer un análisis de control de los áridos reciclados con ensayos de colapso (NLT 254) e hinchamiento (UNE 103601). El material que no presente colapso podría servir para su empleo en terraplenes y el material a partir del que presente colapso debería cumplir el límite en yeso. De forma análoga se debería proceder para el contenido en sales solubles.

Por otro lado, los límites para contenido en yesos y sales solubles para áridos reciclados se pueden redefinir y servir para que las plantas productoras de áridos reciclados extremen los controles de recepción y preclasificación del material para cumplirlos. No obstante todo lo anterior, un límite aceptable del contenido en yesos podría situarse en el 3%.

Finalmente, en relación con los parámetros de contaminantes orgánicos, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- El límite exigido en el artículo 330 del PG3 para suelos seleccionados es del 0,2% (según UNE 103204). Este límite lo cumple el 80% de las muestras analizadas. En este caso, en principio se puede aceptar el límite vigente y exigir a los productores de áridos reciclados un mayor control de recepción y preclasificación del material para no superar el límite establecido. No obstante, se debería analizar la posibilidad del empleo como suelo seleccionado de muestras de áridos reciclados que superen el límite establecido de materia orgánica (por ejemplo, muestras con < 1%), siempre que los ensayos de colapso (NLT 224) e hinchamiento (UNE 103601) sean 0 (esto conlleva presuponer que el principal problema que la presencia de materia orgánica puede provocar en los terraplenes (siempre desde el punto de vista estructural y no medioambiental) es la aparición de colapsos e hinchamientos. Por lo tanto, si se quiere incrementar el límite vigente, se propone realizar un estudio adicional análogo al propuesto para el contenido en sales solubles y yeso.
- El límite exigido en la normativa para suelos adecuados es de un contenido < 1% de materia orgánica (según UNE 103204). El 86% del total de las muestras analizadas de áridos reciclados cumple con este requisito, por lo que en principio se puede mantener este límite en las prescripciones para áridos reciclados. No obstante lo anterior, sería interesante realizar un estudio adicional que permitiese fijar que para aquellos áridos reciclados con un contenido en materia orgánica entre el 1 y 2%, si no presentan fenómenos de hinchamiento y colapso, se permitiese su empleo en suelos adecuados.
- El límite exigido en la normativa para suelos tolerables es de un contenido < 2% de materia orgánica (según UNE 103204). El 90% del total de las muestras analizadas de áridos reciclados cumple con este requisito, por lo que en principio se puede mantener este límite en las prescripciones para áridos reciclados.
- En los rellenos de zanjas para instalación de tuberías y rellenos localizados de material drenante se pide que el material no tenga materia orgánica. En principio se puede proponer un límite en las prescripciones del 0,2% de materia orgánica (según UNE 103204), alegando que es el límite vigente para la utilización en suelos seleccionados para terraplenes en cualquier zona y es ya lo suficientemente restrictivo (este límite lo cumple el 83% de las muestras analizadas de áridos reciclados). Sería muy importante que el material proveniente de árido reciclado para este uso tuviese un contenido muy reducido de “materiales extraños” que se pueden identificar como las maderas, plástico, papel, etc. En principio se piensa que un límite < 0,2% (según UNE 103204) sería suficiente alegando que es el límite vigente para la utilización en suelos seleccionados para terraplenes en cualquier zona y es ya lo suficientemente restrictivo (este límite lo cumple el 83% de las muestras analizadas de áridos reciclados).

Los apartados siguientes presentan con más detalle los estudios específicos realizados para la aplicación del árido reciclado en bases y subbases de firmes de carretera, en rellenos y explanaciones y en firmes y explanaciones de suelo cemento y gravacemento.

7.1 Firmes de carretera

Este capítulo fue desarrollado por los técnicos de INTROMAC (Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción), que forman parte del equipo investigador del Proyecto GEAR.

7.1.1 Situación de la investigación en el área en España y Europa

El uso como zahorra, junto quizás con el de rellenos, es el más utilizado a la hora de emplear árido reciclado en la actualidad. Son múltiples las obras, sobretodo en vías de baja intensidad de tráfico, en que la zahorra reciclada forma parte de la infraestructura de estas vías. Es por ello que en este uso concreto existe una amplia experiencia.

No obstante, en la mayoría de los casos se ha tratado de obras con requisitos de calidad de los materiales mínimo, o exentos de control incluso.

A continuación se presentan distintas experiencias llevadas a cabo con árido reciclado en bases y subbases de vías y carreteras, tanto a nivel nacional como internacional.

Proyecto ARED: "Utilización de áridos reciclados obtenidos a partir de residuos de demolición y construcción, en vías de baja intensidad de tráfico".

Empresas/Instituciones participantes:

- Junta de Extremadura, Vicepresidencia Segunda y Consejería de Economía, Comercio e Innovación.
- INTROMAC (Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción).
- SANI (Gestión Tecnológica Extremeña de Reciclado, R.C.D. y Abono orgánico).

Material reciclado utilizado:

RCD limpio (procedente de demoliciones y derribos con selección en origen); RCD mezclado (procedente de reformas u obras nuevas).

Producto comercializado: Zahorra 0/15 mm, árido 6/15 mm, árido 0/6 mm, residuos de hormigón de alta resistencia y residuos cerámicos con tamaños inferiores a 4 mm.

Empresa suministradora del árido reciclado:

SANI (Gestión Tecnológica Extremeña de Reciclado, R.C.D. y Abono orgánico).

Breve descripción de las actividades:

- Estudio del material que produce la planta de tratamiento que colabora en el proyecto, SANI.
- Recogida del material de producción de dicha planta, generalmente una vez al mes, con las características más adecuadas para cumplir el objetivo del proyecto.
- Caracterización completa del material y comprobación del cumplimiento sobre las especificaciones sancionadas por el PG3, para plantear su posible incorporación en capas inferiores de caminos o carreteras de baja intensidad de tráfico.
- Propiedades determinadas: Granulometría, plasticidad, resistencia al desgaste, contenido en finos, lajas, caras de fractura, densidad máxima, contenido en sulfatos solubles en ácido, contenido en materia orgánica, hinchamiento, contenido en impurezas de plástico, clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.
- Obtención de material reciclado a partir de los residuos de la rotura de probetas de hormigón que se realiza en las instalaciones de INTROMAC, para su posible uso en bases y subbases de carretera, así como árido para la fabricación de hormigón. Los residuos caracterizados procedían tanto de hormigón normal como de hormigón de alta resistencia, a partir de una caracterización inicial se descartó la opción de continuar adelante con el hormigón normal, por obtener un valor de resistencia al "Desgaste Los Ángeles" muy por encima de los valores sancionados como válidos para los usos anteriormente citados.
- Obtención de dosificaciones adecuadas de residuos de hormigón y residuos cerámicos, también generados en INTROMAC. Se obtuvieron mezclas de residuos de hormigón de alta resistencia + 20% de residuos cerámicos con tamaños inferiores a 4 mm, que cumplían las especificaciones referidas a la naturaleza del material, para ser utilizado como base o subbase de carreteras.

Resultados obtenidos:

De los resultados obtenidos se puede concluir:

- La composición química de este producto cumple las especificaciones para la aplicación indicada.
- El contenido en finos es ligeramente superior al indicado en las especificaciones. Se propone a SANI intentar controlar la incorporación del material fino de excavación presente en el producto final, denominado Zahorra 0/15 mm. Posteriormente, se procederá a una nueva caracterización para ver si se cumplen las especificaciones relativas a equivalente de arena y plasticidad.
- La granulometría del producto zahorra 0/15 mm, en las distintas muestras tomadas, presenta cierta heterogeneidad y en la mayoría de los casos se aproxima más al huso de una zahorra natural que al de una zahorra artificial. Se propone intentar controlar dicha propiedad en la producción.

Estudio de la reutilización de los residuos de construcción y demolición como áridos reciclados para carreteras.

Empresas/Instituciones participantes:

Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha
AITEMIN
Tecnología y Reciclados, S.L.

Material reciclado utilizado:

Arena reciclada 0/6 mm, grava reciclada 6/20 mm, zahorra reciclada 0/40 mm.

Empresa suministradora del árido reciclado:

TECNOLOGÍA Y RECICLADO, S.L.

Breve descripción de las actividades:

Propiedades del árido analizadas: Petrografía, equivalente de arena, azul de metileno, índice de lajas, caras de fractura.

Aplicaciones estudiadas: Zahorras, mezclas y lechadas bituminosas, suelocemento y gravacemento, riegos.

Resultados obtenidos:

Las zahorras de los áridos reciclados estudiados se pueden emplear con cumplimiento de las especificaciones del PG3 en categorías de tráfico T3, T4 y arcenes. Los áridos reciclados también pueden emplearse por sí solos en algunas aplicaciones de riegos de imprimación y curado. El principal incumplimiento observado en los áridos reciclados para las aplicaciones estudiadas se refiere a la resistencia al desgaste Los Ángeles. Cuando el árido reciclado se corrige con la aportación de árido natural en distintas cantidades, las posibilidades de uso de los áridos reciclados se amplían notablemente.

"Utilización de materiales procedentes de RCD en viales de la ciudad de Málaga". Año 2010.

Empresas/Instituciones participantes:

Ayuntamiento de Málaga. Gerencia Municipal de Urbanismo, Obras e Infraestructuras, Aristerra, Tecniobra, FYM. Italcemeti Group, Cemosa. Ingeniería y Control.

Material reciclado utilizado:

Zahorra artificial reciclada de hormigón.

Zahorra artificial reciclada de hormigón y cerámicos.

Grava-cemento con árido grueso de RCD.

Empresa suministradora del árido reciclado:

Aristerra.

Breve descripción de las actividades:

La realización de este Proyecto de I+D+I, denominado "Utilización de materiales procedentes de residuos de construcción en firmes de viales en la ciudad de Málaga", fue objeto del Convenio de Colaboración suscrito entre el Ayuntamiento y las empresas mencionadas.

La prueba se situó en la obra de "Mejora de la pavimentación, saneamiento y acerado en calle Pascal" a realizar en el Polígono Industrial Villa Rosa de Málaga, en el tramo comprendido entre la Avda. de Guadalmar y la Avda. de Villa Rosa.

El objetivo general del proyecto es verificar que el uso de RCD es apto para la formación de capas inferiores en firmes urbanos. Para ello, se han construido tramos de ensayo en condiciones reales de uso, para contrastar las prestaciones de los materiales.

Los objetivos concretos son los siguientes:

- Determinar los valores característicos de los materiales reciclados (zahorras, grava cemento) y su idoneidad para su uso en las diferentes capas de asiento de firme y firme.
- Ejecutar las obras con dichos materiales.
- Verificar la evolución del comportamiento del firme, comparándolo con otras secciones que se ejecutarán en las mismas condiciones pero con empleo de materiales tradicionales.



Figura 7.1. Esquema de la planta de tratamiento de RCD adoptada.

Resultados obtenidos:

Se prolonga la vida útil de las canteras. El árido natural procedente de explotación minera será empleado solo donde sea insustituible. Al reducirse la distancia a vertedero y a cantera desde la obra, pues la planta está "próxima", disminuye el tiempo de transporte, el consumo de combustible, las emisiones de gases y el coste de la obra.

Al incluir áridos reciclados en las obras municipales se produce una mejora de la eficiencia energética, pues el vehículo es cargado en obra con los residuos de la demolición para su transporte hasta la planta de reciclaje, y aprovecha el porte de vuelta para suministrar el árido reciclado en obra. Este hecho se produce con frecuencia y supone una reducción del 50% del tráfico local y provincial, consumos de gasoil, emisiones de gases a la atmósfera y, como es lógico, en los costes de obra.

Diseño de nuevos materiales procedentes del reciclaje de escombros de construcción y demolición: RUE (Residuos urbanos de edificación) y RAHA (Residuos de aglomerados hidráulicos y asfálticos) Año 2003.

Empresas/Instituciones participantes:

Autor: Gilbert Francisco. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.

Material reciclado utilizado:

La tesis consiste básicamente en un estudio sistemático de clasificación y caracterización de los Residuos de Construcción y Demolición (RUE: Residuos Urbanos de Edificación y RAHA: Residuos de Aglomeración Hidráulicos y Asfálticos) para sus eventuales aplicaciones como áridos reciclados para la fabricación de hormigón magro o pobre y el RAHA como Zahorra Artificial Reciclada.

Breve descripción de las actividades:

Tras el estudio bibliográfico e inicial, se planteó el análisis mediante una metodología en una secuencia de varias fases. Se comenzó con el estado del arte en España y en la Unión Europea para después clasificar y caracterizar los materiales susceptibles de ser reciclados. Una vez evaluada la problemática, se procedió a preparar mezclas que incluyeran una dosificación con áridos gruesos reciclados y áridos finos naturales para su empleo como hormigón magro u hormigón pobre y se caracterizó el RAHA para su empleo como zahorra artificial reciclada.

Reciclaje de la Papelera Torras con un RM100. Balaguer (Lleida).

Empresas/Instituciones participantes:

Impacsa (Grupo Torras), Ibermop S.L., B. Biosca.

Material reciclado utilizado:

Procedente de la demolición y reciclaje de las antiguas instalaciones fabriles de la papelera Torras. 90.000 m^3 de hormigón y material cerámico.

Empresa suministradora del árido reciclado:

B. Biosca

Breve descripción de las actividades:

Demolición y reciclaje de todos los materiales que aparecieron en el complejo industrial. El hormigón y los cerámicos se transformaron en árido reciclado (zahorra para subbases) para su posterior utilización en la construcción de la urbanización de 2.500 viviendas en el mismo solar; el hierro se fue acopiando para darle salida a través de un gestor autorizado; los depósitos fueron inertizados y posteriormente achatarrados; y las baterías, aceites y pinturas fueron recogidos por los correspondientes gestores autorizados.

Resultados obtenidos:

La zahorra Z-40 reciclada, formada por la mezcla de hormigón y materiales cerámicos ya limpios de metales y acopiada directamente en el suelo por el grupo móvil RM100, fue cargada en camiones y transportada hasta las zonas laterales de la finca, donde se almacenó de nuevo hasta su posterior utilización como subbases en la nueva urbanización.

"Recomendaciones para la redacción de Pliegos de especificaciones técnicas para el uso de materiales reciclados de RCD"

Empresas/Instituciones participantes:

Gestión de Infraestructuras de Andalucía (GIASA), Aristerra, Tecniobra, FYM. Italcemeti Group, Cemosa. Ingeniería y Control, AZVI, S.A., ALCOREC.

Material reciclado utilizado:

Las recomendaciones se han elaborado con los datos aportados durante la ejecución de dos proyectos de investigación integrados, en las provincias de Málaga y Sevilla.

En el Proyecto de la provincia de Málaga, como capa de firme fueron empleados distintos materiales por tramos, tales como zahorra artificial reciclada de hormigón, zahorra artificial reciclada mixta de RCD y gravacemento con árido grueso reciclado.

En el Proyecto de la provincia de Sevilla los tramos de ensayo contemplan diferentes secciones con la incorporación de suelos seleccionados y zahorras artificiales recicladas de RCD.

Empresa suministradora del árido reciclado:

ARISTERRA y ALCORES.

Breve descripción de las actividades:

Los Proyectos fueron firmados entre GIASA y empresas privadas del sector: recicladores, constructoras, fabricantes de hormigón y laboratorios de control de calidad de materiales.

El informe confirma la tendencia, cada vez mayor, a aplicar los áridos reciclados procedentes de RCD en obras de todo tipo, siempre que se garanticen unas condiciones mínimas de calidad por parte del fabricante que, debido a su particularidad, no deben ser las mismas que para el árido natural procedente de cantera.

Resultados obtenidos:

En las dos obras que forman parte de este proyecto, los áridos reciclados empleados están dando buenos resultados, en la línea de lo esperado.

Los avances más significativos con respecto al PG3 han sido:

- Consideración del límite de desgaste Los Ángeles hasta valores de 45-50, frente a los 35-40 actuales.
- Consideración de existencia de materia orgánica, hasta valores del 2%, siempre que su origen esté en el betún del aglomerado asfáltico y no húmico.
- Apertura de curva granulométrica e inclusión de zahorras, frente al uso único ZAD20 contemplado en la actualidad.
- Exclusión de resistencia mínima en el hormigón en bruto.
- Inclusión de material cerámico, asfáltico, etc., además del hormigón.

"Aplicación de materiales reciclados procedentes de RCD en capas de firmes de carreteras". (2009-2011).

Empresas/Instituciones participantes:

Gestión de Infraestructuras de Andalucía (GIASA), AZVI, S. A., ALCOREC.

Material reciclado utilizado:

Se plantea ejecutar cuatro paquetes de firme con una longitud de 150 metros en terraplenes cuyas condiciones de contorno son similares:

- Tramo 1: Se mantiene el firme del proyecto y servirá de referencia para comparar el comportamiento de los tramos en los que se usa material reciclado, formado por 5 cm de MBC (Mezclas bituminosas en caliente), 30 cm de zahorra artificial y 30 cm de suelo seleccionado.
- Tramo 2: firme con 5 cm de MBC, 30 cm de zahorra artificial y 30 cm de suelo reciclado.
- Tramo 3: firme con 5 cm de MBC, 30 cm de zahorra artificial reciclada y 30 cm de suelo reciclado.
- Tramo 4: firme conn 5 cm de MBC, y dos capas de 30 cm de zahorra artificial reciclada.

Empresa suministradora del árido reciclado:

ALCOREC

Breve descripción de las actividades:

Se plantea disponer como tramo de prueba el Camino de servicio 2 en la margen izquierda entre el P.K. 0+600 (Enlace de la Carretera SE-425) y el 1+360, perteneciente a la obra: Duplicación de calzada de la A-376, tramo: intersección SE-425 a Utrera (expediente Giasa: CSE1076OEJ0).

Se exigen unas características a los materiales para su puesta en obra: Índice CBR, densidad, contenido en materia orgánica, desgaste, granulometría y plasticidad.

Resultados obtenidos:

Se realiza el seguimiento posterior de los tramos ejecutados, mediante controles ADAR (Auscultación Dinámica de Alto Rendimiento). Se emitirá un informe anual de seguimiento con las conclusiones de estos controles. Para esta fase se estima un plazo de 3 años.

Al término del proyecto se redactará un informe final con las conclusiones del estudio.

Tramos experimentales con materiales reciclados de RCD de la obra "Conexión de la A-367 (Ardales-Ronda) con la A-357 (Campillos-Málaga)".

La duración de este Proyecto es de 4 años, y se engloba dentro del "Plan de Mejora de la Accesibilidad, Seguridad Vial y Conservación en la Red de Carreteras de Andalucía 2004-2013".

Empresas/Instituciones participantes:

Gestión de Infraestructuras de Andalucía (GIASA), Aristerra, Hormigones y Minas (FYM. Italcemeti Group), Cemosa. Ingeniería y Control, Estudio PEREDA CUATRO.

Material reciclado utilizado:

Zahorra de cantera, Zahora reciclada de hormigón, Zahorra reciclada de RCD, Gravacemento de cantera y Gravacemento de RCD.

Empresa suministradora del árido reciclado:

ARISTERRA

Breve descripción de las actividades:

Los objetivos del proyecto son:

- Verificar la idoneidad técnica del aprovechamiento de lo RCD como materiales para construcción de firmes. Reducción del impacto ambiental en obras.
- Determinar los valores característicos a asignar a zahorras y gravacemento provenientes de reciclado en relación con los valores definidos en normativa.
- Ejecutar las obras empleando estos materiales. Establecer parámetros de puesta en obra.
- Evolución real del comportamiento a lo largo del tiempo del árido reciclado.
- Comparar el árido de cantera con el árido reciclado.

El Proyecto consta de las siguientes fases: Memoria técnica y económica, Diseño de tramos experimentales, Ejecución de los tramos y Control de evolución de la obra terminada.

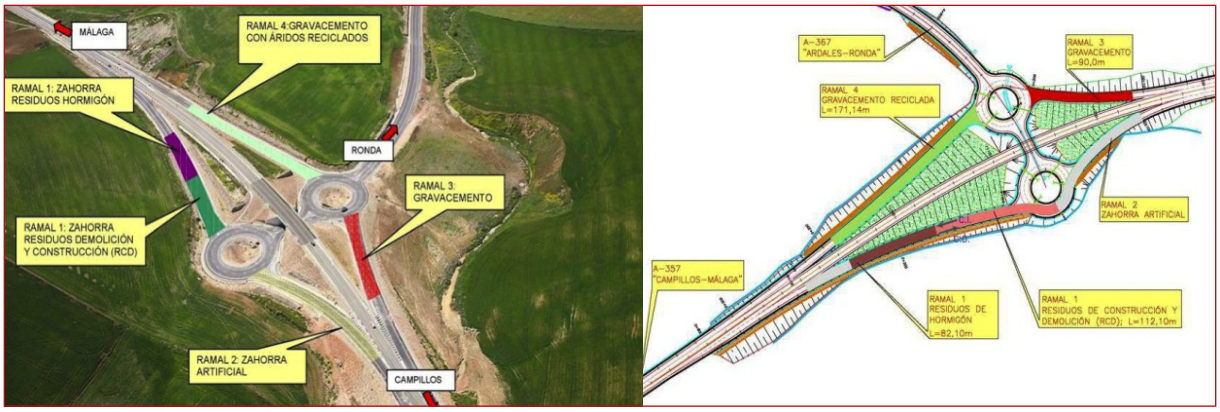


Figura 7.2. Tramos experimentales con materiales reciclados de RCD de la obra "Conexión de la A-367 (Ardales-Ronda) con la A-357 (Campillos-Málaga).

Resultados obtenidos:

- A falta de terminar los ensayos a largo plazo, en el caso de las zahorras, el comportamiento de estos materiales reciclados es totalmente similar, incluso mejor en el caso de la capacidad portante que sus análogos naturales.
- El comportamiento de las gravacementos, tanto natural como reciclada, ha sido, en el caso de capacidad portante, mejor que la esperada.
- En el control de seguimiento a los 6 meses los resultados han sido satisfactorios: las deflexiones no han aumentado, salvo las zahorras de cantera.
- Se ha publicado: "Recomendaciones para la redacción de pliegos de especificaciones técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD)".

"Reciclaje de los residuos de la demolición de la antigua fábrica de Fasa-Renault de Valladolid"

Empresas/Instituciones participantes:

Junta de Compensación del Área de Planeamiento Específico ARIZA25-1, Gestión de Infraestructuras de Castilla y León S. A., Unión Temporal de Empresas Valladolid Ciudad de la Comunicación (Dragados S.A., Construcciones y Obras Llorente S.A. y Construcciones Arranz Acinas S.A.).

Material reciclado utilizado:

Los materiales reciclados serán utilizados para:

- Rellenos en la zona de parque de la urbanización, rellenos seleccionados y subbases de las calles de la urbanización.
- Subbases y bases de las calles de la urbanización: explanada mejorada, zahorras artificiales y material para el suelo-cemento.

Empresa suministradora del árido reciclado:

Transportes Arias, Gracalsa, Extrarriegos.

Breve descripción de las actividades:

La urbanización de la Ciudad de la Comunicación en Valladolid se realiza sobre terrenos de la primitiva factoría de Fasa-Renault situada en el interior del casco urbano.

El solar estaba ocupado por una serie de edificaciones y naves, así como por una losa de hormigón y galerías de canalizaciones. La primera fase de las obras ha consistido en la demolición de todas las edificaciones y naves existentes, así como el levantado de todas las losas, zapatas, galerías, colectores, etc. La segunda fase ha consistido en el reciclaje de los RCD para su posterior uso en las necesidades de la obra.



Figura 7.3. Reciclaje de los residuos de la demolición de la antigua fábrica de Fasa-Renault de Valladolid.

Resultados obtenidos:

El reciclaje de los productos de demolición ha sido ventajoso desde el punto de vista medioambiental, pues no se ha utilizado volumen de vertedero, del cual tampoco se disponía en el municipio de Valladolid. Por otra parte, se ha evitado el uso de áridos naturales.

Otra ventaja medioambiental es que no ha sido necesario el transporte a vertedero y tampoco de material de cantera. Igualmente, se han evitado molestias a los habitantes de la ciudad, puesto que la obra se sitúa en pleno casco urbano.

"Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para subbases de carreteras". Año 2009.

Empresas/Instituciones participantes:

Jiménez, J.R.; Agrela, F.; Ayuso, J. & López, M. (Universidad de Córdoba. Área de Ingeniería de la Construcción)

EPREMASA S.A.

Material reciclado utilizado:

Se han estudiado siete áridos reciclados de RCD, tres áridos reciclados de hormigón (RCA-1 a RCA-3) y cuatro áridos reciclados mixtos (MD-1 a MD-4). Para cada material, se tomó una muestra de alrededor de 500 kg de los acopios de tres plantas con proceso de reciclaje diferente en Córdoba. Como árido natural de control se ha usado una zahorra artificial caliza.

Empresa suministradora del árido reciclado:

EPREMASA, S.A.

Breve descripción de las actividades

Los ensayos realizados siguen las recomendaciones del artículo 510 del PG3, que establece los requisitos de los materiales no ligados para su uso en capas estructurales (subbases). Los materiales han sido ensayados de acuerdo con las normas especificadas en la Tabla 4. Cada valor obtenido en este trabajo es un promedio de dos mediciones.

Resultados obtenidos:

- El árido natural presenta las mejores propiedades, seguido de los áridos reciclados de hormigón y los mixtos. Los áridos reciclados de hormigón cumplen los límites del el PG3 para capas granulares estructurales (subbase) en las categorías de tráfico T3 y T4.
- Los áridos reciclados mixtos no cumplen algunas especificaciones del PG3 (contenido de compuestos de azufre totales, coeficiente Los Ángeles y coeficiente de limpieza).
- En el proceso de reciclaje de residuos de hormigón no es necesario el precribado para eliminar la fracción fina; las propiedades del RCA-1 (precribado) son similares a las del RCA- 2 y RCA-3 (no precribados).
- En cambio, en el proceso de reciclaje de escombros mixtos el precribado para eliminar la fracción fina reduce el contenido de compuestos de azufre totales en el árido reciclado (MD-1, MD-2 y MD-3) y mejora su calidad.
- El árido natural tiene la mayor densidad seca y la menor absorción de agua. Los áridos reciclados de hormigón tienen una mayor densidad seca y menor absorción de agua que los mixtos. En los áridos reciclados de hormigón y en el árido natural, la densidad de partículas tras secado en estufa de la fracción gruesa es mayor que la de la fracción fina, mientras que en los mixtos ambas densidades son similares. En los áridos reciclados de hormigón y el árido natural la absorción de agua de la fracción fina es superior a la de la fracción gruesa, mientras que en los mixtos no se aprecian diferencias significativas.
- En el Próctor Modificado el árido natural tiene una mayor densidad seca máxima y menor contenido de humedad óptima que los áridos reciclados de hormigón y mixtos. El árido natural y el reciclado de hormigón son más sensibles a los cambios en el contenido de humedad que los mixtos.
- El árido natural tiene el mayor valor de CBR, seguido de los áridos reciclados de hormigón y de los mixtos. Basándose en el alto valor del CBR y en la ausencia de hinchamiento tanto en los áridos reciclados de hormigón como en los mixtos, se puede esperar que ambos posean una aceptable capacidad de carga y estabilidad estructural.
- Si las plantas de tratamiento de RCD mantienen un buen control de calidad del material reciclado, este se podrá utilizar directamente como subbase en el firme de carreteras. Los ensayos de caracterización y de comportamiento realizados deben complementarse con ensayos en tramos de prueba de carreteras, para superar la desconfianza existente.

Comportamiento en fatiga de bases de pavimentos con árido reciclado y residuos de fibras de HDPE. Periódico de Ingeniería Geotécnica y Geomedioambiental, julio de 2003.

Empresas/Instituciones participantes:

Sobhan, K Florida Atlantic University, Departamento de Ingeniería Civil, 777 Glades Rd, Boca Raton, FL 33431 EE.UU.

Material reciclado utilizado:

Los materiales para bases del pavimento contienen cemento estabilizado y árido compactado recuperado, cenizas volantes, y refuerzo de fibras de residuos de plástico (polietileno de alta densidad).

Breve descripción de las actividades:

El objetivo principal de la investigación es evaluar una composición que contiene más del 90% de material reciclado para usos alternativos.

Los objetivos específicos del estudio son:

- Evaluar el comportamiento en fatiga de este nuevo material compuesto.
- Evaluar la acumulación de los daños por fatiga en el material.

Resultados obtenidos:

Los resultados indican que la resistencia a la fatiga de este material es similar a la de otros materiales tradicionales de estabilización de pavimentos. Se llegó a la conclusión de que el módulo elástico permanecía aproximadamente constante (disminuía lentamente) para la mayoría de las muestras hasta el fallo por fatiga.

La acumulación de daños en el material sigue aproximadamente las reglas tradicionales de acumulación de daños, utilizadas frecuentemente en ingeniería civil.

Residuos de construcción y demolición para la construcción de carreteras: Comportamiento a largo plazo de carreteras construidas con árido reciclado para capas de base de pavimentos. 3ª Conferencia Internacional de Gestión de Residuos y Medioambiente, Malta, junio de 2006.

Empresas/Instituciones participantes:

Lancieri, F, Universidad de Pisa, Departamento de Ingeniería Civil, División de Carreteras y Transportes, Pisa, Italia.

Material reciclado utilizado:

Se describen los resultados de los ensayos realizados durante 2001 y 2005 en dos carreteras secundarias construidas en 1998, utilizando áridos procedentes de RCD para capas de base y subbase.

Breve descripción de las actividades:

Se llevaron a cabo ensayos no destructivos para obtener los datos de campo, inspecciones visuales, medidas del tráfico y creación de una base de datos. Se analizaron las medidas de las desviaciones con el FWD para determinar los valores del módulo de varias capas de pavimentos y datos de perfiles para determinar el índice de regularidad de la superficie.

Resultados obtenidos:

Las pruebas de desviación en 2001 mostraron que el comportamiento del pavimento era mejor de lo esperado. Este comportamiento se explica por las propiedades autocementantes. Ensayos de campo repetidos en 2005 revelaron la diferencia significante en el comportamiento estructural de los pavimentos estudiados: el primero, para tráfico pesado, mostraba una gran mejora del módulo inicialmente calculado de la subbase, mientras que el segundo mantenía prácticamente los mismos valores del módulo.

Estos datos de campo se compararon con ensayos de laboratorio para investigar la evolución en el tiempo de las características mecánicas de los RCD y para evaluar la influencia de las técnicas de compactación en la mejora de la resistencia. Los resultados confirman que la construcción de carreteras podría ofrecer un uso fiable a los RCD.

7.2 Situación legislativa y normativa en el área de España y Europa

El desarrollo de la industria europea del reciclaje de residuos de la construcción y demolición comienza a principios de los años 80 en Alemania, con la elaboración de las primeras Guías Técnicas de Áridos Reciclados. La principal dificultad fue no disponer de los datos ni la experiencia actuales, respecto a la idoneidad de los productos granulares reciclados en la construcción de capas estructurales de carreteras y vías urbanas.

Los controles de calidad en los procesos productivos, el excelente comportamiento del material y su competitividad entre los áridos para usos no ligados, han sido las claves para su utilización en la construcción de bases y subbases de carreteras y vías urbanas. En el año 1993, se reconoció y reguló oficialmente su utilización en las obras públicas de Alemania, mediante Directrices técnicas del Gobierno Federal para el Control de Calidad de Materiales minerales para obras de carreteras -RG Min-StB 93-.

A partir del año 1993, la Directriz RG Min-StB 93, y una excelente relación entre calidad y precio, facilitaron el crecimiento del sector del reciclaje en Alemania y permitieron demostrar que los áridos reciclados son muy competitivos en los mercados de los materiales granulares destinados a la construcción de bases y subbases de carreteras.

Las directrices de los Organismos de Carreteras alemanes son muy parecidas a las Circulares y Anejos del PG3 español, y contemplan los usos específicos de los áridos reciclados en la construcción de bases y subbases de carreteras, desde el año 1993.

Los criterios que rigen actualmente en España respecto a los requisitos técnicos y medioambientales del uso de los áridos reciclados no permiten diseñar ensayos y definir límites de tolerancia adecuados, ya que se basan en las normativas existentes para los áridos convencionales. En este sentido, dentro de la aplicación de los áridos reciclados como zahorras para bases y subbases de vías y carreteras, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3), en su Parte

5ª: Firmes y pavimentos, presenta la posibilidad del uso de áridos reciclados como zahorras para las categorías de tráfico pesado T2 a T4, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas, y sea declarado su origen.

Con el fin de evitar la dispersión de iniciativas y criterios, el sector del reciclaje debe disponer de un documento técnico oficial que permita el acceso legal de los materiales reciclados a las obras públicas para poder trabajar en igualdad de condiciones, para lo cual sería muy favorable que las Autoridades de Carreteras de España y de las Autonomías con mayores desarrollos del reciclaje respondan a la iniciativa del GERD, que se materializa en la presente Guía.

A continuación se lleva a cabo un recorrido por la legislación aplicable actualmente, tanto en España como en el resto de Europa, a los áridos reciclados que se emplean como zahorras para bases y subbases de vías y carreteras.

ESPAÑA

PG3. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento. Artículo 510. Zahorras

Este pliego recoge las especificaciones que deben cumplir los áridos empleados como zahorras en obras de carreteras y puentes, así como requisitos para la puesta en obra y la ejecución de la unidad de obra correspondiente.

Las zahorras se definen como aquellos materiales, de granulometría continua, utilizados como capa de firme. El Pliego establece que para las categorías de tráfico pesado designadas como T2 a T4, se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho, en cumplimiento del Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, siempre que se declare el origen de los materiales. Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

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

Este documento normaliza el uso de los materiales procedentes de residuos de construcción y demolición. Aunque el empleo de los materiales reciclados está contemplado en la normativa nacional actual, se les aplica las mismas prescripciones que a los materiales naturales, lo que en la práctica dificulta su utilización. Esta normativa regula unas especificaciones propias para la utilización de estos materiales en obras lineales, urbanizaciones, calles, y en general en las obras de construcción.

Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.

Tiene por objeto prevenir la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión y fomentar su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, así como regular los suelos contaminados, con la finalidad de proteger el medio ambiente y la salud de las personas.

Será de aplicación supletoria, entre otras materias, y en aquellos aspectos regulados expresamente en su normativa específica, a la gestión de los residuos resultantes de la prospección, extracción, valorización, eliminación y almacenamiento de recursos minerales, así como de la explotación de canteras.

II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008-2015.

Surge para mejorar la gestión de todos los residuos generados en España, estimular a las distintas Administraciones y agentes involucrados hacia el logro de objetivos ecológicos ambiciosos, y dar cumplimiento a las normas legales (Ley 10/1998 de Residuos y Directiva Marco Europea 2006/12/CE). En este Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) se incluyen, en forma de anexos, 13 Planes de Residuos específicos en cada uno de los cuales se establecen medidas concretas y objetivos ambientales, y 3 Documentos Estratégicos.

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

Tiene por objeto establecer el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, con el fin de fomentar su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, asegurando que los destinados a operaciones de eliminación reciban un tratamiento adecuado, y contribuir a un desarrollo sostenible de la actividad de construcción.

EUROPA

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

Especifica las propiedades de los áridos obtenidos por tratamiento de materiales naturales, artificiales y reciclados, para materiales tratados con conglomerantes hidráulicos y no tratados,

empleados en obras de ingeniería civil y construcción de carreteras. Establece la metodología de evaluación de la conformidad para los productos, y una serie de categorías para cada propiedad especificada.

Como principal novedad en la modificación de 2008, y con aplicación directa para áridos reciclados procedentes de RCD, se incluye una nueva especificación: clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados, según la norma de ensayo EN 933-11, siendo obligatorio realizar un ensayo mensual de esta propiedad.

Directiva 89/106/CE sobre Productos de la Construcción (DPC).

Tiene como objetivo primordial la libre circulación de productos de la construcción en el mercado de la Unión Europea. Esta Directiva dispone que los productos de la construcción, que, como en el caso de los áridos, se incorporen con carácter permanente a las obras, se deben adaptar, en todos los países de la UE y, mediante una adecuada armonización de su normalización, a los requisitos esenciales de seguridad y salud así como a otros requisitos que deberán ser exigidos para garantizar la calidad de los mismos. Estos requisitos esenciales que deben cumplir, durante un periodo de vida razonable, las obras en las que estén incorporados los productos (áridos) con Marcado CE son:

- Resistencia mecánica y estabilidad
- Seguridad en caso de incendio
- Higiene, salud y medio ambiente
- Seguridad de utilización
- Protección contra el ruido
- Ahorro de energía y aislamiento térmico

Otras Directivas y trasposiciones a considerar son las siguientes:

- Directiva de la Comisión de 22 de julio de 1993 por la que se modifica la directiva de Productos de la construcción (89/106/CEE) y otras Directivas.
- Decisión de la Comisión de 31 de mayo de 1995 relativa a la aplicación del apartado 2 del artículo 20 de la Directiva 89/106/CEE del Consejo, sobre productos de la construcción (entre otros productos, afecta a los prefabricados).
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre los residuos. (Directiva Marco sobre Residuos).

HOLANDA

Norma BRL2506:2003. Directiva Nacional de Evaluación 2506, para la certificación de producto KOMO de Áridos RCD para la utilización en construcción de hormigón y carreteras, en construcción de carreteras, en construcción de suelos y en trabajos de obra civil.

Establece un modelo de aseguramiento de la calidad en el proceso de producción de áridos reciclados, con el objeto de obtener el sello de aprobación KOMO, que obliga además al cumplimiento de otras normas técnicas nacionales de construcción, como son las Condiciones Estándar RAW, el Decreto de Materiales de Construcción y/o la NEN 5905, dependiendo de su aplicación.

Además, esta directiva de evaluación incluye reglas para prevenir la aparición de amianto en los áridos de RCD. Para ello se ha adoptado el llamado módulo de cuidados de amianto.

El objetivo de esta directiva de evaluación y de los certificados entregados es garantizar la calidad del producto en el momento de su entrega o su trasmisión al destinatario.

Está estructurada en varios apartados: un prefacio o introducción; unos requisitos de producto, que por un lado incluyen propiedades de higiene industrial y por otro propiedades técnico-civiles en función de las aplicaciones contempladas; siguen unos requisitos de procedimientos para obtención del certificado similares a otros como el marcado CE; y por último establece la sistemática del control de producción para los requisitos de producto comentados anteriormente, con un apartado particular para el manejo del asbesto o amianto.

ALEMANIA

RuA-StB 2001. Directrices para la Utilización Compatible con el Medio Ambiente de Subproductos Industriales y Materiales de Construcción Reciclados en la Construcción de Carreteras y Caminos (RuA-StB), Edición de 2001.

Las directrices RuA-StB tienen en cuenta tanto la compatibilidad con los recursos hídricos como las normativas de la Ley Federal de la Protección del Suelo (BBodSchG) y constituyen la tercera parte de un sistema regulador para asegurar la calidad y la compatibilidad ambiental de la utilización de materiales de construcción minerales en la construcción de carreteras y caminos. Esencialmente el sistema consta de:

- 1ª Parte "Prescripciones Técnicas para el Suministro de Materiales Minerales en la Construcción de Carreteras y Caminos" (TL Min-StB).
- 2ª Parte "Directrices para el Control de Calidad de Materiales Minerales en la Construcción de Carreteras y Caminos" (RG Min-StB).
- 3ª Parte "Directrices para la Utilización Compatible con el Medio Ambiente de los Subproductos Industriales y Materiales de Construcción Reciclados en la Construcción de Carreteras y Caminos" (RuA-StB).

Estas directrices recogen las consideraciones generales, el ámbito de aplicación, y las condiciones para la utilización de los materiales objeto de esta normativa.

En cuanto a las consideraciones generales, destacan las Precripciones Técnicas de Suministro (TL), que ya existen en Alemania para materiales reciclados de construcción, aunque no consideran aspectos de compatibilidad ambiental.

Respecto al ámbito de aplicación, estas directrices son válidas para la utilización de los materiales de construcción de carreteras y caminos en obras de firmes y explanadas de carreteras y caminos incluidos en el Cuadro 1, que recoge, entre otros subproductos industriales, el Material de construcción reciclado (RC).

No se incluyen los materiales bituminosos reciclados, ni materiales reciclados procedentes de demolición de carreteras y caminos que contengan alquitrán.

TL Gestein-StB 2004. Prescripciones técnicas de suministro para los áridos utilizados en la construcción de carreteras y caminos.

Las TL Gestein-StB contienen requisitos de aplicación a los áridos naturales, artificiales y reciclados utilizados en la construcción de capas superiores de asfalto, hormigón, mezclas de material granulares y tratadas con conglomerantes hidráulicos, pavimentos de piedra y adoquines, capas finas en aplicaciones en frío y tratamientos superficiales, que forman parte de carreteras, caminos y otras áreas viales. Además contienen requisitos que afectan a características relevantes para el medio ambiente de los áridos artificiales y reciclados.

Establece una serie de requisitos físico-mecánicos, químicos, granulométricos y de forma y unas categorías para cada propiedad que se deben cumplir en función de la aplicación a la que vaya destinado el árido para construcción de carreteras y caminos. Para el material reciclado de construcción, existe un anexo específico que recoge condiciones particulares para estos áridos, fundamentalmente en cuanto a composición.

También establece el procedimiento para la evaluación de la conformidad, incluyendo los ensayos de tipo inicial y el control de producción en fábrica.

TL SoB-StB 2004. Prescripciones técnicas de suministro para mezclas de material de construcción y suelos utilizados en capas no ligadas en la construcción de carreteras y caminos.

Estas prescripciones técnicas de suministro transponen la norma europea DIN EN 13285 "Mezclas de áridos sin ligante – Requisitos", citado en el apartado C de los "Procedimientos contractuales para trabajos de construcción" (VOB), en Alemania. Cuando sea posible, las TL SoB-StB utilizarán las categorías de esta norma europea para las propiedades de las mezclas de material de construcción y suelos que se requieren en Alemania para la utilización pretendida.

Estas prescripciones establecen los requisitos que deben cumplir las mezclas de material de construcción, como mezcla de áridos naturales y diferentes subproductos industriales, para su empleo como árido en capas no ligadas superiores para carreteras, caminos y otras áreas viales (capas antihielo, capas no ligadas para rodadura, etc.).

SUIZA

SN 670 062 Reciclaje, consideraciones generales.

Esta norma es aplicable a los residuos minerales de la construcción procedentes de la demolición de firmes, escarificación de carreteras y caminos y demolición de edificaciones y obras de ingeniería civil; y a su reutilización en la superestructura de carreteras y caminos.

Establece los requisitos técnicos de construcción para la reutilización de los materiales reciclados y de las capas construidas con ellos. Para las capas de subbase no ligadas, permite el empleo de todas las tipologías de árido reciclado definidas, con condicionantes concretos en cada caso. Recoge además aspectos relevantes para el medio ambiente.

SN 670 141 Reciclaje; materiales bituminosos de demolición.

Esta norma es aplicable a los materiales bituminosos de demolición obtenidos por escarificación o fresado de revestimientos bituminosos en los cuales la parte de zahorra no excede del 10% de la masa total, así como a su reutilización en las superestructuras de carreteras y caminos. Contiene directrices para la extracción del material bituminoso de demolición y su transformación en áridos de asfalto, así como para la utilización de los áridos en la fabricación de aglomerado reciclado o como zahorra

de substitución para las capas de subbase o estabilizaciones. La aplicación de esta norma conforme a las normativas garantiza que se respete el medio ambiente.

En el apartado F.25 se recogen los requisitos de calidad que deben cumplir los áridos de asfalto empleados como zahorra de substitución para subbases. El apartado L hace referencia al empleo de áridos de asfalto en capas no ligadas, incluyendo capas de subbase y explanadas, dando interesantes recomendaciones a la hora de ejecutar estas unidades de obra.

SN 670 142 Reciclaje; materiales no bituminosos de demolición.

Esta norma es aplicable a los materiales no bituminosos de demolición, obtenidos por excavación, escarificación o fresado de capas de subbase no ligadas o de capas de subbase y de base estabilizadas con aglomerantes hidráulicos, así como a su reutilización en las superestructuras de carreteras y caminos.

Contiene directrices para la extracción de los materiales no bituminosos de demolición y la preparación de zahorras recicladas y de áridos de estabilización, así como para la utilización de los materiales reciclados como áridos en la fabricación de aglomerado reciclado o como zahorra de substitución para estabilizaciones o para capas de subbase no ligadas. La aplicación de esta norma para la fabricación de revestimientos, de subbases y de bases conformes debe garantizar que se respete el medio ambiente.

En el apartado F.16 se recogen los requisitos de calidad que deben cumplir los áridos reciclados procedentes de materiales no bituminosos de demolición empleados como zahorra de substitución para subbases. Además, el apartado G que hace referencia al empleo de áridos reciclados procedentes de materiales no bituminosos de demolición en capas no ligadas, incluyendo capas de subbase y explanadas, dando recomendaciones para la ejecución estas unidades de obra.

SN 670 143 Reciclaje; hormigón de demolición.

Esta norma es aplicable al hormigón de demolición, obtenido por medio de la demolición o del fresado de construcciones o de revestimientos de hormigón armado o no armado, así como a su reutilización en las superestructuras de carreteras y caminos. Contiene directrices para la transformación del hormigón de demolición en áridos de hormigón así como para la utilización de los áridos en la fabricación de revestimientos, bases y subbases.

La aplicación de esta norma debe garantizar que la reutilización del hormigón de demolición respete el medio ambiente.

En el apartado F.18 se recogen los requisitos de calidad que deben cumplir los áridos de hormigón, empleados como zahorra de substitución para capas de subbase.

Además, hay un apartado H que hace referencia al empleo de áridos de hormigón en capas no ligadas, incluyendo capas de subbase y explanadas, dando interesantes recomendaciones a la hora de ejecutar estas unidades de obra.

SN 670 144 Reciclaje; materiales mezclados de demolición.

Esta norma es aplicable a los materiales mezclados de demolición, obtenidos durante la construcción, la transformación/renovación y la demolición/desmantelamiento de edificaciones o de construcciones de ingeniería civil, así como a su posterior reutilización en superestructuras de carreteras y caminos. Contiene directrices para la transformación de los materiales mezclados de demolición en áridos de mezcla, así como para la utilización de dichos áridos en la construcción de bases y de subbases de carreteras y caminos.

La aplicación de esta norma debe garantizar una reutilización de los materiales respetuosa con el medio ambiente.

En el apartado E.19 se recogen los requisitos de calidad que deben cumplir los áridos de mezcla, empleados como zahorra de substitución para capas de subbase. Además, hay un apartado F.21 que hace referencia al empleo de áridos de mezcla en capas de subbase, aportando recomendaciones para la ejecución de estas unidades de obra.

7.3 Resumen de metodología, resultados y conclusiones de la investigación en el área

El principal ámbito de investigación en el que se ha trabajado en la GEAR es la utilización de áridos reciclados mixtos como zahorra en la construcción de capas estructurales de carreteras, según UNE-EN 13242:2008 y Orden del PG3 (artículo 330 “Zahorras”), y como aplicación accesoria, en caminos con baja intensidad de tráfico. Esta aplicación representa el 40% de la producción actual en España y debería alcanzar el 80% en el futuro.

El contenido de la investigación realizada por el Proyecto GEAR es presentado esquemáticamente en la tabla 7.1.

Etapa	Descripción de las actividades
Diagnóstico	- Caracterización y definición de los usos propuestos. - Análisis de la normativa técnica española de referencia. - Comparativa internacional en normativa para reciclados. - Caracterización de los áridos reciclados producidos en España .
Investigación Complementaria	- Propuesta de investigación: hipótesis de trabajo. - Plan de Ensayos (tipo de muestras, número de muestras, ensayos a realizar). - Análisis de los resultados. - Conclusiones de la investigación y proposición inicial de prescripciones y recomendaciones técnicas.
Aplicación experimental del Conocimiento	- Identificación, análisis y control de obras. - Plan de Ensayos (tipo de muestras, número de muestras, ensayos a realizar). - Análisis de los resultados. - Conclusiones de la investigación y proposición final de prescripciones y recomendaciones técnicas.

Tabla 7.1. Etapas de la investigación realizada por el Proyecto GEAR.

Se pretendió con esta propuesta de trabajo determinar de forma exhaustiva las características del árido reciclado producido en España y estudiar de qué manera afectan estas propiedades al material puesto en obra.

El estudio se ha desarrollado en el marco del Proyecto GEAR en INTROMAC.

7.3.1 Investigación Complementaria

La etapa de "Investigación Complementaria" constituyó una fase del proyecto destinada a determinar científica y empíricamente las características técnicas de los áridos reciclados adecuadas para cada categoría de material y uso recomendado.

Este estudio se ha orientado a:

- Comprobar la resistencia y estabilidad del material.
- Establecer requisitos normativos y técnicos adecuados para el uso de árido reciclado como zahorras y, en su caso, subbalasto.
- Analizar la peligrosidad medioambiental.

El material a estudiar para el uso como zahorra en capas no ligadas se centró principalmente en un todo uno, buscando el mayor ajuste posible a los husos granulométricos previstos por el PG3, es decir, con tamaños máximos de 20 ó 25 mm. En cuanto a la composición, la intención es centrar la investigación en los áridos mixtos, ya que suponen la mayor parte de la producción en España. Ya el PG3 contempla en su artículo 510 la posibilidad de emplear materiales reciclados procedentes de capas de aglomerado de firmes de carretera o de demoliciones de hormigones de resistencia a compresión final superior a treinta y cinco megapascales (35 MPa).

De acuerdo con la propuesta de clasificación de los áridos reciclados recogida en el Propuesta de Prescripciones Técnicas, se estudió tres tipos de áridos, uno predominantemente compuesto por material pétreo, uno predominantemente compuesto por material de hormigón y mortero, y, finalmente, uno predominantemente compuesto por material cerámico. En todos los casos se ha considerado un porcentual de 100% de sustitución de árido natural.

Las granulometrías, buscando adaptarse a lo estipulado en el PG3, tienen como tamaños máximos 20-25 mm.

Por citar algunos ejemplos:

- Planta P29: Planta fija, con los siguientes productos de árido reciclado: 0/20, 0/20 Fino, 0/40, 0/60 y 20/40 mm. Ha suministrado muestras de árido reciclado muy limpio y compuesto mayoritariamente por hormigón puro triturado y piedra natural triturada con algunas trazas de mezclas bituminosas, aglomerantes provenientes de yesos y fragmentos de 5-6 cm de alambre fino de armados. Estas muestras poseen cantidades mínimas de materiales cerámicos. El contenido en partículas flotantes (papel, tallos vegetales, madera, plásticos, etc.) es mínimo también. Según se observa en la figura 7.4, el color grisáceo de la muestra es debido al contenido mayoritario de fragmentos de hormigón triturado.
- Planta P3.C2: Planta fija, que produce árido reciclado mixto 0/6, 0/15, 0/50, 6/20, 40/80 y 80/200 mm. Ha suministrado un material más rico en la proporción de materiales cerámicos triturados que el anterior. Se ha observado al realizar los ensayos de composición, que la presencia de fragmentos de ladrillos rústicos para solados que han sido fabricados a partir de arcillas poco depuradas (granos de arena de cuarzo y feldespato bien visibles) da lugar a que se desprendan muchos finos por la propia fricción entre partículas del árido, ya que los citados fragmentos son bastante deleznables. Por lo demás, el árido tiene un contenido mínimo en fragmentos de aglomerantes hidráulicos realizados con yesos y fragmentos de mezclas bituminosas. El contenido en partículas flotantes es

también muy bajo, casi "inapreciable". Según se observa en la figura 7.4, los tonos rojizos indican la mayor presencia de fragmentos de materiales cerámicos triturados de las muestras P3.C2.

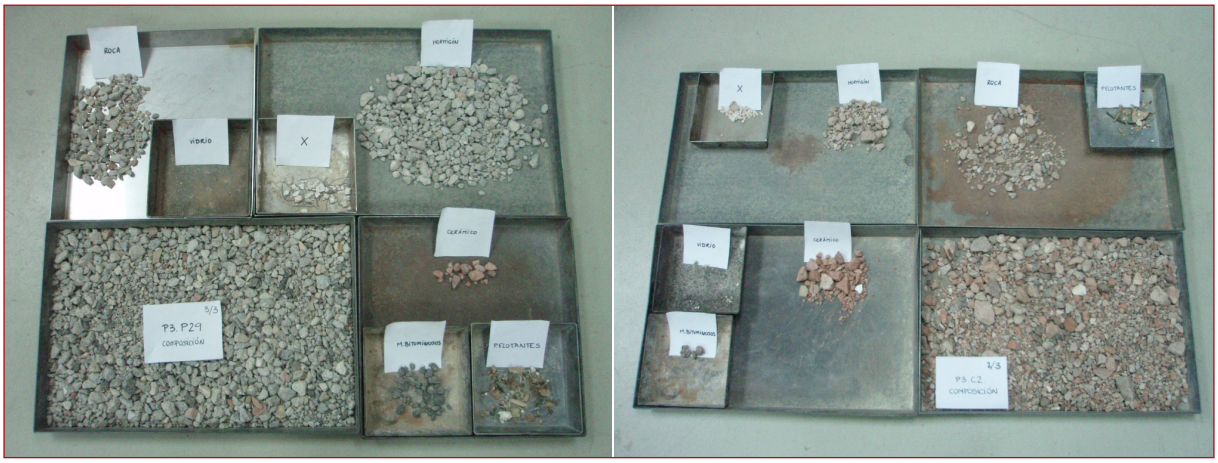


Figura 7.4. Composición de las muestras de las plantas P3.P29 (a la izquierda) y P3.C2 (a la derecha).

Los ensayos y controles recogidos en el Plan de Ensayos planteado para la aplicación como zahorra artificial son presentados en la tabla 7.2.

Control	Norma	Frecuencia	Denominación
Calidad	UNE-EN 1744-1:1999 Art. 11	1/mes	Sulfatos solubles en agua
	UNE-EN 933-11:2009	1/mes	Ensayo de clasificación
	UNE-EN 1097-6:2001	1/mes	Densidad de partículas y absorción de agua
	UNE-EN 1744-1:1999 Art. 11	1/año	Determinación del contenido total en azufre
	UNE-EN 1744-1:1999 Art. 15	1/año	Determinación de los compuestos orgánicos que afectan al fraguado y al endurecimiento de los hormigones. Húmicos
	UNE 103 204:1993	(**)	Contenido en materia orgánica
	UNE 103 201:1996	(**)	Contenido en sulfatos
	UNE 146130:2000 Anexo C	1/mes	Determinación Coeficiente de limpieza
	UNE-EN 933-8:2000	1/semana	Equivalente de arena (*)
	UNE-EN 933-9:1999	1/semana	Ensayo de azul de metileno (*)
	UNE 103103:1994	1/mes	Límite líquido
	UNE 103104:1994	1/mes	Límite plástico
	Anexo 3, PF-7	(**)	Permeabilidad bajo carga variable
	UNE-EN 1097-1:1997	2/año	Determinación de la resistencia al desgaste. Micro Deval
	UNE-EN 1097-2:1999	2/año	Determinación de la resistencia a la fragmentación. Desgaste de Los Ángeles
	UNE-EN 933-3:1997	1/mes	Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
	UNE-EN 933-5:1999	1/mes	Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.
	UNE-EN 933-1:1998	1/semana	Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado.
	NLT-326:2000	1/ 2 años	Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras
	UNE 103501:1994	2/año	Ensayo de compactación. Próctor Modificado
Ejecución	UNE 103502:1995	2/año	C.B.R.
	NLT-357:1998	En obra	Ensayo de carga con placa
	ASTM D 2922	En obra	Densidad in situ

Tabla 7.2. Plan de Ensayos planteado para la aplicación como zahorra artificial.
(*) En función del contenido en finos (**) Cuando sea necesario.

Se ha tomado como base, además del artículo 510 del PG3 y el PF-7, la Instrucción sobre Control de los Áridos Utilizados por las Empresas Constructoras en sus Obras, del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de 2004.

Se han revisado también las normas europeas referidas a la aplicación en capas no ligadas, pero no se considera necesario añadir ningún ensayo adicional.

A continuación se resumen los resultados obtenidos en esta fase.

Composición química

De acuerdo con el articulo 510.2.2 del PG3, el contenido ponderal de compuestos de azufre totales (expresados en SO_3), determinado según la UNE-EN 1744-1, deberá ser inferior al cinco por mil (0,5%) donde los materiales estén en contacto con capas tratadas con cemento, e inferior al uno por ciento (1%) en los demás casos.

Para el total de las plantas analizadas en el diagnóstico realizado por el Proyecto GEAR, y a pesar de haber valores máximos cercanos al 5%, la media de los valores resulta estar en el 1%, justo el límite marcado por la normativa de aplicación.

Ya para las tres muestras analizadas en la fase de investigación complementaria, el límite establecido por el PG3 se cumple sin problemas, con un valor medio de 0,16%.

Como método alternativo al anterior, que se utilizó en la caracterización inicial, y que se ajusta más a las características intrínsecas del árido reciclado, se propuso la siguiente norma: UNE-EN 1744-1:1999 Aptdo 11. Sulfatos solubles en agua.

Con el método alternativo propuesto, que no está influenciado por los alcalinos del cemento presente en los componentes de hormigón del árido reciclado, se consigue aumentar el rango de cumplimiento de forma muy significativa, para el caso de materiales en contacto con capas tratadas con cemento (límite inferior a 0,5%), situación para la que se propone esta alternativa.

En este caso, y con el método alternativo propuesto, se siguen cumplimiento los límites propuestos, incluso con mayor facilidad, ya que en este caso la media de las tres muestras ensayadas baja hasta 0,08%.

Limpieza

De acuerdo con el artículo 510.2.3 del PG3, los materiales estarán exentos de terrones de arcilla, marga, materia orgánica, o cualquier otra que pueda afectar a la durabilidad de la capa.

En el caso de las zahorras artificiales el coeficiente de limpieza, según el anexo C de la UNE 146130, deberá ser inferior a dos (2).

Según los resultados del diagnóstico general, el coeficiente de limpieza tiene un grado de incumplimiento importante, cercano al 48%, si bien hay que señalar que otros ensayos descartan la presencia de sustancias perjudiciales como arcilla y materia orgánica.

Esta propiedad resulta ser una de las críticas para los áridos reciclados a emplear como zahorras, puesto que ninguna de las tres muestras analizadas en la fase de investigación complementaria cumplen este requisito.

Por otro lado, se observa que los materiales estarán exentos de terrones de arcilla, marga, materia orgánica, o cualquier otra que pueda afectar a la durabilidad de la capa.

Según los resultados obtenidos para los ensayos realizados de acuerdo con la norma UNE-EN 1744-1:1999 Aptdo 15 C.O. que afectan al fraguado y endurecimiento, ensayo cualitativo que detecta la presencia de materia orgánica, en todos los casos, la coloración obtenida ha sido menor que la disolución patrón, lo que descarta la presencia de materia orgánica.

Se debe resaltar que este ensayo es más preciso que el normalizado para suelos, por el método del permanganato potásico (UNE 103 101), que da resultados anómalos a causa de las reacciones con sustancias presentes en los áridos reciclados.

Equivalente de arena

Según el PG3, para el total de muestras ensayadas en el diagnóstico, apenas un 13% no llegan al mínimo exigido para poder utilizarse en alguna de las categorías de tráfico.

En el caso de las tres muestras analizadas en la fase de investigación complementaria, el 100% cumple con el requisito más exigente para esta propiedad.

Plasticidad

De acuerdo con el articulo 510.2.4 del PG3, el material será “no plástico”, según la UNE 103104, para las zahorras artificiales en cualquier caso.

El resultado obtenido ha sido no plástico en todos los ensayos realizados.

Resistencia a la fragmentación

De acuerdo con el articulo 510.2.5 del PG3, el valor máximo del Coeficiente Los Ángeles para los áridos de la zahorra artificial debe ser de 35% para categorías de tráfico T00 a T2 y de 40% para categorías de tráfico T3 y T4, y arcenes. Se debe resaltar que el

PG3 permite que materiales reciclados presenten un valor de hasta 40% y 45%, respectivamente.

Según los resultados del diagnóstico general, el grado de incumplimiento para el Coeficiente de desgaste Los Ángeles, aun siendo significativo (17%), resulta mejor de lo esperado.

Además no se observa una diferencia de comportamiento en función de la composición del árido reciclado, como sería esperable inicialmente.

Aun siendo un punto crítico, el comportamiento de los áridos ensayados en la fase de investigación complementaria es excelente. Los tres cumplen las exigencias para alguna de las categorías del PG3.

Forma

De acuerdo con el artículo 510.2.6 del PG3, en el caso de las zahorras artificiales, el índice de lajas de las distintas fracciones del árido grueso, según la UNE-EN 933-3, deberá ser inferior a treinta y cinco (35).

Para el total de las muestras analizadas por el Proyecto GEAR, apenas hay un 0,8% testimonial que no cumple con el límite marcado por el PG3.

Ya para los áridos ensayados en la fase de investigación complementaria, el valor del índice de lajas es excelente y cumple los requisitos establecidos sin ningún problema.

Tipo y composición del material

De acuerdo con el artículo 510.3 del PG3, la granulometría del material, según la UNE-EN 933-1, deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados para las zahorras artificiales (tabla 7.3).

En el caso de las tres muestras analizadas para la investigación complementaria, el grado de cumplimiento apenas llega al 44% para el huso ZA20, uno de los más empleados. En cualquier caso, la granulometría es un aspecto fácilmente regulable, y precisamente este alto grado de incumplimiento puede venir dado porque en el momento de tomar la muestra, los requisitos de producción para el producto todo uno considerado eran otros diferentes a los de la aplicación en carreteras.

En el caso del diagnóstico general realizado por el Proyecto GEAR, el grado de incumplimiento para el caso concreto del huso ZA20 es cercano al 90%. Los motivos pueden ser los expuestos anteriormente.

Se han analizado igualmente los husos ZA25 y ZAD20, con resultados muy similares en cuanto al grado de cumplimiento.

Tipo de zahorra artifical	Abertura de los tamices UNE-EN 933-2 (mm)								
	40	25	20	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ZA25	100	75-100	65-90	40-63	26-45	15-32	7-21	4-16	0-9
ZA20	-	100	75-100	45-73	31-54	20-40	9-24	5-18	0-9
ZAD20	-	100	65-100	30-58	14-37	0-15	0-6	0-4	0-2

Tabla 7.3. Husos granulométricos para las zahorras artificiales fijados por el PG3.

Densidad Próctor

De acuerdo con el artículo 510.7.1 del PG3, para las categorías de tráfico pesado T00 a T2, la compactación de la zahorra artificial deberá alcanzar una densidad no inferior a la que corresponda al cien por cien (100%) de la máxima de referencia, obtenida en el ensayo Próctor Modificado, según la UNE 103501.

En el caso de la zahorra natural o cuando la zahorra artificial se vaya a emplear en calzadas de carreteras con categoría de tráfico pesado T3 y T4 o en arcenes, se podrá admitir una densidad no inferior al noventa y ocho por ciento (98%) de la máxima de referencia obtenida en el ensayo Próctor Modificado, según la UNE 103501.

Para los resultados obtenidos en la investigación complementaria, como era esperable, se observa que la densidad máxima Próctor es ligeramente menor a la habitual para una zahorra artificial de árido natural, mientras que la humedad óptima de compactación resulta ser algo mayor a la más comúnmente empleada para el árido natural.

Se observan las mismas tendencias comentadas anteriormente en el caso del total de las muestras analizadas en el diagnóstico del Proyecto GEAR.

Capacidad portante

Sin ser una exigencia dentro del PG3 para capas de zahorras, el Índice C.B.R. ha sido un ensayo muy extendido que permite estimar la capacidad de soporte de una explanada, ya que se puede realizar en laboratorio, a diferencia del ensayo de placa de carga, que debe hacerse in situ, y es el que mide la deformabilidad de la capa de zahorra y su capacidad de soporte.

Este ensayo nos da una idea aproximada de las características mecánicas de la zahorra, no obstante.

Tanto en el caso de la investigación complementaria como en el diagnóstico general realizado por el proyecto, el valor del C.B.R. resulta ser muy bueno, lo que viene a indicar una capacidad portante alta para el árido reciclado, con lo que de relevante tiene para la durabilidad y comportamiento estructural de la capa de zahorra.

Conclusiones finales

Las conclusiones obtenidas en la fase de investigación complementaria se resumen en la tabla 7.4.

Punto crítico	Problemática	Propuestas de análisis y prescriptivas
Contenido total de azufre	Valores medios por encima de los límites fijados, unque bajo grado de incumplimiento (11%)	Cambio de ensayo por sulfatos solubles en agua, más adecuado a la naturaleza del árido reciclado
Coeficiente de limpieza	Alto grado de incumplimiento (48%)	- Estudio y valoración de "finos" adheridos - Sustitución por ensayo de Terrones de arcilla y Materia orgánica (UNE 103 204)
Resistencia a la fragmentación	Propiedad crítica "per se"; bajo grado de incumplimiento (4%) pero valores cercanos a los límites	Aumentar límites establecidos (ej. 45%), exigiendo comprobación del material compactado (granulometría, EA, plasticidad, …)
Husos granulométricos	Alto grado de incumplimiento	Ninguna (se considera una cuestión de control en la producción de las plantas)

Tabla 7.4. Conclusiones finales de la etapa de investigación complementaria.

7.3.2. Aplicación experimental del conocimiento

Intromac ha llevado a cabo el control y supervisión de tres tramos experimentales, dos de ellos dentro de su ámbito de aplicación, zahorra para viales, hecha con árido reciclado y una para el uso de relleno localizado. El objetivo fue analizar el comportamiento de los áridos reciclados en obra y comprobar la viabilidad del uso de los indicadores de control y calidad ambiental propuestos en sus referidas aplicaciones. El proceso de seguimiento y control de una obra se rige por el Protocolo, por la Ficha de Seguimiento de Control de Obra y por lo que determine la Dirección facultativa de la obra. Los áridos reciclados empleados fueron suministrados por empresas participantes o colaboradoras en el proyecto.

Además, se han analizado los datos disponibles facilitados por el resto de participantes del proyecto para un total de 14 obras más repartidas por toda España.

Este control y supervisión se realizó de acuerdo con una ficha de seguimiento del control de obra y un plan de ensayos según el protocolo específico para la aplicación de zahorras.

Las obras analizadas por el Proyecto son presentadas en el anejo de este documento.

A continuación se resumen los resultados obtenidos en la fase de aplicación experimental.

Coeficiente de Los Ángeles (DLA)

El grado de cumplimiento es bastante elevado, y podría establecerse en un 100% con los resultados que se conocen hasta ahora.

El PG3 clasifica los áridos en 2 categorías en función del DLA, e indica que para materiales reciclados procedentes de capas de aglomerado de firmes de carretera o de demoliciones de hormigones de resistencia a compresión superior a 35 MPa, el valor del DLA podrá ser superior en 5 unidades a los que se especifican en la tabla 510.2, siempre que su composición granulométrica se adapte al huso ZAD20. En la definición de los límites de la GEAR se ha tenido en cuenta este incremento de 5 unidades y además se han establecido 4 clases en función del coeficiente que presenta el árido reciclado.

Teniendo en cuenta estas premisas, es posible clasificar todas las muestras ensayadas en alguna de las categorías que establecen el PG3 o la GEAR.

Algunas muestras no han podido clasificarse en las categorías del PG3 porque, aún cumpliendo con los valores que establece para AR, su granulometría no se adapta al huso ZAD20.

Limpieza

Los ensayos realizados han revelado un 30% de incumplimiento del coeficiente de limpieza, que el PG3 limita al 2%. El valor más alto obtenido en los ensayos del árido reciclado empleado en obra es del 4,2%.

Las prescripciones de la GEAR proponen que, dados los problemas para cumplir con el límite fijado en el PG3 para una parte importante de los áridos reciclados, se realice un estudio de caracterización de los finos adheridos a las partículas gruesas, para descartar de esta forma la posible presencia de sustancias perniciosas para las capas de zahorra.

No obstante, también sugiere que, en caso de incumplimiento de este ensayo, se realicen otros dos que permitan tener la garantía de que los finos adheridos no son peligrosos: terrones de arcilla según UNE 7133 y contenido en materia orgánica según UNE 103 204, con un límite máximo propuesto del 2% en el primer caso y del 1% en el segundo caso.

Composición

Se observa en los resultados de ensayo que todos los áridos reciclados cumplen con los rangos de tolerancia de alguna de las categorías que define la GEAR, en función de la composición del material.

Los datos disponibles también permiten afirmar que, en general, el tipo de AR empleado en las obras depende de las exigencias de éstas y del uso al que se destinan. Así, se observa por ejemplo que las obras de carreteras utilizan zahorras con predominancia de hormigón (ARH y ARMh) y sin embargo la zahorra empleada en urbanizaciones presenta un porcentaje más elevado de elementos cerámicos (ARMc).

Sulfatos

Se observa en este ensayo un cumplimiento muy bajo (tan solo el 50%) de los límites establecidos en las prescripciones, que son los mismos en la GEAR y en el PG3. Ambos establecen que el contenido ponderal de compuestos de azufre totales será inferior a 0,5% donde los materiales estén en contacto con capas tratadas con cemento, e inferior al 1% en los demás casos.

El contenido en sulfatos más alto que se ha registrado en las obras es del 4,59%.

Contenido en yeso

Como era de esperar, dados los datos obtenidos para el porcentaje de sulfatos en los áridos reciclados, los contenidos en yeso también son bastante elevados. Es sabido que la presencia de impurezas como el yeso contribuye al aumento del contenido en sulfatos.

El cumplimiento se reduce al 36% pero hay que aclarar que para este ensayo se dispone de un menor número de datos, con lo que probablemente, los porcentajes de cumplimiento del contenido en sulfatos y en yeso sean bastante similares.

CBR

En general, el árido reciclado empleado en todas las obras presenta un índice CBR bastante aceptable. Con los datos de los que se dispone, la Urbanización de Burgo de Ebro presenta el CBR más alto (156 para una compactación al 100%). El CBR más bajo (45), se ha obtenido en la obra de urbanización del Gran Parque Matalascañas.

Placa de carga

Los resultados de ensayo muestran que aunque para casi todas las obras se obtienen capacidades de soporte que cumplen alguna de las categorías de tráfico pesado contempladas en el PG3 (solo un tramo de una obra presenta un módulo inferior al mínimo de 80 marcado por esta norma). Sin embargo ,el cumplimiento de la relación de módulos es mucho más bajo, con lo que de las seis obras estudiadas para este ensayo, solo una de ellas puede clasificarse en una categoría de tráfico pesado (T00 a T1).

Relación DLA – Placa de carga

El árido reciclado que se utilizó en el tramo de carretera de la Conexión Txorierri presenta un coeficiente Los Ángeles de 38 (clase 2 de la GEAR). En el ensayo de Placa de Carga se obtiene una capacidad de soporte muy satisfactoria, que permite clasificar el árido en la categoría de tráfico T00 a T1. La relación de módulos también se cumple, a excepción del tramo 2 que supera mínimamente el límite marcado en el PG3.

Tramo 1 = 225/109,76 = 2,05 < 2,2.
Tramo 2 = 225/100 = 2,25 > 2,2.
Tramo 3 = 236,84/118,42 = 2,00 < 2,2.

Para el árido reciclado empleado en la Urbanización del Tranvía de Zaragoza, de los ensayos se obtiene un coeficiente Los Ángeles de en torno a 25 (clase 1 de la GEAR). Aunque cumplen la capacidad de soporte para la categoría T3 que establece el PG3 en la Placa de carga, el valor de la relación de módulos supera con creces el límite establecido:

Tramo 1 = 136,36/41,21 = 3,3 > 2,2.

Las muestras de árido reciclado de la Urbanización de San Pablo en Ferrol presentan un coeficiente Los Ángeles de 45 (clase 3 de la GEAR). Al igual que en el caso anterior, aunque cumplen la capacidad de soporte para la categoría T3 en la Placa de carga, el valor de la relación de módulos supera el límite establecido. Sin embargo, este valor se aproxima más al límite del PG3.

Tramo 1 = 101/43 = 2,33 > 2,2.
Tramo 2 = 102/40 = 2,56 > 2,2.

En un principio, sería lógico pensar que la relación entre los resultados obtenidos en los ensayos del coeficiente Los Ángeles y la Placa de carga presentan la siguiente tendencia: al disminuir el DLA (clasificación en categorías de tráfico superiores), se obtienen mejores resultados en el ensayo de Placa de carga. Esta correlación puede observarse en los

resultados de ensayos efectuados en las obras de Txorierri y San Pablo.

Sin embargo la obra del Tranvía de Zaragoza no sigue esta regla, ya que presenta unos DLA muy buenos (en torno a 25) pero la capacidad de soporte es reducida y no cumple el PG3 al superar el límite la relación de módulos.

Relación DLA – CBR

Índices CBR altos se corresponden con bajos coeficientes de desgaste Los Ángeles. El índice CBR más alto que se ha obtenido corresponde a la Urbanización de Burgo de Ebro, donde el árido reciclado presenta un DLA de 28 (Clase 1 de la GEAR). En la obra que presenta el CBR más bajo, el Gran Parque Matalascañas, se obtiene un DLA de 42, que entraría en la categoría 3 de las prescripciones de la GEAR.

Sin embargo, no se observa una tendencia clara y esta relación no se cumple en todos los casos. Así, la obra con un DLA más alto presenta también un elevado CBR.

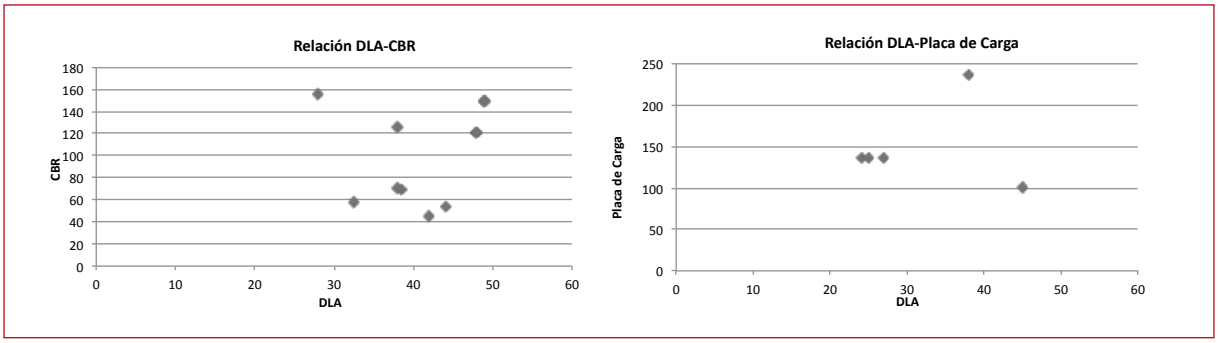


Figura 7.5. Correlación entre los resultados de Coeficiente Los Ángeles y los resultados de CBR y Placa de carga.

Relación CBR – Placa de carga

Índices CBR altos se corresponden con buenos resultados en el ensayo de Placa de carga. De todos modos no se dispone de datos suficientes para confirmar esta tendencia en todas las obras.

Conclusiones finales

A las conclusiones obtenidas en la fase de investigación complementaria, pueden añadirse las siguientes:

1) Coeficiente de Desgaste Los Ángeles: Se ha observado que no existe correlación entre el ensayo de Desgaste Los Ángeles y el ensayo de composición. Las prescripciones de la administración siempre han puesto énfasis en este ensayo y sin embargo se ha demostrado que no es el parámetro más importante, pues en los áridos reciclados, lo que está determinando es el desgaste para el cemento que hay adherido a las partículas pétreas. En el uso del árido reciclado como zahorra y resto de usos no ligados, puede mejorar el DLA tras la compactación, obteniéndose en algún caso concreto una disminución de 42 a 35. Se debe tener en cuenta además que la normativa aplicable a la realización del ensayo, publicada en septiembre de 2010, incluye un anexo específico para el ensayo con RCD.

2) Humedad del material reciclado: De las experiencias de puesta en obra del árido reciclado se han obtenido conclusiones interesantes relacionadas con la humedad del material reciclado procedente de las plantas.

Algunas empresas constructoras que han intervenido en las obras adscritas al proyecto han informado de que el material proveniente de RCD, sobre todo si es de naturaleza cerámica, produce mucho polvo debido al alto contenido en finos.

Por el contrario, el material natural proveniente de cantera, suele incorporar la humedad Próctor para la puesta y en obra basta con aportar cierta cantidad de agua superficial adicional.

Cuando el material es árido reciclado seco, el agua que se incorpora en obra se absorbe rápidamente. Por ello se recomienda aportar esta humedad en planta, lo que implica un amasado de la mezcla árido reciclado-agua, difícil de conseguir en obra a no ser que se remueva con motoniveladora.

Si a la absorción se suman las condiciones de temperatura e insolación del entorno de ejecución en obra, el resultado será que la humedad se perderá rápidamente y se producirá un secado muy rápido de la superficie.

Por lo tanto, la puesta en obra del árido reciclado es muy importante y la presaturación es una operación complicada. La trabajabilidad que pueda deducirse de un ensayo in situ sin presaturar es falsa, porque el valor del Próctor en un árido reciclado disminuye notablemente en la puesta en obra, debido a la absorción natural que presenta. Para solucionar esto, primero habría que saturar el material y después añadir la humedad de trabajabilidad.

Este aspecto es muy importante, pues si no se considera, se corre el riesgo de que las empresas

constructoras obtengan malos resultados de puesta en obra para el árido reciclado y no deseen adquirir este producto.

3) Sulfatos y yeso: En cuanto al yeso presente en los RCD, se tiene constancia de que el uso de yeso en construcción en España es masivo y que al tratarse de materiales de derribos, es normal que esté presente en los áridos reciclados. Sin embargo, su presencia ocasiona una serie de problemas relacionados con la reactividad en el hormigón, y por otro lado de tipo ambiental debido a los lixiviados. Algunas soluciones a la presencia de yeso que se están llevando a la práctica son las siguientes:

- Instalación de medios para rebajar el contenido en yeso desde los procesos en planta.
- Control del material que llega a las plantas de RCD, por ejemplo en la descarga de volquetes, enviando los camiones a un lugar u otro de la obra, según el contenido en yeso que presenten.
- Mediante un precribado que extraiga en seco los finos y elimine de entrada gran parte del contenido en sulfatos.
- Legislación que obligue a separar en obra el yeso.

En cuanto a las sales solubles en agua, precisamente el yeso es la que más rápidamente se solubiliza y se tiene la impresión de que el PG3 es erróneo en este aspecto porque prescribe el análisis de los sulfatos en una muestra, separando la fracción gruesa y analizando solo la fina.

Sería más correcto que los ensayos de sales solubles en agua, yeso y sulfatos solubles en ácido, se llevasen a cabo sobre la misma muestra y no sobre fracciones diferentes. Se podría simplificar también reduciendo los ensayos únicamente al de sulfatos solubles en agua.

7.4 Rellenos y explanaciones

Este capítulo fue desarrollado por los técnicos de AITEMIN (Asociación para la Investigación y Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales), que forman parte del equipo investigador del Proyecto GEAR.

7.4.1 Situación de la investigación en España y Europa

La investigación de la aplicación de los áridos procedentes del reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) que vayan a ser utilizados como material granular en la construcción de terraplenes, explanaciones y rellenos diversos, a pesar de ser una de las aplicaciones que, a priori, mayor viabilidad técnica y comercial podría alcanzar, se encuentra en un estado, como en general el de la aplicación de los áridos reciclados, poco desarrollado en España.

Se puede afirmar que en nuestro país se han realizado poco estudios sobre el uso de áridos reciclados para rellenos, a pesar de la aprobación de su empleo en la normativa nacional vigente, como se verá más adelante. Solo se tiene constancia de estudios para trabajos puntuales para su aplicación en rellenos en polígonos industriales y urbanizaciones.

Una excepción a lo mencionado anteriormente lo constituyen los siguientes recientes trabajos de investigación:

- “Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción”. Marzo 2009. Este trabajo ha sido desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento, y en él se ha desarrollado una aplicación informática de fácil acceso a cualquier persona interesada en los distintos materiales potencialmente utilizables, aplicaciones de destino, normativa que los regula, etc. Entre los residuos contemplados están los RCD y su aplicación como áridos reciclados en carreteras (tanto en terraplenes, como en zahorras y usos ligados de carreteras).
- “Manual de Directrices para el uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco”. Mayo de 2009. Este trabajo ha sido realizado por IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental del País Vasco y como resultado de dicho estudio se ha confeccionado un manual que se puede usar como herramienta para el fomento del uso de los áridos reciclados para obras públicas de la CAPV, entre las cuales se consideran los terraplenes, rellenos y explanadas.
- “Recomendaciones para la redacción de pliegos de especificaciones técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD)” Edición 1. Abril 2010, trabajo de investigación coordinado por Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A (GIASA) y financiado por la Consejería de Obras Públicas y Vivienda de la Junta de Andalucía. En el artículo 3 de este trabajo se desarrollan, en forma de pliego de especificación técnica, las recomendaciones para el empleo de los áridos reciclados como suelos reciclados.
- “Investigación prenormativa sobre la utilización de árido reciclado”. Este proyecto, que se está desarrollando en la actualidad, está siendo realizado por IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental del País Vasco, y tiene como objetivo generar el conocimiento científico-tecnológico que permita establecer una serie de prescripciones técnicas para la utilización de áridos reciclados en aplicaciones no ligadas (explanadas y zahorras) de secciones de carreteras.

En nuestro entorno europeo, existe una amplia experiencia en la utilización de áridos reciclados en carreteras, fundamentalmente en capas granulares, siendo una práctica habitual en países como Francia, Reino Unido, Países Bajos, Alemania, Austria, Suiza y Dinamarca. En apartados posteriores se desarrollará la normativa vigente en distintos países europeos para el empleo de áridos reciclados como suelos para carreteras.

7.4.2 Situación legislativa y normativa en España

La incorporación de los áridos reciclados en la infraestructura de una carretera puede hacerse siempre que se cumplan las condiciones técnicas y medioambientales exigidas, como materiales para explanaciones, en terraplenes y rellenos.

La reglamentación que proporciona el marco general para la utilización de áridos procedentes de residuos de construcción y demolición es la siguiente:

- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, que regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015, que trata a los residuos de construcción y demolición en su apartado número 12.

Las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de áridos reciclados para terraplenes, rellenos y explanadas se encuentran recogidas en la siguiente legislación:

- Artículo 330 “Terraplenes” Orden FOM/1338/02 del PG3
- Artículo 332 “Rellenos localizados” ORDEN FOM/1382/02 del PG3

Asimismo, aunque no se encuentra recogido en el articulado técnico la aplicación de áridos reciclados para los usos de relleno que nos ocupan en este capítulo se deben tener en consideración, además, la siguiente legislación:

- Artículo 421 “Rellenos localizados de material drenante” Orden FOM/3460/03 del PG3
- Norma 6.1-IC “Secciones de Firme” de la Instrucción de Carreteras. Orden FOM/3460/03 del PG3

7.4.3 Situación legislativa y normativa en Europa

En Alemania, el documento de referencia para la utilización de áridos reciclados no bituminosos en la construcción de carreteras es:

- RuA-StB, Directiva para la utilización compatible con el medio ambiente de residuos industriales y materiales de construcción reciclados en la construcción de carreteras.

Este documento, que regula los aspectos de calidad medioambiental de los materiales de construcción y de calidad de los áridos reciclados en la construcción de carreteras, se utiliza en combinación con las normas técnicas generales de construcción:

- TL Gestein-StB, Prescripciones técnicas de suministro para los áridos utilizados en la construcción de carreteras y caminos.
- TL SoB-StB, Prescripciones técnicas de suministro para mezclas de material de construcción y suelos utilizados en capas no ligadas en la construcción de carreteras y caminos.
- TP Min-StB, Regulaciones de los ensayos técnicos de los áridos minerales para la construcción de carreteras y caminos.
- La serie de normas DIN, elaboradas por el Deutsches Institut für Normung eV .

Los documentos de referencia en Holanda para la utilización de áridos reciclados son:

- Decreto de Materiales de Construcción (para la protección del suelo y el agua superficial), que regula la utilización de materiales pétreos y tierras en la construcción.
- BRL 2506, Directiva Nacional de Evaluación para la certificación de producto KOMO de áridos reciclados procedentes de RCD.

Estos documentos se utilizan en combinación con las normas técnicas generales de construcción:

- RAW (Racionalización y automatización de la construcción de carreteras).
- NEN: (especialmente las referidas a hormigón, como la NEN 5905 “Áridos para hormigón. Materiales con densidad superior a 2.000 kg/m^3”).
- Recomendaciones CUR 4: Áridos reciclados de hormigón como árido para hormigón, y CUR 5: Áridos reciclados cerámicos como árido para hormigón.

En Austria, los documentos de referencia para la utilización de áridos reciclados son:

- El estudio elaborado por la Umweltbundesamt (Agencia Federal del Medio Ambiente), dependiente del Ministerio de Medio Ambiente austriaco, “Materiales Reciclados de Construcción, regulación relacionada con la compatibilidad ambiental”, de diciembre de 2002.
- Las guías que publica la Österreichischer Gütesschutzverband Recycling-Baustoffe ÖGSV (Aso-

ciación Austriaca de Protección de la Calidad de los Materiales Reciclados de Construcción): Guía para los materiales reciclados de construcción, Guía para los materiales reciclados de construcción procedentes de edificación: usos ligados, Guía para los materiales reciclados de construcción procedentes de edificación: usos no ligados, Guía para los suelos reciclados de materiales cerámicos de construcción y Guía para el tratamiento de suelos y materiales de construcción contaminados.

- Se utilizan, además, como prescripciones técnicas generales, la serie de normas RVS, elaboradas por la Österreichische Forschungsgemeinschaft Srtasse und Verkehr, y ÖNORM, elaboradas por el Österreichische Normungsinstitut (Instituto Austriaco de Normalización).

En Portugal, los documentos de referencia para la utilización de áridos reciclados son:

- E 471-2006 “Guide for the use of recycled coarse aggegrates in concrete”.
- E 472-2006 “Guide for the production of recycled hot mix asphalt”.
- E 473-2006 “Guide for the use of recycled aggregates in unbound pavement layers”
- E 474-2006 “Guide for the use of construction and demolition recycled materials in embankments and capping layers”

En Francia, el documento de referencia para el empleo de áridos reciclados en terraplenes y explanadas es:

- NF P 11-300. Según esta norma, los áridos reciclados para estas obras están adscritos a la familia F7 de subproductos industriales, para su empleo en terraplenes y explanadas. En esta norma se señala que si el contenido en sulfatos solubles (determinado según la norma francesa XP P 18 581) fuera mayor al 0,7%, estos materiales no se podrán estabilizar con ligantes hidráulicos, ni utilizarlos en zonas próximas a obras o capas tratadas con cemento, o en zonas inundables, ni tampoco en coronación de terraplenes.

7.4.4 Resumen de metodología, resultados y conclusiones de la investigación

7.4.4.1. Investigación Complementaria

La etapa de “Investigación adicional” constituye una fase del Proyecto GEAR destinada a determinar científica y empíricamente las características técnicas de los áridos reciclados, adecuadas para cada categoría de material y uso recomendado.

El principal ámbito de investigación es la utilización de áridos reciclados mixtos (ARMh, ARMc, ARMa) en terraplenes y explanadas para carreteras, así como en otros tipos de rellenos. El uso de áridos reciclados en estas aplicaciones constituye actualmente más del 50% de la producción de los mismos en España.

En esta línea de investigación se han propuesto 6 aplicaciones de los áridos reciclados para terraplenes y rellenos: suelos seleccionados, adecuados, tolerables y marginales, rellenos de material drenante, y rellenos localizados (zanjas, trasdós).

El plan de trabajo propuesto para la investigación desarrollada para el empleo de áridos reciclados en rellenos y explanadas ha seguido el esquema que se muestra a continuación:

- Caracterización y definición de los usos propuestos.
- Estudio de la normativa técnica española de referencia.
- Comparativa internacional de normativa para áridos reciclados para los usos estudiados.
- Realización de los estudios y análisis complementarios.
- Análisis de resultados.
- Identificación de puntos críticos.
- Estudio de obras realizadas.
- Conclusiones. Elaboración de prescripciones técnicas y fichas de uso.

Usos propuestos y normativa española

Los usos propuestos para la investigación adicional, así como la normativa técnica española vigente para los mismos y que ha servido como un elemento de entrada para el estudio, son los siguientes:

- Suelo seleccionado para terraplenes (artículo 330 del PG3)
- Suelo adecuado para terraplenes (artículo 330 del PG3)
- Suelo tolerable para terraplenes (artículo 330 del PG3)
- Suelo marginal para terraplenes (artículo 330 del PG3)
- Rellenos localizados (artículo 332 del PG3)
- Rellenos localizados de material drenante (artículo 421 del PG3)
- Explanadas (Norma 6.1-IC “Secciones de firme”)

Comparativa con la normativa internacional

Para los anteriores usos propuestos y con la finalidad de conocer las distintas especificaciones técnicas que se exigen en el resto de Europa, se ha realizado un estudio sobre la normativa vigente en

distintos países para los áridos reciclados empleados para estas aplicaciones, ya expuesta en apartados 7.2.3 anterior.

Características del árido reciclado a investigar

Las variables adoptadas para esta línea de investigación han sido el tipo de árido reciclado (granulometría), composición del árido reciclado (mixto y procedente de hormigón) y el porcentaje de sustitución de árido reciclado. Para el uso de áridos reciclados para relleno las variables se resumen en la tabla 7.5.

Línea de investigación	Tipo de árido	Composición del árido		% sustitución
Uso de áridos reciclados en rellenos	Todo-uno	ARH	P+H > 90% C < 10% A< 5% X < 1%	100% árido reciclado
		ARMh	P+H > 70% C < 30% A< 5% X < 1%	
		ARMc	C > 30% A< 5% X < 1%	
		ARMa	< 5% A< 30% X < 1%	

Tabla 7.5 Resumen de variables del árido reciclado empleado para su estudio en rellenos y explanadas.

Selección de muestras de áridos reciclados. Toma de muestras

De acuerdo con las variables adoptadas el epígrafe anterior y con la distribución geográfica de las plantas de reciclaje participantes en el proyecto, se procedió a tomar muestras representativas de material (de acuerdo con la norma UNE-EN 932-2) de las plantas recicladoras indicadas en la Tabla t.6.

Planta recicladora	Ubicación	Tipo de muestra		
P3.C2	Extremadura	ARMh	P+H > 70% C < 30% A< 5% X < 1%	
P29	Madrid	ARH	P+H > 90% C < 10% A< 5% X < 1%	
P23	Madrid	ARH	P+H > 90% C < 10% X < 1%	
P2.C3	Madrid	ARMc	C > 30% A< 5% X < 1%	

Tabla 7.6. Plantas recicladoras participantes en el estudio específico de áridos reciclados para rellenos y explanadas.

Estudios complementarios. Propiedades a determinar en los áridos reciclados

Los ensayos y características determinadas en el árido reciclado han sido las relacionadas con la estabilidad de las estructuras y los criterios medioambientales de peligrosidad. Por ello, para el uso de los áridos reciclados en rellenos las características que se han determinado en el estudio complementario de los mismos, y en los que se ha basado la investigación adicional, son:

- Composición del material
  - Petrografía de áridos reciclados
- Resistencia/estabilidad del material
  - Límites líquidos y plásticos
  - Ensayos Próctor y CBR para medir la resistencia al esfuerzo cortante del material y poder evaluar su calidad para su uso en rellenos.
  - Densidad in situ (solo para obras con áridos reciclados)
  - Ensayos de colapso y carga en fase de caracterización y de ejecución
  - Granulometría
- Parámetros químicos del material
  - Materia orgánica
  - Contenido en sales y yeso
- Peligrosidad medioambiental
  - Análisis de impacto ambiental de los materiales reciclados.

Los estudios complementarios específicos realizados para estos usos y las características del material reciclado, así como los resultados obtenidos en los ensayos, se recogen en la figura 7.6.

Aitemin Centro Tecnológico

RESULTADOS DE ENSAYOS DE ÁRIDOS RECICLADOS (PROYECTO GEAR - 2009)

Planta				P29 Planta Navalcarnero (AG-T-0/20-R)			Planta RCD Madrid			P3C2 Planta SANI			P2C3 Planta TEC-REC		
Muestra				Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
REQUISITOS GRANULOMÉTRICOS															
UNE 103101	Granulometría	% Pasa	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
			80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
			63	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
			50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
			40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
			25	100	100	100	93	94	94	100	100	99	100	100	100
			20	99	99	100	86	87	87	100	96	96	98	98	97
			12,5	82	82	81	75	76	75	81	85	84	68	67	67
			10	71	71	70	71	72	71	70	77	77	57	56	57
			6,3	53	53	55	64	64	63	55	66	66	49	48	48
			5	47	47	51	61	61	60	51	59	59	46	46	45
			2	31	31	33	48	48	49	3	41	42	33	33	33
			1,25	25	25	28	40	41	41	28	33	35	26	26	26
			0,40	11	11	12	21	22	23	12	20	22	16	16	16
			0,16	7	7	7	13	13	15	7	14	14	12	12	12
			0,080	4,8	4,8	5,7	9,9	9,8	10,6	5,7	8,5	9,2	9	9	8,9
UNE 103101	Contenido finos		% finos	4,8	4,8	5,7	9,9	9,8	10,6	5,6	8,2	8,6	8,9	8,9	8,8
EN 933-8/00	Equivalente de arena		SE	65	61	57	40	38	41	48	58	54	64	64	63
FORMA DEL ÁRIDO GRUESO															
EN-933-3/97	Índice de lajas		% lajas	5	4	5	4	5	4	12	13	13	16	17	15
REQUISITOS FÍSICO - MECÁNICOS															
EN 1097-2/99	Los Ángeles		LA	39	39	38	39	40	40	38	39	41	50	49	50
NLT 254	Asiento ensayo colapso		% Colapso							0					
UNE 103601	Hinchamiento Libre		%	0						0					
UNE 103501	Próctor Modificado		ρmáxima g/cm³	1,99	1,98	1,97				1,98	1,94	1,95	1,93	1,95	1,98
			H óptima %	10,8	11,65	9,50				10,2	10,7	10,4	10,62	9,72	11,84
UNE 103502	CBR		CBR 95 %	63,8						60,7	41	88,3			
			CBR 100 %	97,6						77,8	56,1	155,4			
UNE 103103	Límite líquido		LL												
UNE 103104	Límite plástico		LP	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico	No plástico
	Índice plasticidad		IP												
REQUISITOS QUÍMICOS															
UNE 103204	Materia orgánica		% MO	0,21	0,23	0,25	0,33	0,31	0,33	0,29	0,27	0,29	0,25	0,23	0,27
NLT 114	Sales solubles en agua		% SS	0,67	0,67	0,68	0,59	0,59	0,59	0,79	0,79	0,79	2,03	1,99	1,98
NLT 115	Contenido en yeso		% Yeso	0,80	0,92	0,87	0,25	0,25	0,28	0,27	0,23	0,23	2,56	2,44	2,38
EN 1744-1/99	Contenido en azufre		% S	0,13	0,11	0,13	0,09	0,09	0,09	0,19	0,18	0,19	0,22	0,16	
COMPOSICIÓN ÁRIDO RECICLADO															
pr EN 933-11	Material bituminoso (asfalto)		% Ra	4,0	2,8	2,0	4,6	3,7	3,1	7,1	3,7	1,2	1,7	0	1,2
	Elementos de albañilería		% Rb	1,1	1,4	0,2	0,7	0,2	1,7	8,6	6,4	11,2	19,3	11,8	13,7
	Hormigón, mortero y productos		% Rc	65,2	57,6	51,9	28,9	30,6	33,9	16,8	25,8	29,7	29,8	29,3	29,9
	Áridos no ligados (pétreos)		% Ru	16,8	21,3	22,9	41	37,1	33,8	37,4	40,5	37,2	21,4	24,3	25,6
	Otros		% X	13	16,9	23,1	24,7	23,5	27,5	30,1	23,7	20,7	27,8	34,7	29,7

Figura 7.6. Resultados de ensayos complementarios de áridos reciclados para explanadas y rellenos.

Análisis de resultados

Posteriormente a la realización de los ensayos propuestos en el estudio complementario, se procedió a realizar un análisis de los resultados obtenidos.

Este análisis se ha basado en comprobar el grado de cumplimiento de las especificaciones técnicas nacionales vigentes (PG3, etc.) que los áridos reciclados alcanzan para su empleo en terraplenes y otros rellenos.

Por tanto, los datos de entrada que se han empleado para el análisis han sido los siguientes:

DIAGNÓSTICO GEAR + estudio complementario + Normativa nacional vigente

El objetivo de este análisis es poner de manifiesto los posibles puntos críticos existentes en las distintas clases de áridos reciclados producidas para su empleo en rellenos y explanadas. Asimismo, este análisis ha servido como base para la elaboración de las conclusiones y recomendaciones técnicas de los áridos reciclados para su empleo en estos usos no ligados.

En la tabla 7.7 se muestra un ejemplo parcial del análisis realizado.

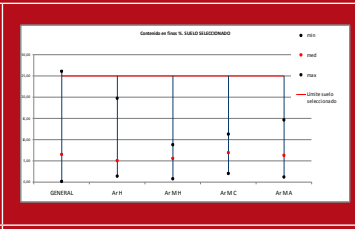
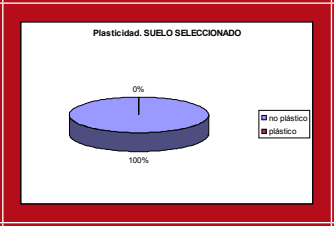
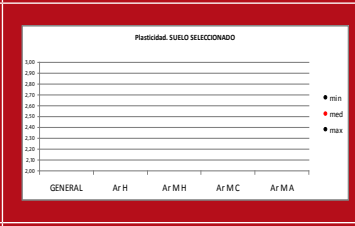
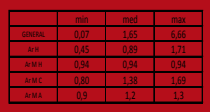
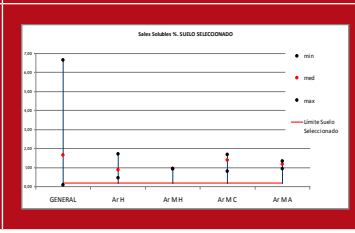
Parámetro	Límite normativo	Resultados por clases	Análisis cumplimiento	
% Finos	< 25%			
Plasticidad	IP < 10			
Sales solubles	< 0,2%			

Tabla 7.7. Ejemplo de análisis de resultados realizado. Suelo seleccionado.

Identificación de puntos críticos

Como resultado final del análisis realizado en el apartado anterior, se concluyó que en principio los áridos reciclados, independientemente de su composición, alcanzan un elevado cumplimiento de las especificaciones técnicas vigentes para su empleo en rellenos y explanadas.

A su vez se han identificado una serie de puntos críticos que a continuación se exponen:

a. Contenido en sales solubles y yesos:

Este aspecto constituye el principal punto problemático de los áridos reciclados para su aplicación en rellenos y explanaciones.

El límite para este uso es de < 0,2% de sales solubles (según NLT 114), pudiéndose admitir hasta < 1% de sales solubles distintas al yeso para su empleo en el núcleo del terraplén. Con las premisas expuestas, tan solo el 2% de las muestras analizadas cumplen con el límite vigente.

Respecto al contenido en yesos (según NLT 115) para su empleo en cualquier zona del terraplén (núcleo, cimiento, coronación o espaldones), se fija un límite de dicha sustancia de < 0,2%, límite que solo lo cumple el 4% de las muestras de áridos reciclados analizadas.

Para el empleo en el núcleo del terraplén, se pide un contenido en yeso < 2%, premisa que cumple el 54% de las muestras analizadas.

Asimismo, para el empleo de material en el cimiento del terraplén, el contenido en yeso debe ser menor del 5%, límite que cumple el 84% de las muestras analizadas.

De acuerdo con lo señalado respecto al contenido en sales solubles y yesos, se consideró que el principal problema que puede derivarse de la presencia de sales solubles y yesos en el material a emplear en los terraplenes es la disolución de material por la penetración de agua, lo que puede conllevar a la aparición de colapsos en la estructura que afecten a la estabilidad del terraplén.

Considerando que la media del contenido en yeso de las muestras analizadas en el proyecto es del 2,74% y de sales solubles es del 1,73%, sería aconsejable intentar redefinir los límites de estos parámetros para los áridos reciclados. Para ello se propone la realización de un estudio de la influencia de estos parámetros en la estabilidad de la estructura (terraplén). En principio la idea sería realizar un es-

tudio de muestras de las distintas clases de áridos reciclados (ARH, ARMh, ARMc y ARMa) con distintos% de yeso (por ejemplo del 1% al 5%) y a estas muestras realizarles los ensayos de colapso (NLT 254) e hinchamiento (UNE 103601). Los porcentajes de aquellas muestras que no presenten colapso podrían servir para su empleo en terraplenes y el porcentaje a partir del que presente colapso debería ser el límite en yeso. De forma análoga se debería proceder para el contenido en sales solubles.

Por tanto, los límites para contenido en yesos y sales solubles para áridos reciclados se deben redefinir y servir para que las plantas productoras de áridos reciclados extremen los controles de recepción y preclasificación del material para cumplirlos. No obstante todo lo anterior, un límite tentativo del contenido en yesos admisible debería rondar el 3%. Asimismo, sería adecuado sustituir el ensayo vigente en el PG3 (NLT-114) por el existente en la normativa europea y española (UNE-EN 1744-1 Sales solubles en agua) que parece más adecuado para medir esta propiedad.

b. Materia orgánica:

El límite exigido en el artículo 330 del PG3 para suelos seleccionados es del 0,2%, < 1% para suelos adecuados y < 2% para suelos tolerables (según UNE 103204). Estos límites se pueden aceptar y exigir a los productores de áridos reciclados un mayor control de recepción y preclasificación del material para no superar el límite establecido.

No obstante, se piensa que se debería analizar la posibilidad del empleo como suelo seleccionado de muestras de áridos reciclados que superen el límite establecido de materia orgánica (sobre todos los áridos reciclados procedentes del reciclado de pavimentos que fácilmente pueden superar estos límites), siempre que los ensayos de colapso (NLT 224) e hinchamiento (UNE 103601) sean 0 (esto conlleva presuponer que el principal problema que la presencia de materia orgánica puede provocar en los terraplenes (siempre desde el punto de vista estructural y no medioambiental) es la aparición de colapsos e hinchamientos. Por lo tanto, si se quiere incrementar el límite vigente, se propone realizar un estudio adicional análogo al propuesto para el contenido en sales solubles y yeso.

c. Fenómenos de expansión:

Hay que tener en consideración la posible aparición de fases expansivas (ettringita) en el empleo de áridos reciclados en rellenos y terraplenes debido al contenido en cemento y yesos presentes en los áridos reciclados y que pueden dar lugar a estos fenómenos en presencia de agua.

Sería interesante llevar a cabo estudios adicionales (DRX y ensayos acelerados de expansividad) para estudiar la posibilidad de aparición de estos fenómenos en estructuras de carreteras en que se empleen áridos reciclados.

No obstante todo lo anterior, estos fenómenos de expansividad parecen, a priori, que no deben ser muy problemáticos debido al pH que necesita esta reacción (muy básico) y a que el cemento de los áridos reciclados parece ser, en principio, inerte a estas reacciones.

7.4.4.2 Aplicación experimental del conocimiento

En nuestro país se tiene constancia del empleo de áridos reciclados, en su mayoría procedentes de hormigón, en capas granulares en polígonos industriales y urbanizaciones, así como en caminos y pistas forestales. En carreteras estatales y autonómicas la utilización de áridos reciclados para rellenos y explanadas ha sido pequeña.

En general, se puede afirmar que las obras de rellenos y explanas realizadas con áridos reciclados no están suficientemente recogidas en la bibliografía y mucho menos se ha hecho un seguimiento de su comportamiento.

Dentro del Proyecto GEAR una de las etapas del estudio ha consistido en la aplicación experimental del conocimiento adquirido, analizándose para ello el comportamiento de los áridos reciclados en obra y comprobar la viabilidad del uso de áridos reciclados para su aplicación en rellenos y explanadas.

El control de cada obra ha consistido en los siguientes trabajos:

- Caracterización completa del árido reciclado suministrado a obra según ensayos de caracterización y de obra propuestos en la investigación adicional de la aplicación.
- Implementación de una ficha de control de obra.
- Realización de una visita de control de obra, revisándose la correcta ejecución y/o funcionamiento de la misma.
- Análisis de resultados obtenidos.

En ese contexto, dentro del Proyecto se ha llevado el control de varias obras realizadas con áridos reciclados para su uso en rellenos y explanadas, que se recogen en la tabla 7.8.

Código Obra	Nombre obra	Ubicación	Uso árido reciclado
OB P9.1	Línea 9 Metro Madrid	Madrid	ZANJA (suelo adecuado y/o seleccionado)
OB P9.2	Instalación subsidaria CLH	Madrid	Relleno compactado para camino
OB P12.1	Ideas	Gijón	Núcleo y saneo del terraplén y subbase
OB P12.3	Montico	Gijón	Terraplén y relleno para drenaje
OB P12.4	Bimenes	Gijón	-
OB P12.5	AS 17	Gijón	-
OB P14.1	Vial de acceso tráfico pesado	Muruarte de Reta (Navarra)	Suelo adecuado y/o seleccionado
OB P14.2	Vial secundario de acceso tráfico pesado	Muruarte de Reta (Navarra)	Suelo adecuado y/o seleccionado
OB P15.1	Auditorio Torrevieja	Torrevieja	Explanada mejorada
OB P16.2	Explanadas parquing	Cataluña	Explanada mejorada
OB P20.1	E.T.A.P. Montfulla	Montfulla	Relleno zanjas
OB P20.3	Deposito Pedret i Marza	Pedret i Marza	Relleno drenante
OB P20.4	CFI Figueres	Figueres	Relleno drenante
OB P21.1	Acondicionamiento Plaza ES Figueral	Mallorca	Explanada mejorada
OB P21.2	Paseo peatonal	Pollença	Explanada mejorada
OB P22.1	Cespa - Moncofar	Castellón	Explanda (zona de aparcamiento)
OB P22.1	Cespa - Moncofar	Castellón	Explanda (zona de aparcamiento)
OB P22.6	Avda Hermanos Bou	Castellón	Relleno de tubería
OB P22.7	Hotel Canino	Castellón	Explanada para pavimento
OB P23.1	M-407	Madrid	Relleno
OB P25.2	San Pablo	Ferrol (A Coruña)	ZANJA (suelo adecuado y/o seleccionado)
OB P25.6	Redes de saneamiento Canido	La Coruña	Coronación y base
OB P26.2	Urbanización Cadrete	Zaragoza	Explanada mejorada
OB P27.6	Carretera Olvan	Olvan	Relleno drenante
OB P29.1	Camino de la Zarzuela. Parte 1	Navalcarnero (Madrid)	Suelo adecuado y/o seleccionado
OB P29.2	Camino de la Zarzuela. Parte 2	Navalcarnero (Madrid)	Suelo adecuado y/o seleccionado
OB P30.1	Ferrovial - Puerto de Bilbao	Bilbao	Explanada mejorada
OB P30.3	Base planta compostaje artigas	Bilbao	Explanada mejorada
OB P5.C2.1	Txorierri	Sondika (Vizcaya)	Explanada mejorada
OB P5.C2.2	Urbanización Amezola	Bilbao (Guipúzcoa)	ZANJA (suelo adecuado y/o seleccionado)

Tabla 7.8 Obras ejecutadas y analizadas en el Proyecto GEAR. Rellenos.



Figura 7.7. Elaboración en obra del árido reciclado para relleno en ampliación de Línea 9 del Metro de Madrid (OB P9.1).

En la Figura 7.8 se expone un ejemplo del análisis de resultados realizado en estas obras. Las obras analizadas por el Proyecto son presentadas en el anejo de este documento.

Como resultado final de los estudios realizados para estas aplicaciones en el Proyecto y del análisis de los resultados de ensayos proporcionados por las plantas recicladoras participantes y de los trabajos realizados en las obras adscritas al proyecto en los apartados anteriores, se han obtenido una serie de conclusiones sobre el empleo de áridos reciclados para rellenos y explanadas.

Asimismo, estas conclusiones han servido de base para la elaboración de las recomendaciones técnicas y fichas de uso para los áridos reciclados a utilizar como material granular en rellenos y explanadas.

Aitemin Centro Tecnológico

ANÁLISIS DE OBRAS PARA RELLENOS (SUELO SELECCIONADO)

Proyecto GEAR

USOS APLICADOS			Zanja	Expl. Camino	Expl. Camino	Zanja	Expl. Camino 0/20	Expl. Camino 0/50	Expl. Camino 0/40	Expl. Camino 0/70	Zanja	Expl. mejorada	ANÁLISIS DATOS OBRAS			
OBRAS			OB P9.1	OB P 14.1	OB P 14.2	OB P 25.2	OB P 29.1	OB P 29.1	OB P 29.2	OB P 29.2	IHOBE-AMEZOLA	IHOBE-TXORIERRI	MEDIA	Máximo	Mínimo	Especificación
REQUISITOS GEOMÉTRICOS																
UNE 103101	Contenido finos	% finos (0,080)	0,3	7,4	10,03	9	2,9	3,0	6,4	1,5	7,7		5,4	10,03	0,3	< 25
REQUISITOS FÍSICOS																
UNE 103103	Límite líquido	LL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0	< 30
UNE 103104	Límite plástico	LP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0	-
	Índice plasticidad	IP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0	< 10
UNE 103501	Próctor Modificado	pmáxima g/cm³	2,01	1,84	1,76	2,00	1,88		1,9	1,76	1,94	1,91	1,9	2,01	1,76	-
		H óptima %	8,2	14,5	15,8	7,1	6,5		7,5	8	12,1	13,2	10,3	15,8	6,5	-
UNE 103502	CBR núcleo terraplén	CBR 100 %	91,5	120	150		57,5		69		77,6	125	98,7	150	57,5	> 3
	CBR cimiento terraplén	CBR 100 %	91,5	120	150		57,5		69		77,6	125	98,7	150	57,5	> 3
	CBR corona terraplén	CBR 100 %	91,5	120	150		57,5		69		77,6	125	98,7	150	57,5	> 5
	CBR explanada	CBR 100 %	91,5	120	150		57,5		69,0		77,6	125	98,7	150	57,5	> 10
	CBR rellenos localizados	CBR 100 %	91,5	120	150		57,5		69,0		77,6	125	98,7	150	57,5	> 20
ASTM D	Densidad in situ	% próctor	97,8			99,6	93,2		93,2			99,14	96,6	99,6	93,2	> 95
REQUISITOS QUÍMICOS																
UNE 103204	Materia orgánica	% MO		0,59	1,2		1,13	0,42	0,39	0,28	0,82	0,47	0,7	1,2	0,28	< 0,2
NLT 114	Sales solubles en agua	% SS	0,67	3,65	4,71		0,39	0,91	0,14	0,79	0,35	0,72	1,4	4,71	0,14	< 0,2
NLT 115	Contenido en yeso	% Yeso	0,01	4,09	9,12		0,13	1,01	0,26	0,86	0,73		2,0	9,12	0,011	< 2

Figura 7.8. Análisis de obras en el Proyecto GEAR. Aplicación en suelo seleccionado.

A continuación se recogen las principales conclusiones derivadas de la comparativa de la normativa española vigente para el uso de material en rellenos (PG3), y con el análisis de los resultados de los distintos estudios de áridos reciclados realizados en el Proyecto GEAR para este uso.

Los comentarios realizados se refieren a los requisitos técnicos exigidos a los áridos reciclados y a la ejecución y puesta en obra para los siguientes usos:

- Suelo seleccionado para terraplenes (artículo 330 del PG3)
- Suelo adecuado para terraplenes (artículo 330 del PG3)
- Suelo tolerable para terraplenes (artículo 330 del PG3)
- Suelo marginal para terraplenes (artículo 330 del PG3)
- Rellenos localizados (artículo 332 del PG3)
- Rellenos localizados de material drenante (artículo 421 del PG3)
- Explanada (Norma 6.1-IC “Secciones de firme”)

Suelos Seleccionados

a. Composición del árido reciclado:

Cualquiera de los tipos de áridos reciclados definidos por su composición en el Proyecto se puede emplear para esta aplicación.

b. Granulometría y contenido en finos:

Los requisitos granulométricos exigidos en la reglamentación vigente (PG3), referentes a la granulometría contenido en finos que pasa por el tamiz 0,080 mm (< 25), son perfectamente asumibles por los productores de áridos reciclados, que tan solo deben ajustar su proceso productivo para alcanzar los requerimientos solicitados.

c. Plasticidad:

La totalidad de las muestras de áridos reciclados analizados en el Proyecto y en las obras son no plásticas, por lo que este parámetro no supone un problema para el empleo de áridos reciclados para suelos reciclados y se puede asumir la prescripción técnica existente en el PG3.

d. Contenido en sales solubles y yesos:

El límite de sales solubles, incluyendo el yeso, según NLT 114, recomendado para la utilización de áridos reciclados como suelo seleccionado en cualquier zona, será de < 0,2%, pudiéndose admitir hasta < 1% de sales solubles siempre que el contenido en yesos según NLT 115, sea inferior al 1%.

e. Materia orgánica:

El contenido en materia orgánica (según UNE 103204) debe ser inferior al 0,2%.

Este límite se puede ampliar hasta el 2% de materia orgánica en aquellos áridos reciclados en los cuales dicho porcentaje se debe a la presencia de áridos reciclados procedentes del fresado de firmes asfálticos.

f. CBR:

La totalidad de las obras realizadas con áridos reciclados a las cuales se le ha realizado este ensayo (según UNE 103502), cumple con los límites establecidos en el PG3 vigente, por lo que, en principio, se debe optar por mantener dichos límites.

g. Humedad óptima:

Del análisis realizado a las obras estudiadas, (ensayo Próctor según UNE 103501), la humedad media óptima para este tipo de áridos ha sido del 10,3%. Es necesario incidir, como se ha hecho en la prescripción técnica de aplicación, que se debe proporcionar el agua suficiente a estos áridos para alcanzar la compactación exigida, lo cual redundará en un mejor acabado de la obra y en una mayor durabilidad de la misma.

h. Densidad in situ:

Se debe incidir sobre la adecuada ejecución de las operación de compactación (y consecuentemente de la adición de agua suficiente para alcanzar la misma) en las obras en que se empleen áridos reciclados para este uso.

Suelos Adecuados

a. Composición del árido reciclado:

Cualquiera de los tipos de áridos reciclados definidos por su composición en el proyecto se puede emplear para esta aplicación.

b. Granulometría y contenido en finos:

Los requisitos granulométricos exigidos en la reglamentación vigente (PG3), son válidos.

c. Plasticidad:

Se puede asumir la prescripción técnica existente en el PG3.

d. Contenido en sales solubles y yesos:

El límite de sales solubles, incluyendo el yeso, (según NLT 114) recomendado para la utilización de áridos reciclados como suelo adecuado en cualquier zona, será de < 0,2%, pudiéndose admitir hasta < 1% de sales solubles siempre que el contenido en yesos según NLT 115, sea inferior al 1%.

e. Materia orgánica:

El contenido en materia orgánica (según UNE 103204) debe ser inferior al 1%

Este límite se puede ampliar hasta el 3% de materia orgánica en aquellos áridos reciclados en los cuales dicho porcentaje se debe a la presencia de áridos reciclados procedentes del fresado de firmes asfálticos.

f. CBR:

La totalidad de las obras realizadas con áridos reciclados a las cuales se le ha realizado este ensayo (según UNE 103502) cumple con los límites establecidos en el PG3 vigente, por lo que, en principio, se debe optar por mantener dichos límites.

g. Humedad óptima:

Se mantienen las mismas conclusiones expresadas para los áridos reciclados para uso como suelo seleccionado.

h. Densidad in situ:

Se mantienen las mismas conclusiones expresadas para los áridos reciclados para uso como suelo seleccionado.

Suelos Tolerables

a. Composición del árido reciclado:

Cualquiera de los tipos de áridos reciclados definidos por su composición en el proyecto se puede emplear para esta aplicación.

b. Granulometría y contenido en finos:

Los requisitos granulométricos exigidos en la normativa vigente (PG3), son válidos.

c. Plasticidad:

Se puede asumir la prescripción técnica existente en el PG3.

d. Contenido en sales solubles y yesos:

El límite de sales solubles (según NLT 114) recomendado para la utilización de áridos reciclados como suelo tolerable, será de < 2%, siempre que el contenido en yesos según NLT 115, sea inferior al 5%.

e. Materia orgánica:

El contenido en materia orgánica (según UNE 103204) debe ser inferior al 2%.

Este límite se puede ampliar hasta el 3% de materia orgánica en aquellos áridos reciclados en los cuales dicho porcentaje se debe a la presencia de áridos reciclados procedentes del fresado de firmes asfálticos.

f. CBR:

La totalidad de las obras realizadas con áridos reciclados a las cuales se le ha realizado este ensayo (según UNE 103502) cumple con los límites establecidos en el PG3 vigente, por lo que, en principio, se debe optar por mantener dichos límites.

g. Humedad óptima:

Se mantienen las mismas conclusiones expresadas para los áridos reciclados para uso como suelo seleccionado.

h. Densidad in situ:

Se mantienen las mismas conclusiones expresadas para los áridos reciclados para uso como suelo seleccionado.

i. Hinchamiento libre y colapso

El asiento en ensayo de colapso, según NLT 254, será < 1% para el empleo de áridos reciclados clasificados como aptos para suelo tolerable.

El ensayo de hinchamiento libre según UNE 103601 será < 3% para el empleo de áridos reciclados clasificados aptos para suelo tolerable.

Suelos Marginales

a. Composición del árido reciclado:

Cualquiera de los tipos de áridos reciclados definidos por su composición en el proyecto se puede emplear para esta aplicación.

b. Granulometría y contenido en finos:

Los requisitos granulométricos exigidos en la normativa vigente (PG3), son válidos.

c. Plasticidad:

Se puede asumir la prescripción técnica existente en el PG3.

d. Materia orgánica:

El contenido en materia orgánica (según UNE 103204) debe ser inferior al 5%.

e. CBR:

La totalidad de las obras realizadas con áridos reciclados a las cuales se le ha realizado este ensayo (según UNE 103502) cumple con los límites establecidos en el PG3 vigente, por lo que, en principio, se debe optar por mantener dichos límites.

f. Humedad óptima:

Se mantienen las mismas conclusiones expresadas para los áridos reciclados para uso como suelo seleccionado.

g. Densidad in situ:

Se mantienen las mismas conclusiones expresadas para los áridos reciclados para uso como suelo seleccionado.

h. Hinchamiento libre y colapso

El ensayo de hinchamiento libre según UNE 103601 será < 5% para el empleo de áridos reciclados para suelo tolerable.

Rellenos Localizados

La reglamentación vigente (artículo 332 del PG3) limita el material que se puede emplear para este uso a suelos adecuados y seleccionados, por lo que en principio los requisitos exigibles a los áridos reciclados para estos usos son los ya especificados anteriormente, además de los mencionados a continuación:

a. Composición del árido reciclado:

Cualquiera de los tipos de áridos reciclados definidos por su composición en el proyecto se puede emplear para esta aplicación.

b. Granulometría:

Los requisitos granulométricos exigidos para el empleo en relleno de zanjas para instalación de tuberías (tamaño máximo admisible de partículas de 5 cm para relleno en zona baja y de 10 cm para zona alta del relleno de la zanja) son asumibles para las recomendaciones de áridos reciclados.

c. Plasticidad:

Se debe asumir la normativa vigente en las prescripciones de áridos reciclados para suelo adecuado y seleccionados.

d. Contenido en materia orgánica:

En los rellenos de zanjas para instalación de tuberías se pide que el material no tenga materia orgánica. En principio se puede proponer un límite en las recomendaciones del 0,2% de materia orgánica (según UNE 103204).

Este límite se puede ampliar hasta el 2% de materia orgánica en aquellos áridos reciclados en los cuales dicho porcentaje se debe a la presencia de áridos reciclados procedentes del fresado de firmes asfálticos.

e. CBR:

Se propone admitir los límites vigentes en el artículo 332 ya que lo cumplen la totalidad de las muestras de áridos reciclados ensayadas.

Rellenos Localizados de Material Drenante

a. Composición del árido reciclado:

Cualquiera de los tipos de áridos reciclados definidos por su composición en el proyecto se puede emplear para esta aplicación, solo debiéndose prestar atención a los áridos reciclados asfálticos que pueden causar más problemas.

b. Granulometría:

Los límites y requisitos exigidos en el artículo 421 del PG3 deben ser asumidos en las recomendaciones para áridos reciclados.

c. Contenido en finos:

Los límites de finos exigidos en el PG3 (< 5% de material cernido por tamiz 0,080 mm) pueden ser asumidos por los productores de áridos reciclados para este uso.

d. Plasticidad:

Se debe asumir la normativa vigente en las recomendaciones de áridos reciclados.

e. Equivalente de arena:

El límite especificado es de EA > 30, lo cual es alcanzado por el 88% de las muestras analizadas en el proyecto, por lo tanto, este límite se puede mantener en las prescripciones.

f. Materia orgánica:

El artículo 421 del PG3 especifica que los áridos a emplear para este uso estarán exentos de arcillas, margas y otros materiales extraños. Sería muy importante que el material proveniente del árido reciclado para este uso tuviese un contenido muy reducido de materiales extraños que se pueden identificar como las maderas, plástico, papel, etc. (en principio se podría restringir el contenido en estas sustancias, según EN 933-11 a < 0,5%) y, además, se debería exigir un análisis de lixiviados del árido reciclado en el que se demostrase que los mismos son inocuos medioambientalmente (para suelos y aguas).

Respecto al contenido en materia orgánica para este tipo de material, en principio, se piensa que un límite < 0,2% (según UNE 103204) sería suficiente. Este límite se puede ampliar hasta el 2% de materia orgánica en aquellos áridos reciclados en los cuales dicho porcentaje se debe a la presencia de áridos reciclados procedentes del fresado de firmes asfálticos.

g. Coeficiente Los Ángeles:

El límite exigido en la normativa vigente es de un coeficiente menos de 40. No obstante, al igual que sucede en otros artículos del PG3 (p.e zahorras), este límite se podría incrementar para los áridos reciclados hasta un coeficiente Los Ángeles de 45.

Explanadas

Para el empleo de suelos en explanadas de carreteras, la normativa vigente propone que se use para las mismas suelos adecuados y suelos seleccionados. Se propone admitir los límites técnicos expresados para el empleo de áridos reciclados para dichos tipos de suelos.

7.4.5 Consideraciones generales de los áridos reciclados para rellenos

Granulometría

Los requisitos granulométricos exigidos para rellenos son perfectamente asumibles para cualquiera de las clases de los áridos reciclados definidas en el Proyecto GEAR. El cumplimiento de estos requisitos tan solo exige un acondicionamiento del proceso productivo de trituración y de clasificación de las plantas recicladoras, lo que no debe suponer un problema para alcanzar los límites exigidos en la normativa.

Contenido en finos

No se aprecian diferencias apreciables según composición del árido reciclado.

Plasticidad

No se aprecian diferencias apreciables según composición del árido reciclado.

Sales solubles

Los áridos reciclados de hormigón (ARH) son los que presentan contenidos más bajos de sales solubles (media del 0,89%). A pesar de este dato, no se considera que por el mismo se deban excluir las demás clases de áridos reciclados definidas para su empleo en rellenos.

Sulfatos solubles en agua

La media de todos los áridos reciclados es inferior al 0,2%, excepto para los áridos ARMh. Sería recomendable emplear este ensayo (según UNE-EN 1744-1) para la detección de sales solubles en agua, en vez del vigente en el PG3.

Yeso

Todas las clases de áridos reciclados cumplen para su empleo en los núcleos de los terraplenes con la adopción de precauciones y en los cimientos de estas estructuras.

Coeficiente Los Ángeles

No hay diferencias significativas para este valor entre los distintos tipos composicionales de árido reciclado.

Equivalente de arena

No hay diferencias significativas para este valor entre los distintos tipos composicionales de árido reciclado.

CBR, hinchamiento y colapso

No hay diferencias significativas para este valor entre los distintos tipos composicionales de árido reciclado. Los datos existentes todavía son pocos y se debería incidir más en comprobar en los casos necesarios el valor de dichas características.

Lixiviados

Se aplicará el ensayo de lixiviación UNE EN 12457-4 y los valores límite de la UE DOCE 16/1/03 con carácter transitorio hasta que existan valores y recomendaciones españolas o UE para el ensayo de percolación.

Fenómenos de expansión

Hay que tener en consideración la posible aparición de fases expansivas (ettringita) en el empleo de áridos reciclados en rellenos y terraplenes debido al contenido en cemento y yesos presentes en los áridos reciclados y que pueden dar lugar a estos fenómenos en presencia de agua.

Sería interesante realizar estudios adicionales para estudiar la posibilidad de aparición de estos fenómenos en estructuras de carreteras en que se empleen áridos reciclados.

No obstante todo lo anterior, estos fenómenos de expansividad parecen, a priori, que no deben ser muy problemáticos debido al pH que necesita esta reacción (muy básico) y a que el cemento de los áridos reciclados parece ser, en principio, inerte a estas reacciones.

Ejecución de terraplenes

El empleo de áridos reciclados en la explanada y por extensión al resto de terraplén, debería conllevar la exigencia por parte tanto del proveedor de áridos reciclados como del constructor de un escrupuloso cumplimiento de los requisitos de calidad y construcción vigentes en la reglamentación (PG3). Se recomienda especialmente comprobar las siguientes condiciones:

- Analizar la posibilidad de compactar los áridos reciclados del lado húmedo.
- Verificar que la densidad seca in situ sea mayor al valor mínimo exigido y que se cumpla la condición de humedad-densidad especificada.
- Verificar que el módulo de deformación vertical en el segundo ciclo de carga con placa (E) sea como mínimo el requerido según el tipo de material y de la zona de obra de acuerdo con el PG3 vigente (> 50 MPa en suelos seleccionados en cimiento, núcleo y espaldones y > 33 MPa para el resto de suelos reciclados. > 100 MPa para suelos seleccionados en la coronación y > de 60 MPa para el resto).

Con el fin de garantizar la durabilidad de este tipo de obras con áridos reciclados, se debe incidir en la ejecución de terraplenes bien drenados en la plataforma y en el pie de los mismos.

Se recomienda la ejecución de taludes menos verticales cuanto menor sea la calidad del árido reciclado.

7.5 Suelo cemento y grava cemento

Este capítulo fue desarrollado por los técnicos de AIDICO (Instituto Tecnológico de la Construcción), que forman parte del equipo investigador del Proyecto GEAR.

7.5.1 Situación de la investigación en España y Europa

La adición de cemento a un material granular tiene como objetivo principal dotarle de cohesión para mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Los materiales tratados con cemento se clasifican en función de las características del material granular utilizado y de la resistencia alcanzada por la mezcla a una determinada edad.

La concepción actual del suelocemento para su uso en carreteras se remonta a principios del siglo XX. Un avance muy importante se dio en Carolina del Sur a principios de 1930 con la construcción de varios tramos experimentales, lo que permitió profundizar en el conocimiento de estos materiales. A partir de 1936 se empezaron a ejecutar proyectos en otros estados de USA.

En Europa, a principios de los 60, se introdujo y generalizó la gravacemento con la puesta en marcha por las autoridades francesas del Programa de Autovías, con la idea de desarrollar un material con mejores características que el suelocemento.

En España, el uso de firmes con base de gravacemento y/o suelocemento se introdujeron en los años 60 para hacer frente al considerable incremento de la intensidad de tráfico pesado como consecuencia del desarrollo económico del país. La técnica fue importada de Francia y se utilizó por primera vez en 1963 en el tramo de Las Rozas–Villalba de la carretera N-VI, en la provincia de Madrid, donde en una de las dos calzadas se construyeron 4 km con suelocemento y mezclas bituminosas. En 1968 se construyó el tramo Alcobendas-San Agustín en Guadalix de la N-II, también en la provincia de Madrid, con un comportamiento magnífico durante mas de 20 años. A raíz del éxito de esta obra, la técnica se popularizó y se construyeron diversas carreteras.

La normativa sobre suelocemento evolucionó en paralelo a la de la gravacemento, de manera que ambas unidades de obra fueron incluidas por primera vez en la instrucción de Carreteras 6.1-IC de 1975.

Así empiezan a sustituirse las zahorras artificiales en capas de base para tráfico pesado por gravacemento con objeto de dar “cohesión”, es decir, aumentar la resistencia mecánica y durabilidad de un material granular. En capas de subbase, las zahorras y arenas con finos son sustituidas en algunas obras por suelocemento, con lo que no solo resulta un material insensible al agua, sino una capa más rígida y no erosionable. Este proceso de cambio continuó en los años posteriores.

El empleo de la gravacemento y del suelocemento (y en menor medida del hormigón compactado) ha sido muy amplio en España. Sin embargo, las realizaciones que incorporen áridos reciclados no son tan habituales. En el conjunto de España se han reciclado más de 21 millones de metros cuadrados de carreteras (actualmente unos 2,5 millones m^2/año), lo que explica la importancia de caracterizar el ma-

terial, definirlo estructuralmente y determinar sus leyes de comportamiento.

Las investigaciones previas conocidas, corresponden a dos tramos experimentales ejecutados en Cataluña por la empresa Servià Cantó. Ambos tramos han sido realizados bajo el marco de un proyecto de suelocemento en el que colaboraron las universidades Alfonso X y UPC. Los áridos utilizados en la ejecución de los tramos han sido: árido de hormigón reciclado 0/32 mm para el tramo de Girona y árido mixto para el tramo de la Garriga.

Por otro lado, se conoce el uso de los RCD generados en la demolición de la antigua fábrica de Fasa-Renault (Valladolid) en la posterior urbanización de la zona. Se obtuvieron dos tipos de material reciclado: árido de hormigón reciclado y árido mixto. Los áridos se destinaron a:

- Rellenos en la zona de parque de la urbanización, rellenos seleccionados y subbases de las calles de la urbanización.
- Subbases y bases de las calles de la urbanización: explanada mejorada, zahorras artificiales y material para el suelo-cemento.

Recientemente se han realizado diversos tramos experimentales, con materiales reciclados de RCD's, en la obra "Conexión de la A-367 (Ardales-Ronda) con la A-357 (Campillos-Málaga)". La duración de este Proyecto ha sido de 4 años, y se engloba dentro del "Plan de Mejora de la Accesibilidad, Seguridad Vial y Conservación en la Red de Carreteras de Andalucía 2004-2013". Las empresas/Instituciones participantes son: Gestión de Infraestructuras de Andalucía (GIASA), Aristerra, Hormigones y Minas (FYM. Italcemeti Group), Cemosa. Ingeniería y Control, Estudio Pereda Cuatro.

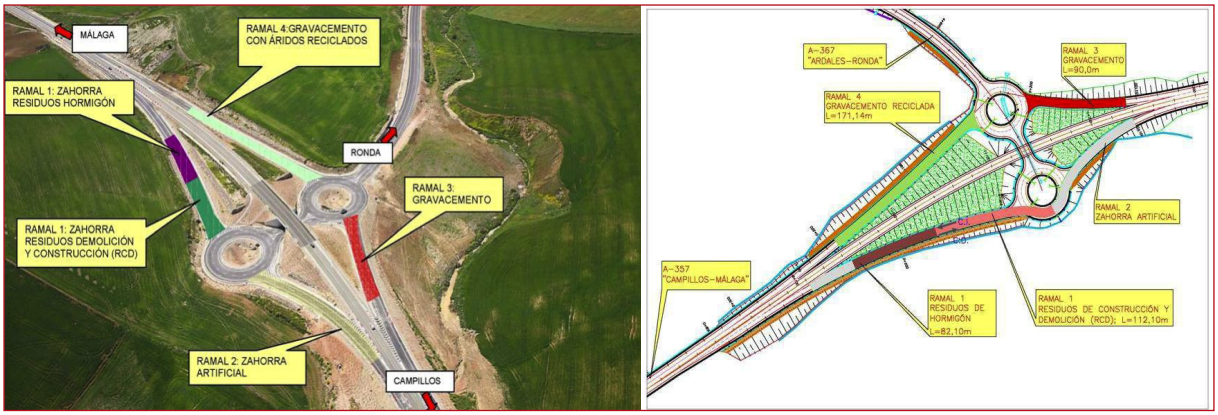


Figura 7.9. Tramos experimentales con materiales reciclados de RCD's de la obra "Conexión de la A-367 (Ardales-Ronda) con la A-357 (Campillos-Málaga).

Los resultados se resumen a continuación;

- A falta de terminar los ensayos a largo plazo, en el caso de las zahorras, el comportamiento de estos materiales reciclados es totalmente similar, incluso mejor en el caso de la capacidad portante, que sus análogos naturales.
- El comportamiento de las gravacementos, tanto natural como reciclada, ha sido, en el caso de capacidad portante, mejor que la esperada. Se empleó árido reciclado mixto 7/25 mm, la dosificación de cemento fue de 3.5%, el método de fabricación fue en central.
- En el control de seguimiento a los 6 meses los resultados han sido satisfactorios: las deflexiones no han aumentado, salvo las zahorras de cantera.
- Se ha publicado: "recomendaciones para la redacción de pliegos de especificaciones técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD)". 1ª Edición. Abril 2010.

Otra obra singular realizada recientemente ha sido la realizada en la conexión 3310/ Autovia del mediterráneo A7 (Málaga), promovida por la Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre y en la cual han participado las siguientes empresas e instituciones; Arristerra, UTE Sacyr-Prinur y IC-UCO (Universidad de Córdoba). El material empleado ha sido; árido reciclado con porcentajes de partículas cerámicas en torno al 15% (ARM15) y al 35% (ARM35). Las características de ambos tramos se resumen a continuación.

Material utilizado	ARM15	ARM35
D. MÁX.	1,99 kg/dm^3	1,96 kg/dm^3
H. OPT.	11,53%	11,09%
% Cemento 32,5.	3%	3%
Plazo de trabajabilidad (min)	152	145
Tramo de ensayo	200 m	300 m
Método	En central	En central
Profundidad capa SC (cm)	20	20

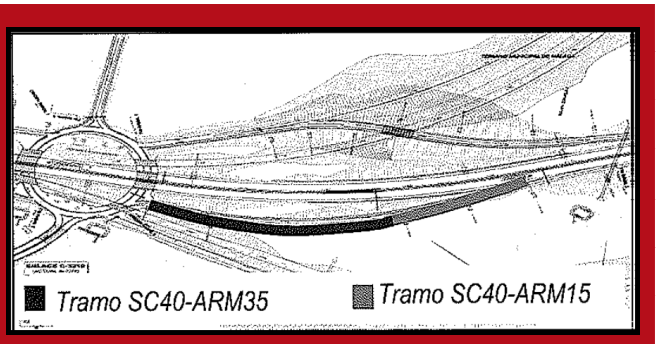


Figura 7.10. Tramos experimentales SC40, conexión 3310/Autovía del Mediterráneo A7 (Málaga).

7.5.2 Situación legislativa y normativa en España

NORMATIVAS TÉCNICAS

En el art. 513 del PG3 se hace mención expresa a la utilización de subproductos o productos inertes de desecho en cumplimento al PNRD 2001-2006 en gravacemento y suelocemento. Con todo ello, la normativa española aplicable a materiales tratados con cemento se resume a continuación.

- Instrucción de carreteras Norma 6.1.IC. Secciones de firme, aplicables a firmes de nueva construcción Ministerio de Fomento
- Instrucción de firmes Norma 6.3. IC. Rehabilitación de firmes. Ministerio de Fomento.
- Artículo 513. Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento) del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG3). Parte 5ª Firmes. Capítulo III.
- Artículo 202. Cementos
- Norma UNE-EN 13242. Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes
- Orden Circular 8/2001. Articulo 21. Reciclado in situ con cemento de capas de firme
- Instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (1999) O.C. 1/ 99. Consejería de Obras Públicas y Transporte. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos 2004. Junta de Castilla y León, Valladolid.
- Catálogo de firmes y pavimentos de la ciudad de Valencia. Servicio de Coordinación de obras e Infraestructuras. 2007.
- Norma para el dimensionamiento de firmes de la red de carreteras del País Vasco. 2007.

Las normas de consulta referentes a ensayos que aparecen en las presentes prescripciones son las siguientes:

UNE EN 196-3	Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad en volumen.
EN 933-1	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
EN 933-2	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.
EN 933-3	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
EN 933-5	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas del árido grueso.
EN 933-8	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
EN 933-9	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo del azul de metileno.

EN 1097-2	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos – Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
UNE EN 1744-1	Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos – Parte 1: Análisis químico.
UNE EN 7133	Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones.
UNE 41240	Materiales tratados con conglomerantes hidráulicos. Método de ensayo. Determinación del plazo de trabajabilidad.
UNE 83301	Ensayos de hormigón. Fabricación y conservación de probetas.
UNE 103103	Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.
UNE 103104	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.
UNE 103300	Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.
UNE 103501	Geotecnia. Ensayo de compactación. Próctor Modificado.
UNE 103503	Determinación in situ de la densidad de un suelo por el método de la arena
UNE 146507-1	Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato.
NLT 305	Resistencia a compresión simple de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos.
NLT 310	Compactación con martillo vibrante de materiales granulados tratados.
NLT 326	Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras (Método del tanque).
NLT-330	Cálculo del índice de regularidad internacional (IRI) en pavimentos de carreteras.

A continuación se resume la normativa española según la aplicación:

SUELOCEMENTO

El suelocemento es el material para capa de firme resultante de la mezcla homogénea de un suelo, cemento, agua y, eventualmente, aditivos, como un retardador de fraguado, realizada en central y en ocasiones in situ y debidamente compactada, a la que se le exigen una determinada resistencia mecánica y unas ciertas características de acabado. La utilización típica del suelocemento es como subbase, e incluso como base en vías de tráficos pesados de intensidades medias o reducidas.

Según el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes 2004 (PG3), el material granular que se vaya a utilizar en el suelocemento será una zahorra, natural u obtenida por trituración, o un suelo granular. También se podrán utilizar subproductos o productos inertes de desecho, en con el PNRCD 2001-2006, en cuyo caso sus características y las condiciones para su utilización deberán venir fijadas por el pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. El material granular estará exento de terrones de arcilla, material vegetal, marga u otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o, en su defecto, el directo de las obras deberá fijar los ensayos para determinar la inalterabilidad del material. Se considera conveniente, para caracterizar los componentes del material granular o del árido, que puedan ser lixiviados y que puedan significar un riesgo potencial para el medio ambiente o para los elementos de construcción situados en sus proximidades. Se empleará la NLT-326.

En cuanto a las prescripciones técnicas particulares, existen 4 comunidades autónomas en España que son: Andalucía, País Vasco, Comunidad Valenciana y Castilla y León, que poseen una normativa de firmes específica y que, por tanto, exigen al material que se emplee en suelocemento ciertas especificaciones que pueden diferir o no de las que marca el PG3. Las principales particularidades de cada una de las prescripciones técnicas se resumen en la tabla siguiente.

Característica	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG3). Art 513		Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos 2004. Junta de Castilla y León	Norma para el dimensionamiento de firmes en la Red de Carreteras del P. Vasco	Norma de secciones de firme de la Comunidad Valenciana (2009)	Instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (1999) O.C. 1/ 99.	
Clasificación	SC 40	SC20		SC40 y SC20	SC	SC3 Cumplirá las especificaciones correspondientes al material S-EST3	SC4 Cumplirá las especificaciones correspondientes al PG3
Uso	Resto de Arcenes y Calzadas	Arcenes y calzadas tráfico (T3 y T4)	El suelocemento es una de las posibilidades para la construcción de subbases en todo tipo de vías, así como de bases en carreteras con intensidades de tráfico pesado medias o bajas.	Con tráficos T1 o superiores el SC se fabricará en central. Con tráficos inferiores, se admitirá también la fabricación in situ si se garantiza la calidad de la unidad de obra, mediante un tramo de prueba.	En las categorías de explanada estabilizadas E2, E3 y E4, se podrán disponer subbases de suelocemento. El espesor total de suelocemento o de gravacemento no podrá ser inferior a 20 cm ni superior a 30 cm.	Para tráficos inferiores a T3A, limitando a 2.5 MPa su resistencia a compresión a los 7 días	En firmes con categoría de tráfico pesado (T3A o superior)
Contenido mínimo de cemento	≥3%		≥3%	≥3%	≥3%		≥3%
Materia orgánica, UNE 103204	≤1%		≤1%	≤1%	≤1%		≤1%
Comp totales de azufre, UNE-EN 1744-1	≤1%		≤1%	≤1%	≤1%		≤1%
Sulfatos solubles en ácido (SO_3) (1), UNE-EN 1744-1	≤0.8%			≤0.8%	≤0.8%		≤0.8%
Reactividad potencial álcalis del cemento	No reactivo			No reactivo	No reactivo		No reactivo

Característica	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG3). Art 513		Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos 2004. Junta de Castilla y León	Norma para el dimensionamiento de firmes en la Red de Carreteras del P. Vasco		Norma de secciones de firme de la Comunidad Valenciana (2009)	Instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (1999) O.C. 1/ 99.	
Límite líquido, UNE 103103	<30		<30	<30		<30	Para tráficos inferiores a T3A, limitando a 2.5 MPa su resistencia a compresión a los 7 días	<30
Índice de plasticidad, UNE 103104	<15		<12	<15		<15		<12 y preferiblemente <10
Resistencia media a compresión (7 d)	4.5		≥2.5, con cementos de alto contenido de adiciones ≥2.1 MPa	≥ 4.5 en trafico alto (>T3)		No se fija, cuando las capas se prefisuren		4.5
Granulometría, UNE-EN 933-1	% pasa	% pasa		% pasa	% pasa			
50 40 25 20 12.5 8 4 2 0.5 0.063	100 80-100 67-100 62-100 53-100 45-89 30-65 17-52 5-37 2-20	- 100 92-100 76-100 63-100 48-100 48-100 36-94 18-65 2-35	Tamaño máximo 50 mm, máximo recomendado ≤ 40mm. Cernido por el tamiz de 2 mm ≥20% y por el tamiz de 0,063 mm ≤35.%	100 80-100 67-100 62-100 53-100 45-89 30-65 17-52 5-37 2-20	- 100 92-100 76-100 63-100 48-100 48-100 36-94 18-65 2-35	No será necesario que se ajuste al uso del PG3, Pero el tamaño máximo permitido es 40 mm		Husos granulométricos SC40 o SC20 limitando en este último el rango de contenido en partículas finas (<0,063 mm) 3-30%

Tabla 7.9. Tabla resumen normativa española aplicable a suelocemento.

GRAVACEMENTO

La gravacemento es el material resultante de la mezcla homogénea y uniforme de áridos, cemento, agua y, eventualmente, aditivos, realizada en central con un contenido de cemento reducido (del 3 al 5% de la masa seca de los áridos) y un contenido de humedad que permite el paso de rodillos sobre ella. A dicha mezcla, convenientemente compactada, se le exige una determinada resistencia mecánica que la hace apta para ser utilizada como capa de base.

Según el propio pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, en la gravacemento se utilizará un árido natural procedente de la trituración de piedra de cantera o de gravera. También se podrán utilizar productos inertes de desecho o subproductos, en cumplimiento de Acuerdo del Consejo de Ministros de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, en cuyo caso sus características y las condiciones para su utilización deberán venir fijadas por el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o, en su defecto, el directo de las obras deberá fijar los ensayos para determinar la inalterabilidad del material. Se considera conveniente, para caracterizar los componentes del material granular o del árido, que puedan ser lixiviados y que puedan significar un riesgo potencial para el medio ambiente o para los elementos de construcción situados en sus proximidades, se empleará la NLT-326.

En cuanto a las prescripciones técnicas particulares, existen 4 comunidades autónomas en España que son: Andalucía, País Vasco, Comunidad Valenciana y Castilla y León, que poseen una normativa de firmes especifica y que, por tanto, exigen al material que se emplee en suelocemento ciertas especificaciones que pueden diferir o no de las que marca el PG3, las principales particularidades de cada una de las prescripciones técnicas se resumen en la tabla siguiente.

Característica	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Art 513		Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos 2004. Junta de Castilla y León		Norma para el dimensionamiento de firmes en la Red de Carreteras del P. Vasco	Norma de secciones de firme de la Comunidad Valenciana (2009)		Instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (1999)
Clasificación	GC20	GC25	GC20	GC25	GC20 (Requisitos Art.513 PG3)	GC20 y GC25 (Requisitos Art.513 PG3)		GC20 (Requisitos Art.513 PG3)
Uso	Calzadas tráfico pesado (T00 a T2)	Calzadas tráficos (T3 y T4) y en arcenes sustitución del SC40	Calzadas y Arcenes	Arcenes	Todo tipo de tráfico	Calzadas tráfico pesado (T00 a T2)	Calzadas tráficos (T3 y T4) y en arcenes sustitución del SC40	Todo tipo de tráfico
Plasticidad árido fino, Límite líquido , UNE 103103 Índice de plasticidad UNE 103104	No plástico	LL<25 IP<6	No plástico	LL<25 IP<6		No plástico	LL<25 IP<6	
Equivalente de arena UNE-EN 933-8 (4)	≥40	≥35	≥40 Calzadas T2	≥30 Arcenes T2		≥40	≥35	
Materia orgánica, UNE 103204	≤1%		≤0.05%			≤1%		
Terrones de arcilla,UNE 7133	≤0.25		≤0.5%			≤0.25		
Comp totales de azufre, (SO_3)UNE-EN 1744-1	≤1%		≤ 0.4%			≤1%		

Característica	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Art 513				Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos 2004. Junta de Castilla y León		Norma para el dimensionamiento de firmes en la Red de Carreteras del P. Vasco	Norma de secciones de firme de la Comunidad Valenciana (2009)				Instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (1999)
Sulfatos solubles en ácido (SO_3) [1], UNE-EN 1744-1	≤0,8%				≤0,4%, ≤0,8% si se utilizan cementos resistentes a la acción de los sulfatos y se aíslan adecuadamente las obras de fábrica de las capas de firme			≤0,8%				
Características de inalterabilidad	-				Pérdida media después de 5 ciclos bajo la acción de: sulfato sódico <10% o sulfato magnésico<15%			-				
Reactividad potencial álcalis del cemento	No reactivo				No reactivo			No reactivo				
Absorción de agua	-				2%	3%	-					
CBR inmediato	-				>65			-				
Contenido de conglomerante	> 3,5%				3,5 - 5%			> 3,5%				
Tipo de trafico	Calzada			Arcenes	Todo		Todo	Calzada			Arcenes	Todo
Resistencia a compresión (NLT-305) 7 d	4,5-7 MPa			4,5-6 MPa	>4,5 MPa		>4,5 MPa	>4,5 MPa			>4,5 MPa	
Categoría de tráfico	T00-T1	T2	T3 y T4	T00 a T1	Calzadas T2	Arcenes T2		T00-T1	T2	T3 y T4	T00 a T1	
Partículas trituradas, UNE-EN 933-5 (%)	≥75	≥50	≥30	≥50	≥75	≥30		≥75	≥50	≥30	≥50	
Índice de lajas, UNE-EN 933-3	≤30		≤35	≤40	≤30	≤35		≤30		≤35	≤40	

Característica	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Art 513			Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos 2004. Junta de Castilla y León		Norma para el dimensionamiento de firmes en la Red de Carreteras del P. Vasco	Norma de secciones de firme de la Comunidad Valenciana (2009)			Instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (1999)
Coeficiente Los Ángeles UNE-EN 1097-2	≤30	≤35	≤40	<35	<40		≤30	≤35	≤40	
Granulometría, UNE-EN 933-1	% pasa		% pasa	% pasa	% pasa		% pasa		% pasa	
40	-		100	-	100		-		100	
25	100		76-100	100	75-100		100		76-100	
20	80-100		67-91	80-100	67-91		80-100		67-91	
8	44-68		38-63	44-70	38-63		44-68		38-63	
4	28-51		25-48	28-50	25-50		28-51		25-48	
2	19-39		16-37	20-40	16-37		19-39		16-37	
0,5	7-22		6-21	7-25	6-21		7-22		6-21	
0,063	1-7		1-7	1-8	1-7		1-7		1-7	

Tabla 7.10. Normativa española aplicable a la gravacemento.

7.5.3. Situación legislativa y normativa en Europa

La normativa europea vigente para materiales tratados con cemento, en la que se contempla el uso de áridos de residuos de construcción y demolición, es la siguiente:

- ALEMANIA:
  - Directrices para la Utilización Compatible con el Medio Ambiente de Subproductos Industriales y Materiales de Construcción Reciclados en la Construcción de Carreteras y Caminos (RuA-StB 01).
  - Prescripciones técnicas de suministro para los áridos utilizados en la construcción de carreteras y caminos (TL Gestein-StB 2004).
  - Prescripciones técnicas de suministro para materiales de construcción y mezclas de materiales para pavimentos de hormigón y capas intermedias tratadas con conglomerantes hidráulicos (TL Beton-StB).
- HOLANDA:
  - Directiva Nacional de Evaluación 2506 para la certificación de producto KOMO de áridos de RCD para su utilización en construcción de carreteras.
  - Certificado holandés del Decreto de Materiales de Construcción (BSB) para áridos de RCD ligados o sueltos utilizados en trabajos de ingeniería civil.
- SUIZA:
  - SNV 670 062. Reciclaje: consideraciones generales. Norma suiza de la asociación suiza de los profesionales de la carretera y los transportes.

A continuación se resume la normativa europea aplicable a materiales tratados con cemento.

ALEMANIA

La norma TL Gestein-StB 2004 contempla la utilización de áridos obtenidos a partir de material de construcción reciclado. Su composición debe cumplir los requisitos de composición de la tabla siguiente:

Grupo de sustancias	% m/m
Áridos de asfalto en la fracción >4 mm.	< 30
Clínker, ladrillos y cerámicas en la fracción >4 mm	< 30
Arenisca caliza, yesos y sustancias similares en la fracción >4 mm	< 5
Materiales minerales de construcción ligeros y materiales aislantes, tales como hormigón aireado y de espuma de escorias en la fracción >4 mm	< 1
Sustancias extrañas, tales como madera, caucho, plástico y textiles en la mezcla	< 0,2
Serán excluidas las sustancias ligadas por medio de alquitranes de carreteras y gigantes que contengan betunes. Además no deben ser utilizados suelos cohesivos, rocas alteradas por la intemperie ni aquellas susceptibles a la intemperie así como sustancias minerales igualmente inadecuadas	

Tabla 7.11. Requisitos de composición de los áridos de RDC.

Además de los requisitos de composición, los materiales granulares para uso en base ligada con aglomerantes hidráulicos deben de cumplir las siguientes especificaciones.

Apartado No.	Característica	Base ligada con aglomerantes hidráulicos
2.1.1	Identificación del material, UNE EN 932-3	Debe declararse
2.1.2	Densidad de partículas, UNE EN 1097-7	Debe declararse
2.2.2	Granulometría de árido fino, UNE EN 933-1	G_F80
2.1.2	Granulometría de árido grueso UNE EN 933-1	$G_C80/20$
2.2.3	Contenido en finos del árido fino y contenido en finos del árido grueso según UNE EN 933-1	Debe declararse. Los requisitos aplicables al contenido en finos de la mezcla total no deben ser excedidos
2.2.4	Calidad de los finos: Azul de metileno (MB_F) según UNE EN 933-9 y equivalente de arena (SE_F) según UNE EN 933-8	Cuando el contenido en finos <3% mm no se requieren pruebas adicionales. Si >3%: valores de MB_F y SE_F si son solicitados
2.2.5	Forma de los áridos gruesos: coeficiente de forma (SI) según DIN EN 933-4 ó Índice de lajas (FI_R) según UNE EN 933-3	Sin requisitos

2.2.8	Contenido en conchas (árido grueso) según UNE-EN 933-7 $SC_{declarado}$	>10%
2.2.14.1	Absorción de agua según UNE EN 1097-6 Anexo B	≤0,5%
2.2.14.3	Resistencia al hielo según UNE EN 1367-1 (pérdida de masa%)	≤ 4%
2.2.18	Contaminantes orgánicos en árido fino m_{LPC} 0.5	≤0,5%
2.2.18	Contaminantes orgánicos en árido grueso m_{LPC} 0.5	≤0,5%
2.2.23	Compuestos que afectan al fraguado y al endurecimiento según UNE EN 1744-1: tiempo de rigidización y resistencia a compresión (sección 15.3) y presencia de materia orgánica (sección 15.1)	Debe demostrarse

Tabla 7.12. Características y categorías requeridas para los áridos para su uso en base ligada con aglomerantes hidráulicos en Alemania.

HOLANDA

En Holanda, la Directiva Nacional de Evaluación 2506 para la certificación de producto KOMO de áridos de RCD para su utilización en construcción de carreteras, contempla el uso de áridos procedentes de materiales de construcción reciclados como áridos ligados en la construcción de carreteras. Las especificaciones se muestran en la tabla siguiente:

Procedencia	Requisitos	Método de decisión
Áridos de mezcla	Condiciones estándar RAW, art. 28.16.01 Condiciones estándar RAW, art. 28.16.02. apartado 01 Condiciones estándar RAW, art. 28.16.02. apartado 02 Condiciones estándar RAW, art.28.16.04 Para áridos de la fracción que pasa por el tamiz 2mm que puedan sufrir daños durante el endurecimiento del cemento: no hay	Condiciones estándar RAW [1] C.E.RAW prueba 23.0
Áridos de mampostería	Condiciones estándar RAW, art. 28.16.01 Condiciones estándar RAW, art. 28.16.02. apartado 01 Condiciones estándar RAW, art. 28.16.02. apartado 02 Condiciones estándar RAW, art.28.16.03	Condiciones estándar RAW [1] C.E.RAW prueba 23.0
Áridos 0/4 mm Arena cribada de machaqueo	Condiciones estándar RAW, art.22.06.03 Para los áridos que puedan sufrir daños durante el endurecimiento del cemento: no hay Propiedades mecánicas: resistencia a compresión mínima 2.0 Mpa	Condiciones estándar RAW [1] C.E.RAW prueba 23.0 C.E.RAW prueba 22.1
Áridos de escombros	Para los áridos que puedan sufrir daños durante el endurecimiento del cemento[2]: no hay Propiedades mecánicas[2]: resistencia a compresión mínima 2.0 Mpa Granulometría: especificaciones conformes al productor Composición de la fracción en el tamiz C8[3]: especificaciones conformes al productor	C.E.RAW prueba 23.0 C.E.RAW prueba 22.1 C.E.RAW prueba 6.0 [1] C.E.RAW prueba 154

Tabla 7.13. Especificaciones holandesas para el uso de áridos de RCD como áridos ligados en la construcción de carreteras.

[1] En la determinación de granulometría, además, se aplicará el apartado A.7 del anexo A de la Directiva Nacional de Evaluación 2506.
[2] Este requisito solo es necesario si el (parte del) aglomerante se compone de cemento.
[3] Si la fracción retenida por el tamiz C8 es al menos de 20.0% se evaluará su composición.

SUIZA

La norma SNV 670 062 Reciclaje; consideraciones generales, es aplicable a los residuos de la construcción, provenientes de la escarificación de carreteras y caminos, así como de la demolición de edificaciones y de obras de ingeniería civil y a su reutilización en superestructura de carreteras y caminos. Los ámbitos de aplicación de dichos residuos se definen en la tabla siguiente:

Materiales reciclados	Utilización	Origen	Extracción	Tratamiento	Composición % en masa
Zahorra reciclada P (SN 640 742)	Posible	Subbases zahorra	Excavación fresado	Machaqueo si necesario	Zahorra reciclada min 95 Áridos de asfalto max 4 Áridos estabilización y hormigón sumados max. 4 Áridos de mezcla max. 1 Impurezas max 0.3
Zahorra reciclada B (SN 640 742)	Recomendada				Zahorra reciclada min 80 Áridos estabilización y hormigón sumados max. 4 Áridos de mezcla max. 1 Impurezas max. 0.3
Áridos de estabilización (SN 640 742)		Capas estabilizadas con conglomerantes hidráulicos	Escarificación Fresado		Áridos de estabilización, zahorra reciclada y áridos de hormigón sumados min. 95 Áridos de asfalto max.3 Áridos de mezcla max.2 Impurezas max.0.3
Áridos de hormigón (SN 640 743)		Revestimientos de hormigón		Machaqueo fraccionan. si necesario	Áridos de hormigón, zahorra reciclada y áridos de estabilización sumados min. 95 Áridos de asfalto max.3 Áridos de mezcla max. 2 Impurezas max. 0.3
Áridos de mezcla (SN 640 744)		Edificaciones e ingeniería civil	Eliminación de los residuos de la construcción de acorde con SAI 460		Áridos de mezcla, zahorra reciclada, áridos de estabilización y de hormigón sumados min 97 Áridos de asfalto max. 3 Impurezas max. 0.3

Tabla 7.14. Ámbitos de utilización y características de los materiales reciclados.

7.5.4. Resumen de metodología, resultados y conclusiones de la investigación

7.5.4.1. Investigación complementaria

La etapa de Investigación constituye una fase del Proyecto GEAR destinada a determinar científica y empíricamente las características técnicas de los áridos reciclados adecuadas para cada categoría de material y uso recomendado.

El principal ámbito de investigación del presente apartado es la utilización de áridos reciclados mixtos (ARMh, ARMc y ARMa) en aplicaciones de suelocemento y gravacemento para carreteras.

La metodología de trabajo propuesta en la investigación desarrollada para el empleo de áridos reciclados en suelocemento y gravacemento se ha planteado en dos etapas: Una primera etapa que constituye un estudio a nivel de laboratorio y una segunda fase a nivel experimental, para evaluar en obra los conocimientos adquiridos con los trabajos efectuados en laboratorio.

Planning Propuesta General de Ensayos	Norma	Descripción de Ensayo
1. Toma de muestra	UNE-EN 932-2	Según protocolo GEAR-CO-PROT-001
2. Caracterización del árido seleccionado	UNE-EN 933-1	Granulometría
	UNE-103103	Plasticidad
	UNE-103104	
	Norma EN 933-3	Lajas
	UNE-EN- 1744-1	Contenido en sulfatos
	UNE-103204	Materia Orgánica
	UNE 146507-1	Reactividad Potencial
	EN 1097-2	Desgaste Los Ángeles
	UNE-EN 933-11	Ensayo de composición
3. Estudio de dosificaciones y realización de baterías de ensayos	NLT-310	Fabricación de mezclas
	UNE-103501	Determinación densidad máxima y humedad óptima
	UNE-41240	Plazo de trabajabilidad
4. Caracterización de los materiales tratados con cemento.	NLT-305	Resistencia mecánica

Tabla 7.15. Plan de trabajo a nivel laboratorio.

7.5.4.2. Resultados y conclusiones

El material granular reciclado a utilizar dentro de las aplicaciones previstas, es decir, suelocemento y gravacemento, corresponde a la tipología todo uno y grava cuya composición será la que corresponde a dos tipologías de árido reciclados provenientes de diferentes plantas: ARMh y ARMc.

El objetivo del trabajo fue justamente establecer las características de las dos tipologías de áridos para poder definir las aplicaciones de los materiales granulares reciclados y las propiedades exigibles a los mismos en origen, así como su normativa de aplicación. El material todo uno fue un 0/40 mm y las gravas recicladas correspondieron a una granulometría 8/40 mm.

Para la aplicación de los materiales en suelocemento se realizó un estudio comparativo con una zahorra natural y con un material granular de machaqueo.

Por otra parte, para la aplicación en gravacemento se realizó un estudio comparativo con una grava natural triturada compuesta en laboratorio con la combinación de tres fracciones de grava diferentes.

Inicialmente, se realizó una caracterización geométrica, física, mecánica y química de los áridos reciclados y los resultados se presentan en la siguiente tabla 7.16.

Tal como se puede apreciar en los resultados de los áridos reciclados analizados, ambos presentaron propiedades adecuadas para su uso en suelocemento. Para gravacemento las propiedades del ARMh fueron adecuadas mientras que los ARMc superaron el valor establecido para el índice de lajas.

En función de los resultados obtenidos con los ensayos de caracterización, y siguiendo el plan de ensayos establecido en el cronograma, se han realizado los estudios de dosificaciones necesarios para la fabricación de muestras de suelocemento y gravacemento con los materiales granulares estudiados.

Para el correcto diseño de la fórmula de trabajo, se realizó un pequeño estudio a fin de verificar el efecto de humectación de los áridos en materiales tratados con ligantes hidráulicos.

Materiales	Exigible suelocemento							Exigible gravacemento		
Descripción	M. Orgánica M.O.(%)	Reactividad potencial	Sulfatos totales (%SO_3)	(%) Sulfatos solubles en ácido	Limites Attenberg			Eq. Arena	Índice de Lajas	Coef. Los Ángeles
					L. L.	L. Pl.	I. Pl			
ARMh	0,48	No reactivo	0,60	0,58	NP	NP	NP	43	12	35
ARMc	0,49	No reactivo	1,85	1,84	NP	NP	NP	35	42*	35
Suelo natural	0,44	No reactivo	0,008	0,06	21,6	16	5,7	14*	30	23

Materiales	Exigible suelocemento							Exigible gravacemento		
Material granular de machaqueo	0,31	No reactivo	0,85	0,32	NP	NP	NP	42	24	30
Composición grava triturada	0,31	No reactivo	0,35	0,32	NP	NP	NP	69	17	27

Tabla 7.16. Resumen del promedio de las propiedades de los áridos analizados.

***Valores fuera de Rango según las prescripciones del PG.**

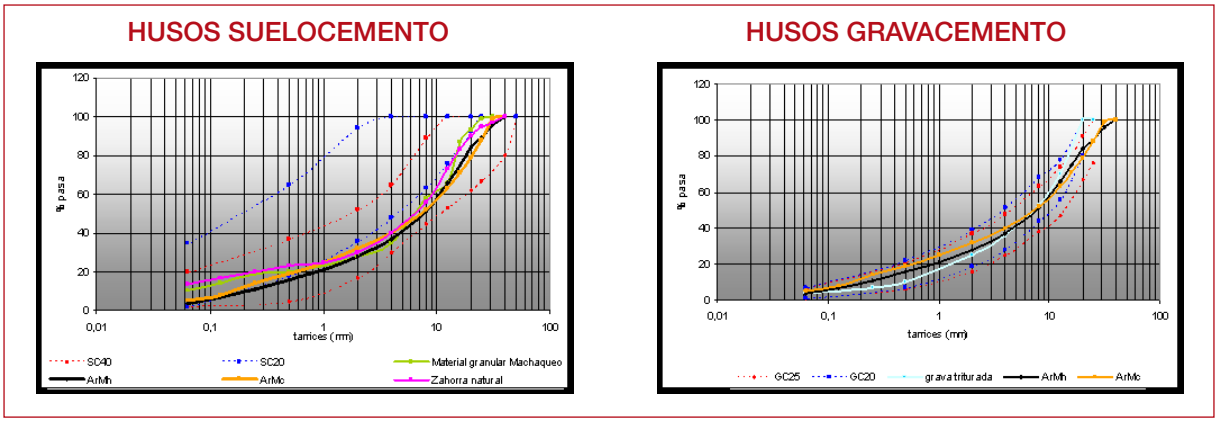


Figura 7.11. Correspondencia de los husos áridos seleccionados con los Husos del PG3.

I. EFECTO DE LA HUMECTACIÓN DE LOS ÁRIDOS EN LA APLICACIÓN DE MATERIALES TRATADOS CON LIGANTES HIDRAULICOS

Es conocido que los materiales procedentes de RCD presentan un coeficiente de absorción de agua superior a los habituales en los áridos naturales. Esta absorción de agua, además, se produce de una manera más lenta que en el caso de los áridos naturales, por ello el presente estudio pretende evaluar el efecto de la humectación de los áridos reciclados en la obtención de la fórmula de trabajo, para garantizar finalmente una densidad máxima y, por tanto, unas mejores prestaciones del material.

Para llevar a cabo el presente estudio, se solicitó una partida nueva de árido reciclado para ser utilizado en la aplicación de suelocemento. El árido se caracterizó a fin de comprobar su validez, en cuanto a las exigencias del PG3 para la aplicación de suelocemento. Los resultados de caracterización del árido se detallan a continuación.

Se realizó el ensayo granulométrico y el ensayo de composición de los áridos según UNE EN 933-1. El árido recibido se corresponde con ARMh según la clasificación establecida por el GERD en el Proyecto GEAR.

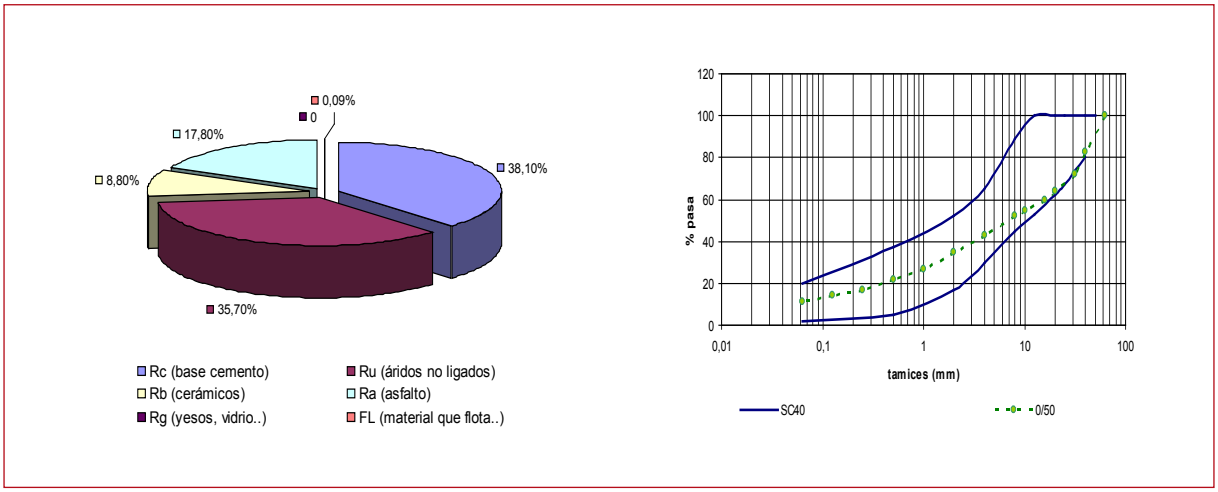


Figura 7.12. Granulometría y composición de los áridos.

El huso granulométrico de los áridos se encuadra dentro de los límites establecidos para SC40. Con lo cual, el árido reciclado podría ser susceptible de emplearse en arcenes y calzadas distintas a T3 y T4. (a) Ensayo de composición del árido y (b) huso granulométrico.

En cuanto al resto de propiedades, en todos los casos se cumplieron las prescripciones del PG3, para la aplicación de estos materiales en suelocemento, tal como se plasma en la tabla 7.17.

Exigible suelocemento							
Descripción	M. Orgánica M.O.(%)	Reactividad potencial	Sulfatos totales (%SO_3)	Sulfatos solubles en ácido (%SO3)	Límites Attenberg		
					L. L.	L. Pl.	I. Pl
ARMh	0,48	No reactivo	0,42	0,48	NP	NP	NP

Tabla 7.17. Resumen propiedades de los áridos analizados.

Se prepararon 75 kg de árido reciclado para la realización de los ensayos de Próctor Modificado. Se tamizaron por el tamiz de 20 mm, según norma UNE 7-050/2. El material que pasó por dicho tamiz se cuarteó en porciones homogéneas, aproximadamente iguales, de unos 5 kg y se analizaron tres casuísticas posibles en la preparación de un mismo material para la determinación de la humedad óptima y la densidad máxima a partir del ensayo de Próctor Modificado.

A) Próctor Modificado humedad natural 0%.
B) Próctor Modificado humedad natural 8,56%.
C) Próctor Modificado tras saturación del árido

A continuación se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los supuestos de preparación de los áridos.

A) Próctor Modificado humedad natural 0%

Se tomaron cinco porciones de material se secaron en estufa a 60 ºC durante 24 horas hasta conseguir eliminar la humedad del material, mediante comprobación de peso constante.

A continuación se añadieron distintos porcentajes de agua y se realizó el ensayo de Próctor* en el laboratorio, según el procedimiento modificado, para obtener el valor de la densidad máxima a partir de dosificar la humedad óptima.

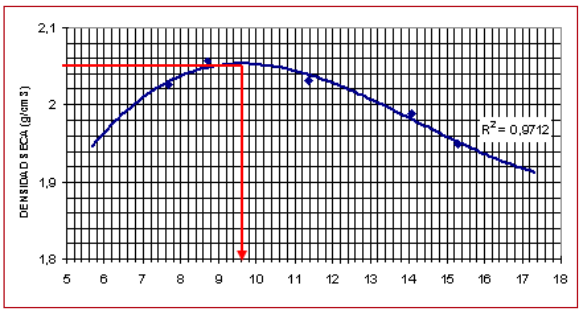


Figura 7.13. Próctor Modificado (humedad natural 0%).

***Las humectaciones y compactaciones de estas porciones de muestra de acuerdo con el procedimiento mencionado, se han hecho sin ningún "tiempo de maduración", de tal manera que una vez amasada la porción de ensayo con la dotación de agua calculada se procedió a su compactación.**

Material	Valores Próctor Modificado	
	Densidad máxima (g/cc)	Humedad óptima (%)
Suelo ARMh	2,05	9,7

Tabla 7.18. Ensayos realizados con áridos sin humectación previa.

B) Próctor Modificado tomando la humedad natural del árido 8,56%

Del mismo modo se tomaron cinco porciones y se calculó su humedad natural, resultando ser del 8,56%, y se añadieron distintos porcentajes de agua y se realizó el ensayo de Próctor Modificado en el laboratorio preparando porciones de la muestra de ensayo, con distintos grados de humedad y tiempo de maduración de 15 minutos. Posteriormente las porciones fueron compactadas con una determinada energía, según el procedimiento modificado, para obtener el valor de la densidad máxima a partir de dosificar la humedad óptima.

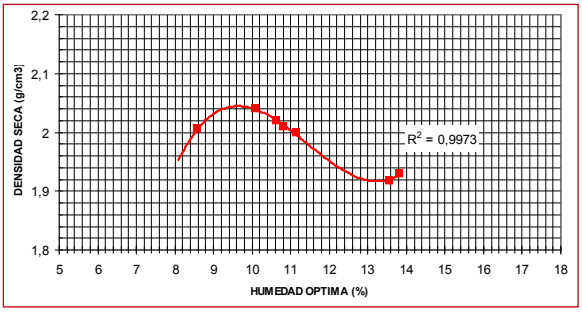


Figura 7.14 . Próctor Modificado (humedad natural 8,56%).

Los valores de Próctor Modificado se detallan en la tabla 7.19.

Material	Valores Próctor Modificado	
	Densidad Máxima (g/cc)	Humedad Óptima (%)
Suelo de ARMh	2,04	9,7

Tabla 7.19. Ensayos realizados con áridos con su humedad natural.

C) Próctor Modificado "tras saturación"

Finalmente se tomaron tres porciones de 5 kg del suelo, con una humedad natural de 8,56%, se esparcieron en una bandeja metálica y se presaturaron con agua añadiendo a cada una de ellas 1,5 l de agua, con todo ello la humedad calculada en cada una de ellas fue de 12,8%. Se mantuvieron durante una hora, antes de proceder al ensayo de compactación de Próctor Modificado. Los valores obtenidos se han representado en la curva del Próctor Modificado con humedad natural.

Tal como se puede apreciar, los valores obtenidos se encuadran perfectamente en la curva de Próctor Modificado "tras saturación". A pesar de haber estado un mayor tiempo de maduración.

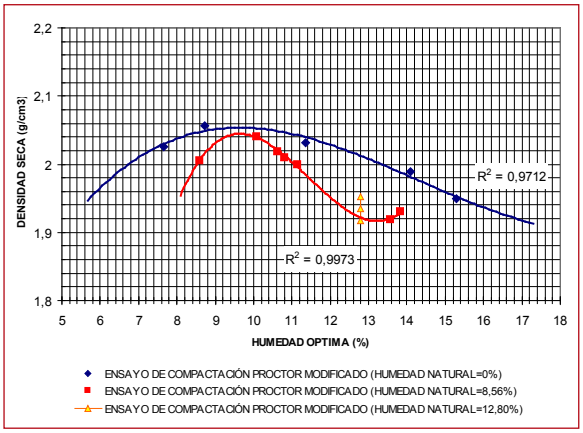


Figura 7.15. Próctor Modificado tras saturación del árido.

Aunque en ambos casos la densidad máxima obtenida y la humedad óptima ha resultado ser prácticamente la misma 2,04 g/cc y 9,7% independientemente de la preparación del árido, la forma de la curva de Próctor Modificado secando el árido (más suavizada) difiere de la forma de la curva de Próctor Modificado tras saturación. La absorción de los áridos reciclados es mayor que la de los áridos naturales y, por tanto, el hecho de no esperar un tiempo de maduración para la realización del ensayo está dando artefactos en la curva de Próctor. Por ello se recomienda obtener la fórmula de trabajo a partir del ensayo de Próctor Modificado con la humedad natural o tras saturación.

A fin de comprobar la influencia de la humedad en la densidad máxima, y por ende en la resistencia mecánica final del material tratado, se fabricaron probetas para realizar ensayos físico-mecánicos y comprobar la resistencia a compresión del material según la siguiente fórmula de trabajo (tabla 7.20) con distintos grados de humectación previa, según tabla 7.21.

Material	Tipo	% Cemento	H. Óptima	% Aditivo retardante
Sueloce-mento de AR	ARMh	3	9,7	Sin aditivo

Tabla 7.20. Fórmula de trabajo.

Serie 1	Árido con grado de humedad inicial 7,12%
Serie 2	Árido con grado de humedad inicial 0%
Serie 3	Árido con un grado de humedad inicial sobresaturado

Tabla 7.21. Series de ensayos de resistencia mecánica a compresión.

SERIE 1. Se tomó el árido con un grado de humedad inicial de 7,12%, se añadió la proporción de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima obtenida con el ensayo de Próctor tras saturación. Se homogenizó el material en bandeja metálica durante aproximadamente quince minutos, posteriormente se recalculó la humedad y viendo que la humedad del material era 9,7% se fabricaron las probetas de suelocemento empleando martillo vibrante durante 20 s (en cada una de las tres tongadas para hacer la probeta). El aspecto de las probetas de suelocemento antes de su rotura se presenta en la figura 7.16.



Figura 7.16. Probetas de suelocemento antes de su rotura – Serie I.

La densidad del material y la resistencia se presenta a continuación.

		Densidad del material (G/cc)		Resistencia a compresión 7días (mpa).	
Serie 1	I	2.153	2.131	2.38	2.50
	II	2.131		2.50	
	III	2.111		2.52	

Tabla 7.22. Densidad del material y la resistencia mecánica a compresión.

SERIE 2. Se tomó el árido tras su secado en estufa con un grado de humedad del 0%, se añadió la proporción de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima obtenida con el ensayo de Próctor tras saturación. Se homogeneizó el material en bandeja metálica durante aproximadamente quince minutos, posteriormente se calculó la humedad del material corroborando que era 9,7%. El aspecto de las probetas de suelocemento antes de su rotura se presenta en la figura 7.17.



Figura 7.17. Probetas de suelocemento antes de su rotura – Serie II.

La densidad del material y la resistencia se presenta a continuación.

		Densidad del material (G/cc)		Resistencia a compresión 7días (mpa)	
Serie 2	I	2.014	1.980	2.20	2.23
	II	1.948		2.35	
	III	1.977		2.16	

Tabla 7.23. Densidad del material y la resistencia mecánica a compresión.

SERIE 3. Se colocaron los áridos reciclados en el suelo y se regaron durante un tiempo. Los áridos se removieron de vez en cuando mientras se regaba con agua, para que la totalidad de la superficie quedara perfectamente saturada. Después del riego, se dejó reposar el conjunto durante un tiempo de dos horas y finalmente se recogieron los áridos con una pala para escurrir bien el agua se repitió el proceso hasta obtener el peso de la muestra saturada con superficie seca con un tiempo mayor de riego y de reposo según se necesitó. En las pruebas de laboratorio se ha observado que el agua no se drena de forma satisfactoria y se observa que un tiempo excesivo de riego podría producir la segregación de los finos en el acopio y, como consecuencia, obtenerse un material no apto para su colocación en obra. La resistencia a compresión de las probetas no se pudo determinar por la poca cohesión del material, que apenas tocándolo se desmoronaba.

Conclusiones

- Se podría utilizar cualquier sistema de saturación del acopio, siempre que se consiga que antes de su compactación los suelos hayan completado su absorción de agua. Queda probado que un exceso de riego puede provocar consecuencias indeseables para el material tratado.
- Los materiales procedentes del reciclado de RCD presentan un coeficiente de absorción de agua superior a los habituales de los áridos naturales, lo que puede afectar al procedimiento de los ensayos de compactación Próctor. Por ello, el tiempo que transcurre en el laboratorio desde el amasado de las distintas porciones de la muestra de ensayo hasta su compactación en el molde ha de ser suficiente para que se produzca la total absorción de agua.
- Antes de su mezclado, el árido grueso reciclado deberá estar acopiado saturado de agua y la densidad de referencia será la determinada con el ensayo Próctor Modificado tras saturación por considerarlo de mayor sensibilidad de cara a obtener la fórmula de trabajo.

Continuando con las experiencias de laboratorio se analizaron la susceptibilidad de los ARMh y ARMc iniciales en las aplicaciones de suelocemento y gravacemento.

II. OBTENCIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO DE ARMh Y ARMc EN APLICACIONES DE SUELOCEMENTO Y GRAVACEMENTO

APLICACIÓN DE ÁRIDO RECICLADO EN SUELOCEMENTO

En primer lugar se han determinado los parámetros D máxima y H óptima de los áridos mediante el ensayo de Próctor Modificado, según norma UNE 103501, presentando los resultados en la tabla siguiente.

Material	Valores Próctor Modificado	
	Densidad Máxima (g/cc)	Humedad Óptima (%)
Suelo de ARMh	2.06	8.4
Suelo de ARMc	1.86	11.5
Zahorra natural	2.26	6.5
Material granular de machaqueo	2.33	5.6

Tabla 7.24. Resultados ensayos Próctor iniciales.

Para la confección de las probetas con diferentes contenidos en cemento, se ha tenido en cuenta que el PG3 indica como porcentaje mínimo en suelocemento una cantidad del 3%. Se han realizado los ensayos para corroborar los datos del ensayo

Próctor Modificado, comprobándose la densidad máxima y humedad óptima, para el material granular mezclado con los porcentajes de cemento utilizados para la confección de probetas, en este caso un 3%.

Para la fabricación de probetas se ha seguido la norma NLT-310, fabricación de probetas con martillo vibrante, se ha determinado el tiempo de vibración necesario para la obtención de una densidad del 98% de la obtenida en el ensayo Próctor y se han confeccionado las probetas para su posterior ensayo a compresión a 7 días. A continuación se muestran las dosificaciones utilizadas en la tabla 7.25.

Material	Tipo	% Cemento	% agua sobre el peso de áridos + cemento	% Aditivo retardante
Suelocemento de AR	ARMh	3	8.4	Sin aditivo
	ARMc	3	8.2	Sin aditivo
Suelocemento de zahorra natural	ZN	3	6.5	Sin aditivo
Material granular de machaqueo	MG	3	5.6	Sin aditivo

Tabla 7.25. Estudio dosificaciones para suelocemento.

En el caso de los ARMh, los porcentajes de agua utilizados coinciden con la humedad óptima obtenida para el ensayo Próctor, esto es debido a que el material a ensayar estaba totalmente seco. No ocurre lo mismo con el caso del árido ARMc, que debido a su elevada absorción y pesar de su aspecto, al calcular su humedad natural se obtuvieron valores entre 3 y 3,5% y por tanto el porcentaje de agua empleado para conseguir la humedad óptima en la dosificación fue del 8,2%.

Se ha determinado el tiempo de trabajabilidad de cada mezcla y los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Material	Plazos de trabajabilidad (min)
Suelocemento de ARMh	185
Suelocemento de ARMc	140
Suelocemento de zahorra natural	135
Material granular de machaqueo	160

Tabla 7.26. Plazo de trabajabilidad.

Con los resultados obtenidos, la única muestra que cumple el tiempo de trabajabilidad necesario para su puesta en obra es el material granular reciclado tipo ARMh, y solo en el caso de que se efectúe la ejecución de la anchura completa, para el resto de muestras e independientemente del tipo de ejecución previsto, será necesario utilizar aditivos retardadores del fraguado tal y como recomienda en estos caso el PG3.

APLICACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS EN GRAVACEMENTO

Dado que en ambos casos, suelocemento y gravacemento, se está considerando el material granular todo uno, los valores iniciales de humedad óptima y densidad máxima mediante el ensayo Próctor ya se han indicado para todos los materiales granulares, y se ha comprobado que los valores no han cambiado al adicionar un 3% de cemento. En cualquier caso y teniendo en cuenta que el PG3 indica como porcentaje mínimo en gravacemento, una cantidad del 3,5%, se decide estudiar dos porcentajes más: 4% de cemento y 4,5% de cemento. Por ello, se realiza una comprobación de los parámetros densidad máxima y humedad óptima para el material granular mezclado con los porcentajes máximos de cemento utilizados para la confección de probetas, en este caso un 4,5%, mediante un nuevo ensayo Próctor según UNE 103501, presentando los resultados en la tabla siguiente:

Material	Valores Próctor Modificado	
	Densidad máxima (g/cc)	Humedad óptima (%)
Gravacemento de ARMh	2,09	8,8
Gravacemento de ARMc	1,88	13,74
Gravacemento con grava triturada	2,25	3,6

Tabla 7.27.Valores Próctor Modificado.

En el gráfico siguiente se presentan de forma comparativa los valores de densidad y humedad óptima para el ensayo de Próctor con los áridos ARMh y ARMc y para el ensayo de Próctor con los áridos más el 4,5% de cemento, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación:

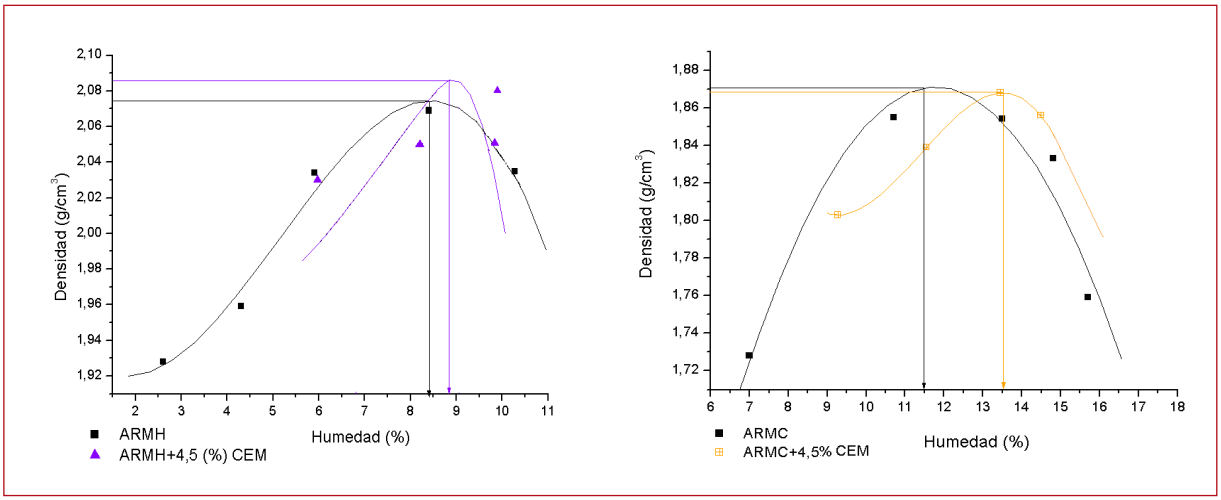


Figura 7.18. Densidad y humedad óptima para los áridos ARMh y ARMc, con y sin más 4,5% de cemento adicional.

En general, los valores de densidad máxima y humedad óptima de un material no presentan grandes diferencias con respecto a los que se obtienen al añadir cemento. El efecto floculante del cemento tiende a producir un ligero aumento en la humedad óptima, en el caso de los ARMc no se ha observado variación en la densidad máxima, pero sin embargo los de densidad máxima se ven incrementados al añadir cemento en el ARMh.

A continuación se muestran en la tabla 7.28 las dosificaciones utilizadas:

Material	Tipo	% cemento	% agua sobre el peso de áridos + cemento	% Aditivo retardante
Gravacemento de AR	ARMh	4	8,4	Sin aditivo
	ARMh	4,5	8,8	Sin aditivo
	ARMc	4	9,1	Sin aditivo
	ARMc	4,5	9,5	Sin aditivo
Gravacemento de grava natural triturada.	GT	3,5	3,6	Sin aditivo

Tabla 7.28. Dosificaciones utilizadas gravacemento.

Se ha determinado el tiempo de trabajabilidad de cada mezcla con los máximos contenidos de cemento utilizados (4.5% para los áridos reciclados y 4% para la grava natural) y los resultados se presentan en la tabla 7.29.

Material	Plazos de trabajabilidad (min)
Gravacemento de ARMh	145
Gravacemento de ARMc	120
Gravacemento de grava natural triturada	185

Tabla 7.29. Plazos de trabajabilidad gravacemento.

Tal como se puede comprobar por los resultados obtenidos, el porcentaje de cemento influye en el plazo de trabajabilidad de la mezcla, de manera que al incrementar la cantidad de cemento se hace necesaria la utilización de aditivos capaces de retardar el tiempo de fraguado en la mezcla y aumentar así los plazos de trabajabilidad de la misma. Una vez determinado el tiempo necesario, se han confeccionado las probetas para su posterior ensayo a compresión a 7 días.

III. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES GRANULARES TRATADOS CON CEMENTO

Con cada dosificación diseñada, tanto para suelocemento como para gravacemento, se han fabricado probetas para la determinación de sus resistencias mecánicas a 7 días.

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN: MEZCLAS DE SUELOCEMENTO

Los resultados de los ensayos en probetas realizadas en las mezclas de suelocemento en laboratorio se muestran a continuación:

Material	Serie y % cemento	Número	R compresión 7d (MPa)	
			Valor unitario	Valor medio
Suelocemento de ARMh	I (3%)	1	3,21	3,30
		2	3,03	
		3	3,66	
	II (3%)	1	2,99	
		2	3,06	
		3	3,85	
Suelocemento de ARMc	I (3%)	1	3,59	3,62
		2	3,67	
		3	3,61	
	II (3%)	1	3,56	
		2	3,63	
		3	3,68	
Suelocemento de Z. Natural	I (3%)	1	2,60	2,65
		2	2,65	
		3	2,70	
	II (3%)	1	2,68	
		2	2,71	
		3	2,56	
Suelocemento mat.gr.machaqueo.	I (3%)	1	4,19	4,23

Tabla 7.30. Resistencias a compresión suelocemento.

Los requisitos del PG3 para resistencias mecánicas a 7 días, según norma NLT-305, en mezclas de suelocemento, son los siguientes:

Material	Zona	Mínima	Máxima
Sueloce-mento	Calzada y Arcenes	2,5	4,5

Tabla 7.31. Especificaciones PG3 para resistencias mecánicas en suelocemento.

Como se puede ver en la tabla, todos los resultados cumplieron las exigencias del PG3 para un contenido de cemento del 3%, que es el mínimo exigido para el caso de mezclas cuyo uso previsto sea como suelocemento.

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN: MEZCLAS DE GRAVACEMENTO

Los resultados de los ensayos en probetas realizadas en las mezclas de gravacemento en laboratorio se muestran a continuación:

Material	Serie y % cemento	Número	R compresión 7d (MPa)	
			Valor unitario	Valor medio
Gravacemento de ARMh	I (4%)	1	4,2	4,1
		2	3,9	
		3	4,3	
	II (4%)	1	4,0	
		2	4,4	
		3	3,9	
	I(4.5%)	1	5,5	5,4
		2	5,4	
		3	5,2	
	II (4.5%)	1	5,2	
		2	5,4	
		3	5,6	

Gravacemento de ARMc	I (4%)	1	4,1	4,0
		2	4,0	
		3	4,2	
	II (4%)	1	3,8	
		2	4,3	
		3	3,9	
	I (4.5%)	1	4,5	4,5
		2	4,5	
		3	4,2	
	II (4.5%)	1	4,7	
		2	4,5	
		3	4,3	
Gravacemento de grava natural triturada.	I (3.5%)	1	8,1	8,2
		2	8,2	
		3	8,2	
	II (3.5%)	1	7,9	
		2	8,4	
		3	8,3	
	I (4%)	1	10,0	9,7
		2	9,4	
		3	9,7	
	II (4%)	1	9,9	
		2	9,8	
		3	9,4	

Tabla 7.32. Resistencias mecánicas gravacemento.

Los requisitos del PG3 para resistencias mecánicas a 7 días según norma NLT-305, en mezclas de gravacemento, son los siguientes:

Material	Zona	Mínima	Máxima
Gravacemento	Calzada	4,5	7,0
	Arcenes	4,5	6,0
	Calzada y Arcenes	2,5	4,5

Tabla 7.33. Especificaciones PG3 para resistencias mecánicas en gravacemento.

Como se puede ver en la tabla 7.30 y 7.32, no todos los tipos de RCD cumplen las especificaciones del PG3 en cuanto a prestaciones mecánicas, empleando el porcentaje mínimo de cemento. Para cumplir las especificaciones para gravacemento en los árido reciclados se requiere un porcentaje de cemento del 4,5%.

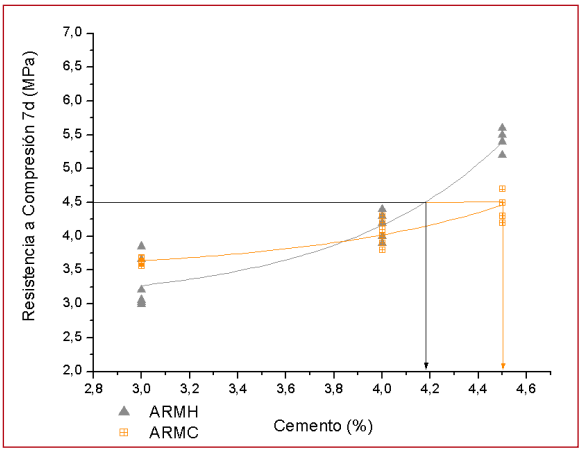


Figura 7.19. Resistencia mecánica versus porcentaje de cemento.

Si se comparan los resultados obtenidos para el ARMh y el ARMc con los valores obtenidos para la grava natural podemos observar que la necesidad de cemento en este caso para alcanzar las resistencias ha sido la mínima 3,5% e incluso para este porcentaje, los valores obtenidos, superan los máximos recomendados por el PG3.

Las buenas resistencias obtenidas con el mínimo cemento son lógicas si se tiene en cuenta que la grava utilizada ha sido compuesta para la obtención de un buen esqueleto pétreo y una buena compacidad, no ocurre así con la grava reciclada que en realidad se trata de un todo uno con la granulometría que se obtiene tras el proceso de triturado y cribado en planta. No obstante, a pesar de las heterogeneidades del material reciclado y, por tanto, su menor rendimiento, se ha podido comprobar a la luz del gráfico anterior, figura 7.19, que con un 4,5% de cemento se consiguen superar las prestaciones mecánicas exigidas por el PG3 para los materiales ARMh y se alcanzan las prestaciones mínimas para los materiales ARMc, estudiados.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Ensayo de Composición. UNE-EN 933-11.

La tipología de los áridos reciclados empleados en la experiencia se determina en base a la estimación de las proporciones relativas de los componentes mayoritarios de los áridos gruesos reciclados, según la norma UNE-EN 933-11. Del ensayo de composición se deduce que el componente mayoritario de la muestra 54191 es mortero-hormigón y tras la adición de material cerámico a la muestra 53708 el componente mayoritario pasa a ser material cerámico. En todas las muestras analizadas el componente X, que indica yeso, vidrio u otras impurezas es muy reducido en el caso de la muestra 54191 y bastante elevado en el caso de la muestra 53708 enriquecida,

no llegando a superar el límite del 1% establecido en la clasificación del proyecto.

Granulometría. UNE- EN 933-1.

Al representar las curvas granulométricas de las muestras de árido reciclado todo uno y los husos correspondientes a las posibles aplicaciones, se aprecia que para la aplicación como suelocemento, los áridos reciclados estudiados ARMh y ARMc cumplen el huso para SC40, es decir, son susceptibles de emplearse en calzadas y arcenes distintas a T3 y T4. Para comparar su comportamiento con un material natural, se ha optado por una zahorra natural y un material granular de machaqueo que encajan perfectamente en dicho huso.

Para su aplicación en gravacemento, ambos materiales ARMh y ARMc encajan tanto en el huso G20 como en el G25. Para comparar su comportamiento con un material natural, se ha optado por una grava triturada, resultado de la composición de distintas fracciones, de manera que cumpla perfectamente ambos husos.

Plasticidad. UNE 103103 y UNE- 103014.

Los ensayos de plasticidad realizados tanto para los áridos reciclados como para los materiales naturales no muestran problema alguno para el cumplimiento de los requisitos exigibles en ambas aplicaciones (suelocemento y gravacemento), la única muestra cuyos finos presentan algo de plasticidad es la zahorra natural seleccionada y aún así los valores obtenidos cumplen los requisitos necesarios para su uso.

Forma del Árido o Índice de Lajas. EN 933-3.

Teniendo en cuenta los valores exigibles en el PG3 para el ensayo de índice de lajas, analizando los resultados obtenidos, se deduce que los áridos ARMc, con porcentajes de materiales cerámicos cercanos al 60%, superan el valor máximo permitido de 40 para índice de lajas y, por tanto, no podrían ser utilizados ni en arcenes. No obstante, se analizarán el resto de propiedades de los áridos a fin de determinar la adecuación del resto de características.

Contenido en Sulfatos. UNE-EN 1744-1.

De los resultados obtenidos, se deduce que la presencia de sulfatos en los áridos reciclados se debe a la presencia de restos de albañilería, de ahí que en el caso de ARMc, las muestras analizadas superaron el 1% de compuestos totales de azufre expresados como SO_3%, superando así los valores máximos permitidos establecidos por el PG3.

Dado el porcentaje de sulfatos que presentaron los ARMc, al 1,84%, se realizó el ensayo de hinchamiento que se describe en el ensayo CBR según norma UNE 103 502, observando que en ambos casos ARMh y ARMc, no se produjeron expansiones durante el periodo de ensayo que establece la norma.

Materia Orgánica. UNE-103204.

Los valores obtenidos en todas las muestras analizadas presentan un contenido en materia orgánica inferior al valor máximo permitido para su uso en las aplicaciones de suelocemento y gravacemento.

Reactividad Potencial. UNE 146507-1.

Los áridos analizados tanto reciclados como naturales no presentan en ningún caso un comportamiento potencialmente reactivo y, por tanto, pueden utilizarse con materiales granulares tratados con cemento para cualquiera de las aplicaciones previstas.

Determinación del Coeficiente de Los Ángeles. EN 1097-2.

Independientemente de la composición de los áridos reciclados analizados, el valor del coeficiente Los Ángeles obtenido permite el uso de estos áridos en todo tipo de arcenes ya que la limitación establecida es de 40; sin embargo, para el caso de utilizar en calzadas, su uso quedaría limitado a aquellas calzadas correspondientes a la categoría de tráfico T3 y T4.

Calidad del Árido Fino. Equivalente de Arena. UNE-EN 933-8.

La condición de equivalente de arena es limitante para los finos de muestras cuyo uso sea gravacemento. Las muestras analizadas presentan valores de equivalente de arena dentro del rango exigido y por tanto, son aptos para su aplicación en cualquiera de los husos GC20 y GC25.

CONCLUSIONES

A continuación se detallan las conclusiones y recomendaciones para cada una de las aplicaciones analizadas.

Conclusiones para suelocemento:

- En todos los casos con el mínimo contenido de cemento (3%), los áridos ensayados independientemente de su composición cumplieron las resistencias mínimas exigidas a los 7 días por el PG3.
- Los ARMh no necesitaron ningún aditivo adicional para garantizar los plazos de trabajabilidad.
- En caso de disponer de áridos reciclados de composición mayoritariamente cerámica ARMc, con un porcentaje en cerámicos superior al 50%, cuya absorción suele ser mayor, se deberían de emplear aditivos para garantizar los plazos de trabajabilidad.

Recomendaciones para suelocemento:

- En caso de tener que emplearse un ARMc, que posea un contenido de sulfatos totales ligeramente superior al máximo establecido por el PG3, se recomienda emplear cementos resistentes a sulfatos.

Conclusiones para gravacemento:

- Para conseguir la resistencia mínima exigida por el PG3, ha sido necesario emplear un 4,5% de cemento, mientras que la grava triturada superó la resistencia mínima con el 3,5% de cemento.
- Debido al incremento del porcentaje de cemento, se observa una disminución del plazo de trabajabilidad, por tanto, con los áridos empleados seria necesario utilizar aditivos retardadores de fraguado.
- Dado el elevado porcentaje de cemento necesario y el elevado porcentaje de sulfatos que presentaron los ARMc, se realizó el ensayo de hinchamiento que se describe en el ensayo CBR, según norma UNE 103 502, observando que en ambos casos ARMh y ARMc, no se producen expansiones durante el periodo de ensayo que establece la norma.
- Según las especificaciones técnicas del PG3, el ARMc de estudio con un 60% de material cerámico, supera el contenido máximo de sulfatos, fijado en un 1% y presenta un índice de lajas que restringe su uso a arcenes de cualquier categoría de trafico pesado; no obstante, su comportamiento en cuanto a hinchamiento y prestaciones mecánicas fue similar al de la gravacemento en RCD de ARMh.

Recomendaciones para gravacemento:

- En caso de tener que emplearse ARMc, en aplicaciones de gravacemento, se recomienda limitar el porcentaje de cerámicos en torno al 30-40%, para garantizar el cumplimiento del índice de lajas y obtener una mejor compactación con una menor H.Óptima.
- Se podría utilizar cualquier sistema de saturación del acopio, siempre que se consiga que antes de su compactación los suelos hayan completado su absorción de agua. Queda probado que un exceso de riego puede provocar consecuencias indeseables para el material tratado.
- Antes de su mezclado, el árido grueso reciclado deberá estar acopiado saturado de agua y la densidad de referencia será la determinada con el ensayo Próctor Modificado tras saturación por considerarlo de mayor sensibilidad de cara a obtener la fórmula de trabajo.

7.5.5. Obras

Finalmente, la segunda fase del proyecto comprende la ejecución de un demostrable de la aplicación estudiada a fin de que quede constancia de la bondad del material reciclado para ser aplicado como suelocemento y/o gravacemento en paquetes de firme. A este efecto, surgió la posibilidad de realización de un tramo experimental al que se hace referencia a continuación, gracias a la colaboración de D. José Antonio Aranda Castelló, Dirección área de carreteras (Diputación provincial de Valencia).

7.5.5.1. Descripción y condicionantes de la obra

Las obras cedidas por la diputación para el objeto del proyecto están situadas en el término municipal de Castelló de la Ribera, en Valencia. La carretera proyectada será una variante de la actual CV-560 (VP-1038) discurrirá desde la Pobla Llarga hasta la N-340, circunvalando la población de Castelló de la Ribera por el lado izquierdo del núcleo urbano según la dirección antes mencionada. Resolviendo con rotondas las intersecciones de la variante con las diferentes carreteras que intersecta: Carretera de Manuel CV-562 (VV-1033), carreteras de Senyera CV-564 (VV-1053), carretera de San Juan de Énova CV-561 (VV-1039).

A continuación se detalla el plano del emplazamiento de interés para AIDICO en el control de las obras. Se trata del tramo ubicado en el eje principal después de la primera glorieta, entre 0+450 hasta 0+900, cuya longitud aproximada podría llegar a 450 m. A continuación se detalla el plano del emplazamiento de interés para AIDICO en el control de las obras. Se trata del tramo ubicado en el eje principal después de la primera glorieta, entre 0+450 hasta 0+900, cuya longitud aproximada podría llegar a 450 m.

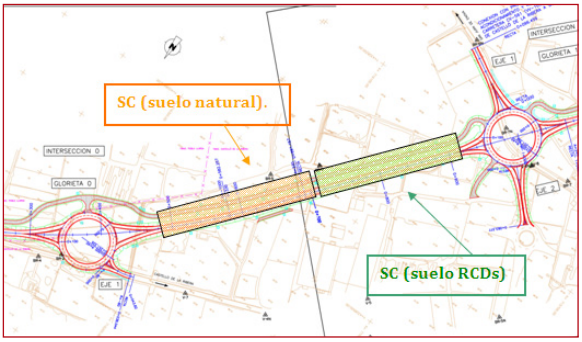


Figura 7.20. Situación de la obra. Zonificación de los tramos de prueba.

A fin de poder comparar el comportamiento del suelocemento procedente de árido reciclado frente a suelocemento procedente de suelo natural se propone que se realice la mitad del mismo, 200 m, empleando suelocemento con suelo procedente de árido reciclado y la otra mitad aproximadamente, 200 m, empleando suelocemento procedente de zahorra natural.

En este caso, ambos tramos soportarían la misma incidencia de tráfico y, por tanto, el comportamiento

de los RCD frente al suelo natural sería muy fácilmente comparable. Finalmente, para su ejecución se tendrían las mismas consideraciones operativas en todo el tramo.

La ejecución de 200 m lineales constituye un volumen aproximado de 500 m^3, por ello los áridos a analizar se considera que conforman un único lote para los ensayos de control de calidad.

DATOS PARTICIPANTES DE LA OBRA.

DIRECCIÓN DE OBRA. URBINSA (Urbanistas Ingenieros, S.A.)

Francisco José González Luque, Director de obra, de la empresa URBINSA
Juan Bondía, Ingeniero técnico de la empresa URBINSA.

CONTRATISTA. DIPUTACIÓN DE VALENCIA:

Julio Jiménez, Jefe del Servicio de Construcción de la Diputación de Valencia y Director de Contrato.
Paloma Corbi, Ingeniero Jefe del Servicio de Seguridad Vial, Supervisión y Control de Calidad de Diputación de Valencia.
Raquel Vidal, Ingeniera Técnica del Servicio de Seguridad Vial, Supervisión y Control de Calidad de Diputación de Valencia.

CONSTRUCTORA. FRAN JUAN S.L.

Juan Manuel Saludas Elvira, Jefe de obra de la empresa constructora Fran Juan, S.L

EMPRESA ÁRIDOS RECICLADOS.

Derribos mediterráneos.

CONTROL CALIDAD EJECUCIÓN:

- INTERCONTROL.
- Unidad técnica de I+D+i (AIDICO).

7.5.5.2. Características de los materiales empleados

A continuación se describen los materiales empleados y la caracterización de los mismos.



ÁRIDO 59415 (albarán AIDICO)

Zahorra de cantera Sellent (Franjuan).
Se trata de un material de color marrón oscuro, con gran humedad.
Fecha recepción de la muestra 1/04/2011



ÁRIDO 59435 (albarán AIDICO)

RCD (Derribos Mediterráneo).
Se trata de un material de color grisáceo, aparentemente es de tipo AMH, no presenta mucha humedad. Fecha recepción de la muestra 12/05/2011

Se realizó el ensayo granulométrico y el ensayo de composición de los áridos según UNE EN 933-1. El árido reciclado recibido se corresponde con ARMh según la clasificación establecida por el GERD en el Proyecto GEAR.

El huso granulométrico de los áridos se encuadra dentro de los límites establecidos para SC40. Con lo cual el árido reciclado podría ser susceptible de emplearse en arcenes y calzadas distintas a T3 y T4.

En cuanto al resto de propiedades, en todos los casos se cumplieron las prescripciones del PG3, para la aplicación de estos materiales en suelocemento, tal como se plasma en la tabla 7.34.

Exigible suelocemento							
Descripción	M. Orgánica M.O.(%)	Reactividad potencial	Sulfatos totales (%SO3)	Sulfatos solubles en ácido (%SO3)	Límites Attenberg		
					L. L.	L. Pl.	I. Pl
RCD tipo ARMh (AIDICO)	0,9	No reactivo	0,26	0,23	NP	NP	NP
RCD tipo ARMh (INTERCONTROL)	0,16	No reactivo	-	-	NP	NP	NP

Tabla 7.34. Resumen propiedades de los áridos analizados.

7.5.5.3. Obtención de la fórmula de trabajo

La compactación es un parámetro fundamental para asegurar las resistencias mecánicas máximas en las mezclas con cemento. A continuación se presenta. El valor de Próctor obtenido para el material todo uno 59435 con el 3% de cemento.

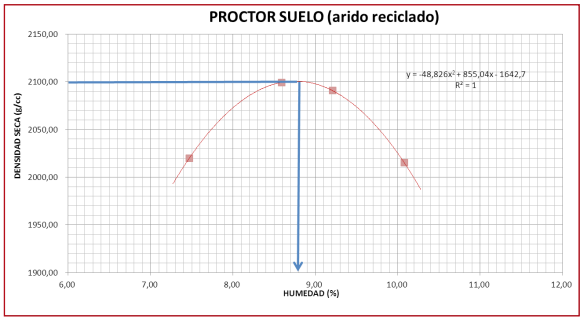


Figura 7.21. Próctor suelo a emplear en obra.

A continuación se resumen los resultados obtenidos para ambas tipologías de suelo.

Material	Valores proctor modificado	
	Densidad máxima (g/cc)	Humedad óptima (%)
Próctor suelo natural +3% cemento	2,33	5,3
Próctor suelo a. Recicl. +3% Cemento.	2,1	8,8

Tabla 7.35. Valores Próctor Modificado.

Se ha determinado el tiempo de trabajabilidad de cada mezcla con contenidos de cemento utilizados (3% para los áridos reciclados y 3% para la grava natural) y los resultados han sido satisfactorios, aunque se esta estudiando la adición de retardadores de fraguado para el caso de los áridos naturales. Una vez determinado el tiempo necesario, se han confeccionado las probetas para su posterior ensayo a compresión a 7 días.

Material	Valores individuales (mpa)	Valores promedio (mpa)
Suelocemento de 59415 + 3% cemento	4,4	4,083 ± 0,9
	3,8	
	2,4	
	4,3	
	4,8	
	4,8	
Suelocemento de 59435 + 3% cemento	2,4	4,07 ± 0.93
	4,58	
	4,49	
	5,09	
	4,08	
	3,78	
Suelocemento de 59435 + 3.5% Cemento	5,63	5,5 ± 0,16
	5,55	
	5,32	

Tabla 7.36. Valores de Resistencia a Compresión (MPa).

7.5.5.4. Tramo de prueba

El estado actual de las obras se refleja en la figura 7.22. Los ensayos de caracterización de los materiales a emplear se han realizado. El tramo de prueba esta pendiente de realización y su ejecución para probar la fórmula de trabajo se efectuará en breve y las obras del tramo experimental y el resto del trazado de la CV-560 se ejecutaron en septiembre de 2011, según los resultados que se obtengan en el tramo de prueba.



Figura 7.22. Estado actual de las obras.

7.6. Bibliografía

- Manual de firmes con capas tratadas con cemento (2ª Edición). IECA.
- Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición. Investigación prenormativa. (IHOBE)
- PG3. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes del Ministerio de Fomento
- II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008-2015.
- Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A. (GIASA). Recomendaciones para la redacción de: Pliegos de especificaciones técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD).

8. Los áridos reciclados en usos ligados

En este apartado se presentan los estudios específicos realizados por los Centros Tecnológicos y Universidades participantes en el Proyecto GEAR en cada uno de los ámbitos seleccionados siguientes:

- Prefabricados de hormigón (Universidad de Oviedo)
- Hormigón compactado con rodillo (Universitat Politècnica de Valencia)
- Hormigón en masa (Universidad de A Coruña)

Para realizar estas investigaciones, cada Centro y Universidad ha llevado a cabo un plan de investigación específico en laboratorio y se han utilizado los datos recogidos durante la etapa de diagnóstico (datos de productos y usos habituales en las plantas de reciclaje, obras históricas) y la etapa de aplicación experimental (documentos y seguimiento de las obras adscritas al proyecto).

La normativa técnica que regula los usos ligados en España es la Instrucción Técnica del Hormigón (EHE) y los artículos referidos a pavimentos en el Pliego General de Condiciones (PG3).

La nueva EHE-08, que entró en vigor en diciembre de 2008, contiene el Anejo 15, que recoge las recomendaciones específicas sobre la utilización del árido reciclado procedente de hormigón en hormigón estructural. Como en la mayoría de las normas europeas, en dicho anejo se limita el empleo de áridos reciclados en el hormigón estructural hasta un porcentaje máximo del 20% de sustitución. Para el hormigón de uso no estructural, la EHE-08 determina en su Anejo 18 que el árido reciclado podrá sustituir hasta el 100% del árido grueso. En ningún caso la EHE-08 contempla la posibilidad de utilizar áridos reciclados mixtos en ninguno de los usos.

Por otro lado, no existe ninguna referencia a la utilización de áridos reciclados en la normativa específica de prefabricados, que se desarrolla por tipo de pieza, y se refiere con carácter general a lo que establezca la normativa técnica de áridos y hormigones. De este modo, no existe ningún impedimento legal que pueda representar una barrera a la hora de utilizar áridos reciclados en los prefabricados. Los fabricantes de prefabricados de hormigón pueden utilizar los áridos reciclados siempre que les llegue como materia prima lista para ser incorporada en el proceso y hayan sido fabricados por un gestor autorizado, tal como establece el Decreto 93/1999 modificado por el Decreto 219/2001.

La Norma 6.1-IC hace referencia a hormigones empleados en los pavimentos de hormigón, estableciendo una nomenclatura que para Hormigón de Firme corresponde a (HF) y para Hormigón Magro Vibrado a (HM) en cualquier caso, seguida del valor de la resistencia característica a flexotracción a los 28 días expresada en MPa. Estos hormigones deberán cumplir las especificaciones fijadas en el artículo 550 Pavimentos de Hormigón y artículo 551 Hormigón Magro Vibrado del PG3.

En el pliego de Prescripciones Técnicas PG3 de 1986 se refería a hormigones compactados. En éste los áridos debían cumplir las condiciones del artículo 513 para gravacemento (actualmente 513 Materiales tratados con cemento - suelocemento y gravacemento) y la determinación del CBR se hacía según la norma NLT 111/78.

En el artículo 550 del PG3 (pavimentos de hormigón), cuando se hace referencia a los áridos utilizados se dice que cumplirán todas las especificaciones recogidas en la norma UNE-EN 12620:2003 y a su vez en la Instrucción, «Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)» o normativa que la sustituya, cuya definición será la que figura en el artículo 28 de la vigente EHE-08, la cual además contempla el uso de áridos reciclados según las especificaciones establecidas en su Anejo 15, permitiendo un 20% de sustitución de árido natural por árido reciclado para uso estructural.

Sin embargo, la Norma 6.1-IC "Secciones de firme" de la Instrucción de Carreteras, al igual que el PG3, no incluye especificaciones y usos para el hormigón HCR, porque su aplicación se queda en vías de muy baja capacidad, al no cumplir los valores del IRI el Índice de Regularidad Superficial.

La normativa europea contempla el uso de árido reciclado y lo enmarca en la UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón. Esta norma especifica las propiedades de los áridos y filleres obtenidos por tratamiento de materiales naturales, artificiales y reciclados, y la mezcla de estos áridos para la elaboración de hormigón.

La UNE-EN 13242:2002. Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes. Especifica las propiedades de los áridos obtenidos por tratamiento de materiales naturales, artificiales y reciclados, para materiales tratados con conglomerantes hidráulicos y no tratados empleados en obras de ingeniería civil y construcción de carreteras.

En concordancia con la normativa actual y con base en los estudios realizados por el Proyecto GEAR, de un modo general, los áridos reciclados más apropiados para usos ligados suelen ser aquellos que presentan en su composición mayor cantidad de residuos procedentes de material pétreo o de hormigón. En general, en relación con las normativas vigentes, la mayoría de las muestras analizadas por el Proyecto GEAR cumplen con los requisitos en una u otra categoría.

De hecho, la normativa técnica (EHE y PG3), al igual que en los usos no ligados, contempla casi en exclusiva la utilización de áridos reciclados procedentes de hormigón, descartando los áridos reciclados mixtos.

Por otro lado, es importante recordar que el Proyecto GEAR estudia fundamentalmente los áridos reciclados mixtos y que los estudios e investigaciones que se han realizado y exponen a continuación se refieren a la utilización de todas las categorías de árido reciclado (AR H, ARM H, ARM C).

Aunque se ha detectado un constante incremento en usos ligados (casi exclusivamente en mezclas con cemento) en prefabricados y en hormigón en masa (como hormigón de baja o media resistencia), la utilización de áridos reciclados en la fabricación de hormigón no alcanza el 15% de la producción total. El uso de áridos reciclados mixtos debe ser valorado.

Según los resultados obtenidos en el diagnóstico realizado con los áridos reciclados mixtos producidos en España:

- La granulometría del material y su contenido de finos es una característica que puede ser ajustada en planta y, por eso, no es considerada un limitador de uso del material;
- La mayor parte de todas las muestras analizadas (cerca de 83%) han presentado absorción de agua igual o inferior al 10%, lo que indica su viabilidad para uso en hormigones y prefabricados, con posibles restricciones en la dosificación y el porcentaje de sustitución de árido natural;
- De todos los productos analizados, el 75,56% presentan equivalente de arena igual o superior a 35, aunque solo 48,65% presentan valor igual o superior a 50;
- El 99% de todos los productos analizados cumplen el requisito de índice de lajas igual o inferior a 35%;
- Cerca de 84% del total de las muestras han presentado un contenido de sulfatos solubles en agua igual o inferior a 0,8%;
- Cerca del 73% han presentado un contenido de azufre igual o inferior al 1%.
- Cerca de 84% del total de las muestras cumplen el valor de coeficiente Los Angeles inferior a 40, mientras que cerca del 97% del total de las muestras tienen coeficiente Los Angeles igual o inferior a 50;
- Todos los productos han sido considerados no plásticos.

En todos los casos de aplicación de áridos reciclados en usos ligados, el problema crítico se concentra en el contenido de impurezas de estos materiales. Solo el 54% del total de las muestras analizadas por el Proyecto GEAR han presentado un contenido de otros elementos inferior al 1% en su composición.

Además, considerando las exigencias del artículo 513 del PG3 para hormigones compactados con rodillo, el uso de los áridos reciclados también es limitado por el contenido de sulfatos solubles en ácido. El límite exigido en la normativa para este parámetro es de un contenido < 1% de sulfatos solubles en ácido (solo el 50% del total de las muestras analizadas de áridos reciclados cumple con este límite).

Ya respecto al uso de los áridos reciclados españoles en prefabricados, buena parte de la limitación de uso de los áridos reciclados españoles también es acreditada al contenido de yeso. Solo el 28% del total de las muestras analizadas de áridos reciclados han presentado contenido de yeso igual o inferior al 1%.

En todos los casos, por lo tanto, se recomienda la mejora o implantación de un sistema de clasificación y limpieza en la planta para reducir estos problemas, ya que se asume que los límites citados deben ser cumplidos por el material para que el mismo sea utilizado adecuadamente.

Los apartados siguientes presentan con más detalle los estudios específicos realizados para la aplicación del árido reciclado en prefabricados (capítulo 8.1), en hormigones compactados con rodillo (capítulo 8.2) y en hormigones en masa (capítulo 8.3).

8.1 Prefabricados

Este capítulo fue desarrollado por los técnicos de UNIOVI (Universidad de Oviedo), que forman parte del equipo investigador del Proyecto GEAR.

8.1.1 Situación de la investigación en los prefabricados de hormigón producidos con áridos reciclados, en España y en Europa

Los productos prefabricados de hormigón están adquiriendo cada vez mayor importancia dentro del sector de la construcción. Actualmente, la estructura de algunos tipos de viviendas unifamiliares e incluso edificios se está construyendo íntegramente con estos elementos. Las razones principales de su uso hay que buscarlas en la sencillez y en la fiabilidad de la fabricación, con controles establecidos sobre las materias primas, proceso y producto final.

Además, la moldeabilidad y los exhaustivos controles propios de un proceso industrial dan lugar a la obtención de un producto homogéneo y de calidad contrastada. Por otra parte, el empleo de áridos, obtenidos mediante trituración de residuos de construcción, en la fabricación de estos productos, contribuye de manera notable a la mejora de nuestro entorno ambiental. Todo ello ha llevado a que algunas empresas y universidades se hayan planteado ir un paso más allá y hayan hecho una apuesta decidida por el empleo de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demoliciones como sustituto del árido natural en la fabricación del hormigón utilizado en piezas y elementos prefabricados.

Empresas y universidades de España y Europa llevan impulsando desde los últimos años investigaciones enfocadas al uso de áridos reciclados, procedentes de residuos de construcción y demoliciones, en el ámbito de los prefabricados de hormigón. En dichos proyectos se pretende fomentar el uso de este tipo de áridos, y así ayudar notablemente a reducir la sobreexplotación de los recursos naturales, evitar el crecimiento incontrolado de los vertederos y, en definitiva, minimizar la contaminación medioambiental.

En la actualidad los proyectos llevados a cabo dentro del ámbito de los prefabricados, utilizando áridos reciclados, se han desarrollado en empresas y universidades de Cataluña y de Asturias. En Europa también se han desarrollado diversas investigaciones dentro del mismo campo.

A continuación se reseñan los trabajos más relevantes llevados a cabo en prefabricados de hormigón, utilizando áridos reciclados, tanto en España como en Europa.

La empresa Áridos Pérez, ubicada en Caldes de Montbui, Barcelona, ha desarrollado los bloques GDP® (2006). Dichos bloques son piezas de hormigón prefabricadas con áridos reciclados que conforman una amplia gama de productos, rocallas, piedras artificiales, escolleras, tochos, pies para vallas y fuentes públicas, fruto de la necesidad de encontrar nuevos usos a unos productos obtenidos mediante el reciclaje de residuos de construcción y demoliciones. A través de sus investigaciones se han desarrollado procesos innovadores hasta conseguir el diseño de elementos de hormigón prefabricados y con el 100% de áridos reciclados.

Las principales ventajas esgrimidas por la empresa son las siguientes:

- Ahorro de costes de transferencia a vertedero.
- Árido exento de agentes contaminantes, sulfatos ni materia orgánica.
- Hormigón reciclado de buena consistencia.
- Bajo consumo de cemento.
- Óptima resistencia a compresión y buen comportamiento a la retracción.
- Rapidez de montaje (hasta 5 veces menos que un muro convencional).
- Instalación limpia.
- Sin preparativos previos alrededor de la obra.
- Sin necesidad de grandes infraestructuras se construyen muros de gran solidez.
- Son piezas recicladas y 100% reciclables.
- Posibilidades infinitas de productos.

Los ensayos realizados sobre el nuevo producto demuestran que posee buenas condiciones de durabilidad.

En la figura 8.1 se observa el aspecto final de un bloque GDP® empleado como escollera en la contención de un terraplén. En la figura 8.2 se muestra el muro de una vivienda unifamiliar construido con bloques GDP®, donde puede observarse el excelente acabado que presentan.



Figura 8.1. Bloques GDP empleados como escollera.



Figura 8.2. Bloques GDP empleados en la construcción del muro de una vivienda unifamiliar.

El Centro Catalán del Reciclaje, la Gestora de Runes de la Construcció (GRC), la Universidad Politécnica de Cataluña y las empresas Breinco y Zicla (2007) han impulsado la realización de un proyecto para evaluar la viabilidad de la sustitución de una parte de los áridos de cantera por áridos reciclados en la producción de prefabricados de hormigón.

El objetivo del proyecto ha sido obtener prefabricados de hormigón que tengan por sus características técnicas, estéticas, ambientales y de costes, posibilidades reales de situarse ventajosamente en el mercado de los productos reciclados. Los ensayos realizados hasta el momento en los laboratorios de la Universidad y en la industria demuestran que los prefabricados de hormigón, elaborados con áridos reciclados, tienen unas características mecánicas excelentes que animan a estudiar el proceso de fabricación a escala precomercial.

Todos los productos procedentes de las plantas de reciclaje de GRC son analizados y caracterizados trimestralmente por laboratorios homologados con la intención de realizar un control exhaustivo de los materiales reciclados destinados a la venta.

Una de las aplicaciones realizadas ha consistido en la fabricación de un bordillo de hormigón donde el árido natural se ha sustituido por árido reciclado. La metodología aplicada ha incluido la realización de unos ensayos preliminares en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña. Estos ensayos previos sirvieron para definir el tipo y la granulometría del árido más apropiado para la aplicación deseada.

Se llegó a la conclusión de que el uso en planta de los áridos reciclados, como un árido más, es perfectamente compatible con el proceso de producción desarrollado actualmente y, en principio, no plantea problemas específicos ni gastos adicionales.

En la figura 8.3 se observan una serie de bordillos fabricados con áridos reciclados.



Figura 8.3. Bordillos fabricados a partir de áridos reciclados.

La empresa Gestora de Runes del Bages, S.L., ubicada en Manresa, ha investigado sobre la viabilidad de utilización de los áridos reciclados obtenidos en sus instalaciones en la fabricación de mobiliario urbano de hormigón (2009). Llevó a cabo la caracterización completa de los áridos reciclados. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, determinó la dosificación del hormigón. Posteriormente, realizaron amasadas de prueba y ajustaron la dosificación final. Cuando esto se logró, se realizó un encofrado de madera con la forma del banco. Finalmente, se fabricó utilizando dos colorantes distintos para obtener dos acabados diferentes.

En la figura 8.4 puede observarse el resultado obtenido. Este tipo de bancos se utiliza como mobiliario urbano en vías públicas y, principalmente, en plazas y parques.

Desde hace tres años se lleva realizando en las instalaciones de la empresa Pastor, S.A., fábrica de prefabricados para la construcción en Santa Margalida, Mallorca, un proyecto de investigación con la finalidad de obtener piezas prefabricadas de hormigón vibrocomprimido utilizando áridos reciclados mixtos. Durante el último año ha sido posible ejecutar en obra pavimentos con adoquines de hormigón

reciclado. A partir del año 2009 se han empezado a fabricar prototipos de mobiliario urbano con áridos reciclados, además de otros pequeños elementos prefabricados de hormigón reciclado sin armadura.

Esta investigación surge de la necesidad de hallar un uso al árido reciclado que se genera en las plantas trituradoras de escombros de Mallorca y sus alrededores.



Figura 8.4. Banco de hormigón fabricado con áridos reciclados.

El árido reciclado procedente de la planta Mac Insular, en Mallorca, tiene algunos inconvenientes asociados a su heterogeneidad y al contenido de impropios y contaminantes. Ante estas características, el estudio se ha centrado en pequeños prefabricados sin armadura y hechos en hormigón seco. En primer lugar se caracterizaron los áridos reciclados, se diseñaron las dosificaciones con árido reciclado y se fabricaron y ensayaron probetas vibrocomprimidas con las dosificaciones calculadas. A continuación, se hicieron unos bloques de hormigón y adoquines con un 100% de árido reciclado y se ensayaron a rotura. Por último, se construyó un pavimento piloto con adoquines 100% reciclados. Actualmente, se está estudiando su comportamiento y evolución en servicio sometido a los factores de uso y del clima. Los resultados obtenidos hasta el momento son bastante satisfactorios y permiten ser optimistas en cuanto a una aplicación más extensa de este tipo de productos. En la figura 8.5 se observa un adoquín fabricado con árido reciclado.

Las ventajas de utilizar áridos reciclados en los elementos prefabricados vibrocomprimidos son:

- La baja fluidez no es propiedad limitante, sino deseable de la trabajabilidad de este tipo de hormigón y, por lo tanto, los efectos de la adición de los finos del árido reciclado no acarreará los problemas de trabajabilidad, ya conocidos en dosificación de los hormigones fluidos, debido a estos finos.
- Los prefabricados vibrocomprimidos presentan un amplio abanico de piezas de uso común y mayoritario.
- Se puede optar por prefabricados de menores exigencias mecánicas y estructurales.
- Tener mayor control sobre las variables en la fabricación.

Por otra parte, y en vista del buen resultado obtenido en los adoquines fabricados con árido reciclado, se ha tratado de buscar nuevos productos que admitiesen este tipo de áridos. Desde el año 2009, esta empresa de prefabricados viene desarrollando algunos prototipos en el ámbito del mobiliario urbano. Para ello, se está empleando árido reciclado 0-8 mm como fracción fina procedente de la planta Mac Insular. Como fracción gruesa se emplean recortes procedentes de la sección de marmolería de Pastor, S.A. triturados en la propia planta de prefabricados. De este modo se consigue reciclar gran parte de los residuos de la propia fábrica. Estos áridos reciclados por Pastor, S.A. tienen una granulometría de 8-16 mm, de tal forma que dosificando al 50% la continuidad de la curva granulométrica queda garantizada. Este hormigón, siendo en la práctica 100% reciclado, tiene unas características mecánicas superiores. El motivo se encuentra en que los áridos procedentes de marmolería, granitos y rocas metamórficas tienen una resistencia a compresión muy superior a los áridos naturales calcáreos disponibles en Mallorca. A pesar de esta excelente característica de los áridos reciclados, se está optando por diseños sencillos y no comprometidos estructuralmente, aunque también se realizan algunas pruebas de comportamiento para diseños más complejos. El objetivo de este nuevo proyecto es el de hallar una familia de piezas de mobiliario urbano para poder fabricarlas sin dificultades con hormigón reciclado.



Figura 8.5. Adoquín fabricado a partir de árido reciclado por la empresa Pastor, S.A.

En las figuras 8.6 y 8.7 se muestran las piezas prefabricadas de mobiliario urbano hechas a partir de áridos reciclados.



Figura 8.6. Bancos prefabricados por la empresa Pastor, S.A. a partir de árido reciclado.



Figura 8.7. Mobiliario urbano fabricado por la empresa Pastor, S.A. con árido reciclado.

La empresa El Caleyo Nuevas Tecnologías, situada en las proximidades de Oviedo, ha llevado a cabo un proyecto de investigación (2008) para reutilizar los áridos reciclados, procedentes de residuos de hormigón generados en las plantas de la propia empresa, en prefabricados de hormigón. La pieza prefabricada elegida fue la bovedilla. Los ensayos realizados sobre estas piezas fabricadas con árido reciclado proporcionan unos resultados similares a los que se obtienen en las bovedillas fabricadas con áridos naturales.

En la figura 8.8 se observa una bovedilla fabricada a partir de áridos reciclados con contenido mayoritario de residuos de hormigón.

En la Universidad de Liverpool, Inglaterra, se ha realizado un estudio sobre prefabricados de hormigón con áridos reciclados procedentes de residuos de la demolición de edificios (2008). La investigación estaba centrada en la fabricación de adoquines y losas. El objetivo consistía en analizar el uso potencial de los áridos reciclados en los dos elementos prefabricados citados anteriormente.

El hormigón se dosificó con un bajo contenido en agua, el proceso de vibro-compactación utilizado en la fábrica se puso en práctica en el laboratorio y la vibración se aplicó uniformemente a todo el molde donde se encontraba el adoquín mientras era compactado por un vibrador neumático.



Figura 8.8. Bovedilla fabricada con áridos reciclados con un contenido mayoritario de residuos de hormigón.

El comportamiento estructural de los adoquines fue analizado utilizando la aplicación LS-DYNA. Dicho programa informático permite un modelado de los adoquines en 3-D, dejando incluso recrear la separación real que existe ente ellos cuando se colo-

can, de tal forma que se puede predecir de forma bastante aceptable como será su comportamiento.

Los áridos reciclados procedentes de los residuos de construcción y demoliciones no causan una reducción significativa en la resistencia a compresión ni en la resistencia a tracción de los adoquines, si los porcentajes de sustitución se mantienen bajos. La durabilidad es similar a la que presentaba un adoquín fabricado con áridos naturales.

Los análisis numéricos mostraron que los adoquines se compactan como si estuvieran entrelazados unos con otros cuando se distribuyen las cargas de tráfico. Este mecanismo puede aumentar significativamente la capacidad portante de la acera.

En la figura 8.9 se observa un adoquín fabricado con áridos reciclados, así como la simulación por ordenador mediante el programa LS-DYNA.

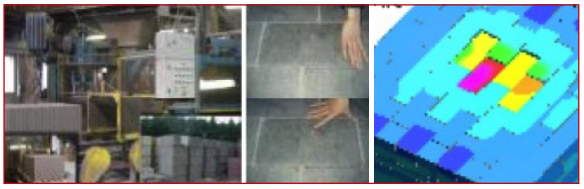


Figura 8.9. Adoquín fabricado con árido reciclado y simulación mediante el programa LS-DYNA.

La organización WRAP (Waste & Resources Action Programme), con sede en Inglaterra, ha desarrollado un trabajo de investigación centrado en el uso de los áridos reciclados (2005). Se realizaron ensayos en el laboratorio sobre vigas prefabricadas de hormigón armado hechas con árido reciclado utilizadas en la construcción de edificios. El objetivo era identificar si el uso de árido reciclado procedente de residuos de hormigón afectaba a la resistencia del hormigón a compresión según el criterio establecido en el Eurocódigo 2. Este proyecto también pretendía determinar si la resistencia de las vigas se podía predecir a través de la resistencia a compresión del hormigón tal y como viene definido en el Eurocódigo 2. Para llevar a cabo todos estos estudios fue necesario establecer un programa de ensayos. Se realizaron ensayos de resistencia a compresión a 28 días, ensayos de tracción, ensayos de fluencia y retracción, así como ensayos de flexión y cortante en las vigas.

Se realizaron cuatro amasadas diferentes. En una de ellas el porcentaje de sustitución era nulo y en las otras tres era del 30%. La resistencia a compresión estaba comprendida entre 35 y 45 N/mm^2.

Después de realizar el ensayo de flexión y cortante en las vigas, se llegó a la conclusión de que el comportamiento a compresión del hormigón con áridos reciclados es comparable al comportamiento del hormigón fabricado con áridos naturales.

Aunque el módulo de elasticidad de las probetas de hormigón fabricadas a partir de áridos reciclados resultó ser mucho menor que en aquellas en las que no se emplearon áridos reciclados, las grandes deformaciones no eran visibles en las pruebas, ya que las armaduras contribuyeron significativamente a la rigidez.

La diferencia observada en la rigidez determinada mediante ensayos en probetas cilíndricas y en la viga de hormigón sugiere que un fenómeno similar se puede producir en relación con el comportamiento a fluencia.

El comportamiento a flexión fue similar en las vigas que tenían áridos reciclados y en las que solo estaban fabricadas con árido natural. También se pudo observar durante los ensayos que la carga última era muy aproximada tanto en las vigas con áridos reciclados como en aquellas que estaban fabricadas con áridos naturales.

En la figura 8.10 puede observarse una viga prefabricada con áridos reciclados sometida a un ensayo de flexión.

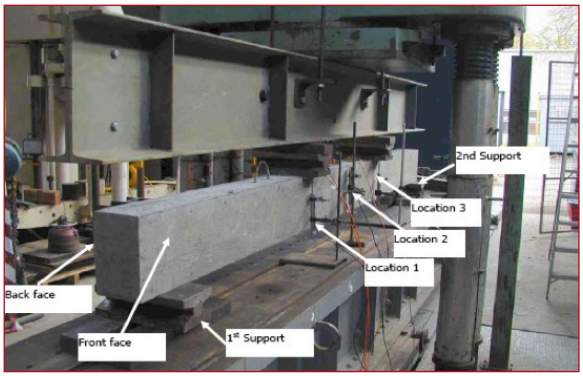


Figura 8.10. Viga prefabricada de hormigón con áridos reciclados, sometida a un ensayo de flexión.

La Asociación Holandesa del Hormigón desarrolló un proyecto de investigación denominado Delftse Zoom (1997) con la finalidad de impulsar el uso del hormigón reciclado y de los áridos procedentes de residuos cerámicos en la fabricación de hormigón.

La finalidad de este proyecto era la sustitución de la fracción gruesa de los áridos naturales por áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición con contenido de hormigón y residuos cerámicos. Se consideró que la fabricación de un hormigón reciclado de estas características sería muy útil y apropiado para lograr una construcción más ecológica y sostenible.

Según las especificaciones técnicas vigentes en Holanda, los áridos mixtos están formados por un mínimo de un 50% de áridos triturados procedentes de hormigón y una fracción restante compuesta por árido triturado cerámico. En Holanda este tipo de árido es utilizado con frecuencia en distintos pro-

yectos de ingeniería civil, especialmente en la construcción de carreteras y en los sectores de la ingeniería hidráulica; sin embargo, las normas vigentes de construcción establecen que la fracción gruesa de los áridos naturales puede ser sustituida por áridos reciclados hasta un máximo de un 20%. Con este proyecto se pretendía demostrar que el árido grueso natural se puede sustituir en un 100%, si se tienen en cuenta algunas consideraciones.

El proyecto de construcción de casas "Delftse Zoom" supuso la ejecución de 272 viviendas familiares y de planta baja, en donde las paredes de separación son elementos prefabricados de hormigón sometidos a cargas. Las paredes divisorias de 106 casas se colocaron dejando un espacio intermedio de 40 mm de anchura mientras que las dos paredes de hormigón prefabricado tienen un ancho de 90 mm. Para su construcción se ha empleado hormigón reciclado de 25 N/mm^2. En la primera fase del proyecto, el hormigón reciclado se utilizó en elementos relativamente sencillos de la construcción, tales como muros de carga sin armadura. En la siguiente fase del proyecto se dirige el empleo del hormigón reciclado hacia un grado de uso más elevado, utilizándose en la fabricación de elementos de fachada pretensados y forjados.

Durante el proceso de fabricación del hormigón los áridos mixtos se combinaron con otros cuya fracción granulométrica se encontraba entre 4 y 16 mm y se mezclaron en la amasadora hasta obtener el hormigón reciclado. A partir de este punto, el procedimiento de fabricación de los elementos prefabricados es el mismo que cuando se emplea hormigón elaborado a partir de áridos naturales. El acabado superficial de los elementos prefabricados era muy bueno y no se notaban diferencias significativas con respecto a otros elementos prefabricados realizados con hormigón a partir de áridos naturales. Sin embargo, en los cortes transversales practicados en algunos de ellos se podía observar la coloración característica del ladrillo. Por medio de un modelo matemático se demostró que el aislamiento acústico proporcionado por los elementos fabricados con hormigón reciclado cumple con lo establecido en el reglamento de la Construcción. Todas las viviendas construidas dentro del proyecto Delftse Zoom fueron vendidas con garantía.

Con la realización de este proyecto se han conseguido resolver muchas dudas acerca del uso de los áridos reciclados en la construcción de paredes prefabricadas de hormigón para utilizar en viviendas de baja altura. Algunas de las preguntas planteadas previamente, tales como si era seguro el uso de estos áridos reciclados, los efectos en la apariencia superficial y la capacidad de carga de las paredes prefabricadas, han quedado resueltas. No obstante, la investigación todavía sigue en curso.

Este estudio se ha centrado en dos aspectos importantes. El primero de ellos ha sido la definición de nuevos campos de aplicación de los áridos reciclados, no solo con un 20% de sustitución del árido natural, sino tratando de ver que ocurría cuando se llegaba al 100% de sustitución. El segundo aspecto tratado en esta investigación se corresponde a la adecuación del diseño, construcción y acabado con respecto a las indicaciones de la normativa correspondiente.

En la figura 8.11 se observa una vivienda construida con paredes prefabricadas de hormigón, a partir de áridos reciclados, con sustituciones del 100% del árido natural.



Figura 11. Vivienda construida con paredes prefabricadas de hormigón reciclado.

8.1.2 Situación legislativa y normativa en prefabricados de hormigón, en España y Europa

La directiva que proporciona el marco general para la utilización de áridos procedentes de residuos de construcción y demolición es la siguiente:

- D-AR: Directiva de utilización de áridos procedentes de residuos de construcción y demolición.

Las normas referentes al ámbito de los prefabricados son muy amplias ya que existen una gran cantidad de productos. La investigación complementaria llevada a cabo en la Universidad de Oviedo, dentro del Proyecto GEAR, eligió dos elementos prefabricados de gran utilización en el mundo de la construcción: el bordillo y la bovedilla. La relación de normas vigentes referentes a estos dos elementos prefabricados son las siguientes:

- EN 1340:2004 Bordillos prefabricados de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.
- EN 127340 Bordillos prefabricados de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo. Complemento a la Norma UNE-EN 1340.
- EN 15037-2 Productos prefabricados de hormigón. Sistemas de vigueta y bovedilla. Parte 2: Bovedillas de hormigón.

En ninguna de estas normas se hace mención al empleo de los áridos reciclados. En las tres normas mencionadas anteriormente se hace referencia a otras normas específicas que a continuación se relacionan:

- EN 932-1 Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo.
- EN 932-2 Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio.
- EN 933-1 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
- EN 933-2 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo. Tamaño nominal de las aberturas.
- EN 933-3 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
- EN 933-4 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4. Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma.
- EN 933-8 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
- EN 933-9 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo del azul de metileno.
- EN 933-11 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos – Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.
- EN 1097-2 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos – Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
- EN 1097-6 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua.
- EN 1744-1 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos – Parte 1: Análisis químico.
- EN 12620 Áridos para hormigón.
- EN 13369 Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón.
- NLT 115/99 Contenido de yeso en suelos.
- NLT 172/86 Áridos. Determinación de la limpieza superficial.

En Noviembre de 2002 se constituyó el Grupo de Trabajo “Hormigón Reciclado” a instancias de la Comisión Permanente del Hormigón y de ACHE para elaborar un documento que complementara a la reglamentación actual de hormigón estructural (Instrucción EHE). La nueva EHE incluye un anejo (Anejo 15) que recoge las recomendaciones específicas sobre la utilización del árido reciclado procedente de hormigón en hormigón estructural.

Además, la utilización de árido reciclado procedente de hormigón en hormigón no estructural está incluida en el anejo 18 de la EHE.

Por otro lado, no existe ningún impedimento legal que pueda representar una barrera a la hora de utilizar áridos reciclados en los prefabricados. Los fabricantes de prefabricados de hormigón pueden utilizar los áridos reciclados siempre que les llegue como materia prima lista para ser incorporada en el proceso y hayan sido fabricados por un gestor autorizado, tal como establece el Decreto 93/1999 modificado por el Decreto 219/2001.

Las normas europeas que regulan la fabricación y procedimientos de ensayos en bovedillas y bordillos prefabricados son:

- DIN 483 “Concrete kerb units - Shapes, dimensions, marking”.
- NFP-98302 “Bordures et Caniveaux Prefabriqués en Béton”.
- BS 340:1979 “Specification for precast concrete kerbs, channels, edgings and quadrants”.

Las normas y especificaciones europeas que regulan el uso de los áridos reciclados en la fabricación de hormigón son las siguientes:

- DIN 4226-1:2000: “Concrete aggregate” (Alemania)
- BSG “Use of industrial by-products and waste materials in building engineering”. British Standard Guide 6543.1985. (Reino Unido).
- “Recycled Aggregates: BRE Digest 433” 1998. (Reino Unido).

- BS 8500-2:2002: "Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2: Specification for Constituent Materials and Concrete" (Reino Unido).
- "Quality Control: The production of Recycled Aggregates. BR 392". ISBN 186081 381 X (Reino Unido).
- RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures): "Especificaciones para el hormigón con áridos reciclados". Materiales y estructuras, nº27. P.p. 557-559, 1994.
- WRAP "Mix Design Specification for Low Strength Concretes Containing Recycled and Secondary Aggregates". 2002 (Reino Unido).
- Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'ille de France: les bétons et produits de démolition reciclés -LCPC, Paris. Diciembre 1996. (Francia).
- Danish Concrete Association. "Recommendations for the use of recycled aggregates for concrete in passive environmental class". Publication Nº34, 1990. (Dinamarca).
- Danish Concrete Code. "Use of recycled demolition rubble". 1989. (Dinamarca).
- CUR report nr. 125 "Crushed Concrete Rubble and Masonry Rubble as Aggregate for Concrete" (Países Bajos).
- Austrian Quality Protection Association for Recycled Building Materials. "Guidelines for recycled building materials". 1992. (Austria).
- Guidelines for Recycled Construction Materials from Building Construction, Application Cement-bonded substances. (Austria).
- Guidelines for Recycled Construction Materials from Building Construction, Application Unbound Substances. (Austria).

En la mayoría de estas normas europeas, al igual que en el anejo 15 de la EHE-08, se limita el empleo de áridos reciclados en el hormigón estructural hasta un porcentaje máximo del 20% de sustitución.

8.1.3 Resumen de la metodología, los resultados y las conclusiones de la investigación complementaria realizada en el Proyecto GEAR para prefabricados de hormigón, producidos a partir de áridos reciclados

La Universidad de Oviedo ha desarrollado como investigación complementaria, dentro del Proyecto GEAR, un programa de ensayos sobre productos prefabricados centrado en bordillos y bovedillas de hormigón, donde el árido natural utilizado en la dosificación de hormigón se ha sustituido, en diferentes porcentajes, por árido reciclado. Los resultados obtenidos en el programa de ensayos llevado a cabo permiten ser optimistas respecto a la posibilidad de uso de estos tipos de áridos en la fabricación de dichos productos, ya que para sustituciones inferiores al 50% del árido natural, las características del producto final no se ven excesivamente alteradas. A continuación se detalla la caracterización de los materiales utilizados, se describe el proceso productivo, se desarrolla el programa experimental llevado a cabo y, por último, se analizan los resultados obtenidos.

Para la fabricación de los productos prefabricados referidos anteriormente se ha utilizado cemento portland CEM II/A-V 42,5 R de alta resistencia inicial (mínimo 20 MPa a 2 días). En la tabla 8.1 se resumen las principales características del mismo.

Prescripciones		CEM II/A-V 42.5 R
Físicas	Inicio del fraguado	210 minutos
	Final del fraguado	265 minutos
	Expansión	0,4 mm
Mecánicas	28 días	56 Mpa
Químicas	Tritóxido de azufre.	2,4 %
	Cloruros.	0,01 %

Tabla 8.1. Propiedades químicas del cemento CEM II/A-V 42,5 R.

Los áridos reciclados utilizados en este estudio proceden de dos plantas de reciclaje localizadas en Asturias y en la Comunidad Valenciana. El árido reciclado LB procedente de la planta de reciclaje de la Belonga, situada en Latores, localidad cercana a Oviedo, tiene un contenido mayoritario de hormigón, ya que se obtiene de los residuos generados por las plantas de hormigón preparado, participes de la sociedad y ubicadas en las proximidades de la planta de reciclaje. El árido reciclado TB procede de la planta de reciclaje de la empresa Tabisam ubicada en Torrevieja (Alicante). En su composición, a diferencia del anterior, puede advertirse un mayor porcentaje de residuos cerámicos procedentes de la industria del ladrillo. En la tabla 8.2 pueden observarse los resultados de los ensayos de composición de los dos áridos reciclados. Dichos áridos presentan otros tipos de residuos en su composición tales como materiales pétreos e incluso, en el caso del árido TB, restos de asfalto y pequeños trozos de madera o vidrio.

Planta	Composición del material				
	Asfalto (A)	Albañilería (B)	Hormigón (C)	Áridos (U)	Otros (X)
LB	0%	0%	71%	29%	0%
TB	1,33%	17,67%	9,33%	69%	2,67%

Tabla 8.2. Ensayo de composición según la norma EN 933-11.

Las propiedades de los áridos naturales LB y TB se resumen en la tabla 8.3. En la figura 8.12 se muestra las curvas granulométricas de esos áridos.

Propiedades	Unidad	Árido LB		Árido TB	
		0/4 mm	4/10 mm	0/4 mm	6/12 mm
Densidad tras secado en estufa	g/cm³	2,692	2,752	---	2,655
Absorción de água	%	0,16	0,45	---	0,75
Coeficiente Los Ángeles	%	28	28	---	21,5
Índice de Lajas	%	---	9,6	---	---
Contenido en finos	%	15,3	0,32	10,2	---
Equivalente de arena	%	69	---	78,25	---

Tabla 8.3. Propiedades de los áridos naturales LB y TB.

En la figura 8.12 se observa la curva granulométrica de los dos áridos reciclados LB y TB.

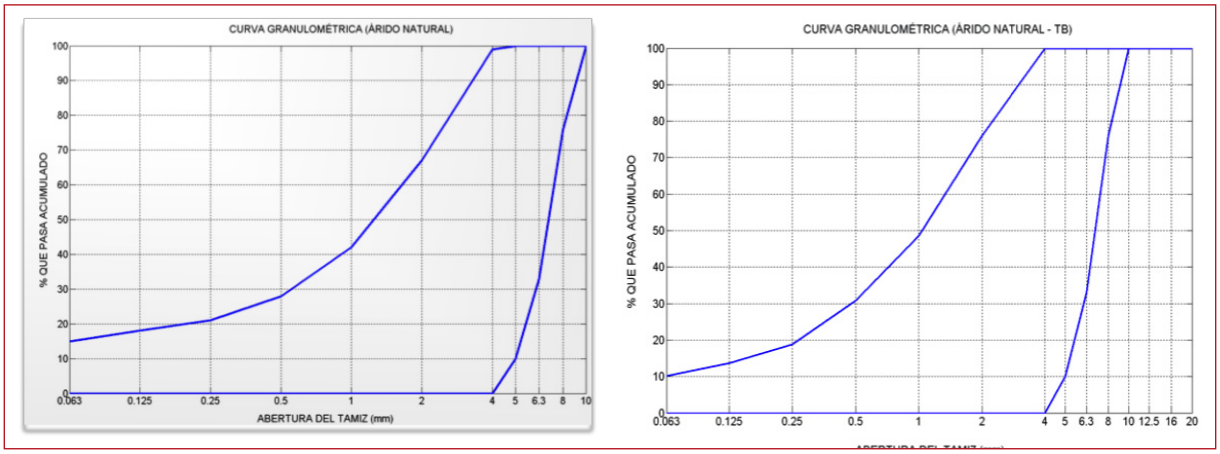


Figura 8.12. Curvas granulométricas del árido LB (izquierda) y la arena TB (derecha).

En la tabla 8.4 se muestran los resultados de los ensayos de caracterización de los dos áridos reciclados utilizados en este trabajo.

Propiedad		Unidad	Valor recomendado	Árido	
				LB	TB
Densidad tras secado en estufa		g/cm³	-	1,94	2,16
Absorción de agua	Árido grueso	%	-	5,90	4,15
	Árido fino	%	-	11,82	9,47
Coeficiente Los Ángeles		%	< 40	34	48
Índice de Lajas		%	< 35	6	15
Equivalente de arena		%	< 40	60	20

Propiedad	Unidad	Valor recomendado	Árido	
			LB	TB
Azul de metileno	-	Si EA < 40	-	6,2

Tabla 8.4. Caracterización del árido reciclado.

La experimentación se llevó a cabo utilizando cuatro porcentajes de sustitución de árido reciclado diferentes: 20%, 50%, 70% y 100%. Estas piezas también se fabricaron con hormigón de control (0% de sustitución). Los bordillos se fabricaron siguiendo la norma EN 1340, con una longitud de 500 mm para los bordillos fabricados con árido reciclado LB y de 1.000 mm para los bordillos hechos con árido reciclado TB. Las bovedillas se fabricaron según la norma EN 15037-2. Las características geométricas de ambos productos pueden observarse en la figura 8.13. En las tablas 8.5 a 8.8 se observan las dosificaciones utilizadas.

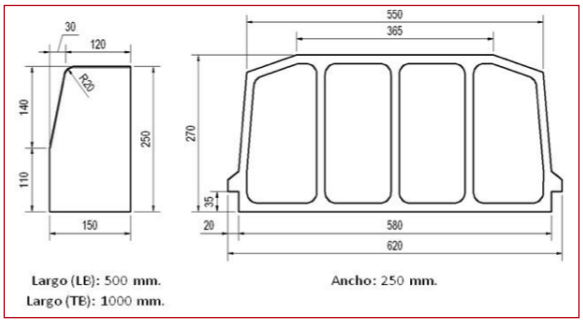


Figura 8.13. Características geométricas del bordillo y de la bovedilla.

% de sustitución	Cemento (kg)	Agua (l)	Árido natural calizo 0/4 mm (kg)	Árido natural silicio 0/2 mm (kg)	Árido reciclado 0/10 mm (kg)
0%	300	100	1370	550	0
20%	300	96	1095	440	284
50%	300	106	685	275	710
70%	300	104	411	165	980
100%	300	80	0	0	1420

Tabla 8.5. Dosificaciones para los bordillos fabricados con árido LB.

% de sustitución	Cemento (kg)	Agua (l)	Arena natural 0/4 mm (kg)	Grava natural 6/12 mm (kg)	Árido reciclado 0/12 mm kg
0%	360	100	1223	1373	0
20%	360	103	978	1097	499
50%	360	106	611	686	1248
70%	360	110	366	411	1747
100%	360	116	0	0	2497

Tabla 8.6. Dosificaciones para los bordillos fabricados con árido TB.

% de sustitución	Cemento (kg)	Agua (l)	Árido natural calizo cárcaba 0/4 mm (kg)	Árido natural calizo cárcaba 4/10 mm (kg)	Árido reciclado 0/10 mm (kg)
0%	190	110	1720	460	0
20%	190	115	1375	370	320
50%	190	115	860	230	800

% de sustitución	Cemento (kg)	Agua (l)	Árido natural calizo cárcaba 0/4 mm (kg)	Árido natural calizo cárcaba 4/10 mm (kg)	Árido reciclado 0/10 mm (kg)
70%	190	110	520	140	1115
100%	190	110	0	0	1595

Tabla 8.7. Dosificaciones para las bovedillas fabricadas con árido LB.

% de sustitución	Cemento (kg)	Agua (l)	Arena natural 0/4 mm (kg)	Grava natural 6/12 mm (kg)	Árido reciclado 0/12 mm (kg)
0%	140	50	910	590	0
20%	140	52	735	476	289
50%	140	53	472	306	722
70%	140	55	297	192	1011
100%	140	58	0	0	1500

Tabla 8.8. Dosificaciones para las bovedillas fabricadas con árido TB.

La fabricación del bordillo y de la bovedilla se llevó a cabo mediante un proceso totalmente automatizado que incluye un sistema de dosificación, amasado y transporte del hormigón fresco desde la amasadora hasta la moldeadora y un sistema de vibración enérgico dentro de la máquina. El hormigón se transporta desde la amasadora hasta la máquina moldeadora mediante una cubeta suspendida de un carril por su parte superior. Incorpora un sistema de apertura en su parte inferior para permitir el vertido del hormigón en una tolva situada en la parte superior de la máquina. En la figura 8.14 se muestra la cubeta de transporte del hormigón. El molde se apoya en un tablero donde va dispuesto un sistema de vibración que permite el reparto uniforme y homogéneo del hormigón en su interior. Una vez vertido y compactado, el hormigón en el molde, se extrae las piezas y se envían directamente a la zona de curado donde permanecen durante 28 días antes de pasar al parque de almacenamiento. En la figura 8.15 se observan los bordillos y las bovedillas inmediatamente después de su fabricación.

Se fabricaron dos series de piezas para cada elemento prefabricado, una con árido reciclado LB y otra con árido reciclado TB. En cada serie se realizaron 5 amasadas: una para el hormigón de control y el resto con los porcentajes de sustitución indicados (20%, 50%, 70% y 100%). Los ensayos de la bovedilla fabricada con árido LB se realizaron en 4 piezas por amasada y en tres piezas por amasada para las bovedillas hechas con árido TB. En dos de las bovedillas fabricadas con árido LB se realizó el ensayo de carga concentrada y en las otras dos el ensayo de flexión, siguiendo en ambos ensayos las prescripciones establecidas en la norma EN 15037-2. Con el árido TB se fabricaron tres bovedillas por amasada en las que se realizó el ensayo de resistencia a flexión siguiendo las indicaciones de la norma EN 15037-2.



Figura 8.14. Transporte del hormigón fresco a la tolva de la moldeadora.

Para el ensayo de resistencia a cargas concentradas, la bovedilla se coloca en la máquina de ensayos apoyada sobre sus dos alas. La carga P se aplica de forma gradual hasta la rotura de la pieza con un incremento de la carga igual a 10 ± 0,3 daN/s. La carga se aplicó por medio de una pieza rígida de madera de 50x50 mm situada paralelamente a los apoyos en la posición más extrema para la resistencia del bloque. Para el ensayo de resistencia a flexión, la bovedilla se apoya sobre sus alas y se somete a una carga gradual en el centro transmitida por medio de una pieza de madera sobre una franja de 20 mm de ancho y paralelamente a los apoyos,

tal y como se observa en la figura 8.16. En la tabla 8.9 se resumen los resultados de los ensayos de carga concentrada y de resistencia a flexión para las bovedillas fabricadas con árido reciclado LB y TB.



Figura 8.15. Bordillos y bovedillas saliendo del proceso de fabricación.



Figura 8.16. Ensayos de flexión sobre la bovedilla.

Por otra parte, se realizaron ensayos de absorción y flexión, en los bordillos fabricados con áridos reciclados LB y TB, siguiendo las pautas establecidas en la norma EN 1340. El ensayo de flexión sobre el bordillo se realiza aplicando la carga en su cara más ancha. Al tener un perfil variable fue necesario realizar un refrentado en todas las piezas, según se observa en la figura 8.17. La tensión se va incrementando progresivamente a una velocidad de 0,06 ± 0,02 MPa/s hasta la rotura de la pieza.



Figura 8.17. Refrentado en el bordillo.

El ensayo de absorción de agua en los bordillos se realizó a partir de los trozos resultantes del ensayo anterior, con una masa comprendida entre 2,5 kg. y 5 kg. En la tabla 8.10 se resumen los resultados de los ensayos de la absorción y de la resistencia a flexión para los bordillos fabricados con árido reciclado LB y TB.

Nº	Porcentaje de sustitución (%)	Bovedilla. Árido reciclado LB		Bovedilla. Árido reciclado TB	
		Carga concentrada	Flexión	Carga concentrada	Flexión
		Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)
1	0	3,75	5,42	----	4,0
2	0	4,91	----	----	4,3
3	0	---	----	----	4,1
4	20	4,74	4,34	----	3,8
5	20	2,39	4,76	----	4,1

Nº	Porcentaje de sustitución (%)	Bovedilla. Árido reciclado LB		Bovedilla. Árido reciclado TB	
		Carga concentrada	Flexión	Carga concentrada	Flexión
		Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)
6	20			----	4,2
7	50	2,15	3,23	----	3,6
8	50	1,76	3,28	----	3,8
9	50	----	----	----	3,3
10	70	3,03	3,66	----	3,6
11	70	2,23	4,17	----	3,1
12	70	----	----	----	3,4
13	100	4,52	5,31	----	2,8
14	100	----	4,87	----	2,4
15	100	----	----	----	2,9

Tabla 8.9. Resultados de los ensayos de la carga concentrada y de la resistencia a flexión para las bovedillas fabricadas con árido reciclado LB y TB.

Nº	Porcentaje de sustitución (%)	Bordillo. Áridos reciclados (LB)			Bordillo. Áridos reciclados (TB)		
		Carga (kN)	Resistencia flexión (MPa)	Absorción (%)	Carga (kN)	Resistencia flexión (MPa)	Absorción (%)
1	0	33,21	3,85	5,9	24,2	5,7	4,0
2	0	34,79	4,03	6,3	21,8	5,1	4,2
3	0	35,13	4,07	6,3	23,1	5,4	4,1
4	0	---	---	---	22,4	5,3	---
5	0	---	---	---	23,4	5,5	---
6	0	---	---	---	24,3	5,7	---
7	0	---	---	---	24,6	5,8	---
8	0	---	---	---	23,7	5,6	---
9	20	34,06	3,86	6,3	22,9	5,4	5,3
10	20	36,77	4,16	6,0	24,2	5,7	5,1
11	20	38,56	4,37	5,7	23,3	5,5	5,0
12	20	---	---	---	23,7	5,6	---
13	20	---	---	---	22,8	5,4	---
14	20	---	---	---	22,4	5,3	---
15	20	---	---	---	21,7	5,1	---
16	20	---	---	---	24,4	5,7	---
17	50	41,40	4,58	7,3	21,7	5,1	6,9
18	50	38,41	4,25	6,8	20,7	4,9	7,1
19	50	40,24	4,46	6,7	22,6	5,3	6,7
20	50	---	---	---	21,5	5,0	---

Nº	Porcentaje de sustitución (%)	Bordillo. Áridos reciclados (LB)			Bordillo. Áridos reciclados (TB)		
		Carga (kN)	Resistencia flexión (MPa)	Absorción (%)	Carga (kN)	Resistencia flexión (MPa)	Absorción (%)
21	50	---	---	---	22,9	5,4	---
22	50	---	---	---	20,6	4,9	---
23	50	---	---	---	22,2	5,2	---
24	50	---	---	---	21,8	5,1	---
25	70	39,08	4,24	8,5	19,2	4,5	8,5
26	70	34,24	3,72	8,3	18,7	4,4	8,3
27	70	43,76	4,75	7,5	20,1	4,7	7,9
28	70	---	---	---	17,5	4,1	---
29	70	---	---	---	19,8	4,6	---
30	70	---	---	---	17,4	4,1	---
31	70	---	---	---	20,5	4,8	---
32	70	---	---	---	19,4	4,5	---
33	100	27,03	3,10	11,3	16,7	3,9	9,6
34	100	28,83	3,30	10,5	14,3	3,3	10,1
35	100	35,26	4,04	9,5	15,1	3,5	10,0
36	100	---	---	---	16,2	3,8	---
37	100	---	---	---	14,6	3,4	---
38	100	---	---	---	16,4	3,8	---
39	100	---	---	---	15,7	3,7	---
40	100	---	---	---	16,9	3,9	---

Tabla 8.10. Resultados de los ensayos de la absorción y de la resistencia a flexión para los bordillos fabricados con árido reciclado LB y TB.

En la figura 8.18 se observa tanto el ensayo de resistencia a flexión llevado a cabo en el bordillo, como el ensayo de absorción de agua realizado en los bordillos.



Figura 8.18. Ensayo de resistencia a flexión (izquierda) y ensayo de absorción de agua (derecha) ambos realizados sobre el bordillo.

En la figura 8.19 se han representado los valores medios de la absorción obtenidos para cada uno de los diferentes porcentajes de sustitución. En ella se observa claramente el aumento de la absorción al ir incrementándose el porcentaje de sustitución.

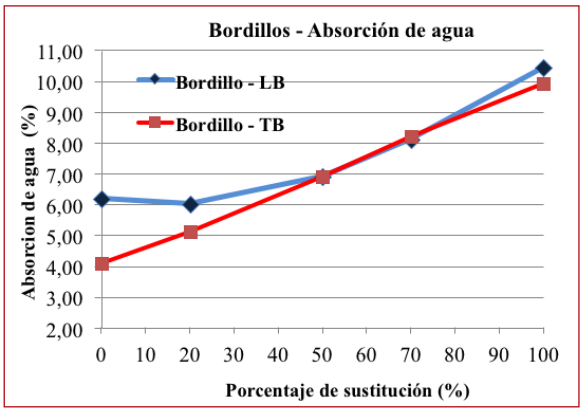


Figura 8.19. Valores medios de absorción en los bordillos según el porcentaje de sustitución.

En la figura 8.21 se representan los valores medios de los resultados del ensayo a flexión realizado sobre las bovedillas. En el gráfico se observa que la resistencia de las bovedillas fabricadas con árido LB presenta su valor más bajo cuando el árido natural es reemplazado en un 50% por árido reciclado. Por otro lado, el

valor de la resistencia a flexión de las bovedillas fabricadas con árido reciclado TB presenta un descenso continuo a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución del árido natural por árido reciclado.

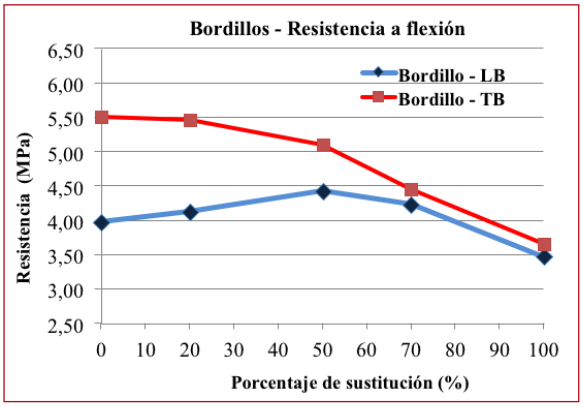


Figura 8.20. Valores medios de la resistencia a flexión en los bordillos según el porcentaje de sustitución.

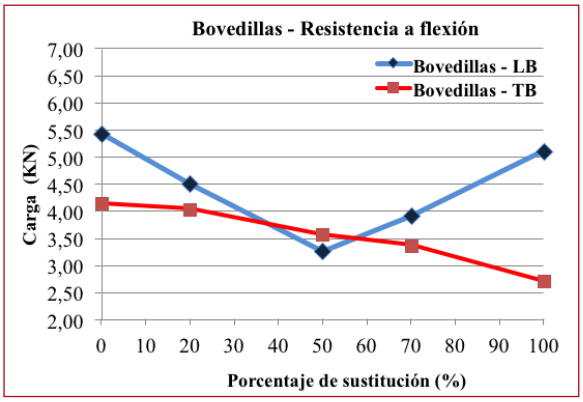


Figura 8.21. Valores medios de la resistencia a flexión en las bovedillas para cada diferente porcentaje de sustitución.

A partir del análisis llevado a cabo con los datos obtenidos en los ensayos realizados en las piezas prefabricadas de hormigón, bordillo y bovedilla, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Los bordillos presentan valores de absorción de agua similares cuando el porcentaje de sustitución sobrepasa el 35%, tanto para los áridos reciclados procedentes de hormigón como para los áridos reciclados con un contenido importante de residuos cerámicos. A medida que el porcentaje de sustitución de árido reciclado LB y TB aumenta, la absorción, como es lógico, se incrementa. Por cada 20% de incremento en la sustitución de árido reciclado la absorción aumenta en un 1% aproximadamente, alejándose del valor máximo establecido por la norma EN 1340. Si el porcentaje de sustitución se mantiene por debajo del 20%, el valor de la absorción del bordillo se mantiene dentro de los límites establecidos por la norma EN 1340.

Los valores mínimos de resistencia a flexión en el bordillo se obtienen cuando el árido natural es reemplazado por árido reciclado en un porcentaje superior al 50%.

La disminución de la resistencia a flexión que se produce en las bovedillas fabricadas con árido reciclado LB puede deberse a una falta de ajuste en el agua de amasado en la dosificación del hormigón.

Los bordillos y las bovedillas fabricadas con árido reciclado presentan valores muy aceptables en su resistencia a flexión.

Las bovedillas fabricadas con árido reciclado LB presentan unos valores aceptables frente a cargas concentradas.

El acabado de los bordillos y de las bovedillas fabricadas con árido reciclado no presenta variaciones significativas respecto a las piezas fabricadas con árido natural cuando el porcentaje de sustitución es inferior al 50%.

Por último, indicar que resulta imprescindible ajustar correctamente la cantidad de agua de amasado mediante ensayos previos para obtener un producto final sin deficiencia alguna.

8.1.4 Obras históricas y obras controladas, realizadas en prefabricados hechos con áridos reciclados en España

El bloque GDP® fabricado por Áridos Pérez es idóneo para la construcción modular de muros de contención. Los bloques son macizos ya que a la empresa siempre le ha interesado colocar la máxima cantidad de árido reciclado, y al ser un muro que trabaja por presión, interesa que sea pesado. La disposición de los bloques GDP® utilizados en la construcción de los muros de contención de tierras se realiza como la del muro tradicional hecho con piedras rectangulares. Se colocan las piezas formando hileras sucesivas encadenadas para conseguir el mejor enganche entre ellos. Las piezas tienen una cara preparada para quedar a la vista en el exterior y las perforaciones que sirven para su transporte se convierten en desagües para la evacuación de las aguas que filtren las tierras.

Una de las obras realizadas por Áridos Pérez consistió en la construcción del muro para sostener las tierras que se desprendían en la avenida Palaudalba s/n, en la localidad de Lliça de Vall, Barcelona. En la figura 8.22 se muestra el muro construido con bloques prefabricados a partir de áridos reciclados. La obra se ejecutó en el año 2007. En la figura 8.23 se muestra un esquema del montaje del muro con bloques prefabricados GDP®.



Figura 8.22. Muro construido con bloques prefabricados a partir de áridos reciclados.

En la empresa se está estudiando la posibilidad de emplear estas piezas en obras marítimas utilizando para ello el cemento apropiado. El coste del árido reciclado es una cuarta parte menor que el del árido natural, por lo que en este aspecto consigue una ventaja competitiva importante respecto a sus competidores. Esto es debido a que dispone de planta propia de reciclaje.

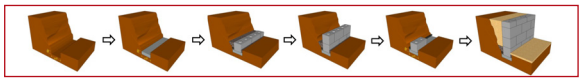


Figura 8.23. Esquema de ejecución del muro construido a partir de bloques prefabricados con árido reciclado.

El problema principal reside en la ausencia de una normativa clara. La empresa está tratando de homologar este sistema para poder ofrecerlo en obras públicas del Ministerio de Fomento, ADIF, Puertos del Estado, etc.

En la figura 8.24 se muestra el frontal de los vestuarios de un campo de futbol municipal de Badalona, construido por la empresa Tau Icesa, a partir de bloques GDP®.



Figura 8.24. Muro construido con bloques prefabricados a partir de áridos reciclados.

La empresa Gestora de Runes del Bages S.L. ha llevado a cabo una prueba con áridos reciclados para fabricar un banco de hormigón. La investigación se inició en el mes de febrero de 2009 y en la primera fase se llevó a cabo un estudio sobre como emplear los áridos reciclados en un elemento prefabricado. En junio de 2010 se fabricó el primer banco prefabricado por esta empresa. Actualmente, se está estudiando la viabilidad económica del negocio. En total, para la primera fase experimental se ha empleado un total de 5 t de árido reciclado 20/40 mm, obtenido a partir de un proceso de cribado en la propia planta de reciclaje de la fracción 0/40 mm. Para la fracción más fina se ha empleado árido natural.

La empresa Pastor, S.A. construyó un pavimento piloto de adoquín reciclado para observar su comportamiento. Pasados dos años se comprobó su buena resistencia y durabilidad. Los adoquines no presentaban fisuración pero sí algunos desconches, aunque mínimos, debido al tráfico rodado de maquinaria de la fábrica. En la figura 8.25 se observa un tramo del adoquinado piloto realizado en las inmediaciones de la planta de prefabricados. En la figura 8.26 se muestran tramos de acera realizados con adoquines reciclados en distintos puntos de la ciudad.



Figura 8.25. Tramo de pavimento piloto realizado con adoquines fabricados a partir de áridos reciclados.

Debido a los buenos resultados obtenidos en el pavimento piloto, se decidió realizar una segunda prueba, aunque en esta ocasión en una obra real, de tal forma que el adoquinado se puede exponer a situaciones de servicio público y de esta forma analizar su comportamiento en un escenario real. Las recientes reformas correspondientes al entorno peatonal de la iglesia de Alcudia (Mallorca) han permitido la construcción de una franja peatonal de 300 m^2. Esta intervención se ha ejecutado con adoquines reciclados fabricados en doble capa. La capa gruesa de 8 cm ha sido dosificada con un 100% de áridos reciclados. La capa fina, con una huella de 2 mm, se fabricó con mortero natural de cemento blanco con árido fino calcáreo y de sílice. Ante el comportamiento del adoquinado piloto se decidió

fabricarla con aportación de sílice para mejorar las características a desgaste de la superficie del pavimento.

En la figura 8.27 se muestra un muro construido a partir de bloques prefabricados hechos con áridos reciclados.



Figura 8.26. Tramo de pavimento realizado con adoquines fabricados a partir de áridos reciclados.



Figura 8.27. Muro construido a partir de bloques prefabricados con áridos reciclados.

8.2 Hormigón compactado con rodillo

Este capítulo fue desarrollado por los técnicos de UPV (Universidad Politécnica de Valencia), que forman parte del equipo investigador del Proyecto GEAR.

8.2.1 Introducción

El hormigón compactado con rodillo HCR es una mezcla en forma de hormigón seco, colocado en obra de forma análoga a una gravacemento y compactado como un suelo, con los mismos componentes que un hormigón normal pero con un contenido en cemento o conglomerante menor (Tremblay, 1997) y cono cero (Burns CD, 1978). El HCR, además de presentar un bajo coste de producción y una rápida colocación, desarrolla alta resistencia, lo cual le hace muy competitivo. Un HCR bien diseñado puede llegar a alcanzar una alta resistencia a compresión (± 60 MPa a 7 días) y buena durabilidad (Delhez P, 2004). Por otra parte, este tipo de hormigón es menos sensible al agrietamiento debido a la retracción por secado.

La utilización de áridos reciclados para la fabricación de hormigón reciclado compactado con rodillo (HRCR) es una forma eficiente y sostenible de dar salida al mercado a este producto en cantidades importantes (figura 8.31).

El hormigón compactado con rodillo (HCR) ha sido aplicado a gran escala fundamentalmente en la construcción de presas, pero también ha sido utilizado para la construcción de caminos rurales y carreteras. Y es, en este último campo, hacia donde se enfoca el uso del HRCR, orientado en dos ver-

tientes: como capa de rodadura de hormigón en caminos y viales, y como capa de base de alta calidad en carreteras. Actualmente, la aplicación de HCR como capa única en carreteras se ha desestimado frecuentemente por la necesidad de garantizar un índice de regularidad en la capa de rodadura.

Dado que los áridos constituyen aproximadamente el 80% del volumen de cualquier hormigón y que la aplicación en pavimentos puede dar salida a volúmenes importantes de hormigón, se deduce la importancia de pensar en el uso de áridos reciclados en una aplicación de este tipo.

El HCR, debido a su mayor densificación y menor relación agua/cemento, ofrece altas resistencias, y su tecnología apenas exige equipamiento especializado, pudiendo ser aplicado con una instalación de hormigón preparado y los sistemas de extensión y compactación tradicionales para capas granulares. Por ello puede ser una alternativa económica para la construcción de pavimentos rígidos con espesores reducidos. La flexibilidad de su uso le permite ser implementado en la mayoría de localizaciones y puede representar una salida rápida y eficaz para los áridos reciclados independientemente de su nivel de producción.

Los niveles de exigencia de calidad al hormigón reciclado compactado con rodillo HRCR estarán en función del tipo de aplicación. Estas exigencias deberán coincidir con las que se aplican a los pavimentos o capas de base de hormigón tradicional, según tráfico y aplicación concreta. El acabado superficial puede mejorarse colocando una pequeña capa de mezcla bituminosa que proporcione la regularidad deseada según el tipo de tráfico y la velocidad. En las siguientes páginas se muestra la experiencia adquirida en el estudio de HRCR hasta su puesta en obra en el camino de acceso al puerto de Vinaroz, como tramo experimental dentro del desarrollo del Proyecto GEAR.



Figura 8.28. Ejecución de HRCR.

8.2.2 Situación actual

El hormigón compactado con rodillo empieza a ser usado regulARMente en los años 70, aunque sobre los años 40 empieza a ser ampliamente utilizado en Reino Unido como subbase para firmes de carreteras y pistas de aeropuertos, bajo el nombre de *lean concrete* hormigón pobre o *dry lean concrete* hormigón seco pobre (Hansen K., 1985), aunque en realidad hace referencia al mismo concepto.

Su uso más extendido se realiza en presas, aunque también es usado para pavimentos y trabajos de reparaciones rápidas. Una aplicación exitosa de este tipo de hormigón se presentó en 1974 para la reparación de los daños producidos por el colapso de un túnel en la presa de Tarbela, en Pakistán, demostrado que era posible colocar 18.000 m^3 de un material resistente y durable en un día (Hansen K. D., 1991). En Estados Unidos, sobre 1997, se tenían 150 proyectos donde se utilizaba HCR, dentro de los cuales 46 eran presas mientas que en Japón fueron ejecutadas 40 presas a partir de 1980.

Por otro lado, la pavimentación de superficies destinadas al acopio para la industria de la madera o el automóvil, en Canadá y el Reino Unido, hacia 1976, fue realizada con HCR por su elevada capacidad de soporte y probabilidad de larga vida de servicio.

Debido a su gran auge, casi paralelamente se han desarrollado investigaciones al respecto. Hacia finales de los 70 en Reino Unido se llevaron a cabo ensayos sobre hormigón pobre con alto contenido de cenizas volantes y bajo contenido de cemento, llegando a establecer que las proporciones relativas de ambos deben fijarse mediante un estudio de laboratorio, y se recomienda que la mezcla se suministre ya efectuada (Dunstan, 1977). Hacia finales de los 90 la investigación sobre el uso del HRCR se desarrolla ampliamente en los Países Bajos, como subbase de un pavimento de hormigón convencional, como capa inferior de un pavimento compuesto de dos capas de hormigón adheridas, como base para capas asfálticas superficiales, como base para un pavimento de bloques de hormigón o para pavimentos de banquinas.

Muchas investigaciones se llevan a cabo para evaluar las propiedades mecánicas y la durabilidad de hormigones fabricados con áridos reciclados y la mayoría coincide en que el uso de áridos reciclados puede generar una disminución en la resistencia y la durabilidad (Tabsh SW, 2009) frente al hormigón con áridos naturales. Esta reducción depende de factores como la calidad del árido reciclado utilizado, el hormigón de origen, su cantidad en la mezcla y su estado de humedad (Pelufo M.J., 2009). Sin embargo, las investigaciones apuntan a que el árido reci-

clado es un producto válido para la aplicación como Hormigón compactado con rodillo HRCR (Serna P., 2009; Courard Luc, 2010) . La caracterización química de los áridos reciclados potencialmente peligrosos que contienen iones cloruro o sulfato es de vital importancia para evitar daños; en investigaciones sobre degradación química por contaminación con cloruros o sulfatos de los áridos reciclados, no se observa ninguna degradación frente a la acción de los cloruros sobre las propiedades del HRCR debido a que no requiere acero de refuerzo al que puede afectar. Sin embargo, en presencia de sulfatos puede producirse algún hinchamiento causado por la formación de etringita lo que puede afectar su durabilidad (Debieb Farid, 2009).

Actualmente, el uso de hormigones compactados con rodillo HCR en España se centra en carreteras de un bajo nivel de tráfico y que no requiere una regularidad superficial de alta calidad, debido a la dificultad de garantizar una rasante totalmente homogénea. Hoy en día se desarrollan algunas técnicas que permiten una compactación del 98% de la densidad máxima, por medio de la extendedora, con lo cual desaparece el problema de la rugosidad superficial y se conservan las propiedades de resistencia. A esta técnica se le denomina hormigones compactados con pavimentadora *(Paver compacted concrete).*

En la Unión Europea, muchos países realizan pavimentos de hormigón con árido reciclados; en Bélgica es habitual el uso de la técnica de fresco sobre fresco, donde el espesor de la capa es dividido en dos partes de diferente espesor, trabajando como capas pegadas o solidarias. La primera es ejecutada con áridos reciclados y garantiza la resistencia a compresión del pavimento, mientras que la capa superficial, que es de un espesor menor, se realiza con áridos de muy buena calidad con alta resistencia al desgaste y la abrasión, según la aplicación.

8.2.3 Legislación y normativa

Los hormigones compactados con rodillo HCR se utilizan en España hace más de treinta años tanto en presas como en caminos agrícolas y otro tipo de vías de baja intensidad. Sus costes de construcción son competitivos respecto a otras alternativas desde el punto de vista estructural y no exige un equipo muy especializado para su ejecución. Sin embargo la Norma 6.1-IC “Secciones de firme” de la Instrucción de Carreteras, al igual que el PG3, no incluye especificaciones y usos para el hormigón HCR, porque su aplicación se queda en vías de muy baja capacidad, al no cumplir los valores del IRI, Índice de Regularidad Superficial.

La Norma 6.1-IC hace referencia a hormigones empleados en los pavimentos de hormigón, estableciendo una nomenclatura que para Hormigón de Firme corresponde a (HF), y para Hormigón Magro Vibrado a (HM) en cualquier caso, debe ir seguida del valor de la resistencia característica a flexotracción a los 28 días expresada en MPa. Estos hormigones deberán cumplir las especificaciones fijadas en el artículo 550 Pavimentos de Hormigón y artículo 551 Hormigón Magro Vibrado del PG3.

El pliego de Prescripciones Técnicas PG3 de 1986 se refería a hormigones compactados. En éste los áridos debían cumplir las condiciones del artículo 513 grava cemento (actualmente 513 Materiales tratados con cemento -suelocemento y gravacemento-) y la determinación del CBR, se hacía según la norma NLT 111/78.

En el artículo 550 del PG3 (pavimentos de hormigón), cuando se hace referencia a los áridos utilizados, se dice que cumplirán todas las especificaciones recogidas en la norma UNE-EN 12620:2003 y a su vez en la instrucción, «Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)» o normativa que la sustituya, cuya definición será la que figura en el artículo 28 de la vigente EHE-08. Ésta contempla el uso de áridos reciclados según las especificaciones establecidas en su Anejo 15, permitiendo un 20% de sustitución de árido natural por árido reciclado para uso estructural.

La instrucción para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía 2007 tiene por objetivo establecer los criterios y procedimientos para el dimensionamiento de firmes de carreteras y viales de titularidad autonómica y provincial. Este documento permite que el proyectista adapte el diseño del firme a las características de los materiales y suelos de la zona, a las condiciones climáticas, ambientales y de tráfico, además de los aspectos funcionales y de seguridad de la circulación vial. En el apartado 7, mejora del firme mediante reciclado in situ, establece recomendaciones para la mejora de la capacidad estructural de un firme cuando se encuentra próximo a su fatiga y hace referencia al reciclado de las capas del firme mediante un reciclado in situ en frío mediante la adición de una emulsión o una mezcla de emulsión y un ligante hidráulico o cemento a los materiales previamente fresados. Pero en general hace referencia al diseño de los firmes siguiendo las especificaciones del PG3.

Actualmente, existe normativa que contempla y regula el uso de áridos reciclados, tanto para hormigón como para carreteras, definidos estos como áridos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción. A continuación se citan algunas normas:

La normativa europea contempla el uso de árido reciclado y lo enmarca en la UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón. Esta

norma especifica las propiedades de los áridos y filleres obtenidos por tratamiento de materiales naturales, artificiales y reciclados, y la mezcla de estos áridos, para la elaboración de hormigón.

La UNE-EN 13242:2002. Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes, especifica las propiedades de los áridos obtenidos por tratamiento de materiales naturales, artificiales y reciclados, para materiales tratados con conglomerantes hidráulicos y no tratados empleados en obras de ingeniería civil y construcción de carreteras.

La UNE-EN 13043:2003. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas, en la modificación hecha en 2004 establece que los áridos reciclados RCD deben cumplir los requisitos establecidos por la norma para áridos naturales y realizar sobre ellos los ensayos que correspondan cumpliendo las especificaciones establecidas.

En Europa existe amplia normativa sobre el uso de materiales de construcción reciclados en la construcción de carreteras. En Alemania, la RuA-StB 2001, en su parte 3ª, establece las directrices para la utilización compatible con el medio ambiente de subproductos industriales y materiales de construcción reciclados RC en la construcción de carreteras y caminos. Aquí se determina que la utilización de estos materiales no debe provocar contaminación ni cambio, las propiedades de las aguas de superficie y de subsuelo.

En Alemania son procesados como áridos reciclados balasto ferroviario, escolleras y pavimentos de piedra natural, hormigón de cubiertas de calzadas, residuos de demolición (materiales de construcción reciclados). El material a utilizar dependerá de la capa en que sea dispuesto, según lo cual requerirá un tratamiento con un ligante o aglomerante y una evaluación de la permeabilidad de las capas superiores. Debe probarse la idoneidad técnica del material de construcción para la utilización prevista, además la diferencia entre el nivel freático máximo y la parte superior de la explanada/base de la superestructura no debe ser inferior a 1 m.

Las Prescripciones técnicas alemanas TL Gestein-StB 2004, de suministro para los áridos utilizados en la construcción de carreteras, establece que los áridos reciclados deben cumplir las siguientes especificaciones:

- Coeficiente Los Ángeles (10-14 mm) ≤ LA 40
- Coeficiente de impacto (8/12,5 mm) ≤32 SZ32
- Áridos de asfalto (en la fracción > 4 mm) ≤ 30
- Clinker, ladrillos y cerámicas (en la fracción > 4mm) ≤ 30
- Areniscas, calizas, yesos y sustancias similares (en la fracción > 4 mm) ≤ 5
- Materiales minerales de construcción ligeros y materiales aislantes, tales como hormigón aireado y de espuma de escorias (en la fracción > 4 mm) ≤ 1
- Sustancias extrañas, tales como madera, caucho, plástico y textiles en la mezcla (en la fracción > 4 mm) ≤ 0,2.

Además, esta normativa también establece en la tabla C3 la frecuencia mínima para realizar ensayos sobre las propiedades de los áridos para mezclas granulares y tratadas con conglomerantes hidráulicos.

Por su parte, Holanda con la norma BRL 2506 Directiva nacional de evaluación sobre Áridos de RCD para la utilización en construcción de carreteras, establece según la clasificación del árido reciclado, campos de aplicación como capas de pavimento, capas de carretera, arena para explanadas, para elevaciones y rellenos y para capas de base ligada.

Esta norma holandesa presenta en sus apartados algunos requisitos para los áridos reciclados cuando son usados como material ligado con áridos de RCD. Los áridos reciclados pueden ser áridos de mezcla, de mampostería o reciclados de asfalto, también áridos 0/4 mm o arena cribada de machaqueo. En su anexo E establece los controles analizando propiedades como granulometría, composición, contaminantes, aptitud, sólidos volátiles, % de finos, CBR, partes redondeadas, planas, coeficiente de fragmentación, resistencia a compresión mínima 20 MPa.

La norma Suiza “SN 670 062 Reciclaje; consideraciones generales” define la terminología y establece requisitos técnicos de construcción para la reutilización de los materiales reciclados y de las capas construidas con ellos. La tabla 1 de la mencionada norma presenta una síntesis de las normas específicas, así como la composición de los materiales reciclados y su ámbito de aplicación.

La normativa Suiza “SN 670 142 Reciclaje; materiales no bituminosos de demolición” indica su composición y describe sus posibilidades de utilización específica. Las posibilidades de utilización tienen en cuenta las limitaciones debidas tanto a la técnica de construcción como a cuestiones relevantes para el medio ambiente y puede ser como capas estabilizadas con aglomerante hidráulico o como capas de subbase, según la composición. En la norma SN 670 143 y SN 670 144 se presentan los ensayos a efectuar para la certificación de la idoneidad de los áridos de hormigón en función de la utilización prevista, según si es hormigón de demolición o materiales mezclados de demolición respectivamente.

La normativa vigente que puede utilizarse en la ejecución de un hormigón compactado con rodillo (Josa García Tornel, 2003):

- UNE 41240:2003 Materiales tratados con conglomerantes hidráulicos. Métodos de ensayo. Determinación del plazo de trabajabilidad.
- UNE 80307:2001 Cementos para usos especiales
- UNE-EN 12390-3:2003 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- 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 103204:1993 Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico.
- UNE 103501:1994 Geotecnia. Ensayo de compactación. Próctor Modificado.
- UNE-EN 933-1:1998 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado.
- UNE-EN 933-5:1999. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.
- UNE-EN 1097-2:1999. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
- UNE-EN 13242:2003. Áridos para materiales tratados con ligantes hidráulicos y materiales no tratados utilizados para los trabajos de ingeniería civil y construcción de carreteras.
- UNE 146130 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas.
- UNE-EN 13242:2003 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.
- NLT-103. Humedad de un suelo por el procedimiento del alcohol.
- NLT-109. Densidad in-situ por el método de la arena.
- NLT-310. Compactación con martillo vibrante de materiales granulares tratados.
- NLT-326 Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras (Método del tanque).
- NLT-330. Cálculo del índice de regularidad internacional. IRI, en pavimentos de carreteras.

Se puede decir que actualmente en España no se ha implementado el uso de áridos reciclados para la ejecución de hormigón compactado con rodillo HCR. Este tipo de hormigones ha sido ampliamente usado en vías de baja intensidad de tráfico o en vías rurales en todo el territorio español además de obras de envergadura como presas.

Dentro de la normativa sobre RCD se estable en España el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. Como un paso para evitar la contaminación de suelos y acuíferos en vertederos incontrolados, el deterioro paisajístico y la eliminación de estos residuos sin aprovechar antes sus recursos valorizables. Según el Gobierno, el problema ambiental no consiste solo en la cantidad de residuos de construcción y demolición que se generan, sino en el volumen que se desecha y no se recicla, el 90 por ciento. Las previsiones del Plan Nacional de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición, aprobado en 2001, se han visto superadas por la fuerte actividad de la construcción registrada en España.

El ámbito del Real Decreto abarca la construcción, rehabilitación, reparación, reforma o demolición y prohíbe el depósito de los residuos sin tratamiento previo. A partir de ahora, el productor titular de la licencia de obra estará obligado a elaborar un estudio de gestión de estos residuos, que deberá incluir, entre otras cosas, una estimación de las cantidades que se van a generar y el destino que tendrán.

También se fijan obligaciones al contratista que ejecuta la obra. Así, éste deberá establecer la clasificación de los residuos, elaborar un plan de ejecución y asumir los costes. Esta obligación de separar los residuos en la obra, a partir de ciertos volúmenes de generación, repercutirá en la obtención de beneficios por la venta directa de los materiales separados.

Con este Real Decreto se afianzará la posición empresarial de aquellos materiales para los que ya existe un mercado (metales y maderas principalmente) y, adicionalmente, servirá para incentivar la creación de otros mercados (áridos reciclados). En aquellas obras en las que las Administraciones Públicas intervengan como promotoras se establece que éstas deberán fomentar las medidas para la prevención de residuos de construcción y demolición, así como la utilización de áridos y otros productos procedentes de su valorización.

- LEY 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.
- ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.
- Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006.
- Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015. II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCD).

8.2.4 HRCR en el Proyecto GEAR

La Guía Española de Áridos Reciclados GEAR abre el camino para validar el uso de los áridos reciclados en hormigón compactado con rodillo HRCR. Teniendo en cuenta que el mercado de los

áridos reciclados existente en España presenta una amplia gama de productos, se analizan diferentes calidades de árido reciclado para su uso en HRCR. La técnica es validada por medio del desarrollo de investigaciones de laboratorio y proyectos a escala real mediante la aplicación de un tramo experimental con 100% de árido reciclado. La comprobación y difusión de los resultados permite mejorar la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición contribuyendo con el ciclo cerrado de la construcción.

En el desarrollo del Proyecto GEAR, se propone la utilización de áridos reciclados de RCD para la fabricación de hormigón reciclado compactado con rodillo (HRCR). El objetivo del estudio es la aplicación de áridos reciclados de distintas calidades para su uso, ya sea como capa de rodadura en vías de baja intensidad de tráfico o como capa de base de alta calidad en carreteras. Se involucra aquí una primera etapa el desarrollo experimental en laboratorio y posteriormente una aplicación sobre un tramo real de hormigón compactado con rodillo para el acceso al nuevo varadero del puerto de Vinaroz.

Se evalúan las propiedades de hormigones HRCR con dos tipos de áridos reciclados, ARH y ARMh. El propósito es fabricar hormigón HRCR con un 100% de sustitución de árido grueso natural por árido grueso reciclado.

Se ha encontrado que el uso de los áridos reciclados en HRCR es posible. La experiencia muestra que el procedimiento propuesto puede llevar a resultados interesantes a precios competitivos.

8.2.4.1 Metodología

Partiendo del conocimiento previamente adquirido por la UPV con el uso de áridos reciclados en hormigón, se plantea dentro del Proyecto GEAR desarrollar un estudio que consta de dos fases (tabla 8.11). La primera constituye un estudio a nivel de laboratorio, mientras que en la segunda fase se ejecuta un tramo experimental de HRCR con el propósito de realizar un seguimiento y evaluar en obra los resultados obtenidos previamente en el laboratorio.

Fase de Laboratorio	Aplicación Práctica
Análisis de la calidad del árido reciclado, Utilización de áridos de distinto tipo. Una caracterización de áridos reciclados fue llevada a cabo.	Elección del tipo de árido reciclado, se realizan ensayos característicos y se comprueba el cumplimiento de las exigencias establecidas para este uso.
Evaluación de los criterios de dosificación, estimando las cantidades y tipo de áridos reciclados que pueden ser utilizados para esta aplicación HRCR.	Evaluación del porcentaje de árido reciclado sustituido, el objetivo es utilizar la mayor cantidad de árido reciclado posible, sin afectar negativamente las propiedades mecánicas y la vida útil del HRCR puesto en obra.
Control de la humedad de los áridos y del estado en el que son introducidos en la mezcla. Se contabiliza el agua total en el HRCR para evaluar la influencia de áridos con distinto nivel de humedad.	Establecimiento del tipo de aditivo a emplear, de manera que permita una trabajabilidad adecuada en obra.
Condiciones de ejecución, incluyendo el tiempo y energía de compactación además de los tiempos de puesta en obra.	Proceso de ejecución, establecimiento del espesor adecuado de las capas y las condiciones ambientales en que debe llevarse a acabo la ejecución del tramo.
El interés del uso de aditivos, para controlar los tiempos de fraguado será evidente en futuras fases.	Control y seguimiento, mediante la toma de testigos del HRCR y la inspección periódica de deformaciones, grietas y demás defectos que puedan presentarse en el tramo.

Tabla 8.11. Metodología para el desarrollo de la aplicación de HRCR dentro del Proyecto GEAR.

8.2.4.2 Resultados y Conclusiones

Las investigaciones llevadas a cabo se han realizado con árido reciclado procedente de plantas de gestión de residuos de construcción y demolición españolas, con el propósito de utilizar un material de producción comercial disponible para esta aplicación. Se presentan a continuación los resultados de los ensayos realizados sobre los áridos reciclados, además de los criterios en el ajuste de la dosificación y los ensayos realizados sobre el hormigón, como HRCR.

Sobre los áridos reciclados se ha realizado una caracterización geométrica, física y mecánica (tabla 8.12, figura 8.29). Además, sobre la fracción gruesa de los áridos reciclados se ha realizado una clasificación de los componentes (tabla 8.13), lo cual permite identificarlos como árido reciclado de hormigón ARH, árido reciclado mixto ARM, árido reciclado mixto con mayor cantidad de hormigón ARMh, etc.

Propiedad	Tipo de árido reciclado de RCD									
	T		A		D		J		M	
Fracción (mm)	0,063/4	4/31,5	0,063/4	4/31,5	0,063/4	4/31,5	0,063/4	4/31,5	ARC 5/20	ARH 5/20
Densidad (g/cm³) UNE EN 1097-6	2,4	2,37	2,305	2,35	2,29	2,37	2,48	2,22	2,15	2,38
Absorción (%) UNE EN 1097-6	4,31	4,25	7,82	6,46	5,81	4,66	5,054	5,19	7,54	3,82
Índice de lajas UNE EN 933-3	11,33		15,23		11,21		6,07		10,5	6,03
Coeficiente Los Ángeles (%) UNE EN 1097-2	30,65		34,51		31,01		43,01		31,7	30,8

Tabla 8.12. Propiedades de los áridos reciclados.

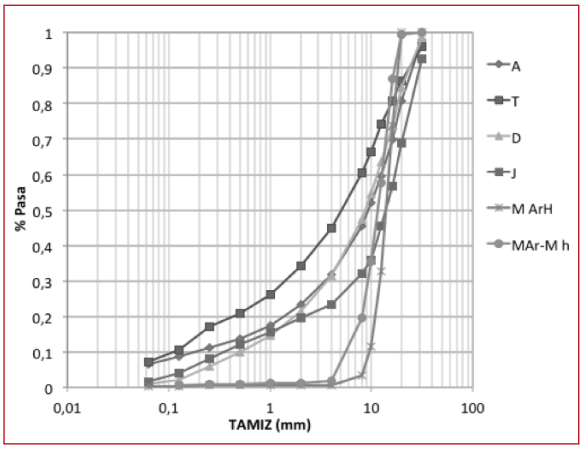


Figura 8.29. Curva granulométrica de los áridos reciclados utilizados (UNE EN 933-2).

Analizando las características del árido reciclado fino y grueso, se decide para esta aplicación utilizar solamente la fracción gruesa del árido reciclado debido a la variabilidad y diferencia de los resultados respecto a la normativa vigente para hormigón, lo que podría generar una alta variabilidad sobre las propiedades del HRCR.

Por lo tanto, como criterio de dosificación en esta investigación, se establece que para todos los hormigones el árido fino es arena 0/4 mm natural de machaqueo, las exigencias a las arenas empleadas y, en su caso a los áridos gruesos naturales, fueron las planteadas en la Instrucción EHE 08. El hormigón de control HCR, se realiza en su totalidad con árido natural machacado. Para el HRCR, la fracción gruesa (≥4mm) está compuesta por un 100% de árido reciclado. El cemento a emplear, como para cualquier pavimento, interesa que sea un cemento con alto contenido en componentes distintos del clinker, y de baja clase resistente, aún a costa de aumentar cantidad de cemento (mejor IV, II…).

Tipo de árido grueso reciclado de RCD (>4mm)	Clasificación de los constituyentes del árido grueso reciclado según UNE-EN 933-11:2004				
	Material bituminoso	Material cerámico	Mortero y productos de hormigón	Áridos limpios	Otros
	Ra	Rb	Rc	Ru	Rg, FL, X
T (ARMH)	2,4	17,3	39,1	40,3	0,9
A (ARMH)	4,5	15,9	47,5	30,6	1,5
D (ARa)	8,8	9,8	33,9	46,8	0,7
J (ARMh)	1,9	18,2	41,9	36,1	1,9
M (ARMh)	0,02	23,9	32,7	41,3	2,1
M (ARH)	-	8,16	65,52	24,50	-

Tabla 8.13. Clasificación de los componentes de los áridos reciclados.

El ajuste de la dosificación de sólidos (incluido cemento) se hace inicialmente con los límites de referencia recomendados por el PG 86 (artículo 516), que incluía un capítulo específico para pavimento de HCR. Estos husos son equivalentes a los propuestos para grava–cemento en el PG3. La tabla 8.14 muestra el huso propuesto que coincide con el recomendado por el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) en su "Manual de Pavimentos de Hormigón, Vías de Baja Intensidad de Tráfico" (figura 8.30).

Tamiz	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
Pasa	100	85-100	68-86	54-74	38-57	28-43	17-29	8-18

Tabla 8.14. Husos granulométricos propuestos para el conjunto árido - cemento en HCR.

El ajuste de la dosificación se realiza valorando las distintas densidades de los materiales. Este hecho es importante si se tiene en cuenta la sensiblemente menor densidad de los áridos reciclados frente a los naturales. Como resultado de los ajustes se ha obtenido las curvas granulométricas que se muestran en la figura 8.31, figura 8.32 y figura 8.33, donde en el caso de usar áridos reciclados se muestra un correcto ajuste en volumen y un ajuste en peso que es menos acertado, según la experiencia adquirida.

Con la composición de áridos prevista y para una dosificación media en cemento, se determina la densidad Próctor Modificado, y la humedad óptima (figura 8.34). Trabajando con la humedad óptima se fabrican hormigones con distintas dosificaciones en cemento (12%, 13%, 14% y 15%). Con ellos se fabrican probetas compactándolas al 97-98% de la densidad Próctor. Las condiciones de obra se han adaptado en el laboratorio a los criterios de fabricación con la utilización del Kangoo (figura 8.35).

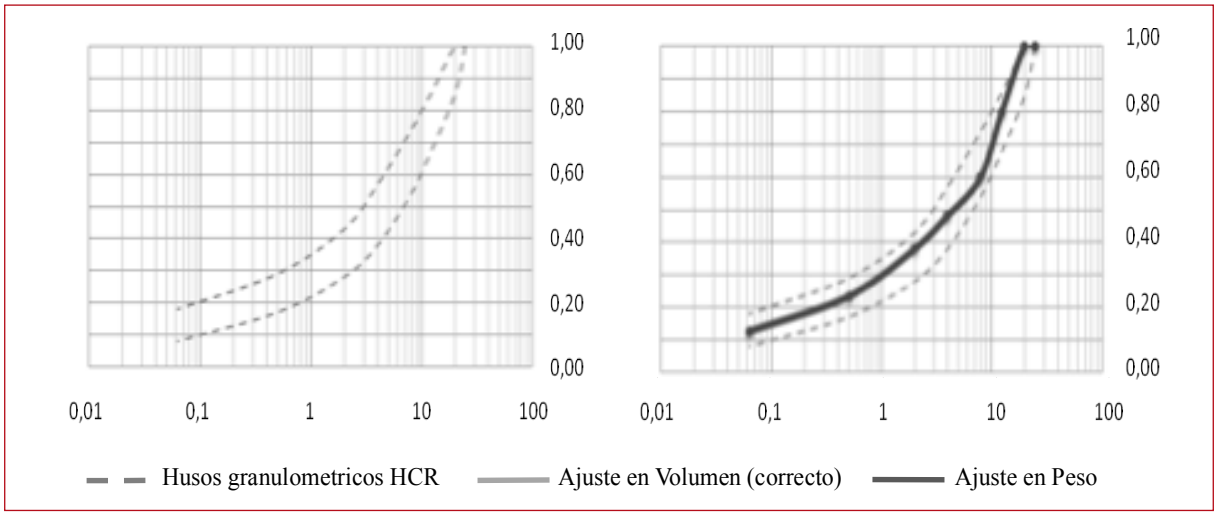


Figura 8.30. Husos granulométricos propuestos para el conjunto árido - cemento en HCR.

Figura 8.31. Ajuste granulométrico con árido natural.

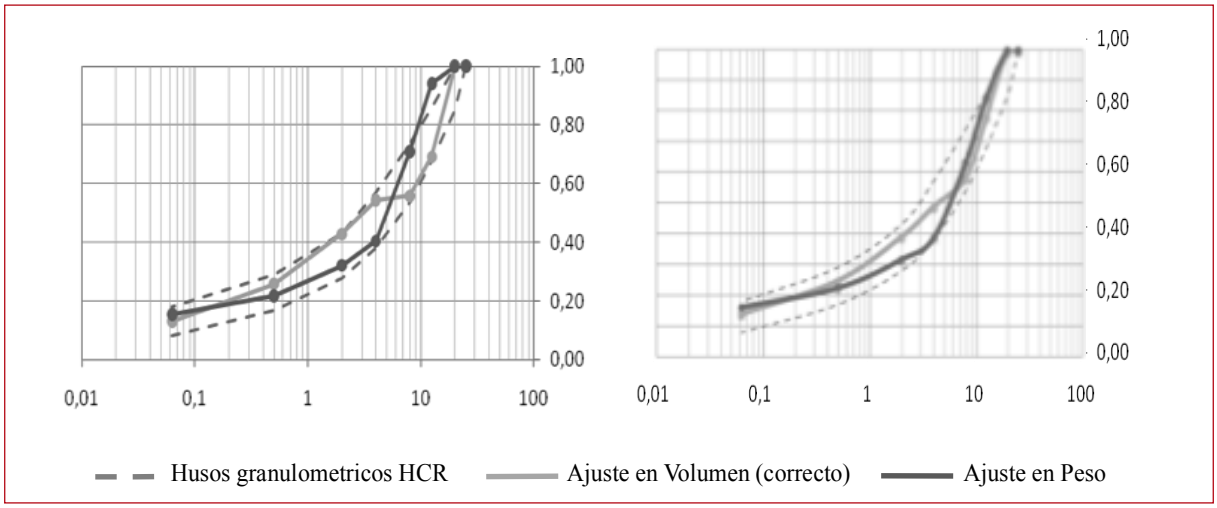


Figura 8.32. Ajuste granulométrico con ARH.

Figura 8.33. Ajuste granulométrico con ARMh.

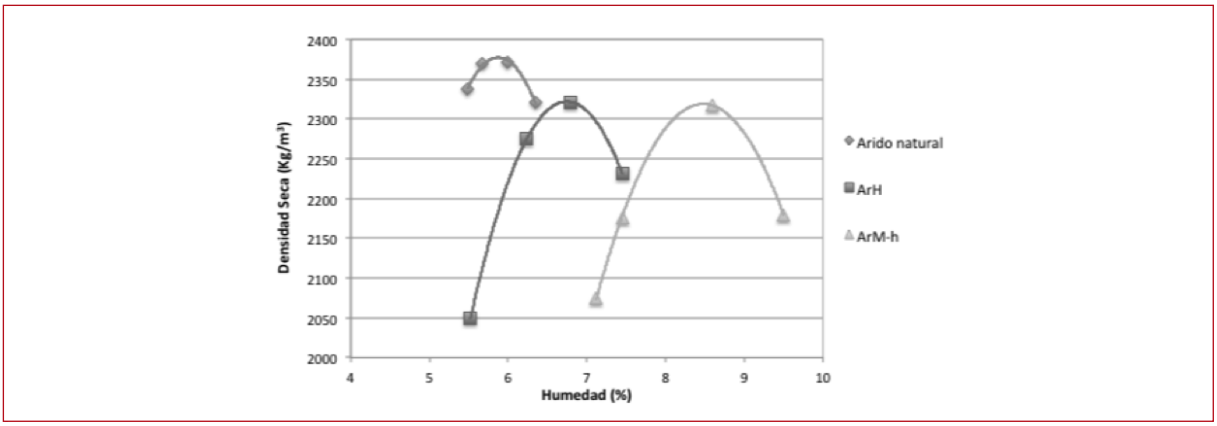


Figura 8.34. Curvas humedad/densidad.



Figura 8.35. Fabricación de probetas en laboratorio con el Kangoo, simulando la técnica para HCR.

Esta fase concluye determinando la resistencia a compresión y a tracción indirecta a 7 y 28 días de las probetas fabricadas. La resistencia media a compresión a 28 días, según la NLT-305 fue mayor que 20 MPa, excepto en el HRCR con ARMh y la resistencia a tracción indirecta a 28 días, según UNE 833046 (figura 8.36, figura 8.37, figura 8.38 y figura 8.39) fue mayor que 3,3 MPa alcanzando hasta 4 Mpa con áridos naturales y ARH, con un 13% de cemento.

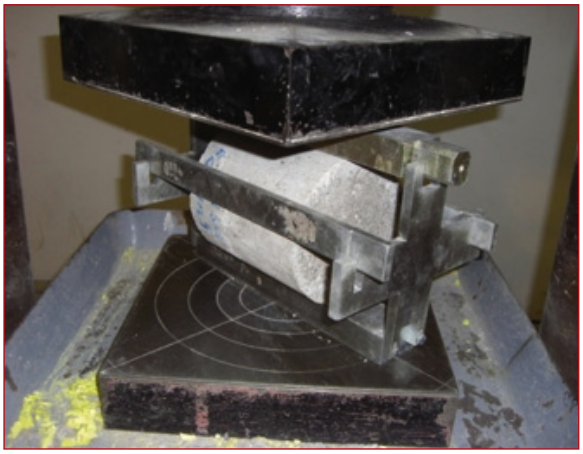


Figura 8.36. Ensayo de tracción indirecta, según UNE 83304 .

De la experiencia obtenida en laboratorio se presentan las siguientes recomendaciones (tabla 8.15), según sea el tipo de aplicación del HRCR, como capa de rodadura o como base para pavimentos.

Como recomendaciones generales, se puede decir que a causa de la absorción de los áridos reciclados, los tiempos de ejecución pueden afectar las condiciones de trabajo o exigir procesos modificados en la misma línea que en hormigones tradicionales con la particularidad de que en HRCR se trabaja con hormigones muy secos. Por lo que la influencia del uso de áridos reciclados en los procesos de amasado, extensión y compactación es evaluada. De ahí que se haga necesaria la ejecución de un tramo de prueba validando así la mezcla a servir en obra.



Figura 8.37. Ensayo de Resistencia a Compresión, según la NLT-305.

Además, es importante contar con gran cantidad de material accesible, para que el ritmo de colocación del HCR no dependa del ritmo de producción del árido; además es necesario llevar un control sobre la granulometría para que sea uniforme a lo largo del tiempo y no se presenten segregaciones. Por eso los estudios deben centrarse en propuestas de dosificaciones viables y con áridos reciclados de producción estándar.



Figura 8.38. Ensayo de tracción indirecta para HRCR con ARMh.

Por otro lado, debe cuidarse el contenido de finos debido a que puede provocar un "colchoneo" del material en el momento de la compactación. Por eso se ha utilizado en todo caso arenas naturales para este proyecto en concreto. Analizar la viabilidad de éstos en la fabricación de HCR considerando sus propias características, sin limitarlo a las exigencias técnicas actualmente establecidas para áridos naturales, es un paso a seguir, buscando siempre que satisfaga las necesidades propias de este tipo de hormigón.



Figura 8.39. Ensayo de tracción indirecta para HCR con árido natural.

<table>
<tr><th>Base para Pavimento</th><th>Capa de Rodadura</th></tr>
<tr><td>
• Realizar ensayos previos a la ejecución que permitan un ajuste de la dosificación, según la calidad del árido reciclado
• Tantear el contenido de cemento, que estará entre el 12% y el 17% del total en peso de los materiales secos
• Ajustar la humedad para obtener la densidad máxima (Próctor)
• Ajustar el contenido en cemento para alcanzar la resistencia requerida.
• La Resistencia media a Compresión a 28 días, según la NLT-305 será mayor que 20 MPa y la resistencia mínima a tracción indirecta a 28 días, según UNE 833046 será mayor que 3,3 MPa.
• Las probetas se compactaran según la NLT-310, mediante el uso del martillo Kangoo
• La superficie de la capa terminada deberá presentar una textura uniforme, exenta de segregaciones y ondulaciones, cumpliendo lo establecido en la tabla. IRI. (según la NLT 330)
</td><td>
• Realizar ensayos previos a la ejecución que permitan un ajuste de la dosificación, según la calidad del árido reciclado
• Tantear el contenido de cemento, que estará entre el 12% y el 17% del total en peso de los materiales secos
• Ajustar la humedad para obtener la densidad máxima (Próctor)
• Ajustar el contenido en cemento para alcanzar la resistencia requerida.
• Las probetas se compactaran según la NLT-310, mediante el uso del martillo Kangoo
• La resistencia mínima a tracción indirecta a 28 días, según UNE 833046 será mayor que 4 MPa.
• Ejecución de un tramo de prueba y supervisar el aspecto.
• La superficie de la capa terminada deberá presentar una textura uniforme, exenta de segregaciones y ondulaciones, cumpliendo lo establecido en la tabla IRI. (según la NLT 330)
</td></tr>
<tr><td>
<table>
<tr><th rowspan="2">Porcentaje de Hectómetros</th><th>Como base para pavimento</th></tr>
<tr><th>T00 a T2</th></tr>
<tr><td>50</td><td>< 2,5</td></tr>
<tr><td>80</td><td>< 3,0</td></tr>
<tr><td>100</td><td>< 3,5</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><th rowspan="2">Porcentaje de Hectómetros</th><th>Como base para pavimento</th></tr>
<tr><th>T3 a T4</th></tr>
<tr><td>50</td><td>< 3,0</td></tr>
<tr><td>80</td><td>< 3,5</td></tr>
<tr><td>100</td><td>< 4,0</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

Tabla 8.15. Recomendaciones para HRCR según su clase de aplicación.

8.2.5 Obras

La posibilidad de la realización del tramo de prueba al que se hace referencia a continuación surge gracias a la colaboración de D. Vicente Ibarra de la Dirección General de Puertos, Aeropuertos y Costas (Generalitat Valenciana), que ofreció la opción de incorporar áridos reciclados en la ejecución del hormigón compactado con rodillo para el camino de acceso al puerto de Vinaroz.

8.2.5.1 Descripción y condicionantes de la obra

Se trata de un vial de acceso al nuevo varadero a construir en el muelle Sur del puerto de Vinaroz, (figura 8.40). Este vial tiene una longitud aproximada de 500 metros y un ancho de base de 7 metros. En algunos tramos se prevé una zona de aparcamiento, con lo que la superficie total es del orden de 4.000 m^2. La figura 8.41 muestra una planta de la obra a realizar.



Figura 8.40. Situación de la obra .

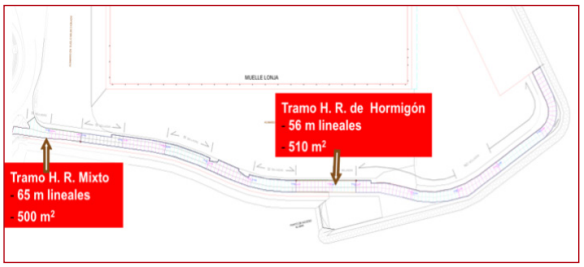


Figura 8.41. Planta de la obra y zonificación de los tramos de prueba.

Se planteó realizar todo el pavimento con hormigón compactado con rodillo (HCR), técnica en la que el equipo de la obra no había tenido experiencia previa significativa, y aprovechar así dos tramos para incorporar áridos reciclados en el pavimento. Se propone el uso de dos calidades de árido reciclado: uno de nivel alto, procedente del machaqueo de hormigón, y otro árido reciclado procedente del machaqueo de productos de demolición de composición variable obtenidos en el mercado.

A partir de la experiencia en laboratorio del equipo investigador de la Universidad Politécnica de Valencia, se consideraba viable la consecución de características similares a la de los áridos naturales cuando el árido natural grueso se sustituye por árido reciclado procedente de hormigón, y se había previsto una cierta disminución de la capacidad mecánica en el caso de sustitución por árido reciclado mixto.

Cuando se plantea la realización de un tramo de prueba en una obra real, y especialmente cuando la decisión de su inclusión se produce una vez la obra ya está en marcha, es imprescindible acoplarse a las condiciones existentes de la obra.

Para garantizar la viabilidad de la obra se realizó una campaña de ensayos previos (limitada en volumen y tiempo) en los laboratorios de Comaypa (asistencia técnica a la dirección de las obras) que permitió plantear unas dosificaciones con suficientes garantías para la ejecución prevista en los plazos necesarios para su inclusión en la obra.

En este documento se comentarán datos procedentes de los ensayos previos realizados por Comaypa con los realizados en paralelo, en la UPV. Debe tenerse en cuenta en el análisis de ambos las diferencias debidas a las condiciones de urgencia y de los medios disponibles en cada caso.

Disponibilidad de áridos reciclados. Se pretendía analizar dos niveles de calidad de áridos reciclados, por ello se propuso trabajar con un árido reciclado de alto nivel, procedente del machaqueo de hormigón, y otro árido reciclado procedente del machaqueo de productos de demolición de composición menos homogénea (mixto) y de mayor posibilidad de ser obtenido en el mercado. La reserva del árido reciclado procedente de hormigón (ARH) fue limitada, estando disponibles únicamente 100 toneladas, por lo que el volumen de hormigón a ejecutar estuvo condicionado a este parámetro. Para el tramo de árido reciclado mixto (ARMh) se planteó fabricar un volumen de hormigón similar. Los áridos reciclados fueron suministrados por la empresa participante en el Proyecto GEAR Gestora de Reciclados Belcaire (GRB).

Adaptación a suministradores, equipos y materias primas disponibles en el momento. La UTE Becsa–Joca contrata de las obras y hormigones Oriente pusieron a su disposición todos los medios posibles en el momento.

Todas las entidades comentadas pusieron de su parte el máximo apoyo posible en aras al buen resultado del experimento.

8.2.5.2 Planteamiento y definición del pavimento

El proceso de evaluación se ha limitado a la aplicación directa de las tablas propuestas por el documento: ROM 4.1. 94. Según este documento, el valor del espesor de pavimento se determina a partir de las características de la explanada, el tipo de tráfico y las exigencias al hormigón.

Explanada

La obra se realiza sobre una explanada preexistente compuesta por:

- Relleno portuario,
- 70 cm de suelo adecuado,
- 40 cm de suelo seleccionado,
- 25 cm de zahorra artificial

Según ROM 4.1. 94 se considera S2 – equivalente a E2 según Instrucción 6.-I.C

Tráfico previsto

Se prevé 20-30 vehículos /día durante tres meses. Luego debe descender a menos de 1/día. Valorando 24/día durante 3 meses y luego a 2/día ≈ 4 /día durante 3 años, según ROM 4.1. 94 sería Tráfico C4 (el de menor nivel); o C2, si se considera que se mantendrá el tráfico inicial durante toda la vida útil.

Tipos de hormigones a utilizar

Se plantea la realización de tres tramos diferentes, diseñados para su ejecución con tres tipos de hormigón diferentes, todos ellos puestos en obra por compactación con rodillo (HCR) y diferenciados por el tipo de árido grueso utilizado, y adaptando la dosificación y el espesor de capa a las características del árido a emplear.

Los hormigones planteados han sido:

- Hormigón con áridos tradicionales.
- Hormigón con árido reciclado mixto.
- Hormigón con árido reciclado de hormigón.

Espesor pavimento

Se ha evaluado a partir de las propuestas del ROM 4.1. 94, El catálogo de firmes de este documento propone el espesor del pavimento en función del tráfico, el tipo de explanada y la calidad del hormigón a utilizar.

Para tráfico C4 y explanada S2 se propone:

- 14 cm si el hormigón es HPR -4 (calidad que se considera viable en los tramos a ejecutar con árido natural y con árido reciclado de hormigón)
- 16 cm si el hormigón es HPR -3,5 (calidad que se considera viable en el tramo a ejecutar con árido reciclado mixto)

8.2.5.3 Descripción y caracterización de los materiales empleados

Áridos

Los áridos utilizados han sido: árido machacado 12/20 mm (G12/20), árido machacado 7/12 mm (G7/12), arena machacada 0/2 mm (A0/2), arena machacada 0/4 mm (A0/4), árido reciclado de hormigón (ARH) y árido reciclado mixto (ARMh). Para todos los hormigones se utilizo árido fino natural.

Se caracterizan las propiedades químicas, físicas y geométricas de los áridos utilizados para el posterior diseño de dosificaciones de hormigón, mediante ensayos de granulometría (figura 8.42), densidad y absorción, índice de lajas y coeficiente Los Ángeles. Dichos ensayos fueron realizados tanto por el laboratorio de materiales de construcción de la Universidad Politécnica de Valencia y por el laboratorio de Comaypa, S.A. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8.16. Un ensayo de clasificación de constituyentes e impurezas fue realizado sobre los áridos reciclados, como una forma de clasificación objetiva.

De particular interés resulta el estudio de la absorción, cuyos valores para los áridos reciclados son normalmente superiores a los de los áridos naturales. Esto justifica la necesidad de un nivel de control intenso de la humedad de los áridos reciclados. Es evidente que la humedad y la absorción son variables fundamentales en el diseño de las dosificaciones del hormigón por su relación con la resistencia del pavimento (agua/cemento) y con la necesidad de conseguir el nivel de compactación adecuado.

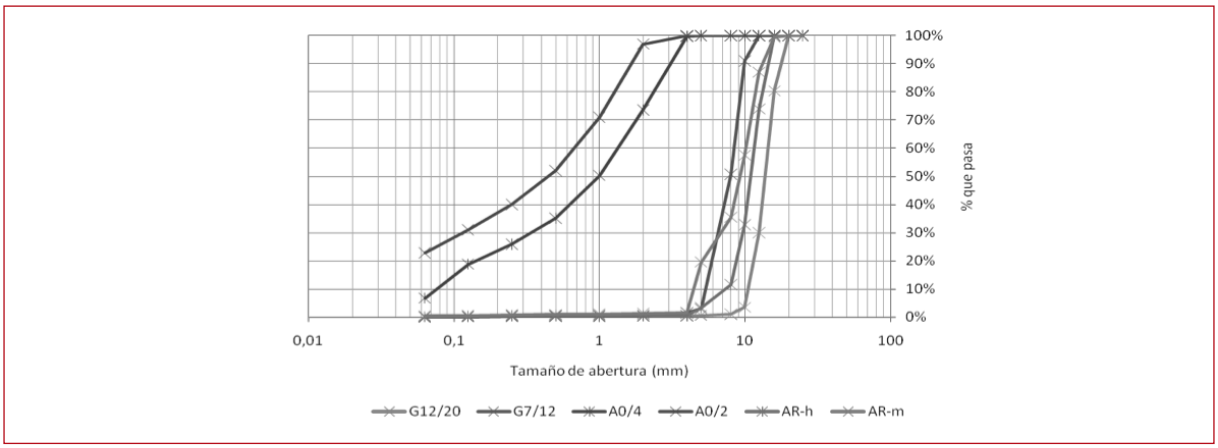


Figura 8.42. Granulometría de los áridos empleados.

Árido	Densidad (kg/m³)		Absorción (%)		Índice de Lajas (%)	Los Ángeles (%)
	UPV	Comaypa	UPV	Comaypa	UPV	UPV
G12/20	2618	2610	1,43		15,77	20,12
G7/12	2530	2610	1,89		18,81	-
A0/2	-	2720	-		-	-
A0/4	2570	2650	1,33		-	-
ARH	2379	2360	3,82	3,90	6,03	30,80
ARMh	2125	2090	7,54	7,60	10,55	35,00

Tabla 8.16. Resultados de los ensayos de los áridos.

Cemento

Se optó por un cemento tipo I 42,5 R-SR. La resistencia a sulfatos del cemento es fundamental tanto por la localización de la obra como por la posible presencia de yesos en los áridos gruesos reciclados. El contenido de cemento se fijó en ensayos previos de laboratorio para determinar una cantidad suficiente que permitiera alcanzar resistencias a tracción indirecta a veintiocho días (parámetro fundamental de diseño en los pavimentos de hormigón compactado con rodillo) suficientemente elevadas de acuerdo con las exigencias. Para este caso se selecciona la dosificación que cumple con los valores exigidos por la ROM 4.1. 94, indicados en la tabla 8.17.

Tipo de hormigón	HPR 4		HPR3,5	
	Resistencia (MPa)		Resistencia (MPa)	
Ensayo	Compresión - fc	Tracción - tr	Compresión - fc	Tracción - tr
Valor a 7 d	25	3,3	20	3
Valor a 28 d	30	4	24	3,6

Tabla 8.17. Características mecánicas exigidas a los hormigones a utilizar en HCR.

Como propuesta de inicio de dosificación en cemento se propuso:

HPR -4: Cemento: 300 para árido natural
320 para árido reciclado de hormigón

HPR-3,5: Cemento: 350 para árido reciclado mixto

Agua

La compactación es un parámetro fundamental para asegurar un material más resistente y de mayor durabilidad. La cantidad de agua debe ser optimizada mediante el cálculo de la densidad para diferentes contenidos de agua de la mezcla seleccionando aquella que permite alcanzar entre el 98% y el 100% de la densidad máxima del ensayo Próctor, que fue determinada por medio de martillo Kangoo. Las proporciones ensayadas deben tener en cuenta el coeficiente de absorción de los áridos para poder definir la cantidad de agua que es necesaria, o agua total, y la cantidad de agua que es realmente eficiente en el proceso de hidratación del cemento, o agua efectiva. Es imprescindible señalar expresamente a qué cantidad de agua se está haciendo referencia. En este documento, para el cálculo de las curvas de humedad frente a densidad seca y las dosificaciones, se habla exclusivamente de agua total. La figura 8.43 muestra los resultados del proceso para los tres hormigones estudiados y para cada uno de los criterios de ajuste granulométrico antes comentado. La tabla 8.18. muestra la densidad Próctor y la humedad óptima de las dosificaciones empleadas en obra. Se aprecia que los dos criterios conducen a humedades óptimas similares, pero que el ajuste volumétrico alcanza valores de densidad Próctor superiores, siendo las diferencias mucho mayores para áridos reciclados. En el ajuste ponderal la curva correspondiente al árido reciclado mixto es más tendida, por lo que permite dosificar con un mayor rango de humedades para alcanzar el rango de densidades objetivo.

Dosificación	Densidad (kg/m³)		Humedad óptima (%)	
Árido natural	2364	3271	5,82	5,80
Árido reciclado de hormigón	2320	2266	6,66	6,70
Árido reciclado mixto	-	2056	-	8,90

Tabla 8.18. Densidades máximas y humedades óptimas para las dosificaciones empleadas en obra.

Se realizó un ajuste granulométrico adaptándose al huso, combinando los materiales en peso de manera convencional. Este criterio fue realizado con la urgencia de proponer una dosificación rápida en obra por Comaypa (figura 8.44).

En los estudios correspondientes a la línea de investigación se realizó un ajuste más fino, que se presentó en el apartado anterior de Resultados y Conclusiones de la investigación, en el que se valoró las distintas densidades de los materiales y donde el ajuste granulométrico fue hecho en volumen. La tabla 8.19. muestra las dosificaciones definitivas empleadas en obra.

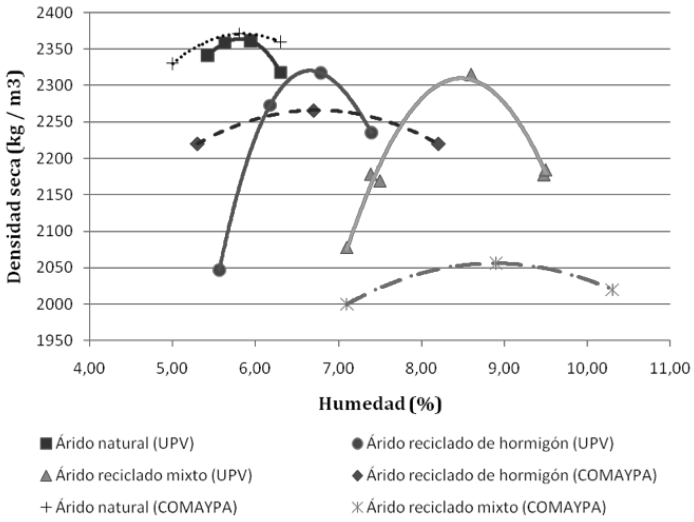


Figura 8.43. Curvas humedad/ densidad obtenidas en la UPV y en Comaypa.

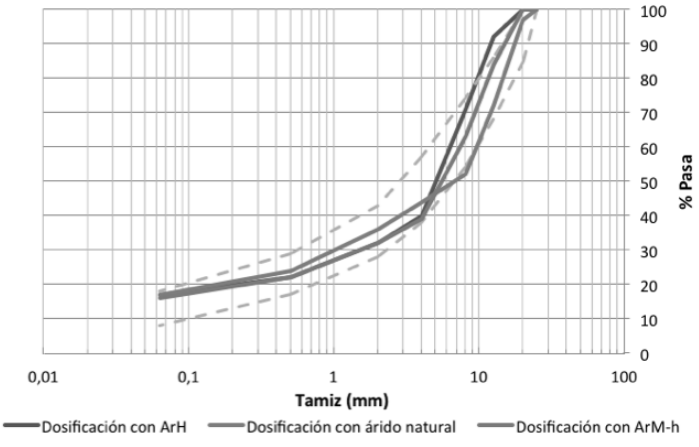


Figura 8.44. Ajuste granulométrico para los diferentes hormigones puestos en obra.

Tipo de árido	Dosificación con árido natural		Dosificación con árido reciclado de hormigón		Dosificación con árido reciclado mixto	
	kg/m³	%	kg/m³	%	kg/m³	%
A0/2	107	4,52	-	-	43	2,07
A0/4	612	25,82	634	27,94	492	23,87
G12/20	597	25,18	-	-	-	-
G7/12	597	25,18	-	-	-	-
ARH	-	-	1155	50,87	-	-
ARMh	-	-	-	-	1021	49,57
Cemento	320	13,5	329	14,5	350	17
Agua total	137	5,80	152	6,70	155	7,50
Totales	2370	100	2270	100	2060	100

Tabla 8.19. Dosificaciones propuestas. Dosificación en kg/m³ y % en peso sobre el total de componentes.

8.2.5.4 Propuesta de procedimiento de ejecución

Se planteó como criterios para la realización de la obra las siguientes premisas:

- Dosificación: en planta de hormigón preparado.
- Amasado: en camión hormigonera, a falta de planta con amasadora propia.
- Transporte: camión hormigonera y camión volquete.
- Extendido: extendedora de grava cemento.
- Compactación: rodillo metálico liso vibrante.
- Curado: riego con agua.
- Juntas de retracción: longitudinal en el centro; transversales variables para analizar resultados: 3; 3,5 y 4 m.
- Corte con sierra de disco: 4-5 cm. – Entre 6 y 24 h después de la puesta en obra.
- Sellado de juntas: se sella la junta longitudinal y las transversales impares.
- Textura y regularidad: acabado de obra.

Para el control de obra se propuso la siguiente serie de ensayos.

- Ensayos de hormigón en ensayos previos: probetas fabricadas con Kangoo. Para comprobar la dosificación de obra.
- En ejecución. Densidad (sonda nuclear). Sonda a fondo y previamente calibrada.
- Extracción de testigos de 100 mm de diámetro en toda la profundidad de la capa, con la finalidad de controlar espesores y determinar las características mecánicas de HRCR.
- Control visual (aparición de fisuras, defectos…).
- Auscultación durante la vida de servicio: 2 veces al año (invierno / verano).

8.2.5.5 Ejecución

Tramo de prueba e inspección de la mezcla. La ejecución del pavimento vino precedida por la realización de un tramo de prueba para la comprobación de la fórmula de trabajo y la aprobación de los equipos de extendido, compactación y del plan de compactación. Dada la envergadura de la obra y por motivos económicos, solo se realizó un tramo de prueba para la dosificación con árido grueso natural.

El ajuste del espesor vertido por la extendedora y el número de pasadas a realizar por el compactador se realizó midiendo el descenso que sufría el pavimento tras el paso del compactador. El equipo técnico presente consideró adecuado un espesor sin compactar de 16 cm y cuatro pasadas del compactador tipo tándem, previa comprobación de la densidad alcanzada con dichos parámetros.

Las pasadas se repartirían de forma que la primera y la última fueran sin vibración y las dos intermedias vibrando. Con la primera pasada se consigue una compactación inicial de alrededor de un 80% de la densidad máxima, las dos siguientes sirven para alcanzar entre el 98 y el 100% de la densidad máxima y la última para el acabado de la rasante y sellado de las huellas longitudinales dejadas por el compactador en las tres primeras pasadas (planchado).

Teniendo en cuenta que el hormigón fabricado con árido reciclado presentó más descenso que el de árido natural, se estimó que el espesor sin compactar para el hormigón con árido reciclado de hormigón debería ser de unos 18 cm (para espesor final de 14 cm) y que para el hormigón con árido reciclado mixto debía ampliarse a 21 cm (para espesor final de 16 cm). Estas estimaciones y del número de pasadas del compactador fueron corregidas in situ

(figura 8.45), adaptándose a las condiciones del suministro real y apoyando las decisiones en las medidas de densidad oportunas para corroborar que se alcanzan valores próximos a la densidad requerida.



Figura 8.45. Medición del descenso tras la compactación del tramo de prueba.

8.2.5.6 Producción y transporte del hormigón

El hormigón se produjo en la planta de Oriente Hormigones, próxima a la obra, quien almacenó los áridos reciclados (figura 8.46). En la figura 8.47 se muestra un detalle del aspecto de estos áridos.

Una vez definida la dosificación propuesta, ésta era verificada en planta durante el primer suministro de hormigón y antes de su salida para obra. La verificación se realizaba por vertido de una muestra de unos 100 litros de hormigón comprobando que la consistencia era adecuada para el modo de puesta en obra previsto (figura 8.48 y 8.49). Una vez aceptada la mezcla, se procedía a la producción en serie y la flota de camiones hormigonera garantizaba el suministro continuo del hormigón (figura 8.50).



Figura 8.46. Acopio de áridos reciclados mixtos.



Figura 8.47. Aspecto de los áridos reciclados mixtos y áridos reciclados de hormigón.



Figura 8.48. Planta de Oriente Hormigones.



Figura 8.49. Verificación de las dosificaciones.



Figura 8.50. Transporte del HCR.

8.2.5.7 Extensión y compactación del hormigón

Para la puesta en obra del hormigón se utilizó una extendedora tipo TITAN 525 (figura 8.51).



Figura 8.51. Extendedora TITAN 525.

8.2.5.8 Alimentación de la extendedora

En una primera fase, la alimentación de la extendedora se realizó directamente desde los camiones hormigonera según orden de llegada (figura 8.52). No obstante, el poco rendimiento de vertido de los camiones hormigonera hizo que muchos de ellos se acumularan en la entrada a la obra y permanecieran parados durante demasiado tiempo con demoras de hasta hora y media. Por ello, la mezcla de algunos de ellos se tuvo que rechazar y replantear el método de trabajo. A este problema se unió la falta de homogeneidad entre los distintos momentos de la descarga debido a que el bajo contenido en agua no permitía una correcta mezcla en este tipo de camiones hormigoneras, a pesar de tiempos de amasado largos a velocidad rápida de amasado. Para mejorar el sistema se propuso que la alimentación de la extendedora se realizara mediante camión basculante, cuyo llenado se realizaría por camiones hormigonera en las inmediaciones de la obra (figura 8.53 y 8.54). Con la introducción de esta variante se consiguió una alimentación cuasi continua de la extendedora.



Figura 8.52. Vertido directo desde camión hormigonera a la extendedora.



Figura 8.53. Muelle de descarga.



Figura 8.54. Vertido desde camión volquete.

8.2.5.9 Compactación del hormigón y curado

Con el avance de la extendedora, iniciaba su trabajo un equipo compactador tipo tándem de 9500 kg (figura 8.55), mientras el equipo técnico inspeccionaba el aspecto final del hormigón y proponía mejoras de ejecución. Los extremos del pavimento se compactaron con bandeja vibrante manual (figura 8.56) y posteriormente se forzaba el paso del

compactador tipo tándem, para compensar la diferencia de energía de compactación de este último en dichas zonas por la presencia del bordillo y la rigola y en las zonas en las que la regla vibrante de la extendedora no fuera suficientemente ancha.



Figura 8.55. Compactador tándem 9.500 kg.



Figura 8.56. Compactador manual.

Aunque la regla vibrante de la extendedora alcanzó todo el ancho de la vía en la mayor parte del tramo, no lo hacía en todos. En aquellos tramos más anchos, el vertido de la mezcla se realizó manualmente y la compactación con el compactador tipo tándem y bandeja vibrante manual. Dado que la regla vibrante de la extendedora produce una precompactación cercana al 60%, en aquellas zonas más anchas, a las que no llegara la regla vibrante, se realizaron el número de pasadas suficiente hasta ajustar la rasante con el resto del pavimento.

El proceso de compactación era seguido por el curado del hormigón por riego directo (figura 8.57).



Figura 8.57. Curado del hormigón.

Una vez extendido el hormigón, durante la compactación, se apreciaron diferentes aspectos que deben ser atribuidos principalmente al logro de una dosificación de referencia más o menos ajustada al método de puesta en obra, o a la metodología de puesta en obra. En el primer tramo, situado al final del dique, y junto al varadero, que se fabricó con árido natural, mostró defectos de ejecución debido a la mala homogeneización del hormigón. Corresponde a la fase en la que se trabajaba por vertido directo del camión hormigonera a la extendedora y durante su puesta en obra se encontraban porciones de pavimento excesivamente húmedos, difíciles de compactar y con superficie que finalmente resultaba continua. Al mismo tiempo, otras zonas próximas mostraban hormigón excesivamente seco, con acabado que dejaba áridos gruesos vistos y superficie muy abierta. Tras el cambio del proceso de alimentación y la adquisición de experiencia, la superficie alcanzada mejoró en continuidad. La figura 8.58 muestra el aspecto conseguido con áridos reciclados de hormigón y con áridos naturales tras el paso de la compactadora.



Figura 8.58. Aspecto del hormigón durante la compactación.

Estos aspectos son los más extremos. La dosificación del hormigón de árido reciclado de hormigón era la que se ajustó con un aspecto más fluido, consiguiéndose superficies más cerradas, pero al mismo tiempo presentaba una cierta tendencia al colchoneo durante la compactación. Sin embargo, la dosificación finalmente utilizada con el hormigón de árido natural era más sencilla de extender, pero el acabado era más abierto con algún riesgo de zo-

nas localizadas de árido grueso con tendencia a soltarse. El hormigón fabricado con árido reciclado mixto mostró un aspecto en puesta en obra similar al del fabricado con árido natural.

El aspecto final de las superficies obtenidas queda reflejado en la figura 8.59. Se destaca que apenas hay diferencia entre aspectos achacable al tipo de árido a excepción de una cierta tendencia a la tonalidad rojiza en el árido reciclado mixto ARMh debido a la presencia de material cerámico.



Figura 8.59. Aspectos de los distintos tipos de hormigón tras la compactación.

8.2.5.10 Control de compactación

Se realizaron mediciones de la densidad del hormigón compactado, con densímetro nuclear, (figura 8.60) obteniendo valores entre 98% y 100% de la densidad de referencia obtenida en el laboratorio para todos los tramos puestos en obra. Para cada tramo la densidad de referencia es diferente ya que, al fin y al cabo, se tratan de distintos materiales (tabla 8.20). Se destaca la disminución de densidad al utilizar árido reciclado, pero garantizando un nivel de compasión similar en todos los resultados y tipos de hormigón.



Figura 8.60. Medida de la densidad in situ.

Tramo de HCR	Densidad máxima (kg/m³)	Densidad Próctor (kg/m³)	Densidad Próctor kg/m³)	%	Humedad óptima Laboratorio	Humedad in situ
Hormigón con áridos naturales	2370	2370	2335	98,5	5,80	4,48
Hormigón con árido ARH	2266	2266	2230	98,4	6,70	5,18
Hormigón con árido ARMh	2056	2056	2028	98,6	8,90	5,14

Tabla 8.20. Densidades máximas, humedades óptimas y humedad in situ.

8.2.5.11 Juntas de retracción

El equipo técnico de la obra acordó la realización de juntas longitudinales no biseladas y selladas. Las juntas transversales no biseladas se alternaron cada 50 metros entre las selladas y las no selladas ,para estudiar el efecto del sellado en un seguimiento posterior (figura 8.61). El producto de sellado fue

el mismo para las juntas transversales y longitudinales: un bicomponente de polisulfuro resistente a hidrocarburos y ambiente marino, por la naturaleza de la obra.



Figura 8.61. Corte de juntas.

La presencia de árido grueso en superficie entorpeció le ejecución de las juntas de longitudinales y transversales de retracción, pues se producía un corte irregular que debe ser controlado y analizado con el tráfico de servicio (figura 8.62).

A pesar de la realización de las juntas apareció en el pavimento algunas fisuras, que no indicaban diferente comportamiento entre los distintos tipos de hormigón.



Figura 8.62. Aspectos de las juntas de retracción.

8.2.5.12 Control de resistencia en obra

Para el control de resistencia del material puesto en obra se extrajo un total de cuatro testigos de cada uno de los tipos de hormigón. La figura 8.63 muestra los testigos extraídos. El aspecto en profundidad fue bastante similar en todos ellos, indicando una buena compactación, salvo en algunos casos concretos (testigo 6 correspondiente a árido reciclado de hormigón).

Los testigos fueron medidos, se determinó su densidad y absorción, y se ensayaron determinando la resistencia a compresión o tracción. La tabla 8.21 muestra los resultados de los ensayos.

Los valores de densidad y absorción se adaptan a los resultados esperados y confirman la clara tendencia a disminuir la densidad y aumentar la absorción cuando se utiliza áridos reciclados, especialmente si éstos son mixtos. Los valores que se obtienen en obra son coherentes con los previstos a partir de los ensayos de laboratorio.

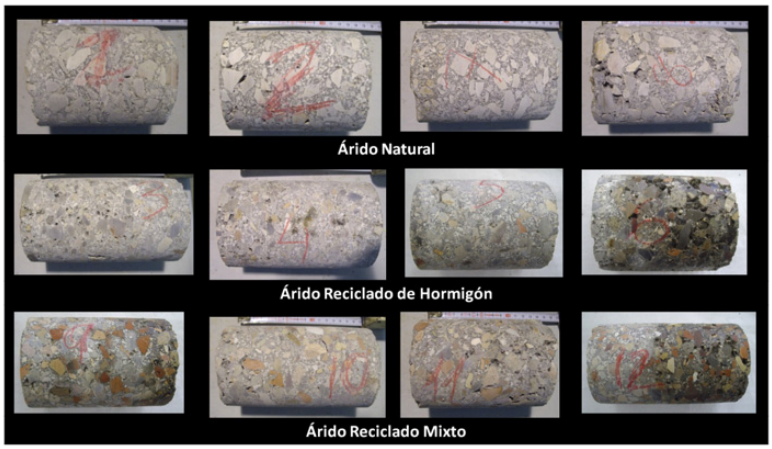


Figura 8.63. Testigos extraídos del pavimento.

Los resultados mecánicos han dada valores adecuados a las exigencias en el hormigón fabricado con árido reciclado mixto. Probablemente este era el caso en el que se esperaban mayores problemas, y por ello se había tratado con un criterio más conservador en la definición de la dosificación. Los hormigones fabricados con áridos naturales y reciclados de hormigón han obtenido niveles de resistencia ligeramente inferiores a los esperados, especialmente en lo relativo a resistencia a compresión. El de árido natural alcanza prácticamente la resistencia a tracción objetivo, en pavimentos esta es la característica mecánica fundamental. El hormigón de árido reciclado de hormigón ha mostrado un resultado menos favorable desde el punto de vista mecánico, probablemente debido a que la dosificación de obra se había centrado con un ligero exceso de humedad, que ya se comentó en el análisis de los acabados.

Tramo según tipo de árido	Testigo No.	Características del testigo		Resistencia (MPa)		Absorción (%)
		Longitud (mm)	Densidad (kg/m³)	Compresión	Tracción	
Árido Natural	1	14,4	2241		3,5	
	2	14,0	2274	19,4		
	7	15,5	2233		4,3	
	8	13,5	2135	19,4		
	Media	14,4	2221	19,4	3,9	3,95
Árido Reciclado de Hormigón	3	17,3	2081		2,7	
	4	17,0	2100	22,1		
	5	12,8	2190		3,9	
	6	14,3	2020			
	Media	15,3	2098	22,1	3,3	6,74
Árido Reciclado Mixto	9	16,5	2108		3,9	
	10	17,3	2126	24,9		
	11	17,3	2058		3,6	
	12	18,3	2085	27,7		
	Media	17,3	2094	26,3	3,7	7,16

Tabla 8.21. Resultados obtenidos de los testigos.

8.2.6 Conclusiones

8.2.6.1 Relativas a la técnica de Hormigón Compactado con rodillo

La realización de tramos de prueba para centrar las dosificaciones y procesos se plantea como fundamental para el éxito de la aplicación. Es evidente que estos tramos convendría realizarlos con suficiente tiempo para realizar las verificaciones pertinentes, no solo en procedimiento sino también para garantizar las características mecánicas. Particularmente en los tramos cortos de hormigón con áridos reciclados la capacidad de reacción fue escasa, por lo que se piensa que en aplicaciones de mayor volumen, y tras experiencias previas, la técnica puede mejorarse sensiblemente.

El proceso de fabricación de hormigón con dosificaciones tan secas como las empleadas en HCR plantea dificultades en plantas sin amasadora. La capacidad de homogeneización en caso de transportes cortos como el de la aplicación realizada es problemático. Es imprescindible garantizar un tiempo de amasado a máxima velocidad de giro de la cuba (esta acción es poco deseada por los transportistas).

La utilización de extendedoras es fundamental para el proceso. Aplicaciones con motoniveladora y otros medios (que fueros analizados en ensayos anteriores) requiere un mayor número de pasadas de compactador y dan lugar a capas más difíciles de extender y nivelar. La capacidad de precompactación de la extendedora facilita sensiblemente el proceso y garantiza un mejor resultado.

Las extendedoras utilizadas permiten y funcionan mejor con un suministro abundante, por ello la utilización del camión volquete como alimentador a la extendedora es muy útil. La combinación de amasado en camión hormigonera y vertido con camión volquete puede plantearse como válida, y con experiencia se podrían mejorar los rendimientos.

Cuando la dosificación y extendido están bien ajustados la compactación es sencilla.

El acabado da lugar a superficies muy abiertas. El ajuste de la dosificación y el control de procesos permite mejorar el acabado, pero no parece fácil conseguir un acabado liso en condiciones competitivas. En consecuencia, el producto final es viable para tramos no exigentes desde el punto de vista de regularidad superficial, o para firmes que incluirán una capa de rodadura sobre la de hormigón compactado con rodillo.

Los problemas de acabado se reflejarán en una formación de juntas de retracción peor definidas.

En cualquier caso con las enseñanzas adquiridas y con los límites arriba comentados, la experiencia muestra que el procedimiento propuesto puede llevar a resultados interesantes a precios competitivos.

8.2.6.2 Relativas al empleo de áridos reciclados en este tipo de aplicaciones

No se han encontrado diferencias esenciales en el comportamiento de los distintos tipos de árido empleados que condicionen el procedimiento de diseño o aplicación de un pavimento de HCR.

Por el hecho de ser áridos con menor densidad y más absorbentes, los hormigones obtenidos muestran también mayor absorción y menor densidad.

Por la mayor absorción de los áridos, pasa a ser más importante la necesidad de controlar la humedad y absorción de los áridos a la hora de definir la dosificación y sobre todo en su aplicación en obra. Además, en la puesta en obra se debe garantizar la correcta homogeneización durante el proceso de fabricación y transporte del hormigón.

Realmente, el proceso de dosificación conduce a formulaciones de HCR con mayor demanda de agua, y por tanto de cemento en el caso de empleo de áridos reciclados, pero las posibilidades de alcanzar los mismos niveles de resistencia son similares.

Las posibilidades de suministro son esenciales en estas aplicaciones. La disponibilidad de árido reciclado procedente de hormigón fue difícil de garantizar, sin embargo no parece tan complicado garantizar un suministro relativamente homogéneo, con propiedades constantes y en cantidad suficiente de árido reciclado mixto.

La sustitución total del árido grueso por árido reciclado no plantea problemas, y permite una producción más sencilla que en casos en los que se pueda exigir la combinación de áridos gruesos naturales y reciclados.

En conclusión, el tipo de árido no muestra mayor dificultad que la de adaptar la definición de la fórmula de trabajo al material empleado.

8.2.7 Bibliografía

- Tremblay, S. (1997). Méthodes de formulation de bétons compactés au rouleau et effet des agents entraineurs d'air sur la maniabilité. Québec: Master thesis, University of Laval.
- Williams, R. (1986). Cement-treated pavements: materials, design and construction. Elsevier Applied Science Publisher.
- Burns CD, S. K. (1978). Vibratory compaction study of zero-slump concrete. ACI J; 75(12):90.
- Courard Luc, M. F. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete . Construction and Building Materials, 24, 390-395.
- Dunstan, M. (1977). Trial of lean rolled concrete at the Tamar Treatment Works. Report to South West Water Autority.
- Debieb Farid, C.L. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. Construction and Building Materials, 23 (11), 3382-3387.
- Delhez P, W. X. (2004). Use of concrete recycled aggregates in roller compacted concrete. Proceedings of an international RILEM conference on use of recycled materials in buildings and structures. 675–83.
- Hansen, K. D. (1991). Roller Compacted Concrete Dams. New York: McGraw-Hill.
- Hansen, K. (1985). Roller Compacted Concrete I. Nueva York: American Society of Civil Engineering (ASCE).
- Josa García Tornel, A. (2003). Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, ed. Manual de pavimentos de hormigón para vías de baja intensidad de tráfico. Madrid: IECA, D.L.
- Pelufo M.J., D. A. (2009). Analysis of moisture state of recycled coarse aggregate and its influence on compression strength of the concrete. Valencia, Valencia, España: Shell and Spatial Structures IASS.
- Serna P., U. V. (2009). Analysis of roller compacted pavements made from recycled concrete aggregate for use in Spain. Sao Paulo, Brazil: Proceedings of RILEM 2009: International Rilem Conference on Progress of Recycling in the Built Environment.
- Tabsh SW, A. A. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. (Vol. 23). Construction and Building Materials.

8.3 Hormigón en masa y estructural

Este capítulo fue desarrollado por los técnicos de UDC (Universidad de la Coruña), que forman parte del equipo investigador del Proyecto GEAR.

8.3.1 Situación de la investigación en España y Europa

Probablemente la primera investigación a gran escala sobre el reciclaje de áridos reciclados mixtos se produjo en Alemania tras la II Guerra Mundial. Cerca de 600 millones de m^3 de residuos inertes en el con-

junto de las ciudades alemanas y aproximadamente 75 millones de m^3 solo en el sector oeste de Berlín, constituían una poderosa fuente de materia prima ante la urgente necesidad de viviendas que se requirió. Se desarrollaron así diversos estudios para introducir áridos reciclados mixtos, con fuerte carga cerámica, como nuevos áridos en mezclas de hormigón para bloques estructurales, y se emplearon éstos en edificios de hasta 8 plantas. El hormigón empleado contenía entre 200 y 250 kg de cemento/m^3, y sus resistencias variaban entre 8 y 12 MPa. Hasta principios de los 60 se hizo uso de esta técnica, desarrollándose normativa específica para el hormigón como material, en 1951, para la construcción de muros ligeros, en 1955, o para la fabricación de bloques de hormigón con áridos cerámicos. En 1959 colapsó una de los edificios construidos, obligando este hecho a evaluar las estructuras y exigiéndose, en algún caso, refuerzos específicos. En la actualidad, muchos de los edificios construidos, con más de 50 años, siguen en uso (ECOserve Network, Newsletter Combined Volume 2, Issue 3 & 4, March/September 2000).

Una pérdida de interés relativa se produjo tras esa necesidad, aunque la aparición de las nuevas corrientes ligadas al desarrollo sostenible, a partir de la creación del Club de Roma en 1968, revitalizó el reciclaje en general y el específico en el ámbito constructivo. La minimización en la generación de residuos y el reciclaje de los mismos son dos de los pilares que fundamentan la construcción sostenible, de gran vigencia en la actualidad.

La RILEM publicó en 1992 el volumen “Recycling of Demolished Concrete and Masonry”, que proporciona un primer estado del arte amplio sobre la fabricación de hormigón a partir de áridos reciclados procedentes de RCD. Se diferencian en ese texto los áridos obtenidos del reciclaje del hormigón de los surgidos del reciclaje de residuos con medio o alto contenido cerámico. Los primeros habían sido estudiados con más profundidad (Nixon, 1978) y aplicados en EEUU en el ámbito de los pavimentos de carretera. Los RCD mixtos se tratan específicamente, por primera vez, en el congreso de la RILEM “Conference on Demolition and Reuse of Concrete”, desarrollado en Rotterdam en junio de 1985, y adquieren naturaleza propia en el congreso “Second International Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry” (continuación del anterior aunque con el nombre ampliado), que tuvo lugar en Tokio en noviembre de 1988.

Probablemente es Holanda el país, tras la experiencia alemana, que más ha contribuido a desarrollar diversas aplicaciones con áridos reciclados mixtos. La necesidad, una vez más, hecha virtud, encuentra en la carencia de áridos naturales un catalizador excelente para el desarrollo de investigación y aplicaciones. Los profesores Schulz (Institute for Building Materials Testing, de Waldkirch, Alemania) y Hendricks (Road Engineering Division, Rijkswaterstaat, Delft, Holanda) destacan por su liderazgo en este campo. Sientan las bases de los numerosísimos trabajos que a partir de ese momento se desarrollan, y detectan los problemas fundamentales vinculados a la fabricación de hormigón con áridos reciclados mixtos.

En España, el profesor Enric Vàzquez (UPC; Barcelona) es el primero en abordar el estudio del hormigones reciclados en la década de los 80, que se impulsa con más decisión en los 90 y con gran fuerza a partir del siglo XXI. En España, no obstante, se investiga fundamentalmente el árido procedente del residuo de hormigón: los proyectos FEDER del año 1998 abren la reciente explosión de estudios, proyectos y trabajos, que quizá cristalizan definitivamente con el proyecto RECNHOR del Ministerio de Medio Ambiente (principios de siglo) y con el grupo de trabajo a él vinculado que desarrolla el Anejo de Hormigón reciclado de la EHE-08. Se definen de este modo los grupos de investigación más representativos (CEDEX, UPC, UDC, UPM, UPV, UNICAN), que crecen significativamente con la puesta en marcha de dos proyectos recientemente finalizados: el Cenit CLEAM y el MIMAM GEAR. Se asocian así centros tecnológicos (AIDICO, INTROMAC, AITEMIN, LABEIN), nuevas universidades como la UCO y la UNIOVI, y, con gran éxito, empresas constructoras y empresas gestoras de RCD. Éstas últimas han jugado un extraordinario papel en el Proyecto GEAR a él vinculadas a través del Gremio GERD.

En la actualidad, varias referencias son fundamentales a la hora de abordar los estudios sobre los áridos reciclados mixtos. Chen expone que la pérdida de resistencia a compresión cuando se sustituye el 100% de árido grueso depende de la relación a/c y que oscila entre el 25 y el 40% pero que la del módulo de deformación no depende de la relación a/c y es del orden del 30%. Brito de sus ensayos dedujo que la pérdida de resistencia a compresión es del orden del 45% y a flexión del 26%, pero que la fabricación de hormigón con áridos reciclados mixtos es factible y que el problema fundamental es la absorción de estos áridos por lo que es ventajoso saturarlos previamente. Debieb afirma que la pérdida de resistencia a compresión y de módulo de elasticidad es de un 30, 40 o 50 para sustituciones del 100% del árido grueso, del fino o de ambos respectivamente, por lo que recomienda no superar el 25 y el 50% de sustitución para el árido grueso y el fino respectivamente. Cachim concluye que para sustitu-

ciones inferiores al 15% en volumen, no existen pérdidas significativas en las propiedades mecánicas y que para sustituciones del 30% en volumen, las pérdidas son aproximadamente del 20%. Sánchez fabrica un hormigón no estructural con un 100% de árido grueso reciclado obteniendo una pérdida de resistencia a compresión del 25%, una pérdida de módulo de elasticidad del 28% y un aumento de la retracción del 38%, recomendando limitar el uso de estos hormigones a hormigones en masa debido a la elevada retracción. Yang comprueba que para hormigones con un 20% de áridos reciclados cerámicos la resistencia a compresión baja en un 11% y se sustituye el 50% baja hasta un 20%. Por último, Bezerra Cabral propone una expresión para obtener la resistencia a compresión y el módulo de deformación en función de los porcentajes de sustitución de cada tipo de árido reciclado (de hormigón, de mortero y cerámico) y de la fracción (gruesa y fina): su aplicación indica que si se sustituye todo el árido grueso por un árido reciclado mixto con un 40% de material cerámico se obtienen descensos del 30% en la resistencia a compresión y del 36% en el módulo de deformación, y si se sustituye por árido reciclado cerámico se alcanzan descensos del 35% en la resistencia a compresión y del 44% en el módulo de deformación.

8.3.2 Marco legislativo y normativa técnica en España y en Europa

En Europa la normativa sobre áridos reciclados debe enmarcarse en el conjunto de disposiciones que afectan al ámbito de la construcción. Por una parte existe la directiva de productos de construcción 89/106. La Directiva establece que los productos de construcción deben ser apropiados para obras que, en su totalidad y en sus partes aisladas, sean adecuadas para su uso. En este sentido, deben cumplir los requisitos esenciales cuando las obras estén sujetas a una normativa que contenga tales requisitos.

A efectos de la Directiva se entiende por "Producto de Construcción" cualquier producto fabricado para su incorporación con carácter permanente a las obras de construcción, incluyendo tanto las de edificación como las de ingeniería civil.

Los requisitos esenciales que deben satisfacer las obras a la que se incorporan los productos y que, por tanto, influyen en las características técnicas de los mismos son: Resistencia mecánica y estabilidad; seguridad en caso de incendio; higiene, salud y medio ambiente; seguridad de utilización; protección contra el ruido y ahorro de energía y aislamiento térmico.

Según se establece en la Directiva, todos aquellos productos que influyen en al menos uno de los requisitos enumerados, deben llevar el Marcado CE, que asegura que cumplen con las especificaciones técnicas que sobre el producto se han considerado exigibles por el conjunto de países europeos. Estas especificaciones se contemplan en tres tipos de documentos, definidos en la Directiva, y que son:

- Norma armonizada
- Documento de idoneidad técnico europeo (D.I.T.E.)
- Norma Reconocida

La Directiva reconoce al Comité Europeo de Normalización (CEN) como el organismo competente para la preparación de normas armonizadas. Una Norma armonizada, según la Directiva, es una especificación técnica (norma europea o documento armonizado), adoptada previo mandato dado por la Comisión. Se considera que un producto es adecuado para su uso, cuando se ajusta a una norma armonizada, un documento de idoneidad técnica europeo o una especificación técnica no armonizada, reconocida en el ámbito comunitario. A falta de normas armonizadas y de documentos de idoneidad técnica europeos, puede reconocerse que las normas nacionales u otras especificaciones técnicas no armonizadas, constituyen una base adecuada para la presunción del cumplimiento de los requisitos esenciales.

Se establecen en la Directiva dos Sistemas de Certificación de los productos:

- Declaración de conformidad para un producto por parte del fabricante: El fabricante dispone de un sistema de control de producción por el que garantiza que es conforme con las especificaciones técnicas.
- Certificación de Conformidad por parte de un Organismo Autorizado: Además de disponer de un Sistema de Control de la producción en fábrica, interviene en su evaluación y vigilancia un organismo de certificación autorizado.

La elección de un procedimiento u otro de certificación para cada producto o familias de productos es efectuada por la Comisión Europea con arreglo a:

- Importancia del producto respecto a los requisitos esenciales.
- Naturaleza del producto.
- Influencia de la variabilidad de las características del producto.
- Posibilidad de que se produzcan defectos en el producto.

Cualquiera de los procedimientos de certificación aplicados dará lugar al Derecho de Uso del Marcado CE al producto.

El Marcado CE aplicado a los áridos indica que estos productos son conformes con las especificaciones y, por lo tanto, cumplen con los citados requisitos esenciales. El Marcado CE es obligatorio, según las distintas normas armonizadas que, en su caso, les sean de aplicación, para comercializar o usar todo tipo de áridos, independientemente de:

- Su naturaleza: naturales, artificiales, reciclados
- Las características de consumo: externo o interno (autoconsumo y préstamos)
- El sistema de tratamiento, mediante plantas fijas o móviles

Las especificaciones a cumplir también surgen de una cadena reglamentaria, que arranca de las normas que establecen los requerimientos técnicos y constructivos a las obras. Éstos se recogen, en el ámbito europeo y para el caso del hormigón estructural en masa, en el Eurocódigo EC2 (Eurocode 2: Design of concrete structures EN1992, figura 8.64). Cada país puede adoptar códigos nacionales que, de acuerdo al EC2, incluyan particularidades específicas en su territorio de aplicación y que sean aprobados por la Comisión. La citada norma no contempla específicamente el empleo de hormigones con áridos reciclados, pero éstos caben dentro de la norma general de hormigones EN 206, que a su vez es referida en el desarrollo de la norma EN 12620 (Aggregates for Concrete).

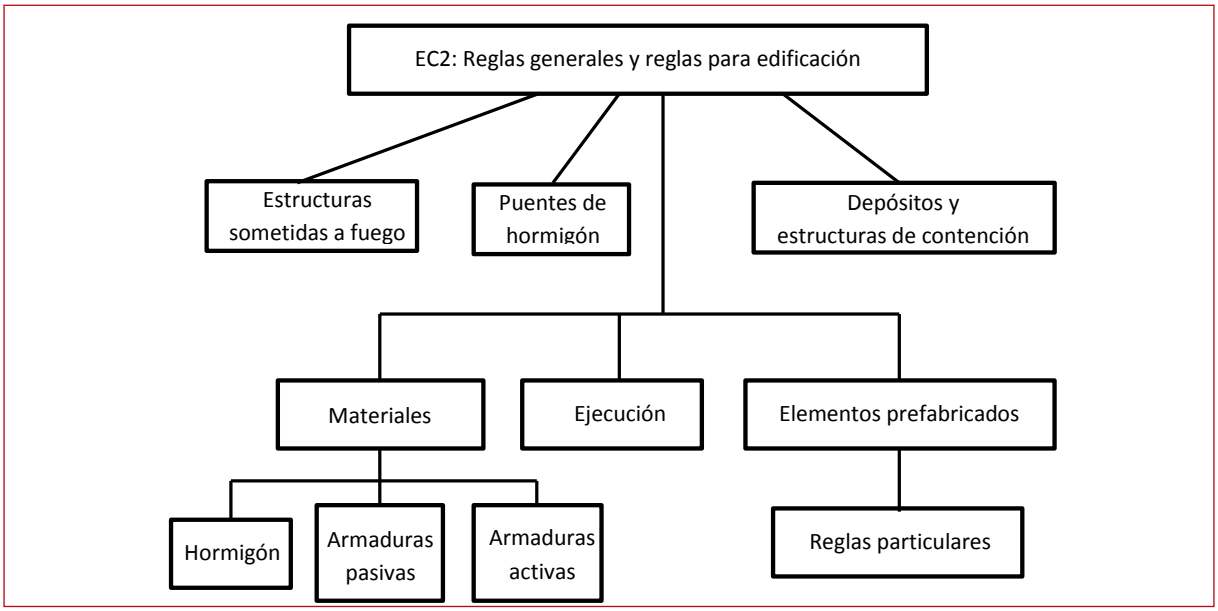


Figura 8.64. Estructura del Eurocódigo 2.

El comité técnico CEN TC 154 es el encargado de la reglamentación ligada a áridos, de acuerdo al esquema incluido en la figura 8.65.

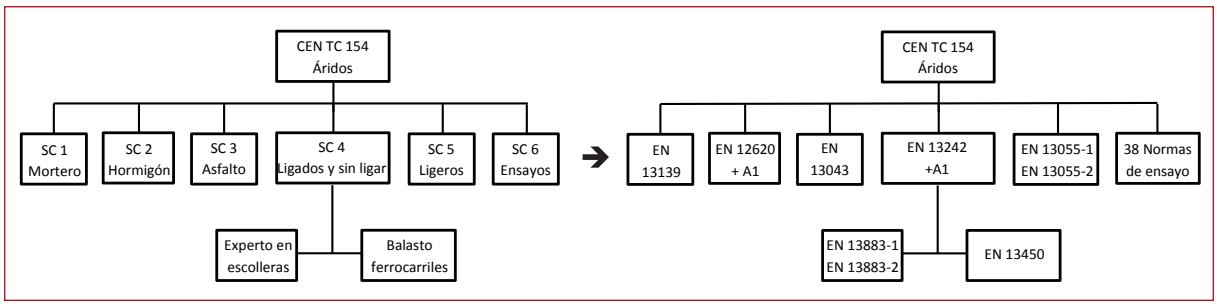


Figura 8.65. Estructura del comité técnico CEN TC 154.

La EN 12620:2002 + A1 (2008) especifica las propiedades de áridos y filleres obtenidos por tratamiento de materiales naturales, artificiales o reciclados y las mezclas de estos áridos, para su uso en hormigón. Abarca áridos que tengan una densidad de partículas mayor que 2,00 Mg/m^3 (2.000 kg/m^3) para todo tipo de hormigón, incluyendo hormigón conforme con la EN 206-1, hormigón utilizado en

carreteras y pavimentos, y el destinado a prefabricación. La norma también abarca el árido reciclado con densidades entre 1,50 Mg/m³ (1 500 kg/m³) y 2,00 Mg/m³ (2.000 kg/m³) y el árido reciclado fino (4 mm), en ambos casos con precauciones específicas. La norma desarrolla el sistema de control de calidad para la producción y prevé la evaluación de conformidad de los productos en esta norma europea.

8.3.2.1 Situación en distintos países

La Situación en España

La norma española de aplicación es la EHE08, que entró en vigor en diciembre de 2008, contiene un anejo específico, el 15, dedicado al hormigón con árido reciclado, únicamente orientado a los áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón.

La Situación en el Reino Unido

La reglamentación británica está totalmente adaptada al EC2.

El Eurocode 2 fue publicado en UK como BS EN 1992. La Parte 1-1 fue publicada en diciembre de 2004 y la 1-2 en febrero de 2005. Con ello se extinguieron las tradicionales BS 8110-1, BS 8110-2 y BS 8110-3. El British Standards Institute (BSI) desarrolló una especificación completa (BS 8500-2) sobre áridos reciclados procedentes de hormigón y su uso en nuevos hormigones.

La Situación en Alemania

También Alemania se encuentra armonizada con el EC2. Las normas vigentes son las siguientes:

- DIN 1045-1 Standard, 2008-08: Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 1: Design and construction
- DIN 1045-2 Standard, 2008-08: Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 2: Concrete - Specification, properties, production and conformity - Application rules for DIN EN 206-1
- DIN 1045-3 Standard, 2008-08: Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 3: Execution of structures
- DIN 1045-4 Standard, 2001-07: Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 4: Additional rules for the production and conformity control of prefabricated elements
- DIN 1045-100 Standard, 2005-02: Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 100: Brick floors.

Se ha desarrollado una norma específica para áridos, con una parte dedicada a los áridos reciclados para hormigones (DIN 4226-100 Aggregates for mortar and concrete - Part 100: Recycled aggregates).

La Situación en Italia

En Italia, la existencia del EC2 y la directiva europea de productos de construcción ha conducido a modificar su normativa nacional. En efecto, el Decreto Ministeriale del 14 de enero de 2008 aprobó la “Norme tecniche per le costruzioni” - NTC 2008. Esta norma, conforme con la EN 12620 de áridos, trata en su capítulo 11 de los materiales para uso estructural y, en concreto, se refiere en 11.1.9 al empleo de áridos reciclados para hormigón. Estos ya aparecían en la Circular 5205 de 2005, que imponía a las empresas públicas y a las sociedades de capital público el requerimiento de cubrir sus necesidades con una cuota anual de productos reciclados en un mínimo del 30%. Recogía además el título A.6: Árido reciclado conforme a la norma UNI EN 12620:2004 para la fabricación de hormigón con clase de resistencia fck ≤ 15 MPa (UNI 8520-2).

La NTC – 2008 estructura el empleado de áridos reciclados de acuerdo con la tabla 8.22.

Origen del material reciclado	Clase del hormigón	Porcentaje utilizado
Demolición de edificios	= C 8/10	100%
Demolición de hormigón en masa y armado	≤ C30/37	30%
	≤ C20/25	60%
Reutilización en industrias de hormigón prefabricado- cualquier clase	≤ C45/55	15%
Reutilización en industrias de hormigón prefabricado- clase > C45/55	Cualquier clase	5%

Tabla 8.22. Empleo de áridos reciclados según la NTC – 2008.

La NTC – 2008 incluye las provisiones de la UNI EN 12620, de la EN 206-1 y de la UNI 8520-1 y -2 (ambas son específicas en Italia para la aplicación de la EN 12620).

La Situación en Francia

Francia asumió, desde el 1 de junio de 2004, la norma NF EN 12620. Respecto al dimensionamiento estructural, conviven con el EC2 las normas BAEL 91 y BPEL 91, que no contienen aspectos relativos a los áridos u hormigones reciclados.

La Situación en Portugal

El decreto-ley 46/2008, relativo a la gestión de RCD, contempla:

- La definición de medidas para prevenir y reutilizar los RCD
- Los costes de vertido
- La posibilidad de reutilizar los RCD en la construcción si se verifican las especificaciones portuguesas o europeas y, en ausencia de tales normas, los requisitos establecidos por el LNEC. En este sentido, el LNEC ha desarrollado una serie de especificaciones, entre las que se encuentra la LNEC E 471 (Guía para el uso de áridos gruesos reciclados en hormigón). Esta guía clasifica los áridos reciclados de acuerdo a la EN 12620, define los requerimientos mínimos para su uso en hormigón y excluye los áridos finos. La clasificación se presenta en la tabla 8.23.

Clase	Constituyente					
	R_c (%)	$R_c + R_u$(%)	R_b (%)	R_a (%)	FL (%)	$X + R_g$ (%)
ARB1	≥ 90		≤ 10	≤ 5	≤ 1	≤ 0,2
ARB2	≥ 90		≤ 30	≤ 5	≤ 1	≤ 0,5
ARC	≥ 90			≤ 10	≤ 1	≤ 1

Tabla 8.23. Requerimientos mínimos para el uso de áridos reciclados en hormigón en Portugal.

Las reglas de aplicación se resumen a continuación:

- Los áridos reciclados no podrán emplearse en hormigones que estén en contacto con agua para el consumo humano.
- Los hormigones reciclados no podrán emplearse en ambientes agresivos.
- ARB1 y ARB2 se podrán emplear en hormigones en masa o armados.
- No se establecen límites al uso de ARB1 y ARB2 como áridos gruesos, si el ambiente es no agresivo. Las condiciones en hormigón armado son las incluidas en la tabla 8.24.

Clase de árido reciclado	Clase de resistencia	Sustitución	Clase de exposición
ARB1	C40/50	25%	X0 XC1 a XC4 XS1 XA1
ARB2	C35/45	20%	

Tabla 8.24. Condiciones de utilización del árido reciclado en hormigones en Portugal.

La Situación en Holanda

En Holanda es de aplicación la EN 12620, y en el campo del hormigón cuenta con una de las especificaciones más avanzadas dado que:

- Se permite la substitución de hasta el 100% de áridos.
- Se incluyen los finos en la substitución.
- Se puede incluir hasta un 50% de árido reciclado procedente de hormigón sin rediseñar la mezcla.
- Se puede incluir hasta un 20% de árido reciclado sin notificación expresa.
- Se puede alcanzar la clase resistente C35/45 según la EN 206-1, lo que desarrolla resistencias de hasta 65 MPa.

Las normas específicas vigentes en Holanda, complementarias a las normas ARMonizadas, son las siguientes: NEN 6720, NEN 805, NEN 5905, NEN 5942 y CUR-Aanbeveling 112.

Otras situaciones de referencia

Son destacables también las situaciones de Dinamarca, Bélgica, Noruega y Suecia, aunque se omiten al considerar que las presentadas cubren adecuadamente el rango de trabajo. Es de destacar el trabajo de la RILEM en este campo, a través del comité técnico 217-PRE (Progress of recycling in the built environment). Dicho comité parte de las recomendaciones del Task Force I of RILEM TC 121-DRG, presentadas en 1993 y pioneras en este ámbito.

8.3.2.2 Análisis y comparación de las diferentes normativas

Tipo de árido y especificaciones

La mayoría de las normativas especifican que el empleo de áridos reciclados para hormigones en masa, que son estructurales, debe quedar restringido a los áridos procedentes de residuos de hormigón. Las tablas 8.25 a 8.27 detallan los tipos de áridos reciclados de las normas más significativas y en la figura 8.66 se incluyen los requerimientos exigidos a los áridos reciclados para su empleo en hormigones tal y como se recoge en la monografía M-11 de ACHE.

Tipo	Origen
Tipo I	Áridos procedentes en su mayoría de escombros de fábrica de ladrillo (definidos como árido cerámico).
Tipo II	Áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón (contenido de cerámicos < 10%).
Tipo III	Áridos compuestos por una mezcla de áridos naturales superior al 80% y áridos Tipo 1 inferior al 10% (o hasta 20% de Tipo II).

Tabla 8.25. Tipos de áridos según la RILEM.

Tipo	Origen
RA	Áridos procedentes de escombros cerámicos.
RCA	Áridos procedentes de escombros de hormigón (contenido de cerámicos < 5%).

Tabla 8.26. Tipos de áridos según la BS.

Tipo	Origen
Tipo 1	Áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón o áridos minerales (≥ 90%), y con un contenido máximo de clinker, ladrillo y/o arenisca calcárea del 10%.
Tipo 2	Áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón o áridos minerales (≥ 70%), y con un contenido máximo de clinker, ladrillo y/o arenisca calcárea del 30%.
Tipo 3	Áridos procedentes en su mayoría de escombros cerámicos (≥ 80%), con un contenido máximo de materiales procedentes de hormigón o áridos minerales del 20%..
Tipo 4	Áridos procedentes de una mezcla de RCD con un contenido mínimo del 80% de material procedente de hormigón, áridos minerales o productos cerámicos.

Tabla 8.27. Tipos de áridos según la DIN.

Requisitos	RILEM			Japón			Bélgica		Hong Kong	Alemania				Reino Unido (BS EN 206-1)		Australia
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	GBSB I	GBSB II		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	RCA	RA	
Densidad seca (kg/m³)	[3]1500	[3]2000	[3]2400	[3]2200			>1600	>2100	[3]2000	[3]2000		[3]1800	[3]1500			>2100
	ISO 6783 y 7033			JIS A1110			NBN B11-255		BS 812.2	DIN EN 1096-6						AS 1141.6
Absorción (%)	≤20	≤10	≤3	≤3	≤5	≤7	<18	<9	<10	≤10[II]	≤15[I]	≤20[II]	-			<6
	ISO 6783 y 7033			JIS A 1110			NBN B11-255		BS 812. 2	DIN EN 1096-6						AS 1141.6
Material (%) de densidad <2200 kg/m³	-	≤10[III]	≤10[III]				-	≤10[III]								
	ASTM C123						-									
Material (%) de densidad <1800 kg/m³	≤10[III]	≤1[III]	≤1[III]				≤10	≤1[IV]								
	ASTM C123						-									
Material (%) de densidad <1.000 kg/m³	≤1[III]	≤0,5[III]	≤0,5[III]				≤1	≤0,5	≤0,5					≤ 0,5	≤ 1	
	ASTM C123						-		BRE Digest 433							
Contenido de metales, vidrios, materiales blandos, betún (%)	≤5	≤1	≤1	[V] ≤10 kg/m³ [V] ≤2 kg/m³			≤1		≤1	Requisitos según Tabla 3.13 del capítulo 3.8.				≤1	≤1	≤2 (incluido ladrillo)
	Visual						Visual		BRE Digest 433							
Índice de lajas (%)									≤40							
									BS 812							
Índice de machaca-bilidad																<30
																AS 1141.21
Índice del 10% de finos									100 kN							
									BS 812. Parte 111							

Requisitos	RILEM			Japón			Bélgica		Hong Kong	Alemania				Reino Unido (BS EN 206-1)		Australia
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	GBSB I	GBSB II		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	RCA	RA	
Contenido de metales (%)	≤1	≤1	≤1													
	Visual															
Contenido de materia orgánica (%)	≤1	≤0,5	≤0,5				<0,5									
	NEN 5933						NBN B11-207									
Contenido (%) de finos (<0,063mm)	≤3	≤2	≤2				<5(VI)	<3(VI)	<4(VII)	<4				<5	<3	
	PrEN 933-1						NBN B11-209		PrEN 933-1	DIN 4226-1						
Pérdida por lavado (%)				≤1												<1%
Resistencia a la helada (%)				≤12	≤40 ≤12(X)	-										
Contenido de arena (<4mm) (%)	≤5(VIII)								<5							
	prEN 933-1								pr EN 933-1							
Contenido de sulfatos (SO_3) (%)	≤1(IX)						<1		<1					≤1	≤1	
	BS 812 Parte 118						NBN B11-254		BS 812 Parte 118					-		
Contenido de cloruros (%)							<0,06		<0,05	<0,04			<0,15			
							NBN B11-202		BS 882	DIN 4226-1						

(I) Absorción a los 10 minutos.

(II) Determinada en condiciones de árido saturado con la superficie seca.
(III) Según la norma belga la densidad considerada es 2.100 kg/m³
(IV) Según la norma belga la densidad considerada es 1.600 kg/m³

(V) Según criterios recogidos en el apartado 3.7 de la monografía M-11 de ACHE.
(VI) Finos menores de 0,08 mm.

(VII) Finos menores de 0,075 mm

(VIII) Si el contenido de arena es superior al límite, la arena que incorpora el árido reciclado se considerará conjuntamente con la fracción total de la arena.
(IX) Sulfatos solubles en agua.

(X) Especificación cuando se requiera resistencia a la helada con áridos de absorción ≤3% para obra civil.

NOTA: Las casillas sombreadas corresponden a aquellos tipos de áridos procedentes mayoritariamente de hormigón

Figura 8.66. Especificaciones incluidas en la monografía M-11 de ACHE.

Una comparación entre las distintas normativas se presenta en la tabla 8.28, que refleja con claridad las tendencias y situación actuales.

				Áridos gruesos			Uso del árido fino
País	Norma	Tipo de árido		Estructural		No estructural	
		Denominación Norma	Categoría GEAR	Sustitución máxima (%)	Resistencia máxima (MPa) hormigón reciclado	Sustitución máxima (%)	
España	EHE-08	Residuo de hormigón	ARH	20	40	100	no
Portugal	E 471 - 2006	ARB1	ARH	25	40	100	no
		ARB2	ARMh	20	35	100	no
		ARC	ARMc			100	no
Reino Unido	BS 85002	RCA	ARH		40		
		RA	ARMc			100	
Alemania	DIN 4226-100	Tipo 1	ARH	45			
		Tipo 2	ARMh	25			
		Tipo 3	ARMc				
Italia	NTC 2008	Demolición hormigón	ARH	30	30		
				60	20		
		Demolición edificios	ARMc			100	
Francia							
Suiza	SN 640 744	Hormigón demolición	ARH				
		Material demolición mezclado	ARMc				
Holanda	NEN 5905	Procedentes de hormigón	ARH	100	45		algunos casos
		Mezcla cerámicos y hormigón	ARMh y ARMc (Horm > 50%)	20	25		
		A. reciclados cerámicos	ARMc				
Bélgica	GBSB-I						
	GBSB-II						
Japón	JIS A 5021:2005	Clase H					algunos casos
	JIS A 5022:2007	Clase M					
	JIS A 5023:2006	Clase L					

		Áridos gruesos					Uso del árido fino
País	Norma	Tipo de árido		Estructural		No estructural	
		Denominación Norma	Categoría GEAR	Sustitución máxima (%)	Resistencia máxima (MPa) hormigón reciclado	Sustitución máxima (%)	
Australia	HB 155-2002	RCA	ARH	30			
		RCM	ARMh			100	
Hong Kong				20	35	100	

Tabla 8.28. Comparación de distintas normativas.

Se observa claramente que la tendencia general se orienta a la sustitución del árido grueso por árido reciclado, impidiéndose el uso de arenas y finos reciclados. Las resistencias especificadas para el hormigón reciclado no superan, en ningún caso, los 25 MPa en caso de emplear áridos reciclados mixtos. Ello acota su uso a los hormigones no estructurales o de limpieza y a los estructurales con resistencia máxima de 25 MPa.

8.3.2.3 Situación actual de la normativa española

Actualmente, la normativa vigente en España referente a hormigones en masa se recoge en la EHE-08, y solo considera el árido reciclado procedente del machaqueo del hormigón estructural. En el Anejo 15 ("Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados") se aconseja que para el hormigón estructural el contenido de árido grueso reciclado se limite al 20% en peso. Sin embargo, en el Anejo 18 ("Hormigones de uso no estructural") se indica que para hormigones no estructurales el porcentaje de sustitución de árido grueso puede aumentar hasta el 100%.

Propiedades de los áridos

Las propiedades exigidas en la EHE-08 para los áridos reciclados y para la combinación del árido grueso natural y reciclado son las recogidas en la tabla 8.29.

Ensayos de los áridos

Los ensayos en hormigón en masa son los propios del hormigón estructural, y por tanto los aplicables a sus áridos. Tal como se destacaba en el documento final del grupo de trabajo de elaboración del anejo de la EHE, las frecuencias de control y los lotes deben ser más estrictos. Las frecuencias de los ensayos recogidas en la EHE-08 se presentan en la tabla 8.30.

Recomendaciones en elaboración y puesta en obra

Las observaciones que recoge el anejo 15 de la EHE son un buen ejemplo de las condiciones de ejecución específicas que introduce el empleo de áridos reciclados (Artículo 71º Elaboración y puesta en obra del hormigón)

Parámetro	Propiedad	Hormigón estructural		Hormigón no estructural
		Árido grueso reciclado	Árido grueso conjunto	Árido grueso reciclado
Impurezas	Material cerámico	≤ 5		≤ 5
	Partículas ligeras	≤ 1		≤ 1
	Asfalto	≤ 1		≤ 1
	Otros materiales (vidrio, plásticos, metales, etc.)	≤ 1		≤ 1

Parámetro	Propiedad	Hormigón estructural		Hormigón no estructural
		Árido grueso reciclado	Árido grueso conjunto	Árido grueso reciclado
Geométrico	Tamaño mínimo	4 mm		4 mm
	Contenido en desclasificados inferiores	≤ 10%		≤ 10%
	Contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm	≤ 5%		≤ 5%
	Índice de lajas	< 35	< 35	< 35
Físico	Contenido de terrones de arcilla	≤ 0,6%	≤ 0,25%	≤ 0,6%
	Absorción	≤ 7%	≤ 5%	≤ 7%
	Coeficiente Los Ángeles	≤ 40	≤ 40	≤ 40
	Pérdida de peso con sulfato magnésico	≤ 18 %	≤ 18 %	≤ 18 %
	Sulfatos solubles	≤ 0,8 %	≤ 0,8 %	≤ 0,8 %
	Cloruros totales	≤ 0,05 %	≤ 0,05 %	≤ 0,05 %
	Contenido total compuestos de azufre	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %
	Partículas ligeras	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %

Tabla 8.29. Propiedades exigidas por la EHE-08 al árido grueso reciclado y al árido conjunto.

Propiedad	Norma	Frecuencia	
Granulometría. Desclasificados inferiores	UNE-EN 933-1	1/semana	Cada 2.000 t
Coeficiente de forma	UNE-EN 933-4	1/mes	Cada 10.000 t
Contenido de finos	UNE-EN 933-2	1/semana	Cada 2.000 t
Coeficiente de Los Ángeles	UNE-EN 1097-2	1/mes	Cada 2.000 t
Absorción	UNE-EN 1097-6	1/semana	Cada 2.000 t
Estabilidad frente a soluciones de $MgSO_4$	UNE-EN 1367-2	1/6 meses	Cada 10.000 t
Terrones de arcilla	UNE 7133	1/semana	Cada 2.000 t
Partículas ligeras	UNE 7244	1/mes	Cada 10.000 t
Determinación de compuestos de azufre (SO_3)	UNE-EN 1744-1	1/3 meses	Cada 10.000 t
Determinación de sulfatos solubles en ácido	UNE-EN 1744-1	1/3 meses	Cada 10.000 t
Determinación de cloruros totales	UNE-EN 1744-1	1/3 meses	Cada 10.000 t
Impurezas	UNE-EN 933-11	1/semana	Cada 2.000 t

Tabla 8.30. Frecuencia de ensayos de control de producción.

Instalaciones de dosificación

La absorción de agua del árido grueso reciclado es elevada, por lo que para hormigones con más del 20% de árido reciclado es aconsejable utilizar los áridos en condiciones de saturación. Para mantener la humedad, se pueden instalar en las plantas de dosificación sistemas que humedezcan los áridos en las cintas transportadoras o aspersores de agua en las tolvas de los áridos.

Fabricación del hormigón

Se recomienda que el hormigón con árido reciclado se fabrique en central amasadora.

Suministro y almacenamiento de materiales componentes

Se deberán establecer acopios separados e identificados para los áridos reciclados y los áridos naturales.

Dosificación de materiales componentes

Los métodos de dosificación habituales para los hormigones convencionales son válidos para los hormigones reciclados con un porcentaje de árido reciclado no superior al 20%. En cualquier caso, se recomienda realizar ensayos previos para ajustar la dosificación.

En hormigones reciclados con sustituciones superiores al 20%, y debido a la menor calidad de los áridos reciclados, para mantener la misma resistencia y durabilidad que un hormigón convencional, el hormigón fabricado con áridos reciclados necesitará un contenido mayor de cemento o una menor relación agua/cemento en su dosificación.

Igualmente, para conseguir la consistencia deseada, suele ser necesario añadir más agua a la dosificación para compensar la mayor absorción del árido reciclado. Otras posibilidades pueden ser utilizar aditivos plastificantes o superplastificantes en la dosificación o presaturar el árido reciclado.

Amasado del hormigón

El amasado del hormigón con áridos reciclados en estado seco puede requerir más tiempo que el de un hormigón convencional, lo que permite la humectación de los áridos con objeto de evitar que la absorción de agua por parte del árido reciclado afecte a la consistencia del hormigón.

No obstante, el tiempo de amasado tampoco debe ser excesivamente prolongado para evitar la generación de finos debido a la friabilidad del mortero adherido del árido reciclado. Se recomienda ajustar el tiempo de amasado realizando ensayos característicos.

Designación y características

En la designación del hormigón reciclado quedará reflejado que se trata de hormigón fabricado con áridos reciclados, tal y como se especifica en el apartado 39.2 del presente Anejo.

Transporte y suministro del hormigón

El volumen del hormigón reciclado transportado no excederá en ningún caso los dos tercios del volumen total del tambor del elemento de transporte.

En hormigones con sustituciones superiores al 20% de árido reciclado, puede ser conveniente la realización de ensayos característicos para evaluar la variación de la consistencia durante el transporte, y compensar dicha variación con la incorporación de aditivo plastificante o superplastificante en obra, siguiendo las indicaciones del fabricante del hormigón.

Puesta en obra del hormigón

En el caso del hormigón bombeado, puede ocurrir que la presión de bombeo altere la homogeneidad de las características del hormigón reciclado, debido a su influencia sobre la absorción del agua por parte del árido reciclado. Se deberá, por tanto, ajustar la dosificación del hormigón realizando ensayos característicos y tomando muestras a la salida de la tubería.

8.3.3 Metodología, resultados y conclusiones de la investigación realizada en el Proyecto GEAR

Cuando se inició este trabajo existían muchos estudios e investigaciones referentes a la fabricación de hormigón con áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón (ARH). En consecuencia, la mayor parte de los países desarrollados han incluido en su normativa este tipo de hormigones. No ocurre lo mismo con el hormigón fabricado con áridos reciclados mixtos (ARMh y ARMc), de los que existe poca bibliografía al respecto y que a continuación se presentan.

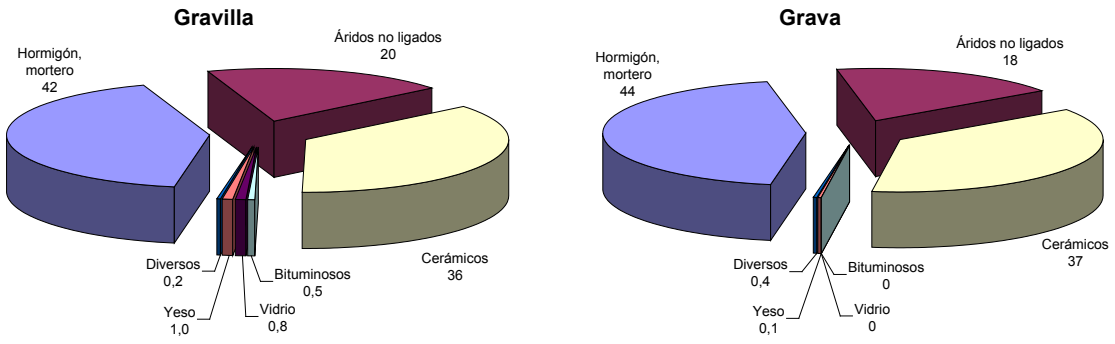
De los estudios realizados para hormigones con ARH se extrae la conclusión de que la utilización del árido fino reciclado resulta inconveniente por varias razones, entre las que destaca el notable aumento de la retracción por secado y de la fluencia debido a que en su dosificación necesitan mayor cantidad de agua.

Teniendo en cuenta las propiedades de los áridos reciclados mixtos no debe plantearse como objetivo la obtención de hormigones de altas prestaciones. Por lo tanto, el marco de trabajo de este documento se va a restringir a la fabricación de hormigones en masa con áridos gruesos reciclados mixtos con los usos siguientes: hormigón estructural con resistencia característica menor o igual que 30 MPa, hormigón no estructural y hormigón de limpieza.

8.3.3.1 Materiales y métodos

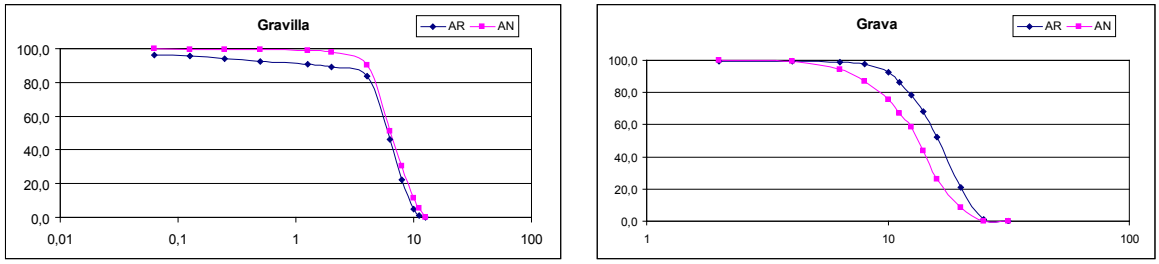
Las principales propiedades de los áridos reciclados y naturales utilizados son las recogidas en las figuras 8.67 y 8.68 y en la tabla 8.31.

Destaca de modo notable la absorción de los ARM, cuyo valor se origina por la presencia de mortero adherido y de componentes cerámicos.



(a) Gravilla. (b) Grava.

Figura 8.67. Composición de los áridos reciclados.



(a) Gravillas. (b) Gravas.

Figura 8.68. Granulometría de los áridos naturales y reciclados.

Propiedad	Árido reciclado	Árido natural	Limitación EHE-08
Humedad (%)	8%		
Absorción (%)	11%	0,5%	≤ 5% ó 7%
Índice de lajas	30		< 35
Desgaste Los Ángeles	49	36	≤ 40
Sulfatos solubles en ácido	0,32%		≤ 0,8%

Tabla 8.31. Principales propiedades de los áridos reciclados utilizados.

Como patrón para el estudio del hormigón estructural se ha considerado un hormigón de resistencia característica de 25 MPa y para la del hormigón no estructural uno de resistencia característica de 20 MPa. A fin de de poder comparar los resultados obtenidos para distintos porcentajes de sustitución optó por utilizar una única dosificación, adoptadas de plantas de hormigón convencionales.

En los primeros ensayos realizados (solo para el hormigón de resistencia característica 25 MPa), el cemento utilizado fue CEM I 42,5R, y el objetivo primordial era estudiar la viabilidad de realizar hormigón con árido reciclado mixto. De los resultados obtenidos se comprobó que la resistencia característica alcanzada era adecuada, incluso por encima de los objetivos marcados. A raíz de estos ensayos se consideró más conveniente utilizar un cemento CEM II, decisión justificada por los siguientes motivos:

- El CEM II es más acorde con exigencias resistentes como las marcadas como objetivo, y de hecho esta es la práctica habitual en las empresas del sector consultadas.
- Las adiciones retrasan el fraguado y aportan un incremento de docilidad y trabajabilidad.
- En el diseño de una dosificación que emplea residuos reciclados, el uso de un cemento con menor huella ecológica (las emisiones de CO_2 son más reducidas y reutiliza subproductos industriales) mejora la sostenibilidad del producto.

Por lo tanto se han utilizado dos dosificaciones y en una de ellas dos tipos de cemento. En la tabla 8.32 se incluyen las dosificaciones utilizadas.

Material	Peso (kg/m³ de hormigón)		
	HM-25 I	HM-25 II	HM-20 II
Cemento CEM I 42,5R	290		
Cemento CEM II/A-M(V-L) 42,5R		290	250
Arena 0 – 6 mm	1050	1050	1090
Gravilla 6 – 12 mm	290	290	290
Grava 12 – 25 mm	550	550	550
Aditivo superplastificante: MELCRET 222	1% del peso de cemento	1% del peso de cemento	1% del peso de cemento

Tabla 8.32. Dosificaciones utilizadas.

La relación agua/cemento diseñada fue de 0,60. Como los áridos reciclados tienen mayor absorción que los áridos naturales, y por los resultados obtenidos en una primera fase de esta investigación y por otras investigaciones publicadas, se sabe que para que el cono de Abrams se mantenga constante para las distintas sustituciones, la cantidad de agua a añadir tiene que aumentar a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. Por todo esto, la cantidad de agua ha sido la necesaria para obtener una relación agua/cemento de 0,6 más la necesaria para saturar los áridos.

8.3.3.2 Resultados obtenidos

En la primera fase (estudio de la viabilidad de estos hormigones), se realizaron 3 amasadas de la dosificación HM-25 I, una para cada porcentaje de sustitución estudiado. En la segunda fase, la del estudio de las diferentes propiedades del hormigón, se realizaron 9 amasadas de cada uno de las dos dosificaciones, con el objetivo de obtener resultados de distintas propiedades físico-mecánicas. Los resultados medios de los ensayos realizados se presentan en la tabla 8.33.

	HM-25 I			HM-25 II			HM-20 II		
Porcentaje de sustitución	0	50	100	0	50	100	0	50	100
Cono (cm)	2	2	1	8	6	4	0 - 1	0 - 1	0 - 1
Densidad del hormigón fresco (kg/m³)		2325	2251	2404	2324	2242	2427	2342	2267
Densidad del hormigón endurecido 28 días (kg/m³)	2386	2306	2234	2399	2296	2201	2418	2329	2247
Resistencia a compresión cilíndricas a 7 días (MPa)	29.59	25.50	22.66				26,71	24,28	19,43
Resistencia a compresión cilíndricas a 28 días (MPa)	34.19	31.03	27.88	30,06	25,85	22,17	31,04	28,41	24,89
Resistencia a compresión cúbicas a 7 días (MPa)	34.15	32.33	30.11				33,50	29,05	23,87
Resistencia a compresión cúbicas a 28 días (MPa)	39.20	40.59	34.56	38,03	32,74	29,70	38,74	36,73	30,29
Resistencia a tracción indirecta a 7 días (MPa)				2,296	2,336	2,157			
Resistencia a tracción indirecta a 28 días (MPa)				2,697	2,555	2,626	2,959	2,273	2,342
Módulo deformación (MPa)				29000	24000	19500	30500	25000	20000
Coeficiente de Poisson				0,16	0,18	0,16	0,18	0,15	0,15

Tabla 8.33. Resultados medios obtenidos.

También se realizaron ensayos de profundidad de penetración de agua bajo presión porque se consideró que es un ensayo básico relacionado directamente con la durabilidad, ya que al tratarse de hor-

migón en masa, la ausencia de armadura garantiza que no existen problemas de corrosión.

Los ensayos se han realizado para las dosificaciones HM-25 II y HM-20 II y para los tres porcentajes de sustitución. Los resultados obtenidos se incluyen en la tabla 8.34, apreciándose que, en la mayor parte de los casos, una mayor sustitución conlleva una penetración menor. Esto puede ser debido bien a que el árido reciclado no estaba saturado y podía admitir más agua, o bien a que aunque la relación agua/cemento es mayor cuanto mayor es el porcentaje de sustitución (se añadió el agua necesaria para saturar los áridos) la relación agua eficaz/cemento no lo es.

		HM-25			HM-20		
Porcentaje de sustitución		0	50	100	0	50	100
Profundidad de penetración máxima (mm)	Máxima (Z_3)	71	50	35	33	34	41
	Media (Z_m)	61	42	32	33	34	32
Profundidad de penetración media (mm)	Máxima (T_3)	46	27	21	27	27	20
	Media (T_m)	40	23	19	25	26	17

Tabla 8.34. Profundidad de penetración de agua bajo presión.

Por último, se realizaron ensayos para obtener los diagramas tensión-deformación. Estos diagramas solo son necesarios para el cálculo de los hormigones estructurales, por lo que solo se hicieron para el HM-25 II. Se ensayaron dos probetas de 3 amasadas distintas (una de cada porcentaje de sustitución) y los diagramas obtenidos se representan en la figura 8.69.

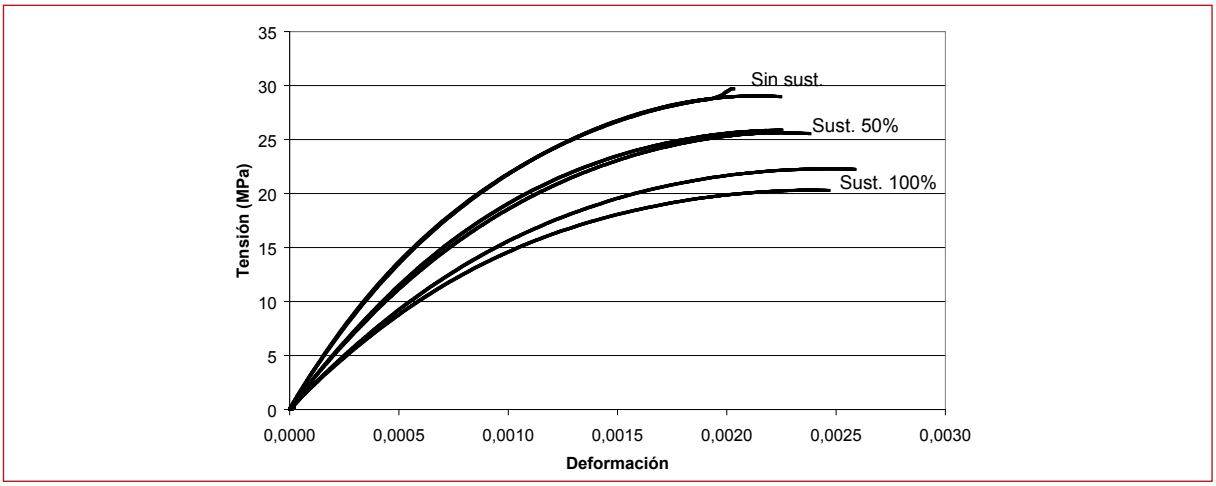


Figura 8.69. Diagramas tensión–deformación.

8.3.3.3 Conclusiones

A la vista de los resultados incluidos anteriormente, la primera conclusión que debe formularse es que la fabricación de hormigones con áridos reciclados mixtos de hormigón o cerámicos es técnicamente posible.

Dosificación y trabajabilidad

Los métodos de dosificación utilizados para el hormigón convencional también son válidos para los hormigones reciclados con áridos gruesos reciclados mixtos (AGrM), excepto en la cantidad de agua a aportar. Esto se debe a que la absorción de agua de los AGrM es mucho mayor que la de los áridos gruesos naturales (AGN), por eso la trabajabilidad disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de AGrM por AGN, o dicho de otra manera, para obtener la misma trabajabilidad debe añadirse más agua. Esta es la razón por la que es recomendable que los AGrM se saturen previamente al amasado del hormigón.

La cantidad de agua que debe añadirse para que la trabajabilidad sea la misma es difícil de calcular, ya que no se conoce la cantidad de agua eficaz necesaria en las amasadas. Por otro lado, tampoco es conveniente introducir más agua que la necesaria porque esto hará bajar la resistencia del hormigón, así que será conveniente realizar distintas pruebas en la dosificación hasta ajustar la cantidad de agua conveniente. Como primera aproximación podrá

añadirse de más la cantidad de agua necesaria para saturar los áridos, siendo esta afirmación más precisa cuanto mayor sea la humedad con la que se introduzcan los áridos.

También se ha constatado que los hormigones con AGrM tienen un cono de Abrams pequeño pero que, sin embargo, su compactación por vibrado de inmersión es fácil, por lo que quizás el ensayo del cono de Abrams no sea el más adecuado para estos hormigones.

Densidad

Al igual que para los hormigones convencionales, para los hormigones fabricados con AGrM, la densidad del hormigón fresco es un poco mayor que la del hormigón a los 28 días y prácticamente no depende de la dosificación.

La densidad, tanto del hormigón fresco como la del hormigón endurecido, disminuye linealmente a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de AGrM por AGN, lo que se justifica por la menor densidad de los AGrM. Esta disminución de la densidad puede acotarse entre un 0,6 y un 0,8% por cada 10% de sustitución de árido grueso.

Resistencia a compresión

Los coeficientes para pasar de probeta cúbica a cilíndrica son menores para el hormigón con AGrM que para el que contiene AGN, lo que es coherente con la mayor deformabilidad de los hormigones con árido reciclado que con áridos naturales. Un intervalo razonable para este coeficiente está comprendido entre 0,80 y 0,85.

La resistencia se adquiere más lentamente en los hormigones reciclados que en el hormigón convencional, probablemente provocada por el aumento de la cantidad de agua. Esto se pone de manifiesto en que el coeficiente de paso por la edad (de 7 a 28 días) disminuye cuando aumenta la cantidad de AGrM.

La resistencia a compresión disminuye a medida que aumenta la cantidad de AGrM utilizados. Aproximadamente, la pérdida de resistencia es lineal con el porcentaje de sustitución de AGrM por AGN, estando comprendida entre el 2 y el 4% por cada 10% de sustitución.

Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta es, aparentemente, independiente de la cantidad de AGrM que se utilice.

Módulo de deformación longitudinal

El módulo de deformación disminuye casi linealmente cuando aumenta el porcentaje de sustitución de AGrM por AGN, pudiéndose cifrar esa pérdida entre el 3 y el 4% por cada 10% de porcentaje de sustitución.

Si para el cálculo del módulo de deformación secante se quiere utilizar la fórmula habitual como el producto de un coeficiente, que depende del tipo de árido, por la raíz cúbica de la resistencia media a compresión tal y como se indica en la fórmula (1)

$$E_{cm} = K \times \sqrt[3]{f_{cm}} \qquad (1)$$

Se debe tener presente que este coeficiente disminuye linealmente con el porcentaje de sustitución aproximadamente entre un 2,5 y un 3% por cada 10% de porcentaje de sustitución.

Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson no varía con el porcentaje de sustitución, considerando válido los valores habituales existentes en la bibliografía. Sirvent da un intervalo entre 0,15 y 0,20, el Código Modelo entre 0,14 y 0,26, etc. Sin embargo, casi todos dan un valor medio de 0,20 y quizás debería contemplarse un valor algo menor, entre 0,15 y 0,18.

Profundidad de penetración de agua bajo presión

En general, puede concluirse que una mayor sustitución conlleva una penetración menor. Esto puede ser debido bien a que el árido reciclado no estaba saturado y podía admitir más agua, o bien a que aunque la relación agua/cemento es mayor cuanto mayor es el porcentaje de sustitución (se añadió el agua necesaria para saturar los áridos) la relación agua eficaz/cemento no lo es.

Para evitar problemas de durabilidad, los hormigones con áridos reciclados mixtos deben limitarse a los ambientes I y II recogidos en la EHE-08, ya que estos hormigones son más porosos que los convencionales.

Comportamiento tenso-deformacional

Al igual que para los hormigones con AGN, para los hormigones con AGrM los diagrama tensión-deformación se pueden ajustar con suficiente precisión tanto con una curva polinomial de 2º orden como con una de 3º orden. La de 2º orden ajusta mejor la pendiente en origen (representativa del módulo de deformación longitudinal) y la de 3º orden la tensión máxima y la deformación de pico.

En estas curvas se puede apreciar principalmente dos cuestiones, que la pendiente de la curva disminuye a medida que aumenta la sustitución del árido grueso, corroborando los resultados obtenidos con los ensayos de módulo y que la deformación de rotura aumenta con el porcentaje de sustitución, aproximadamente entre un 2% por cada 10% de porcentaje de sustitución.

Con la finalidad de poder realizar un análisis más exhaustivo, también se representaron los diagramas unitarios, que se obtienen dividiendo los valores de tensión por el valor de la tensión máxima alcanzada, de forma que todos los diagramas unitarios finalizan en el valor unidad. La comparación de estos diagramas evidencia bien la mayor deformación de pico que se alcanza cuanto mayor es el porcentaje de substitución. También representa la pérdida de rigidez y es de destacar la similitud de las curvas.

8.4. Obras históricas realizadas en España

En cualquier relación de obras históricas realizadas en España en las que se hayan utilizado áridos reciclados en la fabricación de hormigón se deben incluir el Proyecto Tato 14 en Madrid, el puente de Manises en Valencia y la pasarela del Fórum en Barcelona, si bien debe tenerse presente que en los tres casos el árido reciclado utilizado procede de escombros de hormigón y en ninguno de ellos se utilizó árido reciclado mixto.

El Proyecto Tato 14, edificio sito en la calle Tato nº 14 de Madrid, es la primera experiencia en España de puesta en obra de áridos reciclados en el 100% de la estructura de un edificio, ya que todos los hormigones se fabrican con grava reciclada de hormigón.

Los hormigones se fabrican con dos tipos de gravas recicladas, una procedente de la demolición de la cimentación de las perfumerías GAL (Alcalá de Henares), y la otra producida en la planta La Palentina (no se tienen datos del hormigón de procedencia). Aunque para algunos elementos estructurales se selecciona en origen y en otros no, en la figura 8.70 se indica que tipo de grava se utilizó en cada elemento. Los hormigones puestos en obra son: un H-35 con una sustitución del 10% para las zanjas perimetrales, un H-25 con una sustitución del 10% para las zapatas, los muros, la solera y los forjados y un H-25 con una sustitución del 30% para los pilares y la rampa del garaje (zanja del muro, muro y solera). En la figura 8.71 se incluye un esquema de la estructura del edificio.

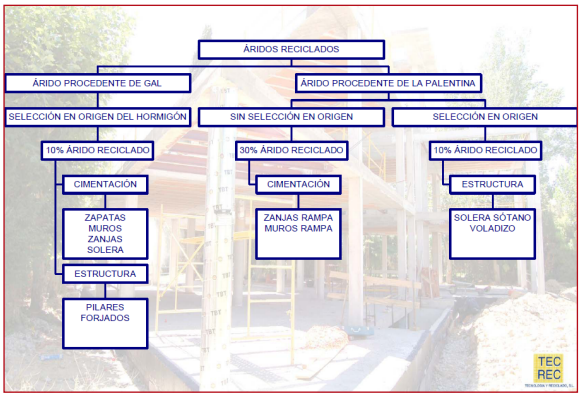


Figura 8.70. Esquema de la grava reciclada utilizada en el Proyecto Tato 14.

El hormigón se fabricó en central (figura 8.72) y se colocó en obra por vertido directo (figura 8.73).

Para todos los hormigones reciclados se realizaron ensayos de rotura a compresión. Las resistencias medias obtenidas a 28 días se presentan a continuación, ligadas a cada tipo de hormigón:

- H-35 con sustitución del 10%
  - zanjas perimetrales: 41,4 MPa
- H-25 con una sustitución del 10%
  - zapatas: 36,3 MPa
  - muros 1 y 2: 32,2 y 26,3 MPa
  - solera 30,1 MPa
  - forjado primera planta: 31,0 MPa
  - forjado segunda planta: 27,7 MPa
  - forjado torreón: 32,0 MPa
- H-25 con sustitución del 30%
  - rampa de garaje: 28,1 y 25,2 MPa
  - pilares 28,1 MPa.

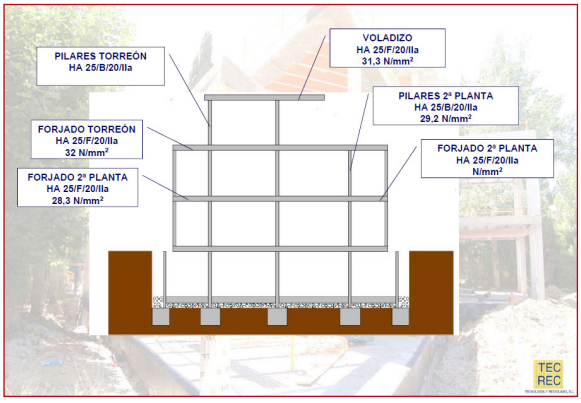


Figura 8.71. Esquema de la estructura del Proyecto Tato 14.



Figura 8.72. Fabricación del hormigón en central.

El puente atirantado sobre el río Turia en Manises-Paterna (Valencia) es otra de las obras pioneras de utilización de hormigones reciclados. En este proyecto se reutilizó la totalidad de la antigua estructura, parte en el tablero del mismo y el resto en el bulevar adyacente.

Aunque existían algunos datos de proyecto respecto al hormigón utilizado, con el fin de tener un conocimiento adecuado acerca de la resistencia y el módulo de deformación del hormigón de la estructura antigua se extrajeron 5 testigos, en 3 vigas diferentes, en un pilar y en la losa. La información se completó mediante la realización de ensayos no destructivos (esclerómetro y velocidad de ultrasonidos), corroborándose la existencia de distintas calidades en los diferentes elementos (mala en pilas y viga en pi, regular en el dintel de la pila 3 y buena o excelente en vigas y losa). Por ello se efectúo una demolición selectiva (figura 8.74).

Al escombro originado (figura 8.75) se le aplicaron los siguientes procesos: tamizado inicial, con el fin de eliminar los finos y las arenas, trituración, para lo que se usó una trituradora de impactos y separación magnética, para eliminar los materiales metálicos. En la figura 8.76 se observa un acopio de los áridos reciclados y en la 8.77 un detalle de los mismos.



Figura 8.73. Puesta en obra del hormigón.

Las condiciones que debían cumplir los áridos reciclados para fabricar hormigón estructural fueron:

- Utilización de árido grueso
- Sustitución máxima del 20%
- La mezcla de árido natural y árido reciclado debían cumplir todas los requisitos de la EHE
- La resistencia media del hormigón de origen debía ser superior a 25 MPa
- La resistencia característica máxima del hormigón reciclado debía ser 50 MPa
- Realización de estudios específicos en ambientes distintos a IIa y IIb.

Así, el escombro utilizado en el hormigón del nuevo puente se obtendría de las vigas (donde se obtuvieron las resistencias mayores) y el resto se reservaría para el bulevar. Los elementos del puente en el que se colocó hormigón reciclado fueron: hormigón de limpieza (8,7 m^3 de árido reciclado en 87 m^3 de hormigón), cimentaciones (240 m^3 de árido reciclado en 2.400 m^3 de hormigón), pantallas (264 m^3 de árido reciclado en 2.640 m^3 de hormigón), estribos (24 m^3 de árido reciclado en 240 m^3 de hormigón), pilono (58 m^3 de árido reciclado en 580 m^3 de hormigón), imposta (4 m^3 de árido reciclado en 43 m^3 de hormigón) y losa (130 m^3 de árido reciclado en 1.300 m^3 de hormigón).



Figura 8.74. Demolición selectiva.



Figura 8.75. Escombros de hormigón.

Pasarela del Fòrum de Barcelona

El desarrollo del Fòrum – 2004 en Barcelona supuso la recuperación de la zona extrema de la Avda.

Diagonal en Barcelona. Entre sus obras destaca el Puente de Marina Seca, pasarela peatonal sobre la Marina de Sant Adrià que se construyó empleando hormigón reciclado en alguno de sus elementos. La pasarela es de dos vanos de 140 y 50 m respectivamente, ambos celosías tipo Warren cuyo tablero, de 6 m de ancho, se realizó con hormigón reciclado (figura 8.78).



Figura 8.76. Acopio de áridos reciclados.



Figura 8.77. Detalle del árido reciclado.

Se utilizó una única fuente de árido reciclado (fracción 4/25 mm), que presentaba una absorción media de 6,7%, no tenía cloruros ni sulfatos y su coeficiente Los Ángeles era del 30%. Más del 95% del árido reciclado procedía de hormigón. La cantidad de finos inferiores a 0,063 mm no superó el 1% y la cantidad de finos menores de 4 mm fue del 10%, por lo que realizó una ligera corrección en la cantidad de arena que no afectó a los resultados.

Se utilizó una sustitución del 20% de árido reciclado presaturado, con un grado de saturación estimado entre el 80% y el 90%. Se emplearon 340 kg/m^3 de cemento, la misma cantidad que para hormigón convencional. La relación agua/cemento se mantuvo constante, obteniéndose conos de 7,5 cm muy uniformes.

Las resistencias medias a compresión obtenidas fueron de 41 MPa a 7 días (43,3 MPa para el hormigón convencional) y 47,8 MPa a 28 días (51,6 MPa para el convencional). Los resultados de los ensayos de penetración de agua fueron adecuados, y la puesta en obra del hormigón reciclado tampoco presentó ninguna dificultad.



Figura 8.78. Pasarela Fórum de Barcelona.

8.4.1 Obras adscritas al Proyecto GEAR

En esta proyecto solo se han controlado dos obras de hormigones en masa con áridos mixtos: la Urbanización de O Bertón y la renovación de las redes de saneamiento de San Pablo, las dos en Ferrol (A Coruña). Existen más obras en las que se utiliza hormigón, como un edificio en la calle Mayor de Sástago de la Diputación de Zaragoza, pero al ser estructural los áridos utilizados eran ARH.

En el proyecto de la Urbanización de O Bertón, la base para las aceras era de hormigón en masa HM 300/B/20. Tanto la empresa contratista UTE Bertón (Comsa-Aopil), como el promotor de la obra, Ayuntamiento de Ferrol, decidieron realizar un tramo experimental con hormigón reciclado.

Se realizaron cuatro hormigones reciclados diferentes, todos ellos con la misma dosificación que el hormigón original salvo que parte de los áridos gruesos naturales se sustituyeron por áridos gruesos reciclados. Dos de los hormigones se fabricaron con áridos reciclados procedentes de hormigón (ARH), uno con una sustitución del 41% y el otro del 69%. Los otros dos se elaboraron con áridos reciclados mixtos cerámicos (ARMc) con las mismas sustituciones que los anteriores. La fabricación de todos los hormigones se realizó en la misma central y el transporte a obra en hormigoneras habituales.

Se actuó exactamente igual con todos los hormigones, tanto si contenían ARH como ARMc, pero esta explicación se centrará en estos últimos al ser el objeto de estudio. La colocación en obra fue la habitual en estos casos, como puede verse en las fotos incluidas en la figura 8.73.



Figura 8.79. Proceso de ejecución.

En todos los hormigones reciclados se determinó la consistencia, mediante el cono de Abrams, y la resistencia a compresión. En la figura 8.80 se observa el cono de Abrams, en la 8.81 la fabricación de las probetas y en la 8.82 la rotura de las probetas de los hormigones con ARMc.

La resistencia media de las probetas del hormigón con un 41% de sustitución fue de 17,9 MPa a 7 días y 22,3 MPa a 28 días. Con el 69% de sustitución las resistencias alcanzaron 13,6 MPa a 7 días y 17,8 MPa a 28 días.

En la Renovación de la red de San Pablo (Ferrol), Urbaser y el Ayuntamiento de Ferrol adoptaron la decisión de utilizar áridos reciclados en distintas aplicaciones, siendo la fundamental como asentamiento o envolvente de tuberías y relleno de las zanjas de las canalizaciones. También se emplearon áridos 0/20 y 20/60 mm para rellenos y explanaciones y la zahorra de hormigón como subbase. Además, la gravilla mixta 12/25 mm se utilizó como componente de hormigones en masa sustituyendo el 20 y el 40% de la gravilla natural (ver figura 8.83).

Se determinó la consistencia mediante el cono de Abrams y la resistencia a compresión para los dos hormigones reciclados. Para el hormigón con una sustitución del 20% se obtuvo consistencia blanda y una resistencia media a 7 días de 24,8 MPa, y de 28,9 MPa a 28 días. Para el hormigón con una sustitución del 40% la consistencia fue fluida y la resistencia media a 7 días de 20,7 MPa.



Figura 8.80. Cono de Abrams.



Figura 8.81. Fabricación de las probetas.



Figura 8.82. Rotura de las probetas.



Figura 8.83. Hormigón realizado con gravilla mixta.

8.5 Bibliografía

- Gómez Soberón, J.M. "Comportamiento tenso deformacional instantáneo y diferido de hormigón con árido reciclado". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 2002.
- González Fonteboa, B. "Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante". Tesis doctoral. Universidade da Coruña. 2002
- Sánchez de Juan, M. "Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2004.
- Etxebarria, M. "Experimental Study on Microstructure and Structural Behavior of Recycled Aggregate Concrete". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 2004.
- Barra, M. "Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 1996
- Martínez Lage, I. "Estudio sobre los residuos de construcción y demolición en Galicia: Método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje". Tesis doctoral. Universidade da Coruña. 2007.
- López Gayarre, F. "Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas". Tesis doctoral. Universidad de Oviedo. 2008.
- Grupo de Trabajo Hormigón Reciclado; Comisión Permanente del Hormigón; Comisión de Materiales de ACHE. "Borrador de normativa española sobre la utilización de árido reciclado en hormigón estructural". III Congreso de Puentes y Estructuras de edificación de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural; Vol. 1; pp 441-453; Zaragoza 2005; ISBN 84-89670-48-X.
- Grupo de Trabajo Hormigón Reciclado; Comisión Permanente del Hormigón. "Utilización del árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural". Monografía de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Madrid 2006.
- Agrela, F., Geraldes, V.L., Jiménez J.R., Ayuso, J.M. "Mixed recycled aggregates characterization for application in manufacture of non structural concrete: correlations between physical and chemical properties". International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Enviroment. Sao Paulo. Diciembre 2009.
- Bezerra Cabral AE, Schalch V, Molin DCCD, Ribeiro JLD. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, Vol. 24, No 4, pp. 421-430, 2010.
- Brito, J., Pereira, A.S., Correia, J.R., "Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates". Cement & Concrete Composites, Vol. 27, pp. 429-433, 2005.
- Brito, J., Amorim, P. "The influence of curing conditions on the durability performance of concrete made with recycled concrete waste". International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Enviroment. Sao Paulo. Diciembre 2009.
- Brito, J., Fonseca, N. "The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste". International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Enviroment. Sao Paulo. Diciembre 2009.
- Cachim, P. "Mechanical properties of bricks aggregate concrete". Construction and Building Materials, Vol 23, pp. 1292-1297, 2009.
- Chen HJ, Yen T, Chen KH. "Use of building rubbles as recycled aggregates". Cement and Concrete Research, Vol. 33, No 1, pp 125-132, 2003.
- Debieb, F., Kenai, S. "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete". Construction and Building Materials, Vol. 22, pp. 886-893, 2008.

- Etxeberria, M., Vázquez E., Marí A., Barra M. "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 735-742, 2007.
- Etxeberria, M., Marí A., Vázquez E. "Recycled aggregate concrete as structural material". Materials and Structures, Vol. 40, pp. 529-541, 2007.
- Evangelista, L., Brito, J. "Mechanical behaviour concrete made with fine recycled concrete aggregates". Cement and Concrete Composites, Vol. 29, pp. 397-401, 2007.
- Evangelista, L., Brito, J. "State of the art on the use of fine recycled aggregates in concrete production". International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Enviroment. Sao Paulo. Diciembre 2009.
- Gomes M, De Brito J. Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: Durability performance. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, Vol. 42, No 5, pp. 663-675, 2009.
- González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F. "Recycled aggregates concrete: aggregate and mix properties". Materiales de Construcción, Vol. 55, pp. 53-66, 2005.
- González-Fonteboa, B., Martínez-Abella, F. "Shear strength of recycled concrete beams". Construction and Building Materials, Vol. 21, pp. 887-893, 2007.
- How-Ji Chen, Tsong Yen, Kuan-Hung Chen. "Use of building rubbles as recycled aggregates". Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 125-132, 2003.
- Khatib, J.M. "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate" Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 763-769, 2005.
- Martins, I.M., Gonçalves, A. "The Fine Fraction of Construction and Demolition Waste". International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Enviroment. Sao Paulo. Diciembre 2009.
- Rahal, K., "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate". Building end Enviromental, Vol. 42, pp. 407-415, 2007.
- Sánchez de Juan, M. "Áridos reciclados para aplicaciones de hormigón no estructural". Curso de Construcción sostenible y reciclaje de residuos. Zaragoza. Abril 2010.
- Tabsh, S.W., Abdelfatah, A.S. "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete", Vol 23, pp. 1163-1167, 2009
- Topçu, I.B., Sengel, S. "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate". Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 1307-1312, 2004.
- Tsung-Yueh Tu, Yuen-Yuen Chen, Chao-Lung Hwang. "Properties of HPC with recycled aggregates". Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp. 943-950, 2006.
- Yang KH, Chung HS, Ashour AF. "Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties". ACI Materials Journal, Vol. 105, pp. 289-296, 2008.
- Yang J; Du Q, Bao Y. "Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks". Construction and Building Materials, Vol.25, No 4, pp. 1935-1945, 2011.

9. Control del impacto ambiental de los áridos reciclados por lixiviación

Este capítulo fue desarrollado por los técnicos de UPC (Universitat Politècnica de Catalunya), que forman parte del equipo investigador del Proyecto GEAR.

9.1. Introducción

Cuando un material sólido entra en contacto con un líquido (normalmente agua), algunos de sus constituyentes pueden disolverse en mayor o menor extensión. El grado de disolución condiciona la composición del extracto (líquido tras pasar por el sólido). La lixiviación es la extracción de los componentes solubilizados en el agua u otro disolvente.

Estos lixiviados pueden incorporarse a los suelos y/o a las aguas superficiales y/o aguas profundas. Esta incorporación puede representar la contaminación de los mismos o el aumento del grado de contaminación en el caso de que estos ya lo estén. Por ejemplo, un suelo que tiene sulfatos recibe más sulfatos por lixiviación de un todo uno de árido reciclado contaminado por sulfatos. En este caso la suma de los sulfatos ya presentes y los aportados por lixiviación puede alcanzar un nivel excesivo que conduzca a la salinización del suelo. En el caso de un suelo sin sulfatos el aporte de estos por lixiviación del material granular representaría la contaminación del suelo.

Los ensayos de lixiviación tratan de reproducir en el laboratorio los procesos que tienen lugar bajo las condiciones de exposición del campo u obra. El ensayo de lixiviación aplicable depende del mecanismo de transporte.

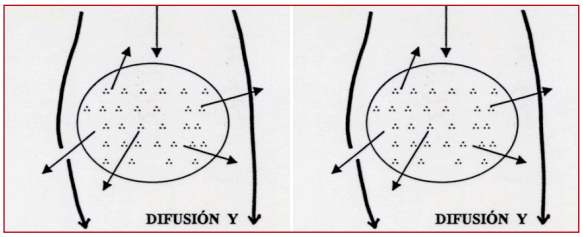
Desde el punto de vista de la lixiviación, se distinguen materiales “No Consolidados” y materiales “Consolidados”.

Un material no consolidado es aquel que está formado por granos sueltos y no tiene una forma fija permanente o durable. Constituyen ejemplos de materiales no consolidados el árido reciclado en el acopio de una planta y también una subbase de una carretera ejecutada con un todo uno de árido reciclado.

Un material consolidado es aquel cuya menor unidad volumétrica tiene como mínimo 50 cm^3 y tiene una forma fija y durable en condiciones normales. Un ejemplo puede ser un hormigón producido con árido reciclado o un suelo cemento.

Cuando se trata de un material no consolidado (granular), si los granos carecen de poros, el mecanismo de lixiviación es la percolación y el correspondiente lavado. Si el material granular está formado por granos con poros, además del lavado puede haber difusión.

En un material consolidado con poros, el agua no fluye libremente y si los poros son accesibles el agua puede disolver material interior de los poros. Pueden presentarse altas concentraciones locales de lo disuelto y reducirse fuertemente la velocidad de disolución. El material disuelto en el interior será transportado a través de los poros comunicados hacia la superficie. La fuerza motriz es la diferencia de concentraciones entre el agua de los poros y la que fluye libremente. El mecanismo motriz se denomina difusión.



DIFUSIÓN (A) **PERCOLACIÓN (B)**

Figura 9.1. Esquema de los mecanismos de transporte de especies químicas debido a la interacción del agua con un material sólido: (A) = Difusión; (B) = Percolación.

En la actualidad no existe una normativa española de ensayos de lixiviación. El Comité Europeo TC 351 recomienda la utilización del ensayo CEN TS 14405 llamado de percolación para materiales granulares no consolidados.

Ensayo de Percolación

El método de percolación determina la liberación de constituyentes de los áridos reciclados con o sin reducción de tamaño. Se colocan en una columna con el líquido lixiviante pasando a través del material en dirección ascendente. Las condiciones de ensayo incluyendo la velocidad del flujo lixiviante permiten sacar conclusiones de los resultados en los cuales los componentes han sido lavados rápidamente y aquellos que han sido liberados por interacción con la matriz.

Los lixiviados se recogen después de cada relación líquido/sólido determinada y se caracterizan química y físicamente. Las condiciones de equilibrio se comprueban verificando después de cada período la desviación del pH. Los resultados se expresan como mg de constituyentes liberados por litro de eluato y en mg de constituyentes liberados acumulados por kg de material ensayado, siempre en función de la relación líquido sólido.

En el ensayo de percolación se utilizan columnas de 50 mm o de 100 mm de diámetro y de 300 mm ± 50 mm de altura. Se obtienen 7 fracciones de eluato correspondientes a L/S entre 0,1 y 10 l/kg, mostradas en la tabla 9.1.

Fracción Nº	Volumen de la fracción (L/S)	Relación L/S acumulada
1	(0,1 ± 0,02) x m0	0,1 ± 0,02
2	(0,1 ± 0,02) x m0	0,2 ± 0,04
3	(0,3 ± 0,05) x m0	0,5 ± 0,08
4	(0,5 ± 0,1) x m0	1,0 ± 0,15
5	(1,0 ± 0,2) x m0	2,0 ± 0,3
6	(3,0 ± 0,2) x m0	5,0 ± 0,4
7	(5,0 ± 0,2) x m0	10,0 ± 0,1

Tabla 9.1. Relación líquido sólido de las siete fracciones del ensayo de percolación.

La velocidad lineal del líquido lixiviante es de 15 cm/día. El ensayo dura aproximadamente 21 días y se utiliza agua desmineralizada. Se mide la evolución del pH y de la conductividad y las concentraciones de las distintas especies químicas en los eluatos para cada relación L/S. El análisis de los elementos se efectúa por ICP-MS y antes de la filtración debe analizarse el pH y la conductividad.



Figura 9.2. Detalles del equipo de percolación y columna con el material granular.

Este ensayo ha sido estudiado en el Proyecto GEAR aplicándolo a 12 áridos reciclados españoles. Los valores límites de concentración de cada especie química deben ser fijados por cada país. España debe fijarlos en función de las condiciones de sus aguas y suelos.

Ensayo de Conformidad

El CEN ha aportado, para materiales residuales destinados a vertedero, el ensayo UNE EN-12457 con diferentes opciones de tamaño de partículas y relación líquido/sólido (L/S).

En este ensayo el material tiene un tamaño inferior a 10 mm y se pone en contacto con el agua desmineralizada. La norma se basa en la suposición de que se alcanza el equilibrio o casi entre las fases líquidas y sólidas durante las 24 horas de duración del ensayo. La masa sólida (S) se coloca en una botella a la que se añade una cantidad de agua (L) hasta conseguir una relación L/S = 10 l/kg ± 2%. La botella se pone en agitación en un dispositivo que mantiene una velocidad de rotación entre 5 y 10 rev/min. Al cabo de 24h ± 0,5 h se separa el residuo sólido por filtración y se determinan las concentraciones de las distintas sustancias que forman el eluato. Después del ensayo, se anotan las condiciones de lixiviación en términos de pH y conductividad.

El ensayo UNE EN 12457-4 (“Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño”) se aplica actualmente a los residuos para su clasificación y depósito en vertedero.

Dadas la rapidez y sencillez de ejecución de este ensayo, las administraciones catalana y vasca lo extienden a materiales valorizables como por ejemplo la escoria de acería.



Figura 9.3. Dispositivo utilizado en el ensayo de conformidad.

Este ensayo ha sido estudiado en el Proyecto GEAR aplicándolo a 12 áridos reciclados españoles. Los valores límites de concentración de cada especie química son los valores límite de la UE DOCE 16/1/03 con carácter transitorio hasta que existan valores y recomendaciones españolas o europeas para el ensayo de conformidad aplicado a productos de construcción.

Componente	L/S = 10 l/kg (mg/kg de materia seca)
As	0,5
Ba	20
Cd	0,04
Cr total	0,5
Cu	2
Hg	0,01
Mo	0,5
Ni	0,4
Pb	0,5
Sb	0,06
Se	0,1
Zn	4
Cloruro	800
Fluoruro	10
Sulfato	1 000

Tabla 9.2. Valores límite para los residuos admisibles en vertederos para residuos inertes. L 11/34 ES Diario Oficial de las Comunidades Europeas DOCE 16.1.2003.

9.2. Resultados obtenidos en el Proyecto GEAR

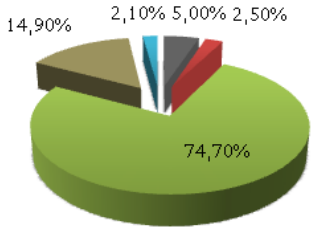
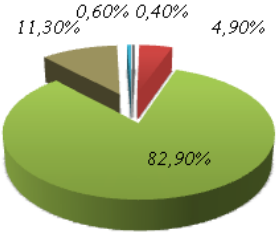
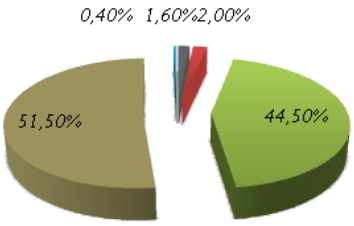
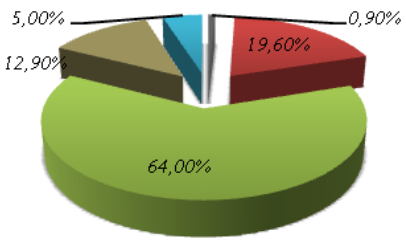
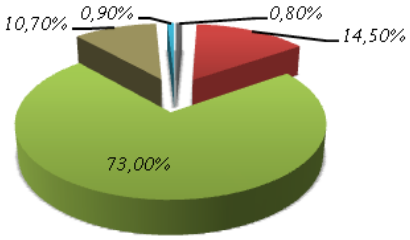
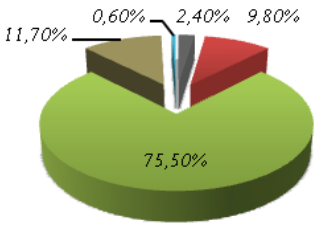
Para el estudio del comportamiento ambiental por lixiviación se han elegido muestras de doce plantas (una de cada planta), que representan según su composición y clasificación a las consideradas en este proyecto. Las muestras fueron identificadas con números romanos de "I" hasta "XII" y la correspondiente clasificación se presenta en la tabla 9.3. Todas las muestras fueron analizadas y lixiviadas por triplicado.

Inspección visual

Ensayo realizado según la norma UNE EN 933-11 2009 – Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.

Clasificación	ARH Árido reciclado de hormigón	ARMh Árido reciclado mixto de hormigón	ARMc Árido reciclado mixto cerámico	ARMa Árido reciclado mixto con asfalto
Muestra / Planta	I VI X	II IV XII	III VII VIII IX	V XI

Tabla 9.3. Relación de muestras estudiadas con la respectiva clasificación.

ARH	Muestra	Muestra
ARH Árido reciclado de hormigón	Muestra I 	Muestra VI 
	Muestra X 	Ra (m.bituminoso) Rb (albañilería) Rc (hormigón) Ru (áridos) X (otros)
ARMh Árido reciclado mixto de hormigón	Muestra II 	Muestra IV 
	Muestra XII 	Ra (m.bituminoso) Rb (albañilería) Rc (hormigón) Ru (áridos) X (otros)

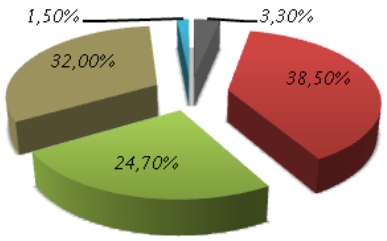
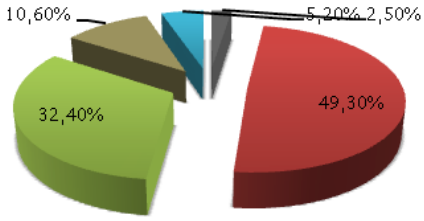
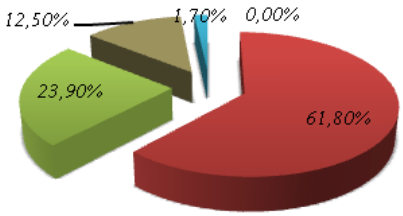
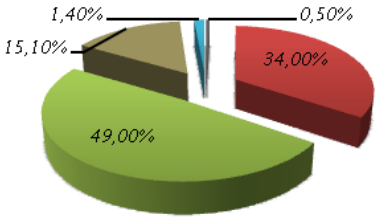
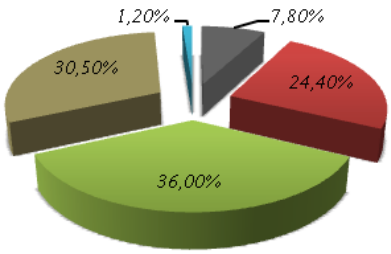
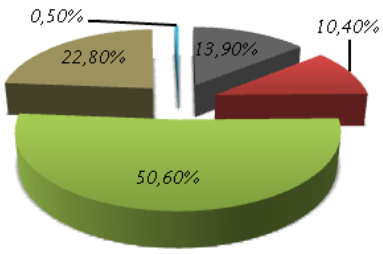
ARH	Muestra	Muestra
ARMc Árido reciclado mixto cerámico Ra (m.bituminoso) Rb (albañilería) Rc (hormigón) Ru (áridos) X (otros)	Muestra III 	Muestra VII 
	Muestra VIII 	Muestra IX 
ARMa Árido reciclado mixto con asfalto Ra (m.bituminoso) Rb (albañilería) Rc (hormigón) Ru (áridos) X (otros)	Muestra V 	Muestra XI 

Tabla 9.4. Clasificación de los componentes de las muestras estudiadas.

9.3. Composición química

El contenido de elementos mayoritarios ha sido determinado empleando la técnica de FRx, utilizando perlas de tetraborato de litio. Los resultados de los contenidos de los elementos mayoritarios expresados en óxidos se presentan en las tablas 9.5.

ARH Árido reciclado de hormigón							
	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3
I	0,66%	5,90%	67,85%	0,45%	2,04%	11,25%	1,29%
VI	1,85%	1,52%	20,08%	0,38%	0,46%	40,46%	0,91%
X	0,51%	2,66%	51,97%	0,96%	0,39%	21,87%	1,44%
ARMh Árido reciclado mixto de hormigón							
	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3
II	0,91%	4,66%	72,17%	0,86%	0,71%	8,85%	2,56%
IV	1,00%	3,25%	17,09%	1,42%	0,49%	40,70%	2,79%
XII	11,70%	1,34%	8,21%	0,35%	0,24%	36,61%	0,84%

ARMc Árido reciclado mixto cerámico							
	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3
III	2,89%	9,25%	47,09%	0,61%	2,05%	17,30%	3,15%
VII	2,76%	5,63%	33,65%	1,75%	1,21%	27,95%	2,29%
VIII	1,74%	11,89%	44,64%	1,67%	1,934%	19,66%	4,12%
IX	1,27%	4,33%	44,09%	2,81%	0,833%	24,40%	1,98%
ARMa Árido reciclado mixto con asfalto							
	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3
V	1,47%	10,36%	52,75%	0,48%	2,31%	14,83%	3,55%
XI	2,36%	10,75%	46,08%	0,89%	2,25%	17,47%	3,45%

Tabla 9.5. Composición química elemental expresada en óxidos de los áridos reciclados estudiados.

9.3.1. Composición química en elementos contaminantes

Para determinar el contenido de los metales pesados se ha realizado una extracción ácida de acuerdo con la norma UNE-EN 13657:2003 – Digestión en agua regía para la determinación posterior de la porción de elementos en el residuo soluble. Los análisis se realizan por triplicado para cada muestra. Los extractos han sido analizados por espectroscopia de emisión atómica con fuente de plasma (ICP) utilizando un equipo marca Thermo Jarell-Ash 61 E polyscan. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9.6.

Elemento (mg/kg)	ARH Árido reciclado de hormigón			ARMh Árido reciclado mixto de hormigón			ARMc Árido reciclado mixto cerámico				ARMa Árido rec. mixto c asfalto	
	I	VI	X	II	IV	XII	III	VII	VIII	IX	V	XI
Ba	94,5	183,0	141,3	67,8	156,0	39,6	258,2	128,7	272,8	162,4	84,8	172,3
As	37,9	16,7	21,0	19,5	16,6	16,7	25,9	36,1	36,3	24,5	22,1	20,6
Cr	21,2	10,2	15,3	28,4	15,4	12,2	22,6	21,0	43,9	25,2	21,8	19,9
Cu	10,2	7,8	8,0	49,9	17,8	33,3	14,6	15,4	24,5	16,1	12,0	11,9
Mo	0,8	0,5	1,0	5,9	1,5	0,5	1,1	1,2	2,1	1,9	1,0	1,2
Ni	9,7	10,9	9,3	14,5	16,6	11,0	12,2	11,4	23,4	14,5	14,2	10,7
Pb	15,0	11,2	9,2	55,7	71,8	19,4	63,3	56,4	43,0	1039	48,5	99,8
Se	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	35,7	34,1	25,2	105,9	108,3	47,8	74,9	113,1	86,6	59,2	97,1	92,5
Cd	0,08	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,3	0,1
Hg	2,3	0,8	1,4	1,4	0,9	0,8	1,6	2,5	1,8	1,5	1,1	0,8
Sb	0,5	1,1	0,5	1,7	1,0	0,6	0,6	0,8	1,5	0,8	0,1	0,2
SO_3^{2-}	5800	5100	13 000	6300	11 800	4 700	6 900	11 800	3 300	5 100	3 300	10 800
Cl^-	100	100	100	200	300	300	200	300	400	300	100	300

Tabla 9.6. Composición química en elementos contaminantes en (mg/kg) de todas las muestras.

9.3.2. Lixiviación – Ensayo de conformidad

El ensayo de lixiviación de conformidad se realizó según la norma UNE-EN 12457-4 – Prueba de conformidad de lixiviación de materiales granulares. Todas las muestras se trituraron a un tamaño menor a 10 mm. El ensayo se realiza por triplicado para cada muestra. El F^-, Cl^-, y SO_4^{2-} son determinados por cromatografía de intercambio iónico. El As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn son determinados por ICP/MS. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9.7.

Elemento (mg/kg)	ARH			ARMh			ARMc				ARMa		Límite DOCE 16/1/2003
	I	VI	X	II	IV	XII	III	VII	VIII	IX	V	XI	
Ba	3,737	2,896	1,126	0,085	1,095	0,367	0,458	0,529	0,778	0,887	-	0,665	20
As	-	-	0,001	-	-	-	-	-	0,026	0,013	-	0,004	0,5
Cr	0,165	0,039	0,292	0,090	0,235	0,272	0,178	-	0,241	0,193	0,182	0,713	0,5
Cu	0,038	-	0,000	0,060	0,253	0,083	-	0,165	0,036	0,182	-	-	2
Mo	0,017	0,032	0,086	0,134	0,097	0,030	0,075	0,070	0,180	0,064	0,059	0,137	0,5
Ni	-	-	0,061	-	-	-	-	-	0,102	0,107	0,018	0,057	0,4
Pb	0,018	0,009	0,010	0,019	0,047	0,052	0,010	0,044	0,030	0,014	0,020	0,023	0,5
Se	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1
Zn	0,302	-	0,301	0,271	0,285	0,177	0,456	0,568	0,114	0,017	0,263	0,049	4
Cd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04
Hg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01
Sb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,06
F-	0,3	4,6	0,7	1,5	0,6	0,2	5,4	3,3	9,6	0,6	3,1	1,70	10
Cl-	32,5	13,7	50,5	152,9	129,0	82,4	122,4	188,5	325,9	202,2	27,8	178,4	800
SO_4-	154,1	152,3	5 276	2 519	4 455	2 581	4 209	14 918	13 753	14 650	918,4	2 431	1 000

Tabla 9.7. Contenido de elementos lixiviados (mg/kg) determinados en el ensayo de conformidad UNE-EN 12457-4 .

Como puede observarse en la figura 9.4, el cromo aparece en once de las doce muestras analizadas, pero solamente supera el contenido límite en una muestra que corresponde a un árido reciclado mixto con asfalto (ARMa).

El contenido de sulfatos en los lixiviados es superior al límite del DOCE 16/1/2003 en nueve de las doce muestras estudiadas. Dos de las tres muestras que están por debajo del límite corresponden a la clasificación de árido reciclado de hormigón (ARH) y la tercera corresponde a un árido reciclado mixto con asfalto (ARMa).

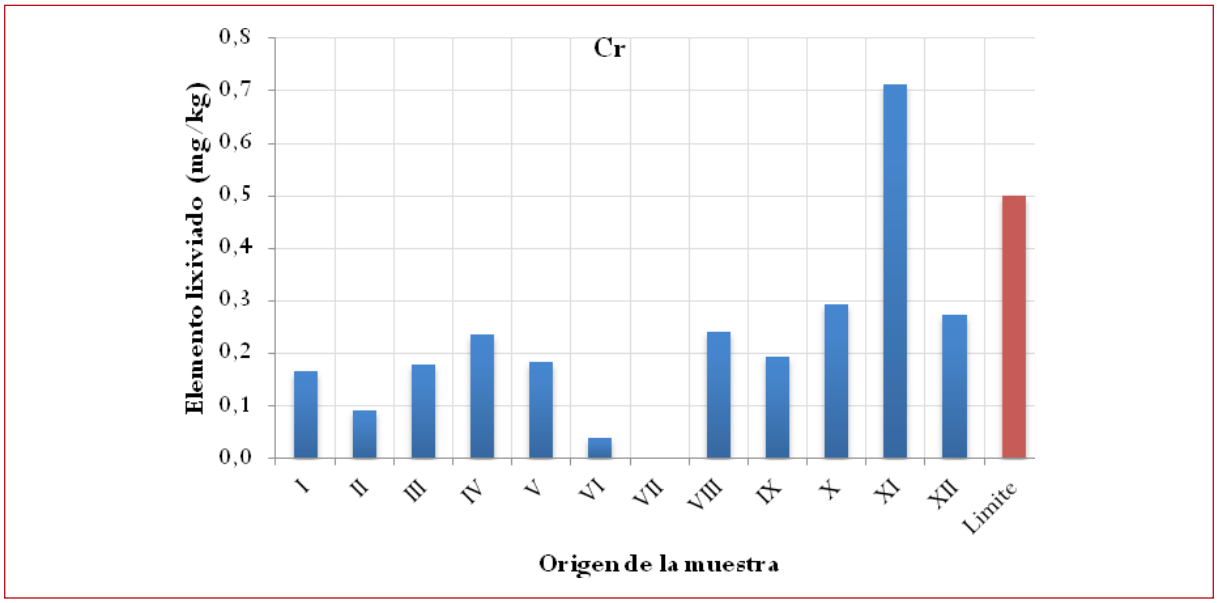


Figura 9.4. Lixiviación de Cr de los áridos reciclados. Ensayo de conformidad.

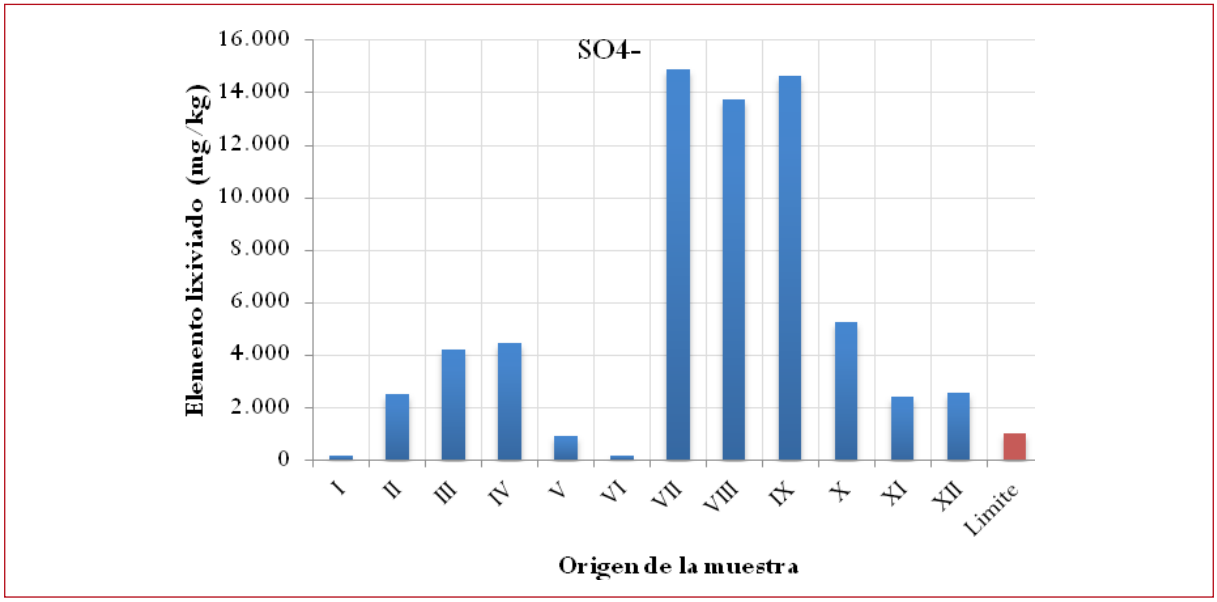


Figura 9.5. Lixiviación de SO_4^{--} de los áridos reciclados. Ensayo de conformidad.

9.3.3. Lixiviación – Ensayo de percolación

El ensayo de lixiviación por percolación se realizó según la norma CEN/TS 14405:2004 – Prueba de comportamiento de lixiviación: Ensayo de percolación de flujo ascendente. Todas las muestras se trituraron a un tamaño menor a 10 mm. El ensayo se realiza por triplicado para cada muestra. El F^-, Cl^-, y SO_4^{2-} son determinados por cromatografía de intercambio iónico. El As, Ba, Cd, Cr total, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn son determinados por ICP/MS. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9.8.

Elemento (mg/kg)	ARH			ARMh			ARMc				ARMa	
	I	VI	X	II	IV	XII	III	VII	VIII	IX	V	XI
Ba	8,343	8,836	0,508	0,055	0,887	0,117	0,727	0,245	0,303	0,733	0,639	0,287
As	-	-	0,002	0,022	0,003	0,001	0,029	0,004	0,031	0,010	0,059	0,029

Elemento (mg/kg)	ARH			ARMh			ARMc				ARMa	
	I	VI	X	II	IV	XII	III	VII	VIII	IX	V	XI
Cr	0,175	0,111	0,464	0,375	0,351	0,399	1,056	0,006	0,028	0,403	5,75	0,634
Cu	0,093	0,081	0,038	0,214	0,352	0,165	0,708	0,015	0,061	0,269	0,45	0,093
Mo	0,040	0,041	0,137	0,342	0,182	0,034	0,313	0,140	0,162	0,116	1,213	0,323
Ni	0,027	-	0,069	0,037	0,118	-	0,198	0,013	0,074	0,119	0,194	0,065
Pb	0,019	0,005	0,001	0,000	0,003	0,002	0,004	0,002	0,002	0,001	0,006	0,001
Se	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	0,064	0,072	0,028	0,032	0,135	0,18	0,122	0,288	0,049	0,036	0,365	0,123
Cd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hg	-	0,002	-	-	0,003	-	-	-	-	-	0,001	-
Sb	-	-	-	-	-	-	-	0,013	0,015	-	0,005	0,002
F-	1,345	2,971	0,853	1,993	2,226	2,167	4,398	4,206	12,19	1,06	1,844	1,826
Cl-	50	19	87	202	150	97	135	185	292	225	27	217
SO_4-	113	93	3410	2660	2702	868	3895	10192	9747	9338	396	4394

Tabla 9.8. Contenido de elementos lixiviados (mg/kg) determinados en el ensayo de percolación CEN/TS 14405.

Los valores límites de concentración de cada especie química de los lixiviados obtenidos en el ensayo de percolación deben ser fijados por cada país. España debe fijarlos en función de las condiciones de sus aguas y suelos.

9.4. Conclusiones

Las conclusiones específicas de los resultados obtenidos en el proyecto, aplicando los dos métodos de lixiviación, son:

- El ensayo de percolación pr EN 14405 con una relación L/S=10, de acuerdo con la experiencia internacional, representa mejor el escenario real de lixiviación de un material granular.
- El ensayo de percolación permite obtener resultados repetibles.
- Los resultados del ensayo de percolación pueden contribuir a trazar, por modelización, los valores de emisiones tolerables para nuestros suelos y aguas.
- No existen valores límite válidos para toda la UE para el ensayo de percolación. Los países fijan sus propios valores.
- El ensayo de percolación es largo y costoso, por tanto no es recomendable para ensayos de control de cumplimiento.
- El ensayo de conformidad UNE EN 12457-4, adoptado para la clasificación de residuos para vertedero (UE DOCE 16/1/03), es sencillo y rápido y tiene una buena repetibilidad.
- No existen valores límite para el ensayo de conformidad fuera de la clasificación de residuos de la UE DOCE 16/1/03.
- Existe una cierta correlación entre los contenidos de contaminantes lixiviados determinados en los ensayos de percolación (pr EN 14405) con una relación L/S=10 y el de conformidad (UNE EN 12457-4).

9.5. Bibliografía

- CEN/TC292 (2005): Characterization of waste - Leaching behaviour tests - Up-flow percolation test (under specified conditions), CEN/TS 14405.
- CEN/TC292 (2005). Characterization of waste - Leaching behaviour tests – DMLT-PLR (dynamic monolith leaching test – periodic leachant renewal), under development.
- DIN 19528 (2008): Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen und anorganischen Stoffen für Materialien mit einer Korngröße bis 32 mm – Grundlegende Charakterisierung mit einem ausführlichen Säulenversuch und Übereinstimmungsuntersuchung mit einem Säulenschnelltest', Ausgabe Juli 2007.- Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 19529 (2008): Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren mit einem Wasser/Feststoffverhältnis

von 2 l/kg zur Untersuchung der Elution von anorganischen Stoffen für Materialien mit einer Korngröße bis 32 mm - Übereinstimmungsuntersuchung, Ausgabe Juli 2007.- Beuth Verlag, Berlin.

- EN 12457-4:2002. Characterisation of waste — Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges — Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 10 mm (without or with size reduction).
- Grathwohl, P., Susset, B. (2009), Application of percolation tests for the assessment of emissions from construction products. Comparison of percolation to batch and sequential leaching tests: Theory and data, WASCON 2009, Lyon, Francia
- Hjelmar,O. (2009), State-of-the-art of the column leaching test: Performance and critical test conditions, WASCON 2009, Lyon, Francia.
- Kalbe,U., Berger,W., Simon,F.-G., Eckardt,J. & Christoph,G. (2007). Results of interlaboratory comparisons of column percolation tests. Journal of Hazardous Materials, 148, 714-720.
- Kalbe, U., Berger,W., Simon, F.G. (2009), Results of German ring tests on the validation of leaching standards for source term determination,WASCON 2009, Lyon. Francia
- NEN (2003). Leaching characteristics - Determination of the leaching of inorganic components from moulded or monolithic materials with a diffusion test - Solid earthy and stony materials – NEN 7375: 2003.
- Van der Sloot, H.,Dijkstra, J., Hjelmar,O., Spanka, G., Bluyssen,Ph., Giselsson,S. (2008),- Evaluation of a horizontal approach to assess the possible release of dangerous substances from construction products in support of requirements from the construction products directive (TR2), Energy Research Centre of the Netherlands, Encargo del UMWELTBUNDESAMT, Berlin, Alemania.
- Van der Sloot, H.A, L. Heasman, Ph Quevauviller, Eds. (1997). Harmonization of leaching / extraction tests. Studies in Environmental Science, Volume 70, Elsevier Science, Amsterdam, 292 pp.
- Van der Sloot, H., Van Zomeren, A., Dijkstra, J.J., Meeussen, J.C.L., Spanka, G., Stoltenberg-Hansen, E., Stenger, R. (2006), European standardisation, regulatory developments and modelling, ECO-SERVE Seminar “Challenges for Sustainable Construction: the “concrete”approach”, 2006 Warsaw, Poland.
- Van der Sloot, H., Kosson, D., Hjelmar, O., Comans, R., (2010), Recent Developments in Testing, Modelling and Environmental Impact Assessment for Soil, Waste and Construction Products, DEPOTECH, 2010, Leoben, Austria.

10. Recomendaciones técnicas

10.1 GEAR-RT-01: recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material granular en firmes

10.1.1 Ámbito de aplicación

Estas recomendaciones técnicas se aplican a los áridos procedentes del reciclado de material inorgánico previamente utilizado en la construcción, para su utilización en capas de firmes de carreteras y caminos.

Estas recomendaciones establecen los requisitos y propiedades de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (en adelante, RCD) que se destinan a dichos usos. También indican los procedimientos del control de calidad en planta (ensayos a realizar y frecuencia) a las que se deben someter estos áridos en el proceso de reciclado.

El presente documento no afecta al procesado de residuos o subproductos industriales realizado en plantas de tratamiento de otro tipo de residuos (plantas de la industria de materiales de construcción), ni a otro tipo de áridos reciclados distintos de los procedentes de residuos de construcción y demolición (por ejemplo, áridos siderúrgicos o áridos bituminosos).

Las aplicaciones consideradas en esta recomendación son:

- Bases
- Subbases
- Arcenes

El material considerado, fabricado a partir de residuos de construcción y demolición, es la zahorra reciclada.

Esta propuesta contempla la legislación y normativa técnica vigente en España correspondiente a esta aplicación:

- UNE EN 13242 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes de carreteras
- Art. 510 Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo.

10.1.2 Categorías de áridos utilizables y clases de uso

Para las aplicaciones contempladas en estas recomendaciones técnicas pueden utilizarse áridos reciclados de las siguientes categorías, según establece el capitulo 5 de esta Guía:

- Categoría ARH: Áridos Reciclados de Hormigón.
- Categoría ARMh: Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón.
- Categoría ARMc: Áridos Reciclados Mixtos de Cerámicos.
- Categoría ARMa: Áridos Reciclados Mixtos con Asfalto.

Las posibles aplicaciones de los áridos reciclados incluidas en estas recomendaciones técnicas se dividen en clases de uso según su grado de exigencia técnica (Tabla 10.1).

Clases	Aplicación
Clase 1	Bases, subbases y arcenes para vías de tráfico T0
Clase 2	Bases, subbases y arcenes para vías de tráfico T1 y T2
Clase 3	Bases, subbases y arcenes para vías de tráfico T3 y T4
Clase 4	Bases y subbases para caminos con categoría de tráfico menor de T4

Tabla 10.1. Clases de uso para la zahorra reciclada, según grado de exigencia técnica.

La posibilidad de utilización de los áridos reciclados en las aplicaciones detalladas en la tabla anterior quedará sujeta al cumplimiento de estas recomendaciones técnicas.

Teniendo en cuenta las propiedades del material esperadas para cada categoría, a modo informativo se indican en la Tabla 10.2 categorías de áridos reciclados aptas para las aplicaciones contempladas en el presente documento, según clase de uso.

Viabilidad de aplicación		Categoría del Árido Reciclado			
		ARH	ARMh	ARMc	ARMa
Clase de uso	Clase 1	X			
	Clase 2	X	X	X	
	Clase 3	X	X	X	X
	Clase 4	X	X	X	X

Tabla 10.2. Viabilidad de aplicación por categoría de árido y clase de uso.

Nota:
La clasificación no debe ser utilizada como un elemento limitador de uso del material en una determinada clase. La calidad técnica del material, independiente de su composición, es el elemento que determina la viabilidad de uso del material en una aplicación. Si el árido reciclado no se adapta a la categoría indicada para una determinada aplicación, pero, aun así, presenta características geométricas, físico-mecánicas y químicas adecuadas a su uso en ella (de acuerdo con los límites presentados en estas recomendaciones), el material puede ser utilizado en el uso planteado.

10.1.3 Requisitos de los áridos

10.1.3.1 Requisitos geométricos

Granulometría

La granulometría del material deberá estARComprendida dentro de alguno de los husos de la zahorra artificial recogidos en la tabla 10.3.

Categoría [a]	Cernido acumulado (% en masa mínimo-máximo) [b]								
	40	25	20	8	4	2	0,500	0,250	0,063
ZA25	100	75-100	65-90	40-63	26-45	15-32	7-21	4-16	0-9
ZA20	—	100	75-100	45-73	31-54	20-40	9-24	5-18	0-9
ZAD20	—	100	65-100	30-58	14-37	0-15	0-6	0-4	0-2

Tabla 10.3. Husos granulométricos para los áridos reciclados.

[a] La designación del tipo de zahorra se hace en función del tamaño máximo nominal, de acuerdo al intervalo de % que pasa fijado en el correspondiente huso.

[b] La abertura de los tamices se define en la norma UNE-EN 933-2.

Adicionalmente, la granulometría de las zahorras debe cumplir con las tolerancias expresadas en la tabla 10.4 según la norma UNE-EN 13242.

Categoría UNE-EN 13242:2003	Árido	Tamaño (mm)	Cernido acumulado (% en masa mínimo-máximo)				
			2 D [a]	1,4 D [bc]	D [d]	d [ce]	d/2 [bc]
G_C 85-15	Árido grueso	d≥ 1	100	98 - 100	85 - 99	0 -15	0 - 5
G_C 80-20		D > 2	100	98 - 100	80 - 99	0 -20	0 - 5
G_F 85	Árido fino	d = 0	100	98 - 100	85 - 99	-	-
G_F 80		D ≤ 6,3	100	98 - 100	80 - 99	-	-

Categoría UNE-EN 13242:2003	Árido	Tamaño (mm)	Cernido acumulado (% en masa mínimo-máximo)				
			2 D [a]	1,4 D [b c]	D [d]	d [c e]	d/2 [b c]
G_A 85	Árido combinado	d = 0 D > 6,3	-	100	85 - 99	-	-
G_A 80			100	98 - 100	80 - 99	-	-
G_A 75			100	-	75 - 99	-	-

Tabla 10.4. Tolerancias en la granulometría de la zahorra – UNE-EN 13242.

[a] Para los áridos en que D > 63 mm, solo se aplicarán los requisitos de desclasificados superiores relativos al tamiz 1,4 D, por no haber series de tamices ISO 565/R20 por encima de 125 mm.
[b] Si los tamices calculados como 1,4 D y d/2 no se corresponden exactamente con los tamices de la serie 565/R20, se debe usar el siguiente tamaño de tamiz más alto o más bajo, respectivamente.
[c] Para usos especiales, se podrán especificar requisitos adicionales.
[d] El porcentaje en masa que pase por el tamiz D podrá ser superior al 99%, pero en tales casos el suministrador debe documentar y declarar la granulometría característica incluyendo los tamices D, d, d/2 y los tamices intermedios entre d y D de la serie básica más la serie 1, o de la serie básica más de la serie 2. Se podrán excluir los tamices con una relación menor a 1,4, respecto del siguiente tamiz inferior.
[e] El porcentaje en masa que pase por el tamiz d se podrá modificar al intervalo 1 a 15 para G_C 85-15 y 1 a 20 para G_C 80-20 si fuera necesario para asegurar un árido de granulometría adecuada.
En cualquier caso, para las clases de 1 a 3 el cernido por el tamiz de 0,063 mm será menor que los dos tercios (2/3) del cernido por el tamiz 0,250 mm.
Para la clase 4 el tamaño máximo del material no rebasará la mitad (1/2) del espesor de la tongada compactada.

Comentario:
Si se supera el valor límite del porcentaje de finos, se recomienda la realización de estudios adicionales.

Forma

La forma del árido grueso, según el ensayo de determinación del índice de lajas UNE-EN 933-3, en las aplicaciones granulares descritas deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.5.

Clase / Aplicación	Índice de lajas (%) - UNE-EN 933-3
Clase 1	< 35
Clase 2	
Clase 3	
Clase 4	

Tabla 10.5. Índice de lajas del árido grueso reciclado.

Comentario:
La forma de las partículas del árido grueso afecta fundamentalmente al esqueleto granular mineral del árido. Los tipos de árido reciclado incluidos en estas recomendaciones no suelen presentar problemas en el cumplimiento del límite presentado. Se debe poner especial atención a este parámetro en la producción de áridos reciclados de categoría ARMc por su tendencia a generar formas más lajosas. Se recomienda la utilización de machacadora de impacto en el proceso de producción de esa clase o realizar dos trituraciones sucesivas.

Angulosidad

La angulosidad de los áridos, según el ensayo de determinación de las caras de fractura en el árido grueso UNE-EN 933-5, en las aplicaciones granulares contempladas debe cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.6.

Clase / Aplicación	Porcentaje de partículas trituradas (%) - UNE-EN 933-5
Clase 1	100
Clase 2	≥ 75
Clase 3	≥ 50
Clase 4	≥ 75

Tabla 10.6. Angulosidad de los áridos reciclados.

10.1.3.2 Requisitos físico-mecánicos

Composición

La composición de los áridos reciclados se determinará según la norma EN 933-11.

Los áridos se clasificarán según las categorías indicadas en la tabla 10.6a.

Categoría	Descripción	Cantidad de elementos (% del peso total) [1]				
		Ru (Productos pétreos)	Rc (Hormigón y mortero)	Rb (Cerámico)	Ra (Asfalto)	X (Otros)
ARH	Árido reciclado de hormigón	≥ 90%		≤ 10%	≤ 5%	≤ 1%
ARMh	Árido reciclado mixto de hormigón	≥ 70%		≤ 30%	≤ 5%	≤ 1%

Categoría	Descripción	Cantidad de elementos (% del peso total) [1]				
		Ru (Productos pétreos)	Rc (Hormigón y mortero)	Rb (Cerámico)	Ra (Asfalto)	X (Otros)
ARMc	Árido reciclado mixto de cerámico	< 70%		> 30%	≤ 5%	≤ 1%
ARMa	Árido reciclado mixto con asfalto	-		-	5%-30%	≤ 1%

Tabla 10.6a. Categorías de los áridos reciclados procedentes de RCD.

Comentario:
Esta tabla se basa en los resultados obtenidos en el plan de control de la producción de áridos reciclados del Proyecto GEAR, sobre un universo de 74 plantas de reciclaje de toda España. Sin embargo, este estudio también demuestra que la composición no es el único determinante de la calidad del árido reciclado, y que debe ser completado con los resultados técnicos de los ensayos realizados.

Resistencia a la fragmentación

La resistencia a la fragmentación de los áridos reciclados en las aplicaciones granulares contempladas deberán cumplir con los requisitos establecidos en la tabla 10.7.

Clase / Aplicación	Coeficiente Los Ángeles (%) - UNE-EN 1097-2
Clase 1	≤ 35
Clase 2	≤ 35
Clase 3	≤ 40
Clase 4	≤ 45

Tabla 10.7. Resistencia a la fragmentación de los áridos reciclados.

Nota:
La normativa técnica española prescribe el ensayo de desgaste de Los Ángeles como medida de la resistencia al desgasto en los áridos. Sin embargo, este ensayo puede resultar bastante riguroso para las características de los áridos reciclados ya que las condiciones del ensayo están consideradas muy por encima de las impuestas a lo largo de la vida útil del firme. La presencia de mortero adherido a la matriz del árido Entre las deficiencias del ensayo están el secado previo de las muestras a los 110 °C, la realización en ambiente seco y el amortiguamiento del impacto de las bolas de acero cuando se genera de cantidad excesiva de finos.
Se admite que los materiales que no satisfagan los requisitos aplicables pueden ser utilizados si la aptitud para el uso es demostrada mediante experiencias positivas.
La característica de los áridos reciclados de presentar una mayor absorción de agua en comparación a los áridos naturales favorece el proceso de compactación de los áridos, lo que compensa la resistencia a la fragmentación. Experiencias prácticas con el uso de árido reciclado indican en obra densidades de compactación del 100% del valor obtenido en el ensayo del Próctor de referencia.
Para las clases 2 y 3, se permitirá superar el valor indicado en la tabla en cinco (5) unidades cuando se hagan las siguientes comprobaciones adicionales: sobre el material ya compactado, la granulometría, la plasticidad y el equivalente de arena deben cumplir los límites marcados en estas recomendaciones técnicas para el material antes de compactar. De esta forma se asegura que una previsible resistencia a la fragmentación baja influya en la distribución de tamaños de la zahorra y en la generación de un exceso de finos perniciosos durante la compactación.

Plasticidad

La plasticidad de los áridos reciclados para utilizar en las aplicaciones granulares contempladas debe cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.8.

Clase / Aplicación	Límite líquido - UNE 103103	Índice de plasticidad - UNE 103104
Clase 1	No plástico	No plástico
Clase 2	No plástico	No plástico
Clase 3	No plástico	No plástico
Clase 4[1]	< 25	< 6
Clase 4[2]	< 35	< 9

Tabla 10.8. Plasticidad de los áridos reciclados.

[1] En subbase o si la base va a recibir un tratamiento bituminoso posterior
[2] Si no va a recibir un tratamiento bituminoso posterior

Nota:
Los arcenes no pavimentos T32 y T4 (T41 y T42) pueden presentar LL < 30 e IP < 10.

Calidad de los finos

El equivalente de arena, según la UNE-EN 933-8, de la zahorra reciclada, deberá cumplir lo indicado en la tabla 10.9.

Clase / Aplicación		Equivalente de arena (%) - UNE-EN 933-8
Clase 1	calzada	> 40
	arcenes	> 35
Clase 2	calzada	> 40
	arcenes	> 35
Clase 3		> 35
Clase 4		> 30

Tabla 10.9. Calidad de los finos de los áridos reciclados.

De no cumplirse la condición para el equivalente de arena, su valor de azul de metileno, según la UNE-EN 933-9, deberá ser inferior a diez (10), y simultáneamente, el equivalente de arena no

1 Para la obtención de la composición de los áridos reciclados por tipo, se recomienda la realización del ensayo EN 933-11 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los constituyentes del árido reciclado grueso.

deberá ser inferior en más de cinco unidades a los valores indicados en la tabla anterior.

Limpieza

La limpieza superficial de los áridos reciclados debe cumplir las condiciones de la tabla 10.10.

Clase / Aplicación	Coeficiente de limpieza (%) - NLT 172/86
Clase 1	< 2
Clase 2	< 2
Clase 3	< 2
Clase 4	N.A.

Tabla 10.10. Limpieza superficial de los áridos reciclados.

Comentario:
Sin embargo, para los usos no ligados que contempla esta recomendación, podemos considerar que si la calidad de los finos resulta adecuada, este ensayo no debe ser utilizado para rechazar el uso del material.

Nota 1:
Los materiales deben estar exentos de terrones de arcilla, marga, materia orgánica, o cualquier otro material que pueda afectar a la durabilidad del producto. Principalmente, en lo que se refiere a ausencia del polvo y de las partículas arcillosas, se pretende garantizar que en presencia de agua sean conservadas las características resistentes de la capa.

Nota 2:
Dados los problemas para cumplir con el límite fijado en el PG3, para una parte de los áridos reciclados se propone la realización de un estudio de caracterización de los finos adheridos a las partículas gruesas para descartar la posible presencia de sustancias perniciosas para las capas de zahorra.
No obstante, se propone que en caso de incumplimiento de este ensayo, se realicen otros dos que permitan tener la garantía de que los finos adheridos no son peligrosos: terrones de arcilla según UNE 7133 y contenido en materia orgánica según UNE 103 204, con un límite máximo propuesto del 2% en el primer caso y del 1% en el segundo caso.

10.1.3.3 Requisitos químicos

Compuestos de azufre

El contenido total de azufre de los áridos reciclados ha de cumplir las condiciones de la tabla 10.11. Se propone mantener el ensayo del contenido total en azufre según UNE-EN 174-1, con el límite del 1% expresado en SO_3, para el caso de capas que no estén en contacto con capas tratadas con cemento. En caso contrario, se estima más adecuado el ensayo de sulfatos solubles en agua, según la norma UNE-EN 1744-1, manteniendo igualmente el límite dado por el PG3 de 0,5%.

Clase / Aplicación	Contenido total de azufre (%SO_3) - UNE-EN 1744-1
Clase 1	≤ 1 % (*)
Clase 2	≤ 1 % (*)
Clase 3	≤ 1 % (*)
Clase 4	≤ 1 % (*)

Tabla 10.11. Contenido en azufre de los áridos reciclados.

(*) ≤ 0,5 % si los materiales están en contacto con capas tratadas con cemento

Sulfatos solubles en agua

El contenido total de sulfatos solubles en agua de los áridos reciclados en las aplicaciones granulares contempladas deben cumplir las condiciones de la tabla 10.12.

Clase / Aplicación	Contenido de sulfatos solubles en agua (%SO_3) - UNE-EN 1744-1
Clase 1	≤ 0,5 %
Clase 2	≤ 0,5 %
Clase 3	≤ 0,5 %
Clase 4	≤ 0,5 %

Tabla 10.12. Contenido de sulfatos solubles en agua de los áridos reciclados.

Comentario:
El estudio realizado por el Proyecto GEARHa puesto en evidencia tanto la tendencia a un nivel excesivo de sulfatos en los áridos reciclados en España, como los mecanismos para solventar este problema en las plantas de reciclaje: no utilización de las fracciones más finas del árido reciclado (mediante pre cribado) y sistemas de lavado (por medio acuático).

Nota 1:
La presencia de sulfatos en los áridos reciclados tiende a ser elevada y se debe a impurezas como el mortero, el yeso y el sulfato procedente de las arcillas originales de la obra de fábrica que provocan eflorescencias.

Nota 2:
Según la RILEM el contenido de sulfatos solubles en ácido, expresados en SO3, debe ser inferior al 1%. La norma alemana DIN 4161 también establece un contenido de sulfatos máximo del 1% para ARH, correspondiendo a un 2,1% del contenido en yeso. Se debe resaltar que para áridos más ligeros, como es el caso del ARC, se permite un mayor contenido de yeso en comparación con el árido convencional debido a que este parámetro se calcula en relación al peso del árido. De acuerdo con la norma holandesa NEN 3542 el contenido de sulfato en los ARC no debe exceder un 1% del peso del árido seco.

Finalmente, la normativa española para hormigones fija los límites de compuestos totales de azufre expresados en SO_3 en un 1% y de sulfatos solubles en ácido expresados en SO_3 en 0,8%.
Según la bibliografía existente el árido reciclado de hormigón puede cumplir estas dos limitaciones si se toman las prevenciones debidas durante su producción. Algunos estudios realizados identificaron valores entre 0,10 y 0,62% para el contenido de sulfatos solubles en ácido expresado en SO_3, mientras que el contenido de compuestos totales de azufre expresado en SO_3 presentó valores algo superiores.
Para los áridos cerámicos, algunos estudios han determinado el contenido de SO_3 para cada densidad y fracción granulométrica. Todos los resultados presentarán valores por debajo del límite establecido por la norma holandesa (entre 0,1 y 0,5% del peso del árido) y no presentarán diferencias en función de la densidad o de la granulometría.

10.1.3.4 Requisitos ambientales

Se aplicará el ensayo de lixiviación UNE EN 12457-4 y los valores límite de la UE DOCE 16/1/03 con carácter transitorio hasta que existan valores y recomendaciones españolas o UE para el ensayo de percolación.

10.1.4 Resumen de los requisitos técnicos

Requisitos técnicos	Clase / Aplicación			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Granulometría	Tabla 10.3	Tabla 10.3	Tabla 10.3	Tabla 10.3
Índice de lajas	< 35%	< 35%	< 35%	< 35%
Partículas trituradas	100%	≥ 75%	≥ 50%	≥ 75%
Composición(*)	ARH ó ARMa	ARH, ARMa ó ARMc	Todas las categorías	Todas las categorías
Coeficiente Los Ángeles	≤ 35%	≤ 35%	≤ 40%	≤ 45%
Límite Líquido	No plástico	No plástico	No plástico	< 25
Plasticidad	No plástico	No plástico	No plástico	< 6
Equivalente de arena	> 40%	> 40%	> 35%	> 30%
Coeficiente de limpieza (*)	< 2%	< 2%	< 2%	N.A.
Terrones de arcilla	< 1%	< 1%	< 1%	N.A.
Materia orgánica	≤ 0,2 %	≤ 0,2 %	≤ 0,2 %	N.A.
Compuestos de azufre	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %
Sulfatos solubles en agua	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %

Tabla 10.13. Resumen de los requisitos técnicos recomendados.

(*) Requisito orientativo y no limitador

10.1.5 Control de calidad

El productor de áridos debe tener en funcionamiento un sistema de control de producción en fábrica que cumpla con los requisitos especificados en la GEAR-RT-01 (capítulo 9).

El objetivo es garantizar que todos los áridos producidos cumplirán los requisitos exigidos para la aplicación prevista de acuerdo con las recomendaciones técnicas aplicables.

En lo que se refiere específicamente al control de producción en fábrica de áridos reciclados a ser utilizados como material granular en firmes, se establece la realización de ensayos iníciales de tipo e inspecciones periódicas de control del producto de acuerdo con los siguientes puntos de este documento.

10.1.5.1 Ensayos iniciales de tipo

El productor deberá realizar ensayos iniciales de tipo para asegurar que el producto cumple con estas recomendaciones técnicas.

Se deben realizar nuevos ensayos iniciales de tipo cuando se modifique significativamente el proceso o los equipos del proceso productivo.

La toma de muestras del material destinados a ensayar ha de ser realizada conforme a la norma UNE EN 932-2. El proceso de la toma de muestras tiene que ser registrado en un documento que será firmado por las personas presentes durante la toma de la muestra.

Si la evaluación inicial da un resultado negativo, se debe llevar a cabo un segundo examen inmediatamente. Si el resultado de esta segunda evaluación es negativo de nuevo, el material afectado definitivamente no cumple con los requisitos de la directriz.

La evaluación inicial debe ser llevada a cabo, como mínimo, una vez por cada planta de producción, por tipo de árido y por granulometría entregada.

Los ensayos a realizar en la caracterización inicial se indican en la tabla 10.14.

Ensayos iniciales de tipo	Necesidad de realización por clase / Aplicación			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Granulometría	X	X	X	X
Índice de lajas	X	X	X	X
Partículas trituradas	X	X	X	X

Ensayos iniciales de tipo	Necesidad de realización por clase / Aplicación			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Composición	X	X	X	X
Coeficiente los Ángeles	X	X	X	X
Límite Líquido	X	X	X	X
Plasticidad	X	X	X	X
Equivalente de arena	X	X	X	X
Coeficiente de limpieza	X	X	X	X
Terrones de arcilla	X	X	X	X
Materia orgánica	X	X	X	X
Compuestos de azufre	X	X	X	X
Sulfatos solubles en agua	X	X	X	X

Tabla 10.14. Ensayos iniciales de tipo en el control de producción de zahorras recicladas.

Los resultados de los ensayos iniciales se deben documentar como punto de partida en el proceso del control de producción en fábrica.

10.1.5.2 Inspección y ensayos

El productor deberá realizar inspecciones periódicas de control del producto para asegurar que los materiales producidos mantienen sus propiedades y, consecuentemente, mantienen el cumplimiento de estas recomendaciones técnicas.

La frecuencia de los muestreos y de los ensayos requeridos de las características más importantes será la que se especifica en la tabla 10.15.

Ensayos de inspección	Frecuencias mínimas por clase / Aplicación			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Granulometría	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3
Índice de lajas	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Partículas trituradas	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Composición	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Coeficiente Los Ángeles	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3
Plasticidad	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Equivalente de arena	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3
Coeficiente de limpieza	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	N.A.
Materia orgánica	2/año	2/año	2/año	2/año
Próctor modificado	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Compuestos de azufre	2/año	2/año	2/año	2/año
Sulfatos solubles en agua	2/año	2/año	2/año	2/año

Tabla 10.15. Frecuencias de los ensayos a realizar según clase de zahorra reciclada.

Nota 1:
Las frecuencias mínimas de ensayo no se definen en función del tiempo transcurrido, sino de la cantidad de material procesado.

Nota 2:
Los requisitos para el control de producción en fábrica pueden conllevar inspecciones visuales. Cualquier divergencia indicada por estas inspecciones puede llevar a incrementar las frecuencias de las pruebas. Cuando un valor medido está cerca de un límite especificado, la frecuencia de las pruebas puede precisar ser incrementada.

Nota 3:
La reiteración en el cumplimiento y la reducción de la variación de los valores analizados de un parámetro determinado, permite reducir la frecuencia del ensayo.

10.1.5.3 Ejecución de la obra

Durante la ejecución de la obra, los productos objeto de las presentes recomendaciones técnicas deben ser tratados igual a sus equivalentes convencionales, siguiendo las precauciones y recomendaciones indicadas a continuación.

Respecto al equipo necesario para la ejecución de la obra:

- Central de fabricación de la zahorra de árido reciclado: Será de aplicación lo indicado en el apartado 510.4.1 del PG3.
- Elementos de transporte: Será de aplicación lo indicado en el apartado 510.4.2 del PG3.
- Equipos de extensión: Será de aplicación lo indicado en el apartado 510.4.3 del PG3.
- Equipos de compactación: Será de aplicación lo indicado en el apartado 510.4.4 del PG3.

Respecto al tramo de prueba, será de aplicación lo indicado en el apartado 510.5.6 del PG3.

En lo que se refiere a las especificaciones de la unidad terminada:

- Densidad: Dado que una de las características del árido reciclado es su alta absorción de agua, que además es más lenta por lo general que en los áridos naturales, será necesario prehumectar el árido al menos durante una hora previo a la realización del ensayo de Próctor Modificado según UNE 103 501. En la compactación de la zahorra, la densidad in situ según UNE 103 503 ó ASTM-D 3017, cumplirá lo especificado en la Tabla 10.16.
- Capacidad de soporte: Deberá cumplir lo especificado en la Tabla 10.16. Para las clases 1 a 3, será de aplicación lo recogido para Zahorra Artificial en el apartado 510.7.2 del PG3. Para el uso en la Clase 4, el índice C.B.R. según UNE 103 502 post-saturación será superior a 20 para subbases y a 70 para bases, y el hinchamiento según UNE 103 601 en ambos casos será inferior al 0,5 %.
- Rasante, espesor y anchura: Será de aplicación lo indicado en el apartado 510.7.3 del PG3.
- Regularidad superficial: Será de aplicación lo indicado en el apartado 510.7.4 del PG3.

Clase / Aplicación	Densidad Máxima - UNE 103 503	CBR - UNE 103 502	Hinchamiento - UNE 103 601
Clase 1	≤ 100 %	apartado 510.7.2 (PG3)	< 0,5%
Clase 2	≤ 100 %	apartado 510.7.2 (PG3)	< 0,5%
Clase 3	≤ 98 %	apartado 510.7.2 (PG3)	< 0,5%
Clase 4	≤ 98 %	> 20% (subbases) y >70% (bases)	< 0,5%

Tabla 10.16. Porcentaje (%) de la Densidad máxima de referencia del Próctor Modificado "prehumectado".

Para el estudio del material y obtención de la fórmula de trabajo, será de aplicación lo indicado en el apartado 510. Se tendrá en cuenta lo referido anteriormente para la realización del ensayo de Próctor Modificado, para la determinación de la humedad de puesta en obra y compactación.

Para la preparación de la superficie que va a recibir la zahorra, será de aplicación lo indicado en el apartado 510.5.2 del PG3.

Para la preparación del árido reciclado a utilizar, dado su mayor absorción de agua, es recomendable llevar a cabo una presaturación del material antes de su aplicación, para que los valores de densidad y humedad en la compactación se puedan controlar de forma adecuada y se optimice la puesta en obra:

- Cuando las zahorras se fabriquen en central, la adición del agua de compactación se realizará también en central, salvo que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares permita expresamente la humectación in situ.
- En los demás casos, antes de extender una tongada se procederá, si es necesario, a su homogeneización y humectación. Se podrán utilizar para ello la humectación previa en central u otros procedimientos sancionados por la práctica que garanticen, a juicio del Director de las Obras, las características previstas del material previamente aceptado, así como su uniformidad.

Respecto a los procedimientos de extensión y compactación de la zahorra reciclada, será de aplicación lo recogido en los apartado 510.5.4 y 510.5.5. del PG3, respectivamente.

Finalmente, para el control de ejecución:

- Se examinará la descarga al acopio o en el tajo, desechando los materiales que, a simple vista, presenten restos de tierra vegetal, materia orgánica o tamaños superiores al máximo aceptado en la fórmula de trabajo. Se acopiarán aparte aquéllos que presenten alguna anomalía de aspecto, tal como distinta coloración, segregación, lajas, plasticidad, etc.
- En su caso, se vigilará la altura de los acopios, el estado de sus separadores y de sus accesos.
- En el caso de las zahorras artificiales preparadas en central se llevará a cabo la toma de muestras a la salida del mezclador. En los demás casos se podrá llevar a cabo la toma de muestras en los acopios. En ese contexto, se realizarán los ensayos indicados en la tabla 10.17.

Ensayo	Norma	Frecuencia
Equivalente de arena	UNE-EN 933-8	Cada 1.000 m^3, o cada día si se fabricase menos material, sobre un mínimo de dos (2) muestras, una por la mañana y otra por la tarde
Azul de metileno	UNE-EN 933-9	
Granulometría	UNE-EN 933-1	
Composición	UNE-EN 933-11	Cada 5.000 m^3 de material producido, o una (1) vez a la semana si se fabricase menos material
Límite líquido	UNE 103103	
índice de plasticidad	UNE 103104	
Proctor modificado	UNE 103501	
Índice de lajas	UNE-EN 933-3	
Partículas trituradas	UNE-EN 933-5	
Humedad natural	UNE-EN 1097-5	
Coeficiente Los Ángeles	UNE-EN 1097-2	20.000 m^3 de material producido, o una (1) vez al mes si se fabricase menos material

Tabla 10.17. Ensayos para control de ejecución.

El Director de las Obras podrá reducir la frecuencia de los ensayos a la mitad (1/2) si considerase que los materiales son suficientemente homogéneos, o si en el control de recepción de la unidad terminada se hubieran aprobado diez (10) lotes consecutivos.

Para la puesta en obra, antes de descargar la zahorra, se comprobará su aspecto en cada elemento de transporte y se rechazarán todos los materiales segregados. Se comprobarán frecuentemente:

- El espesor extendido, mediante un punzón graduado u otro procedimiento aprobado por el Director de las Obras.
- La humedad de la zahorra a su llegada a obra y en el momento de la compactación, mediante un procedimiento aprobado por el Director de las Obras.
- La composición y forma de actuación del equipo de puesta en obra y compactación, verificando:
  - ✓ Que el número y tipo de compactadores es el aprobado.
  - ✓ El lastre y la masa total de los compactadores.
  - ✓ La presión de inflado en los compactadores de neumáticos.
  - ✓ La frecuencia y la amplitud en los compactadores vibratorios.
  - ✓ El número de pasadas de cada compactador.

Para el control de recepción de la unidad terminada, será de aplicación lo recogido en el apartado 510.9.3 del PG3.

Los criterios de aceptación o rechazo del lote siguen los mismos especificados por el PG3:

- Densidad: Será de aplicación lo recogido en el apartado 510.10.1 del PG3.
- Capacidad de soporte: Será de aplicación lo recogido en el apartado 510.10.2 del PG3.
- Espesor: Será de aplicación lo recogido en el apartado 510.10.3 del PG3.
- Rasante: Será de aplicación lo recogido en el apartado 510.10.4 del PG3.
- Regularidad superficial: Será de aplicación lo recogido en el apartado 510.10.5 del PG3.

10.2 GEAR-RT-02: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material granular en rellenos y expalanaciones

10.2.1 Ámbito de aplicación

Estas recomendaciones técnicas se aplican a los áridos procedentes del reciclaje de residuos de construcción y demolición que vayan a ser utilizados como material granular en la construcción de terraplenes, explanaciones y rellenos diversos.

Estas recomendaciones establecen los requisitos y propiedades de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (en adelante, RCD) que se destinan a dichos usos. También indican los procedimientos del control de calidad en planta (ensayos a realizar y frecuencia) a las que se deben someter estos áridos en el proceso de reciclado.

El presente documento no afecta al procesado de residuos o subproductos industriales realizado en plantas de tratamiento de otro tipo de residuos (plantas de la industria de materiales de construcción), ni a otro tipo de áridos reciclantes distintos de los procedentes de residuos de construcción y demolición (por ejemplo, áridos siderúrgicos o áridos bituminosos).

Las aplicaciones consideradas en esta recomendación son:

- Suelos seleccionados
- Suelos adecuados
- Suelos tolerables
- Suelos marginales
- Rellenos localizados
- Rellenos localizados de material drenante

Esta propuesta es coherente y adapta la siguiente normativa técnica a las especificidades de los áridos reciclados procedentes de RCD,:

- Art. 330 ORDEN FOM/1382/02
- Art. 332 ORDEN FOM/1382/02
- Art. 421 ORDEN FOM/1382/02
- Norma 6.1-IC ORDEN FOM/3460/03

10.2.2 Categorías de áridos utilizables y clases de uso

Para las aplicaciones contempladas en estas recomendaciones técnicas, pueden utilizarse áridos reciclados de las siguientes categorías, según establece el capitulo 5 de esta Guía:

- Categoría ARH: Áridos Reciclados de Hormigón.
- Categoría ARMh: Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón.
- Categoría ARMc: Áridos Reciclados Mixtos Cerámicos.
- Categoría ARMa: Áridos Reciclados Mixtos con Asfalto.

Las posibilidades de aplicación de los áridos reciclados abarcadas en las presentes recomendaciones técnicas son divididas en clases de uso, según su grado de exigencias técnicas (tabla 10.18).

Clases	Aplicación
Clase 1	Suelos seleccionados para terraplenes y rellenos localizados
Clase 2	Suelos adecuados para terraplenes y rellenos localizados
Clase 3	Suelos tolerables para terraplenes
Clase 4	Suelos marginales para terraplenes
Clase 5	Rellenos localizados de material drenante

Tabla 10.18. Clases de uso para rellenos según grado de exigencia técnica.

La posibilidad de utilización de los áridos reciclados en las aplicaciones detalladas en la tabla anterior quedará sujeta al cumplimiento de las requisitos técnicos particulares de cada aplicación, establecidos en estas recomendaciones técnicas.

A modo informativo, en la Tabla 10.19 se detallan las categorías de áridos reciclados aptas para las aplicaciones contempladas en el presente documento según clase de uso, teniendo en cuenta las propiedades habitualmente satisfechas por el material por cada categoría de áridos reciclados.

Viabilidad de aplicación		Categoría del Árido Reciclado				
		ARH	ARMh	ARMc	ARMa	MI
Clase de uso	Clase 1	X	X	X	X	
	Clase 2	X	X	X	X	
	Clase 3	X	X	X	X	
	Clase 4	X	X	X	X	
	Clase 5	X	X	X		

Tabla 10.19. Viabilidad de aplicación por categoría de árido y clase de uso.

Nota:
El estudio sobre los áridos reciclados presentado en el capítulo 4 de esta Guía, recoge los resultados analíticos de las muestras ensayadas y su normal cumplimiento de esta tabla. Sin embargo, la clasificación no debe ser utilizada como un elemento limitador de uso del material en una determinada clase.
La calidad técnica del material, independiente de su composición, es el elemento que determina la viabilidad de uso del material en una aplicación. Si el árido reciclado no se adapta a la categoría indicada para una determinada aplicación, pero, aun así, presenta características geométricas, físico-mecánicas y químicas adecuadas a su uso en ella (de acuerdo con los límites presentados en estas recomendaciones), el material puede ser utilizado en el uso planteado.

10.2.3 Requisitos de los áridos

10.2.3.1 Requisitos geométricos

Granulometría

La granulometría debe cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.20.

Clase / Aplicación	Granulometría - UNE 103101
Clase 1	Cernido, o material que pasa, por el tamiz 20 UNE mayor del 70 por 100 por ciento (# 20 > 70 %), según UNE 103101. Cernido, o material que pasa, por el tamiz 0,080 UNE mayor o igual del treinta y cinco por ciento (# 0,080 ≥ 35 %), según UNE 103101.
Clase 2	
Clase 3	
Clase 4	
Clase 5	El tamaño máximo no será, en ningún caso, superior a 76 mm, y el cernido ponderal acumulado por el tamiz 0,080 UNE no rebasará el 5 %

Tabla 10.20. Condiciones granulométricas para los áridos reciclados.

Nota:
Además, deben cumplirse los siguientes requisitos granulométricos en el caso de materiales para suelos seleccionados (clase 1) o adecuados (clase 2).

Clase / Aplicación		Tamaño máximo	Cernido acumulado (% en masa) [a]		
			2	0,40	0,080
Clase 1	Opción 1	≤ 100 mm	-	≤ 15	-
	Opción 2	≤ 100 mm	< 80	< 75	< 25
Clase 2		≤ 100 mm	< 80		< 35

Tabla 10.20. Condiciones granulométricas adicionales para los áridos reciclados.

[a] La abertura de los tamices es definida por la UNE-EN 933-2 (mm)

10.2.3.2 Requisitos físico - mecánicos

Composición

La composición de los áridos reciclados se determinará según la norma EN 933-11.

Los áridos se clasificarán según las categorías indicadas en la tabla 10.21.

Categoría	Descripción	Cantidad de elementos (% del peso total)				
		Ru (Productos pétreos)	Rc (Hormigón y mortero)	Rb (Cerámico)	Ra (Asfalto)	X (Otros)
ARH	Árido reciclado de hormigón	≥ 90%		≤ 10%	≤ 5%	≤ 1%
ARMh	Árido reciclado mixto de hormigón	≥ 70%		≤ 30%	≤ 5%	≤ 1%
ARMc	Árido reciclado mixto de cerámico	< 70%		> 30%	≤ 5%	≤ 1%
ARMa	Árido reciclado mixto con asfalto	-		-	5%-30%	≤ 1%

Tabla 10.21. Categorías de los áridos reciclados procedentes de RCD.

Comentario:
Esta tabla se basa en los resultados obtenidos en el plan de control de la producción de áridos reciclados del Proyecto GEAR, sobre un universo de 65 plantas de reciclaje de toda España. Sin embargo, este estudio también demuestra que la composición no es el único determinante de la calidad del árido reciclado, y que debe ser completado con los resultados técnicos de los ensayos realizados.

Resistencia a la fragmentación

La resistencia a la fragmentación debe cumplir las condiciones presentadas en la Tabla 10.22.

Clase / Aplicación	Coeficiente Los Ángeles (%) - UNE-EN 1097-2	
	L_1	L_2
Clase 1	-	-
Clase 2	-	-
Clase 3	-	-
Clase 4	-	-
Clase 5	<40	<45

Tabla 10.22. Resistencia a la fragmentación de los áridos reciclados.

L_1: Límite corroborado por el PG3 - Parte 5ª: Firmes y pavimentos.
L_2: Límite corroborado por la experiencia / bibliografía especializada.

Nota:
Para la evaluación de la resistencia de los granos, las normativas españolas hacen referencia al ensayo de Abrasión Los Ángeles. Ese ensayo también puede complementarse o substituirse por el ensayo de resistencia al desgaste por el método Micro-Deval (UNE-EN 1097-1), que se adopta en las normativas alemanas, holandesas y portuguesas.

Plasticidad

La plasticidad de los áridos debe cumplir las condiciones presentadas en la Tabla 10.23.

Clase / Aplicación	Límite líquido - UNE 103103	Índice de plasticidad - UNE 103104
Clase 1	< 30	< 10
Clase 2	< 40	Si LL > 30, IP > 4
Clase 3	< 65	Si LL > 40, IP > 0,73*(LL-20)
Clase 4	-	Si LL > 90, IP > 0,73*(LL-20)
Clase 5	No plástico	No plástico

Tabla 10.23. Plasticidad de los áridos reciclados.

Nota:
Los límites presentados en la tabla están corroborados por el PG3 - Parte 5ª: Firmes y pavimentos. Los arcenes no pavimentos T32 y T4 (T41 y T42) pueden presentar LL < 30 y IP < 10.
Los tipos de áridos reciclados abarcados en estas recomendaciones suelen clasificarse como no plástico y no presentar problemas en el cumplimiento de los límites presentados.

Calidad de los finos

La calidad de los finos de los áridos debe cumplir las condiciones presentadas en la Tabla 10.24

Clase / Aplicación	Equivalente de arena (%) - UNE-EN 933-8
Clase 1	-
Clase 2	-
Clase 3	-
Clase 4	-
Clase 5	> 30

Tabla 10.24. Calidad de los finos de los áridos reciclados.

Nota:
Los límites presentados en la tabla están corroborados por el PG3 - Parte 5ª: Firmes y pavimentos. Los tipos de áridos reciclados abarcados en estas recomendaciones suelen no presentar problemas en el cumplimiento de los límites presentados.

De no cumplirse la condición para el equivalente de arena, su valor de azul de metileno, según la UNE-EN 933-9, deberá ser inferior a diez (10), y simultáneamente el equivalente de arena no deberá ser inferior en más de cinco unidades a los valores indicados en la tabla anterior.

Índice CBR

El índice CBR de los áridos debe cumplir las condiciones presentadas en la Tabla 10.24.

Uso específico		Clase / Aplicación	CBR (%) - UNE 103502
Terraplenes	Núcleo	Todas las clases	> 3
	Cimiento		> 3
	Coronación		> 5
Rellenos localizados		Clase 1	> 10 ó > 20 (para trasdós de obra de fábrica)
		Clase 2	
		Clase 3	-
		Clase 4	-
		Clase 5	-

Uso específico	Clase / Aplicación	CBR (%) - UNE 103502
Explanadas	Clase 1	> 10 (*) (**) ó > 20 (*) (**)
	Clase 2	> 5 (*) (**)
	Clase 3	> 3 (*)
	Clase 4	-
	Clase 5	-

Tabla 10.24. Índice CBR de los áridos reciclados.

(*) El CBR se determinará de acuerdo con las condiciones especificadas de puesta en obra, y su valor se empleará exclusivamente para la aceptación o rechazo de los materiales utilizables en las diferentes capas, de acuerdo con la figura de formación de la explanada recogida en la Norma 6.1-IC.
(**) En la capa superior de las empleadas para la formación de la explanada, el suelo adecuado definido como Tipo 1 deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, un CBR 6 y el suelo seleccionado definido como Tipo 2 un CBR 12. Asimismo, se exigirán esos valores mínimos de CBR cuando, respectivamente se forme una explanada de categoría E1 sobre suelos Tipo 1, o una explanada E2 sobre suelos Tipo 2 (Norma 6.1-IC).

Nota:
Los límites presentados en la tabla están corroborados por el PG3 - Parte 5ª: Firmes y pavimentos.
Los tipos de áridos reciclados abarcados en estas recomendaciones suelen no presentar problemas en el cumplimiento de los límites presentados. Al contrario, los áridos reciclados suelen presentar elevados valores de CBR gracias al enriquecimiento de cemento, proveniente del mortero adherido existente en el material reciclado.
Debido a la mayor absorción de agua de los áridos reciclados con respecto a los naturales, para realizar los ensayos próctor y CBR hay que asegurar que los áridos han completado su absorción, lo que se consigue con una humectación previa de los mismos.

Asiento en ensayo de colapso

El asiento en ensayo de colapso de los áridos debe cumplir las condiciones presentadas en la Tabla 10.25.

Clase / Aplicación	Asiento en ensayo de colapso (%) - NLT 254 (*)
Clase 1	-
Clase 2	-
Clase 3	< 1
Clase 4	-
Clase 5	-

Tabla 10.25. Asiento en ensayo de colapso de los áridos reciclados.

(*) Para muestra remoldeada según el ensayo Próctor normal UNE 103500, y presión de ensayo de dos décimas de megapascal (0,2MPa).

Nota:
Los límites presentados en la tabla están corroborados por el PG3 - Parte 5ª: Firmes y pavimentos. Los tipos de áridos reciclados abarcados en estas recomendaciones suelen no presentar problemas en el cumplimiento de los límites presentados.

Hinchamiento libre

El hinchamiento libre de los áridos debe cumplir las condiciones presentadas en la Tabla 10.26.

Clase / Aplicación	Hinchamiento libre (%) - UNE 103601 (*)
Clase 1	-
Clase 2	-
Clase 3	< 3
Clase 4	< 5
Clase 5	-

Tabla 10.26. Hinchamiento libre de los áridos reciclados.

(*) Para muestra remoldeada según el ensayo Próctor normal UNE 103500.

Nota:
Los límites presentados en la tabla están corroborados por el PG3 - Parte 5ª: Firmes y pavimentos. Los tipos de áridos reciclados abarcados en estas recomendaciones suelen no presentar problemas en el cumplimiento de los límites presentados.

Densidad y absorción de agua

Es recomendable conocer la densidad y la absorción de agua de los áridos reciclados, según la norma UNE EN 1097-6, y declarar los resultados, aunque no existe ningún requerimiento técnico para estas propiedades.

Comentario:
Debido a la capa de mortero adherida a los granos, los áridos reciclados de hormigón suelen presentar una densidad inferior a la del árido natural y una mayor absorción. La densidad suele oscilar entre 2.100 y 2.400 kg/m^3, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2.300 y 2.500 kg/m^3. Estos áridos son considerados de densidad normal (no ligeros), por presentar una densidad superior a 2.000 kg/m^3. Para la absorción, la bibliografía indica valores entre 4-10%
El árido reciclado cerámico también presenta una densidad inferior a la del árido natural y una mayor absorción. En ese caso, hay tanto la influencia de la presencia de mortero adherido como de la propia matriz cerámica del material. La densidad suele oscilar entre 1.866 y 2.225 kg/m^3, mientras que para la densidad aparente se han encontrado valores entre 1.159 y 2.564 kg/m^3. La bibliografía muestra valores de absorción entre 6-12 %.
Se debe resaltar que, aunque estas características de densidad y absorción de los áridos reciclados son una de las principales diferencias de estos materiales con los áridos naturales, estas no tienen que considerarse como negativas en el uso de los reciclados como material granular para firmes y explanaciones. Al contrario, la elevada absorción de agua de los áridos reciclados beneficia el proceso de compactación de los áridos, ya que facilita la distribución de los áridos finos entre los huecos creados por los áridos gruesos.
Debido a la mayor absorción de agua de los áridos reciclados con respecto a los naturales, para realizar los ensayos próctor como para su puesta en obra hay que asegurar que los áridos han completado su absorción, lo que se consigue con una humectación previa de los mismos en planta o en obra. Durante el proceso de extendido del suelo previo a la compactación se añadirá el agua necesaria para conseguir la humedad óptima de compactación.

10.2.3.3 Requisitos químicos

Contenido en materia orgánica

El contenido en materia orgánica debe cumplir las condiciones presentadas en la Tabla 10.27.

Clase / Aplicación	Materia orgánica (%) - UNE 103204
Clase 1	< 0,2 ó < 2, para árido ARMa

Clase / Aplicación	Materia orgánica (%) - UNE 103204
Clase 2	< 1 ó < 3, para árido ARMa
Clase 3	< 1 ó < 3, para árido ARMa
Clase 4	< 5
Clase 5	-

Tabla 10.27. Contenido en materia orgánica de los áridos reciclados.

Comentario:
Los límites presentados en la tabla están corroborados por estudios y por la práctica.

Sales solubles y yeso

El contenido de sales y yeso debe cumplir las condiciones presentadas en la Tabla 10.28.

Clase / Aplicación	Sales solubles (%) - NLT 114	Yeso (%) - NLT 115
Clase 1	< 0,2 (sales y yeso) ó < 1, sí contenido en yeso es < 1	
Clase 2	< 0,2 (sales y yeso) ó < 1, sí contenido en yeso es < 1	
Clase 3	< 2	< 5
Clase 4		-
Clase 5		-

Tabla 10.28. Contenido de sales y yeso de los áridos reciclados.

Comentario:
Este apartado constituye el principal punto problemático de los áridos reciclados para esta aplicación en suelos seleccionados. El límite para este uso es de < 0,2 % de sales solubles (según NLT 114), pudiéndose admitir hasta < 1% de sales solubles distintas al yeso para su empleo en el núcleo del terraplén.
De acuerdo con todo lo señalado respecto al contenido en sales solubles y yesos, consideramos que el principal problema que puede derivarse de la presencia de sales solubles y yesos en el material a emplear en los terraplenes es la disolución de material por la penetración de agua, lo que puede conllevar a la aparición de colapsos en la estructura que afecten a la estabilidad del terraplén.
Para las muestras que superen los límites de sales solubles y contenido en yeso expuestos se recomienda realizarles los ensayos de colapso (NLT 254) e hinchamiento (UNE 103601). Los porcentajes de aquellas muestras que no presenten colapso podrían servir para su empleo en terraplenes.
No obstante todo lo anterior, un límite tentativo del contenido en yesos admisible debería rondar el 3 %.

10.2.3.4 Requisitos ambientales

Se aplicará el ensayo de lixiviación UNE EN 12457-4 y los valores límite de la UE DOCE 16/1/03 con carácter transitorio hasta que existan valores y recomendaciones españolas o UE para el ensayo de percolación.

La Recomendación GEAR-RT-09 (capítulo 17) establece criterios y orientaciones sobre el control de los requisitos ambientales en los productos reciclados.

10.2.4 Resumen de los requisitos técnicos

Requisitos técnicos			Clase / Aplicación				
			Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Granulometría			Tabla 11.3	Tabla 11.3	Tabla 11.3	Tabla 11.3	Tabla 11.3
Composición(*)			Todas las categorías	Todas las categorías	Todas las categorías	Todas las categorías	Todas menos la categoría ARMa
Coeficiente de Los Ángeles			-	-	-	-	< 45
Límite líquido			< 30	< 40	< 65	-	No plástico
Plasticidad			< 10	Si LL > 30, IP > 4	Si LL > 40, IP > 0,73*(LL-20)	Si LL > 90, IP > 0,73*(LL-20)	No plástico
Equivalente de arena			-	-	-	-	> 30%
CBR	Terraplén	Núcleo	> 3%	> 3%	> 3%	> 3%	-
		Cimiento	> 3%	> 3%	> 3%	> 3%	-
		Coronación	> 5%	> 5%	> 5%	> 5%	-
	Rellenos localizados		> 10% > 20% en el caso de trasdós de obra de fábrica	> 10% > 20% en el caso de trasdós de obra de fábrica	-	-	-
	Explanada		> 10% o > 20%	> 5%	> 3%	-	-
Asiento en ensayo de colapso			-	-	< 1%	-	-

Requisitos técnicos	Clase / Aplicación				
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Hinchamiento libre	-	-	< 3%	< 5%	-
Materia orgánica	< 0,2 % < 2 % para ARMa	< 1 % < 3 % para ARMa	< 2 % < 3 % para ARMa	< 5 %	-
Compuestos solubles en agua	< 0,2 % (incl. yeso) < 1 % si yeso < 1 %	< 0,2 % (incl. yeso) < 1 % si yeso < 1 %	< 2 % yeso < 5 %	-	-
Sulfatos solubles en agua	-	-	< 1 %	-	-

Tabla 10.29. Resumen de los requisitos técnicos.

(*) Requisito orientativo y no limitador

10.2.5 Control de calidad

El objetivo es garantizar que todos los áridos producidos cumplirán los requisitos exigidos para la aplicación prevista de acuerdo con las recomendaciones técnicas aplicables.

En lo que se refiere específicamente al control de producción en fábrica de áridos reciclados a ser utilizados en terraplenes, explanaciones y rellenos diversos, se establece la realización de ensayos iníciales de tipo e inspecciones periódicas de control del producto de acuerdo con los siguientes puntos de este documento.

10.2.5.1 Ensayos iníciales de tipo

El productor deberá realizar ensayos iniciales de tipo para asegurar que el producto cumple con estas recomendaciones técnicas.

Se deben realizar los ensayos iniciales de tipo correspondientes a la utilización prevista, con objeto de verificar la conformidad con los requisitos especificados en ella, siempre en los casos siguientes:

- Cuando se vayan a utilizar áridos procedentes de una nueva fuente (demolición o residuos de construcción).
- Cuando se haya producido un cambio significativo en la naturaleza del material de construcción o demolición reciclado de una misma fuente, o en las condiciones de almacenamiento o tratamiento, que puedan afectar a las propiedades de los áridos.

Se deben tomar muestras del material para los exámenes, que deben ser realizados conforme a norma UNE EN 932-2. El proceso de la toma de muestras tiene que ser registrado en un documento que debe ser firmado por las personas presentes durante la toma de la muestra. Si la evaluación inicial da un resultado negativo, se debe llevar a cabo un segundo examen inmediatamente. Si el resultado de esta segunda evaluación es negativo de nuevo, el material afectado definitivamente no cumple con los requisitos de la directriz.

La evaluación inicial debe ser llevada a cabo, como mínimo, una vez por cada planta de producción, por tipo de árido y por granulometría entregada.

Las pruebas que deben ser realizadas están indicadas en la tabla 10.30.

Ensayos Iniciales de tipo	Necesidad de realización por clase / Aplicación				
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Granulometría	X	X	X	X	X
Composición	X	X	X	X	X
Coeficiente Los Ángeles	X	X	X	X	X
Límite Líquido	X	X	X	X	X
Plasticidad	X	X	X	X	X
Equivalente de arena					X

Ensayos Iniciales de tipo	Necesidad de realización por clase / Aplicación				
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Índice CBR	X	X	X(*)	X(*)	
Asiento en ensayo de colapso			X		
Hinchamiento libre			X	X	
Contenido en yeso	X	X	X	X	X
Materia orgánica	X	X	X	X	X
Compuestos solubles en agua	X	X	X		X

Tabla 10.30. Ensayos iniciales de tipo necesarios en el contexto del control de producción en fábrica de los áridos considerados en estas recomendaciones.

(*) solo en determinados casos (ver apartados correspondientes en la sección 11.3.2)

Los resultados de los ensayos iniciales se deben documentar como punto de partida para el control de producción en fábrica del material.

10.2.5.2 Inspección y ensayos

El productor deberá realizar inspecciones periódicas de control del producto para asegurar que los materiales producidos mantienen sus propiedades y, consecuentemente, mantienen el cumplimiento de estas recomendaciones técnicas.

La frecuencia de los muestreos y de los ensayos requeridos de las características más importantes será la que se especifica en la tabla 10.31.

Ensayos de inspección	Frecuencias mínimas por clase / Aplicación				
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Granulometría	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Composición	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Coeficiente Los Ángeles	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3
Límite Líquido	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3
Plasticidad	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3
Equivalente de arena					1 cada 20.000 m^3
Índice CBR	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	
Asiento en ensayo de colapso			1 cada 20.000 m^3		
Hinchamiento libre			1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	
Contenido en yeso	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Materia orgánica	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Compuestos solubles en agua	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3		1 cada 5.000 m^3

Tabla 10.31. Frecuencias de los ensayos a realizar en el contexto del control de producción en fábrica de los áridos considerados en estas recomendaciones.

Nota 1:

Las frecuencias mínimas de ensayo no se definen en función del tiempo transcurrido sino de la cantidad de material procesado.

Nota 2:

Los requisitos para el control de producción en fábrica pueden conllevar inspecciones visuales. Cualquier divergencia indicada por estas inspecciones puede llevar a incrementar las frecuencias de las pruebas.

Nota 3:

Cuando un valor medido está cerca de un límite especificado, la frecuencia de las pruebas puede precisar ser incrementada.

10.2.6 Ejecución de la obra

Durante la ejecución de la obra, los productos objeto de la presente recomendación técnica deben ser tratados igual a sus equivalentes convencionales, siguiendo las precauciones y recomendaciones indicadas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3), Parte 5ª: Firmes y pavimentos. Y en particular, las siguientes órdenes y circulares del Ministerio de Fomento, que incorporan disposiciones relativas a la utilización de áridos reciclados:

- Orden Circular 8/2002, sobre reciclado de firmes
- Orden Circular 10/2002, sobre secciones de firmes y capas estructurales de firmes.
- Orden FOM/475/2002, de 13 de febrero, de actualización del PG3.
- Orden FOM/1382/2002, de 16 de mayo, de actualización del PG3.
- Orden FOM/3459/2004, de 28 de noviembre, que aprueba la Norma 6.3-IC "Rehabilitación de Firmes".
- Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, que aprueba la Norma 6.1-IC "Secciones de firmes".
- Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, de actualización del PG3.

Como recomendaciones específicas se presentan los comentarios a seguir.

En lo que se refiere al almacenaje de los áridos reciclados en obra, los acopios se formarán y explotarán de modo a:

- Evitar la contaminación de los materiales, principalmente en lo que se refiere a la superficie de formación de los acopios;
- Evitar la exposición prolongada del material a la intemperie;
- Mantener la segregación adecuada de los materiales para impedir la mezcla de distintos tipos de materiales.

La altura de los acopios, el estado de sus separadores y de sus accesos deberán ser vigilados.

Además, durante la descarga de los áridos al acopio o en el tajo, estos deberán ser examinados. Los materiales que, a simple vista, presenten restos de tierra vegetal, materia orgánica o tamaños superiores al máximo aceptado en el proyecto deberán ser separados. Se acopiarán aparte aquéllos que presenten alguna anomalía de aspecto (distinta coloración, segregación, lajas, plasticidad, etc).

Para la preparación de la superficie de apoyo del relleno, se deben adoptar los procedimientos indicados en el PG3.

Las actividades previstas de desbroce, eliminación de la capa de tierra vegetal, escarificado y escalonado deben seguir las consideraciones indicadas en este Pliego.

Una vez preparada la superficie de apoyo, se procederá a la construcción del relleno, empleando los materiales que se han definido anteriormente. Los áridos serán extendidos en tongadas sucesivas, de espesor uniforme y sensiblemente paralelas a la explanada final.

Para los rellenos tipo terraplén, debe resaltarse que ninguna tongada se extenderá sin la comprobación de que la superficie subyacente cumple las condiciones exigidas y sea autorizada su extensión por el Director de las Obras.

Como en la ejecución de rellenos con áridos naturales, la tongada deberá presentar un espesor adecuado para obtener el grado de compactación exigido en proyecto. En general y salvo especificación en contra del Proyecto o del Director de las Obras, el espesor será de:

- Treinta centímetros (30 cm) o se presentará superior a tres medios (3/2) del tamaño máximo del material a utilizar, para rellenos tipo terraplén;
- De veinticinco centímetros (25 cm) para rellenos localizados.

Durante el proceso de extensión, la uniformidad del material debe ser garantizada mezclándolos convenientemente con la maquinaria adecuada para ello.

Debido a la característica de alta absorción de los áridos reciclados, el riego debe ser abundante, próximo al encharcamiento, hasta conseguir el grado de compactación previsto. Se efectuará esta operación humectando uniformemente los materiales, sea en las zonas de procedencia (canteras, préstamos), en acopios intermedios o en la tongada. Serán adoptados los sistemas adecuados para asegurar la citada uniformidad (desmenuzamiento previo, uso de rodillos, pata de cabra, etc.).

El contenido óptimo de humedad se determinará en obra, a la vista de la maquinaria disponible y de los resultados que se obtengan de los ensayos realizados.

Conseguida la humedad más conveniente, se procederá a la compactación mecánica de la tongada, que se continuará hasta alcanzar la densidad de compactación especificada en la tabla 10.32.

Clase de aplicación	Densidad de compactación - Próctor Modificado - UNE 103501	
	Coronación	Cimiento
Clase 1	100 %	> 95 %

Clase de aplicación	Densidad de compactación - Próctor Modificado - UNE 103501	
	Coronación	Cimiento
Clase 2	100 %	> 95 %
Clase 3	100 %	> 95 %
Clase 4	-	-
Clase 5	> 80 %	

Tabla 10.32. Densidad de compactación de los áridos reciclados para explanadas.

Nota:
Los límites presentados en la tabla están corroborados por el PG3. En el caso de suelos expansivos para rellenos tipo terraplén se aconseja el uso del ensayo Próctor normal UNE 103500.

Si la humedad del material se presenta excesiva para conseguir la compactación prevista, se tomarán las medidas como la desecación por oreo o a la adición y mezcla de materiales secos o sustancias apropiadas, para ajustar ese parámetro y mantener las condiciones de compactación exigidas.

En lo que se refiere al control de la compactación de rellenos tipo terraplén, serán adoptados los procedimientos indicados en el PG3.

El control se efectuará por el método de control de producto terminado, a través de determinaciones in situ en el relleno compactado de densidad, humedad, y módulo de deformación. Los resultados obtenidos serán comparados con los correspondientes valores de referencia.

Para el caso de uso de áridos reciclados, se recomienda, además, la realización de los siguientes ensayos complementarios para caracterizar las propiedades geotécnicas del relleno: resistencia al corte, expansividad, colapso, etc.

10.3. GEAR-RT-03: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en firmes y explanaciones

10.3.1 Ámbito de aplicación

Estas recomendaciones técnicas se aplican a los áridos procedentes del reciclaje de residuos de construcción y demolición que vayan a ser utilizados como material tratado con ligantes hidráulicos en firmes y explanaciones.

Las recomendaciones establecen los requisitos y propiedades de los productos compuestos de residuos de construcción y demolición que se pretenden reciclar en dichas aplicaciones. También indican estándares de calidad que determinan el tipo y la extensión de las evaluaciones que deben ser llevadas a cabo en los materiales de construcción reciclados.

El presente documento no afecta al procesado de residuos o subproductos industriales realizado en plantas de tratamiento de otro tipo de residuos (plantas de la industria de materiales de construcción), ni a otro tipo de áridos reciclados distintos de los procedentes de residuos de construcción y demolición (por ejemplo, áridos siderúrgicos o áridos bituminosos).

Las aplicaciones consideradas en esta recomendación son:

- Suelocemento (SC20 y SC40)
- Gravacemento (GC20 y GC25)

Esta propuesta es coherente y adapta la siguiente normativa técnica a las especificidades de los áridos reciclados procedentes de RCD:

- Norma EN 13242. Áridos para capas estructurales de firmes.
- Art. 513 Orden/FOM/891/2004
- Directiva Europea de depósitos controlados, 99/31.
- Real Decreto. 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertederos.
- Orden MAM/304/202, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista Europea de residuos.
- Decret 201/1994, de 26 de julio, regulador dels enderrocs i altres residus de la construcción.
- Decret 161/2001, de 12 de junio, de modificació del Decret 201/1994, de 26 de juliol, regulador dels enderrocs i altres residus de la construcción.
- I Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006 y II Plan Nacional de Residuos de construcción y Demolición 2007-2015.
- Programa de Gestió dels Residus de la Construcció a Catalunya, 2001-2006.

Además, considera las siguientes especificaciones técnicas y requerimientos normativos en materia medioambiental UE Directiva Europea de productos de la construcción (DEPC):

- Normas Europeas armonizadas (Enh).
- Documentos de Idoneidad Técnica Europeos (DITE).
- Debido a la naturaleza deben cumplir los requisitos en cuanto a la producción de lixiviados que se exigen a los depósitos controlados de RCD (en Catalunya Decreto 1/1997)

10.3.2 Categorías de áridos utilizables y clases de uso

Para las aplicaciones contempladas en estas recomendaciones técnicas, pueden utilizarse áridos reciclados de las siguientes categorías, según establece el capitulo 5 de esta Guía:

- Categoría ARH: Áridos Reciclados de Hormigón.
- Categoría ARMh: Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón.
- Categoría ARMc: Áridos Reciclados Mixtos Cerámicos.
- Categoría ARMa: Áridos Reciclados Mixtos con Asfalto.

Las posibilidades de aplicación de los áridos reciclados incluídas en estas recomendaciones técnicas se dividen en clases de uso según su grado de exigencia técnica (tabla 10.33).

Clases		Aplicación
Suelo cemento	SC20	Suelocemento de aplicación en calzadas y arcenes T3 y T4
	SC40	Suelocemento de aplicación en calzadas y arcenes T00 a T2
Grava cemento	GC20	Gravacemento de aplicación en calzadas T00 a T2
	GC25	Gravacemento de aplicación en calzadas T3 y T4 y arcenes en sustitución de SC40

Tabla 10.33. Clases de uso en las presentes recomendaciones técnicas, según grado de exigencia técnica.

La posibilidad de utilización de los áridos en las aplicaciones detalladas en la tabla anterior quedará sujeta al cumplimiento de las presentes recomendaciones.

A modo informativo, en la Tabla 10.34. se detallan las categorías de áridos reciclados aptas para las aplicaciones contempladas en el presente documento según clase de uso, teniendo en cuenta las propiedades habitualmente satisfechas por el material por cada categoría de áridos reciclados.

Viabilidad de aplicación			Categoría del Árido Reciclado				
			ARH	ARMh	ARMc	ARMa	MI
Clase de Uso	Suelocemento	SC20					
		SC40	X	X	X		
	Gravacemento	GC20	X	X			
		GC25	X	X	X	X	

Tabla 10.34. Viabilidad de aplicación por categoría de árido y clase de uso.

Nota:
El estudio sobre los áridos reciclados, presentado en el capítulo 4 de esta Guía, recoge los resultados analíticos de las muestras ensayadas y certifica el general cumplimiento de esta tabla. Sin embargo, la clasificación no debe ser utilizada como un elemento limitador de uso del material en una determinada clase.
La calidad técnica del material, independiente de su composición, es el elemento que determina la viabilidad de uso del material en una aplicación. Si el árido reciclado no se adapta a la categoría indicada para determinada aplicación, pero, aun así, presenta características geométricas, físicas y químicas adecuadas a su uso en ella (de acuerdo con los límites presentados en estas recomendaciones), el material puede ser utilizado en el uso planteado.

10.3.3 Requisitos de los áridos

10.3.3.1 Requisitos geométricos

Granulometría

La granulometría del material deberá cumplir alguno de los husos que se citan en las tablas 10.35 y 10.36.

Clase	Cernido acumulado (% en masa mínimo-máximo) [a]									
	50	40	25	20	12,5	8	4	2	0.500	0.063
SC40	100	80-100	67-100	62-100	53-100	45-89	30-65	17-52	5-37	2-20
SC20	-	-	100	92-100	75-100	63-100	48-100	36-94	18-65	2-35

Tabla 10.35. Husos granulométricos para la aplicación de suelo cemento.

[a] La abertura de los tamices es la definida por la UNE-EN 933-2 (mm)

Clase	Cernido acumulado (% en masa mínimo-máximo) [a]							
	40	25	20	8	4	2	0.500	0.063
GC25	100	76-100	67-91	38-63	25-48	16-37	6-21	1-7
GC20	-	100	80-100	44-68	28-51	19-39	7-22	1-7

Tabla 10.36. Husos granulométricos para la aplicación de gravacemento.

[a] La abertura de los tamices es definida por la UNE-EN 933-2 (mm)

Forma

La forma del árido grueso, según el ensayo de determinación del índice de lajas UNE-EN 933-3, para utilizar en las aplicaciones granulares contempladas deberá cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.37.

Clase / Aplicación		Índice de lajas (%) - UNE-EN 933-3
SC20		-
SC40		-
GC20	Calzadas T00 a T2	≤ 30
GC25	CalzadasT3 y T4	≤ 35
	Arcenes T00 a T1	≤ 40

Tabla 10.37. Índice de lajas del árido grueso reciclado.

Nota:
La forma de las partículas del árido grueso afecta fundamentalmente al esqueleto mineral del árido. Los tipos de árido reciclado abarcados en estas recomendaciones no suelen presentar problemas en el cumplimiento del límite presentado en la tabla 12.5. Sin embargo, se debe prestar especial atención a ese parámetro en el momento de producción de los áridos ARMc debido al elevado porcentaje de materiales cerámicos que contiene, que induce a obtener de áridos con formas más lajosas. Se recomienda emplear la machacadora de impacto en el proceso de producción de esa clase.

Angulosidad

La angulosidad de los áridos, según el ensayo de determinación de las caras de fractura en el árido grueso UNE-EN 933-5, para utilizarse en las aplicaciones granulares contempladas, deberá cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.38.

Clase / Aplicación		Porcentaje de partículas trituradas (%) - UNE-EN 933-5
SC20		-
SC40		-
GC20	Calzadas T00 a T1	≥ 75
	Calzadas T2	≥ 50
GC25	Arcenes T00 a T1 en sustitución de SC40	≥ 50
	Calzadas T3 y T4	≥ 30

Tabla 10.38. Angulosidad de los áridos reciclados.

10.3.3.2 Requisitos físico-mecánicos.

Composición

La composición de los áridos reciclados se determinará según la norma EN 933-11.

Los áridos se clasificarán según las categorías indicadas en la tabla 10.39.

Categoría	Descripción	Cantidad de elementos (% del peso total)[3]				
		Ru (Productos pétreos)	Rc (Hormigón y mortero)	Rb (Cerámico)	Ra (Asfalto)	X (Otros)
ARH	Árido reciclado de hormigón	≥ 90%		≤ 10%	≤ 5%	≤ 1%
ARMh	Árido reciclado mixto de hormigón	≥ 70%		≤ 30%	≤ 5%	≤ 1%
ARMc	Árido reciclado mixto de cerámico	< 70%		> 30%	≤ 5%	≤ 1%
ARMa	Árido reciclado mixto con asfalto	-		-	5%-30%	≤ 1%

Tabla 10.39. Categorías de los áridos reciclados procedentes de RCD.

Comentario:
Esta tabla se basa en los resultados obtenidos en el plan de control de la producción de áridos reciclados del Proyecto GEAR, sobre un universo de 74 plantas de reciclaje de toda España. Sin embargo, este estudio también demuestra que la composición no es el único determinante de la calidad del árido reciclado, que debe ser completado con los resultados técnicos de los ensayos realizados.

Resistencia a la fragmentación.

La resistencia a la fragmentación de los áridos, según el ensayo por el método Los Ángeles UNE-EN 1097-2, para utilizar en las aplicaciones granulares contempladas deberá cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.40.

Clase / Aplicación		Coeficiente Los Ángeles (%) – UNE-EN 1097-2
SC20		-
SC40		-
GC20	Calzadas T00 a T2	≤ 35

Clase / Aplicación		Coeficiente Los Ángeles (%) – UNE-EN 1097-2
GC25	Calzadas T3 y T4	≤ 40
	Arcenes T00 a T1 en sustitución de SC40	≤ 45

Tabla 10.40. Resistencia a la fragmentación de los áridos reciclados.

Nota:
Para la evaluación de la resistencia de los granos, las normativas españolas hacen referencia al ensayo de Los Ángeles. Se debe resaltar, sin embargo, que este ensayo es bastante riguroso. Las condiciones a las cuales el material es sometido durante el ensayo son mucho más exigentes que las impuestas a lo largo de su vida útil en el pavimento. Entre las críticas que recibe el ensayo destacan el secado previo de las muestras a los 110 °C, la realización del ensayo solo en ambiente seco y el amortiguamiento del impacto de las bolas de acero cuando hay producción de cantidad excesiva de finos.

El valor del coeficiente Los Ángeles podrá ser superior a los límites establecidos por el PG3 en cinco unidades, siempre que la composición granulométrica esté adaptada al huso especificado en las tablas 10.35 y 10.36 de este documento.

Plasticidad

La plasticidad de los áridos deberá cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.41, que indica además las normas de referencia aplicables.

Clase / Aplicación		Límite líquido - UNE 103103	Índice de plasticidad - UNE 103104
SC20	Calzadas y arcenes T3 y T4	< 30	< 15
SC40	Calzadas y arcenes T00 a T2	< 30	< 15
GC20	Calzadas T00 a T2	No plástico	No plástico
GC25	Calzadas T3 y T4	< 25	< 6
	Arcenes T00 a T1 en sustitución de SC 40	< 25	< 6

Tabla 10.41. Plasticidad de los áridos reciclados.

Calidad de los finos

El equivalente de arena, según la UNE-EN 933-8, deberá cumplir lo indicado en la tabla 10.42.

Clase / Aplicación		Equivalente de arena (%) UNE-EN 933-8
SC20		-
SC40		-
GC20	Calzadas T00 a T2	≥ 40
GC25	Calzadas T3 y T4	≥ 35
	Arcenes T00 a T1 en sustitución de SC40	≥ 35

Tabla 10.42. Calidad de los finos de los áridos reciclados.

De no cumplirse la condición para el equivalente de arena, su valor de azul de metileno, según la UNE-EN 933-9, deberá ser inferior a diez (10), y simultáneamente, el equivalente de arena no deberá ser inferior en más de cinco unidades a los valores indicados en la tabla anterior.

Terrones de arcilla

El contenido de terrones de arcilla de los áridos deberá cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.43.

Clase / Aplicación		Terrones de arcilla (%) UNE-7133	
		Árido Grueso	Árido Fino
SC20		-	-
SC40		-	-
GC20	Calzadas T00 a T2	≤ 0,25	≤ 1
GC25	Calzadas T3 y T4	≤ 0,25	≤ 1
	Arcenes T00 a T1 en sustitución de SC40	≤ 0,25	≤ 1

Tabla 10.43. Contenido de terrones de arcilla de los áridos reciclados.

Resistencia a compresión a 7 días

La resistencia a compresión a 7 días deberá adaptarse a los rangos indicados en la tabla 10.44.

Clase / Aplicación		Resistencia a compresión a 7d (MPa) - NLT-305
SC20	Arcenes y calzadas T3a T4	2,5 – 4,5
SC40	Arcenes y calzadas T00 a T2	2,5 – 4,5
GC20	Calzadas T00 a T4	4,5 - 7

Clase / Aplicación		Resistencia a compresión a 7d (MPa) - NLT-305
GC25	Arcenes T00 a T1 en sustitución de SC 40	4,5 - 6

Tabla 10.44. Resistencia media a compresión a 7 días.

Nota:
Por resistencia media se entiende la media aritmética de los resultados obtenidos al menos sobre tres probetas de la misma amasada, definida de acuerdo a lo indicado en el apartado 513.9.2.1. Las probetas se compactarán según la NLT-310, con la energía que proporcione la densidad mínima requerida en el apartado 513.7.1 y nunca con energía mayor. En el caso de emplearse cementos para usos especiales (ESP VI-I) estos valores se disminuirán en un quince por ciento (15%).

Plazo de trabajabilidad

El plazo de trabajabilidad, determinado según la norma UNE 41240, deberá cumplir las condiciones indicadas en la tabla 10.45.

Clase / Aplicación		Plazo de trabajabilidad (min) UNE 41240	
		Anchura completa	Por franjas
SC20	Calzadas y arcenes T3 a T4	180	240
SC40	Calzadas y arcenes T00 a T2	180	240
GC20	Calzadas T00 a T2	180	240
GC25	Calzadas T3 a T4 y arcenes T00 a T1 en sustitución de SC40	180	240

Tabla 10.44. Plazo de trabajabilidad.

Nota:
En el supuesto de la puesta en obra por franjas, el material resultante deberá tener un plazo de trabajabilidad tal que permita completar la compactación de cada una de ellas antes de que haya finalizado dicho plazo en la franja adyacente ejecutada previamente.
La producción de un material tratado con cemento no se podrá iniciar en tanto que el Director de obras no haya aprobado la correspondiente fórmula de trabajo, estudiada en el laboratorio y verificada en la central de fabricación y en el tramo de prueba, la cual deberá señalARComo mínimo:

- La identificación y proporción (en seco) de cada fracción de árido en la alimentación (en masa) según la categoría podrá ser ARH, ARMh, ARMc y ARMa.
- La granulometría del árido combinado, según la UNE 933-2, por los tamices establecidos.
- La dosificación en masa o en volumen, según corresponda, de cemento, de agua y eventualmente de aditivos (*).
- La densidad máxima y la humedad óptima del Próctor modificado, según la UNE 103501 (*).
- La densidad mínima a alcanzar.
- El plazo de trabajabilidad de la mezcla (*).

(*) Los ensayos físico mecánicos para las determinaciones de Próctor modificado, resistencias a compresión simple o plazos de trabajabilidad, se realizarán con el árido grueso reciclado previamente saturado de agua.

El ensayo Próctor se realiza en el laboratorio preparando porciones de la muestra de ensayo con distintos grados de humedad, que posteriormente serán compactados con una determinada energía, según el procedimiento normalizado, normal o modificado.
Las humectaciones y compactaciones de estas porciones de muestras de acuerdo con el procedimiento mencionado, se hacen sin ningún "tiempo de maduración", de tal manera que una vez amasada la porción de ensayo con la dotación de agua calculada se procede a su compactación.
Los materiales procedentes del reciclado de RCD presentan un coeficiente de absorción de agua superior a los habituales de los áridos naturales. Esta absorción de agua, además, se produce de una manera más lenta que en el caso de los áridos naturales, lo que afecta al procedimiento de los ensayos de compactación Próctor. El tiempo que transcurre en el laboratorio desde el amasado de las distintas porciones de la muestra de ensayo hasta su compactación en el molde no es suficiente para que se produzca la total absorción de agua por los áridos. Como consecuencia, la humedad óptima que se determina, si se parte de muestras no suficientemente saturadas, será inferior a la necesaria para conseguir una correcta compactación en obra.
Por ello, los ensayos físico-mecánicos hay que realizarlos tras una saturación previa, lo que se indica como ensayo Próctor "tras saturación". Deberán mantenerse en el estado de humedad un mínimo de una hora, tiempo que se incrementará lo necesario para garantizar que los áridos han completado su absorción de agua.

10.3.3.3 Requisitos químicos

Contenido en Materia Orgánica

El contenido en materia orgánica, determinado según la norma UNE 103204, deberá cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.46.

Clase / Aplicación		Contenido en mat. orgánica (%) UNE 103204
SC20	Arcenes y calzadas T3 y T4	≤ 1
SC40	Arcenes y calzadas T00 a T2	≤ 1
GC20	Calzadas T00 a T2	≤ 1
GC25	Calzadas T3 y T4 y arcenes T00 a T1 en sustitución de SC40	≤ 1

Tabla 10.46. Contenido en materia orgánica de los áridos reciclados.

Compuestos totales de azufre

El contenido en compuestos totales de azufre, determinado según la norma UNE-EN 1744-1, deberá cumplir las condiciones indicadas en la tabla 10.47.

Clase / Aplicación		Compuestos totales de azufre ($\%SO_3$) UNE-EN 1744-1
SC20	Arcenes y calzadas T3 y T4	≤ 1
SC40	Arcenes y calzadas T00 a T2	≤ 1
GC20	Calzadas T00 a T2	≤ 1
GC25	Calzadas T3 y T4 y arcenes T00 a T1 en sustitución de SC 40	≤ 1

Tabla 10.47. Contenido en azufre de los áridos reciclados.

Sulfatos solubles en ácido (SO_3)

El contenido en sulfatos solubles en ácido, determinado según la norma UNE-EN 1744-1, deberá cumplir las condiciones mostradas en la tabla 10.48.

Clase / Aplicación		Sulfatos solubles en ácido ($\%SO_3$) UNE-EN 1744-1
SC20	Arcenes y calzadas T3 y T4	≤ 0,8
SC40	Arcenes y calzadas T00 a T2	≤ 0,8
GC20	Calzadas T00 a T2	≤ 0,8
GC25	Calzadas T3 y T4 y arcenes T00 a T1 en sustitución de SC 40	≤ 0,8

Tabla 10.48. Contenido de sulfatos solubles en ácido de los áridos reciclados.

Reactividad potencial

La reactividad potencial de los áridos con los álcalis del cemento, determinado según la norma UNE 146507-1, deberá cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.49.

Clase / Aplicación		Reactividad potencial UNE 146507-1
SC20	Arcenes y calzadas T3 y T4	No reactivo. Serán considerados potencialmente reactivos : $SiO_2 > R$ cuando $R \geq 70$. $SiO_2 > 35 + 0{,}5R$ cuando $R < 70$.
SC40	Arcenes y calzadas T00 a T2	
GC20	Calzadas T00 a T2	
GC25	Calzadas T3 y T4 y arcenes T00 a T1 en sustitución de SC 40	

Tabla 10.49. Reactividad potencial de los áridos reciclados.

10.3.3.4 Requisitos ambientales

Se aplicará el ensayo de lixiviación UNE EN 12457-4 y los valores límite de la UE DOCE 16/1/03 con carácter transitorio hasta que existan valores y recomendaciones españolas o UE para el ensayo de percolación.

La Recomendación GEAR-RT-09 establece criterios y orientaciones sobre el control de los requisitos ambientales en los productos reciclados.

10.3.4 Resumen de los requisitos técnicos

La tabla 10.50 resume los requisitos técnicos que se acaban de presentar.

Requisitos técnicos		Clase / Aplicación			
		SC20	SC40	GC20	GC25
Granulometría		Tabla 12.3	Tabla 12.3	Tabla 12.4	Tabla 12.4
Índice de lajas		-	-	≤ 30 %	≤ 35 o ≤ 40 %
Partículas trituradas		-	-	≥ 50 o ≥ 75 %	≥ 30 o ≥ 50 %
Composición(*)		-	ARH, ARMh ó ARMc	ARH o ARMh	Todas las categorías
Coeficiente Los Ángeles		-	-	≤ 35 %	≥ 45 o ≥ 40 %
Límite Líquido		< 30	< 30	No plástico	< 25
Plasticidad		< 15	< 15	No plástico	< 6
Equivalente de arena		-	-	≥ 40 %	≥ 35 %
Azul de metileno		-	-	< 10 si no cumple E.A. > 30 %	
Terrones de arcilla	Árido grueso	-	-	≤ 1 %	≤ 1 %
	Árido fino			≤ 0,25 %	≤ 0,25 %

Requisitos técnicos		Clase / Aplicación			
		SC20	SC40	GC20	GC25
Resistencia a compresión 7d		2,5 – 5 Mpa	2,5 – 5 Mpa	4,5 – 7 Mpa	4,5 – 6 Mpa
Plazo trabajabilidad tpm	Anchura completa	180 min	180 min	180 min	180 min
	Por franjas	240 min	240 min	240 min	240 min
Materia orgánica		≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %
Compuestos de azufre		≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %
Sulfatos solubles en ácido		≤ 0,8 %	≤ 0,8 %	≤ 0,8 %	≤ 0,8 %
Reactividad potencial		No reactivo	No reactivo	No reactivo	No reactivo

Tabla 10.50. Resumen de los requisitos técnicos.

(*) Requisito orientativo y no limitador

10.3.5 Control de calidad

El objetivo es garantizar que todos los áridos producidos cumplirán los requisitos exigidos para la aplicación prevista de acuerdo con las recomendaciones técnicas aplicables.

En lo que se refiere específicamente al control de producción en fábrica de áridos reciclados a ser utilizados como material tratado con ligantes hidraulicos en firmes y explanaciones, se establece la realización de ensayos iníciales de tipo e inspecciones periódicas de control del producto de acuerdo con los siguientes puntos de este documento.

10.3.5.1 Ensayos iniciales de tipo

El productor deberá realizar ensayos iniciales de tipo para asegurar que el producto cumple con estas recomendaciones técnicas.

Se deben realizar los ensayos iniciales de tipo correspondientes a la utilización prevista, con objeto de verificar la conformidad con los requisitos especificados en ella, siempre en los casos siguientes:

- Cuando se vayan a utilizar áridos procedentes de una nueva fuente (demolición o residuos de construcción).
- Cuando se haya producido un cambio significativo en la naturaleza del material de construcción o demolición reciclado de una misma fuente, o en las condiciones de almacenamiento o tratamiento que puedan afectar a las propiedades de los áridos.

Se deben tomar muestras del material para los exámenes que deben ser realizados conforme a la norma UNE EN 932-2. El proceso de la toma de muestras tiene que ser registrado en un documento que debe ser firmado por las personas presentes durante la toma de la muestra. Si la evaluación inicial da un resultado negativo se debe llevar a cabo un segundo examen inmediatamente. Si el resultado de esta segunda evaluación es negativo de nuevo, el material afectado definitivamente no cumple con los requisitos de la directriz.

La evaluación inicial debe ser llevada a cabo, como mínimo, una vez por cada planta de producción, por tipo de árido y por granulometría entregada.

Las pruebas que deben ser realizadas están indicadas en la tabla 10.51.

Ensayos iniciales de tipo	Necesidad de realización por clase / Aplicación			
	SC20	SC40	GC20	GC25
Granulometría	X	X	X	X
Índice de lajas	X	X	X	X
Partículas trituradas	X	X	X	X

Ensayos iniciales de tipo	Necesidad de realización por clase / Aplicación			
	SC20	SC40	GC20	GC25
Composición	X	X	X	X
Coeficiente Los Ángeles	X	X	X	X
Límite Líquido	X*	X*	X*	X*
Plasticidad	X*	X*	X*	X*
Equivalente de arena	X*	X*	X*	X*
Azul de metileno				
Terrones de arcilla	X*	X*	X*	X*
Resistencia a compresión				
Plazo de trabajabilidad				
Materia orgánica	X	X	X	X
Compuestos de azufre	X	X	X	X
Sulfatos solubles en ácido	X	X	X	X
Reactividad potencial				

Tabla 10.50. Ensayos iniciales de tipo necesarios en el contexto del control de producción en fábrica de los áridos considerados en estas recomendaciones.

* El Director de las Obras podrá ordenar la realización de los siguientes ensayos adicionales sobre los áridos de la gravacemento

Los resultados de los ensayos iniciales se deben documentar como punto de partida para el control de producción en fábrica del material.

10.3.5.2 Inspección y ensayos

El productor deberá realizar inspecciones periódicas de control del producto para asegurar que los materiales producidos mantienen sus propiedades y, consecuentemente, mantienen el cumplimiento de estas recomendaciones técnicas.

La frecuencia de los muestreos y de los ensayos requeridos de las características más importantes será la que se especifica en la tabla 10.52.

Ensayos de inspección	Frecuencias mínimas por clase / Aplicación			
	SC20	SC40	GC20	GC25
Granulometría	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3
Índice de lajas	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Partículas trituradas	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Composición	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Coeficiente Los Ángeles	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3	1 cada 20.000 m^3
Plasticidad	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3	1 cada 5.000 m^3
Equivalente de arena	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3
Terrones de arcilla	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3	2 cada 1.000 m^3
Resistencia a compresión	1/obra	1/obra	1/obra	1/obra
Plazo de trabajabilidad	1/obra	1/obra	1/obra	1/obra
Materia orgánica	2/año	2/año	2/año	2/año
Compuestos de azufre	2/año	2/año	2/año	2/año
Sulfatos solubles en ácido	2/año	2/año	2/año	2/año

Ensayos de inspección	Frecuencias mínimas por clase / Aplicación			
	SC20	SC40	GC20	GC25
Reactividad potencial	1/obra	1/obra	1/obra	1/obra

Tabla 10.52. Frecuencias de los ensayos a realizar en el contexto del control de producción en fábrica de los áridos considerados en estas recomendaciones.

Nota 1:
Las frecuencias mínimas de ensayo no se definen en función del tiempo transcurrido, sino de la cantidad de material procesado.

Nota 2:
Los requisitos para el control de producción en fábrica pueden conllevar inspecciones visuales. Cualquier divergencia indicada por estas inspecciones puede llevar a incrementar las frecuencias de las pruebas.

Nota 3:
Cuando un valor medido está cerca de un límite especificado, la frecuencia de las pruebas puede precisar ser incrementada.

10.3.6 Ejecución de la obra

Durante la ejecución de la obra, los productos objeto de las presentes recomendaciones técnicas deben ser tratados igual a sus equivalentes convencionales, conforme indica el PG3, siguiendo las precauciones y recomendaciones indicadas a continuación.

Vertido y extensión

Antes de verter la mezcla, se comprobará su homogeneidad, rechazándose todo el material seco o segregado.

Se comprobará continuamente el espesor extendido mediante un punzón graduado u otro procedimiento aprobado por el Director de las Obras, teniendo en cuenta la disminución que sufrirá al compactarse el material.

Compactación

Se comprobará la composición y forma de actuación del equipo de compactación, verificando:

- Que el número y el tipo de compactadores son los aprobados.
- El funcionamiento de los dispositivos de humectación y de limpieza.
- El lastre y la masa total de los compactadores y, en su caso, la presión de inflado de las ruedas de los compactadores de neumáticos.
- La frecuencia y la amplitud de los compactadores vibratorios.
- El número de pasadas de cada compactador.

Se efectuarán mediciones de la densidad y de la humedad en emplazamientos aleatorios, con una frecuencia mínima de siete (7) medidas por cada lote definido en el apartado 513.9.3. Para la realización de estos ensayos se podrán utilizar métodos rápidos no destructivos, siempre que, mediante ensayos previos, se haya determinado una correspondencia razonable entre estos métodos y los definidos en la UNE 103503. Sin perjuicio de lo anterior, será preceptivo que la calibración y contraste de estos equipos con los ensayos UNE 103300 y UNE 103503 se realice periódicamente durante la ejecución de las obras, en plazos no inferiores a quince días (15 d) ni superiores a treinta (30 d).

Curado y protección superficial

Se controlará que la superficie de la capa permanezca constantemente húmeda hasta la extensión del producto de curado, pero sin que se produzcan encharcamientos.

Se realizará un (1) control diario, como mínimo, de la dotación de emulsión bituminosa empleada en el riego de curado, y, en su caso, del árido de cobertura, de acuerdo con lo especificado en el artículo 532 del PG3.

Control de recepción de la unidad terminada

Se considerará como lote, que se aceptará o rechazará en bloque, al menor que resulte de aplicar los tres criterios siguientes:

- Quinientos metros (500 m) de calzada.
- Tres mil quinientos metros cuadrados (3.500 m^2) de calzada.
- La fracción construida diariamente.

El espesor de la capa se comprobará mediante la extracción de testigos cilíndricos en emplazamientos aleatorios, en número no inferior al establecido por el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o, en su defecto, por el Director de las Obras. El número mínimo de testigos por lote será de dos (2), aumentándose hasta cinco (5) si el espesor de alguno de los dos (2) primeros fuera inferior al prescrito. Los orificios producidos se rellenarán con material de la misma calidad que el utilizado en el resto de la capa, el cual será correctamente enrasado y compactado.

La regularidad superficial de la capa ejecutada se comprobará mediante el Índice de Regularidad Internacional (IRI), según la NLT-330, que deberá cumplir lo especificado en el apartado 7.4.5.

Se comparará la rasante de la superficie terminada con la teórica establecida en los Planos del Proyecto, en el eje, quiebros de peralte si existieran, y bordes de perfiles transversales cuya separación no exceda de la mitad de la distancia entre los perfiles del Proyecto. En todos los semiperfiles se comprobará que la superficie extendida y compactada presenta un aspecto uniforme, así como una ausencia de segregaciones. Se verificará también la anchura de la capa.

Densidad

Las densidades medias obtenidas in situ en el lote no deberán ser inferiores a las especificadas en el apartado 513.7.1 del PG3; no más de dos (2) individuos de la muestra podrán arrojar resultados de hasta dos (2) puntos porcentuales por debajo de la densidad exigida. En los puntos que no cumplan lo anterior se realizarán ensayos de resistencia mecánica sobre testigos aplicándose los criterios establecidos en el apartado 513.10.2.del PG3

Resistencia mecánica

La resistencia media de un lote a una determinada edad, se determinará como media de las resistencias de las probetas fabricadas de acuerdo con lo indicado en el apartado 513.9.2.1.del PG3 Si la resistencia media de las probetas del lote a los siete días (7d) fuera superior a la mínima e inferior a la máxima de las referenciadas, se aceptará el lote.

Si la resistencia media fuera superior a la máxima, deberán realizarse juntas de contracción por serrado a una distancia no superior a la indicada en el apartado 513.5.6 del PG3 y de forma que no queden a menos de dos metros y medio (2,5 m) de posibles grietas de retracción que se hayan podido formar.

Si la resistencia media fuera inferior a la mínima exigida, pero no a su noventa por ciento (90%), el Contratista podrá elegir entre aceptar las sanciones previstas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o solicitar la realización de ensayos de información. Si fuera inferior al noventa por ciento (90%) de la mínima exigida, el Contratista podrá elegir entre demoler el lote o esperar a los resultados de los ensayos de resistencia sobre testigos.

Los ensayos de información para la evaluación de la resistencia mecánica del lote no conforme se realizarán, en su caso, comparando los resultados de ensayos a compresión simple de testigos extraídos de ese lote con los extraídos de un lote aceptado. Éste deberá estar lo más próximo posible y con unas condiciones de puesta en obra similares a las del lote no conforme.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el número de testigos a extraer en cada uno de los lotes (aceptado y no conforme), que en ningún caso deberá ser inferior a cuatro (4). La edad de rotura de los testigos, que será la misma para ambos lotes, será fijada por el Director de las Obras.

El valor medio de los resultados de los testigos del lote no conforme se comprobará con el valor medio de los extraídos en el lote aceptado:

- Si no fuera inferior, el lote se podrá aceptar.
- Si fuera inferior a él pero no a su noventa por ciento (90%), se aplicará al lote las sanciones previstas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.
- Si fuera inferior a su noventa por ciento (90%) pero no a su ochenta por ciento (80%), el Director de las Obras podrá aplicar las sanciones previstas por el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o bien ordenar la demolición del lote y su reconstrucción, por cuenta del Contratista.
- Si fuera inferior a su ochenta por ciento (80%), se demolerá el lote y se reconstruirá, por cuenta del Contratista.

Si no se cumple alguna de las condiciones indicadas se rechazará el lote, que será demolido, y su producto trasladado a vertedero o empleado como indique el Director de las Obras.

Espesor

El espesor medio obtenido no deberá ser inferior al especificado en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o en los Planos de secciones tipo. No más de dos (2) individuos de la muestra ensayada del lote presentarán resultados que bajen del especificado en un diez por ciento (10%).

Si el espesor medio obtenido fuera inferior al ochenta y cinco por ciento (85%) del especificado, se demolerá la capa correspondiente al lote controlado y se repondrá, por cuenta del Contratista. Si el espesor medio obtenido fuera superior al ochenta y cinco por ciento (85%) del especificado, se compensará la diferencia con un espesor adicional equivalente de la capa superior aplicado en toda la anchura de la sección tipo, por cuenta del Contratista.

No se permitirá en ningún caso el recrecimiento en capa delgada.

Rasante

Las diferencias de cota entre la superficie obtenida y la teórica establecida en los Planos del Proyecto no excederán de las tolerancias especificadas, ni existirán zonas que retengan agua. Cuando la tolerancia sea rebasada por defecto y no existan problemas de encharcamiento, el Director de las Obras podrá aceptar la superficie siempre que la capa superior a ella compense la merma con el espesor adicional necesario sin incremento de coste para la

Administración. Cuando la tolerancia sea rebasada por exceso, se corregirá mediante fresado por cuenta del Contratista, siempre que no suponga una reducción del espesor de la capa por debajo del valor especificado en los Planos.

Regularidad superficial

Los resultados de la medida de la regularidad superficial de la capa acabada no excederán de los límites establecidos en el apartado 513.7.4.del PG3. Si se sobrepasaran dichos límites, se procederá de la siguiente manera:

- Si es en más del diez por ciento (10%) de la longitud del tramo controlado, se corregirán los defectos mediante fresado por cuenta del Contratista, teniendo en cuenta todo lo especificado en el apartado 513.10.3.del PG3.
- Si es en menos de un diez por ciento (10%) de la longitud del tramo controlado, se aplicará una penalización económica del diez por ciento (10%).

Medición y abono

La preparación de la superficie existente se considerará incluida en la unidad de obra correspondiente a la construcción de la capa subyacente y, por tanto, no habrá lugar a su abono por separado. Sin embargo, cuando dicha construcción no se haya realizado bajo el mismo contrato, la preparación de la superficie existente se abonará por metros cuadrados (m^2) medidos en el terreno.

El cemento se abonará por toneladas (t) realmente empleadas en obra, medidas por pesada directa en báscula debidamente contrastada.

La ejecución de los materiales tratados con cemento, incluida la ejecución de juntas en fresco, se abonará por metros cúbicos (m^3) realmente fabricados y puestos en obra, medidos en los Planos de secciones tipo. El abono del árido y del agua empleados en la mezcla con cemento se considerará incluido en el de la ejecución.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá fijar un único abono de la gravacemento o del suelocemento, en el que se incluyan todas las operaciones y todos los componentes, incluso el cemento.

La aplicación del ligante bituminoso para el riego de curado se abonará por toneladas (t) realmente empleadas en obra medidas antes de su empleo. El árido de cobertura superficial, incluida su extensión y apisonado, se abonará por toneladas (t) realmente empleadas en obra.

10.4 GEAR-RT-04: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en prefabricados

10.4.1 Ámbito de aplicación

Estas recomendaciones técnicas se aplican a los áridos procedentes del reciclaje de residuos de construcción y demolición que vayan a ser utilizados como en la fabricación de hormigón con la finalidad de elaborar productos prefabricados.

Estas recomendaciones establecen los requisitos y propiedades de los productos prefabricados con áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (en adelante RCD) que se destinan a dichos usos. También indican los procedimientos del control de calidad en planta (ensayos a realizar y frecuencia) a las que se deben someter estos áridos en el proceso de reciclado.

El presente documento no afecta al procesado de residuos o subproductos industriales realizado en plantas de tratamiento de otro tipo de residuos (plantas de la industria de materiales de construcción), ni a otro tipo de áridos reciclantes distintos de los procedentes de residuos de construcción y demolición (por ejemplo, áridos siderúrgicos o áridos bituminosos).

Las aplicaciones consideradas en esta recomendación son:

- Bordillo (BD)
- Bovedilla (BV)
- Bancos (BNC)
- Bloques (BLQ)

El material considerado, fabricado a partir de residuos de construcción y demolición, es árido reciclado todo uno procedente de residuos de hormigón.

Esta propuesta contempla la legislación y normativa técnica vigente en España correspondiente a estas aplicaciones:

- EN 1340:2004 Bordillos prefabricados de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo.
- EN 127340 Bordillos prefabricados de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo. Complemento a la Norma UNE-EN 1340.
- prEN 15037-2 Precast concrete products Beams and floor systems Part 2: Concrete blocks.
- DIN 483 Condiciones de suministro y normas de ensayo de los bordillos de hormigón.

- NFP-98302 Bordillos y canaletas de hormigón prefabricado.
- BS 340 Especificación británica para "prefabricados de hormigón: bordillos, canales, orlas y cuadrantes".

10.4.2 Categorías de áridos utilizables y clases de uso

Para las aplicaciones contempladas en estas recomendaciones técnicas pueden utilizarse áridos reciclados de las siguientes categorías, según establece el capítulo 5 de esta Guía:

- Categoría ARH: Áridos Reciclados de Hormigón.
- Categoría ARMh: Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón.
- Categoría ARMc: Áridos Reciclados Mixtos Cerámicos.
- Categoría ARMa: Áridos Reciclados Mixtos con Asfalto.

Las posibles aplicaciones de los áridos reciclados incluidas en estas recomendaciones técnicas se dividen en clases de uso según su grado de exigencia técnica (tabla 10.53).

Clase			Aplicación	Características
Clase 1	Bordillo	BD.-1	Usos indicados en los bordillos de tipo R6, R5 y R3,5	Fabricado a partir de ARH ó ARMh. Porcentaje de uso de árido reciclad igual o inferior al 20%. Buen acabado superficial. Condiciones climáticas adversas.
	Bovedilla	BV.-1	Bovedilla de hormigón para forjados Resistencia a flexión ≥ 4KN	
	Bancos	BNC.-1	Bancos para sentarse en vías públicas y parques.	
	Bloques	BLQ.-1	Bloques de hormigón para la construcción de muros.	
Clase 2	Bordillo	BD.-2	Usos indicados en los bordillos de tipo R5 y R3,5.	Fabricado a partir de ARH ó ARMh. Porcentaje de uso de árido reciclado entre 20% y 100%. No tiene importancia el acabado superficial. No está sometido a condiciones climáticas adversas ni a ciclos de hielo-deshielo.
	Bovedilla	BV.-2	Bovedilla de hormigón para forjados Resistencia a flexión < 4KN	
	Bancos	BNC.-2	Bancos para sentarse en vías públicas y parques.	
	Bloques	BLQ.-2	Bloques de hormigón para la construcción de muros.	
Clase 3	Bordillo	BD.-3	Usos indicados en los bordillos de tipo R3,5.	Fabricado a partir de ARMc. Porcentaje de uso de árido reciclado igual o inferior al 20%. No tiene importancia el acabado superficial. No está sometido a condiciones climáticas adversas ni a ciclos de hielo-deshielo.
	Bovedilla	BV.-3	Bovedilla de hormigón para forjados. Resistencia a flexión ≥ 3KN	
	Bancos	BNC.-3	Bancos para sentarse en vías públicas y parques.	
	Bloques	BLQ.-3	Bloques de hormigón para la construcción de muros.	
Clase 4	Bordillo	BD.-4	Usos indicados en los bordillos de tipo R3,5.	Fabricado a partir de ARMc. Porcentaje de uso de árido reciclado entre 20% y 100%. No tiene importancia el acabado superficial. No está sometido a condiciones climáticas adversas ni a ciclos de hielo-deshielo.
	Bovedilla	BV.-4	Bovedilla de hormigón para forjados. Resistencia a flexión < 3KN	
	Bancos	BNC.-4	Bancos para sentarse en vías públicas y parques.	
	Bloques	BLQ.-4	Bloques de hormigón para la construcción de muros.	

Tabla 10.53. Clases de uso abarcadas en las presentes recomendaciones técnicas según el grado de exigencia técnica.

La posibilidad de utilización de los áridos reciclados en las aplicaciones detalladas en la tabla anterior quedará sujeta al cumplimiento de las requisitos técnicos particulares de cada aplicación, establecidos en estas recomendaciones técnicas.

A modo informativo, en la tabla 10.54 se detallan las categorías de áridos reciclados aptas para las aplicaciones contempladas en el presente documento según clase de uso, teniendo en cuenta las propiedades habitualmente satisfechas por el material por cada categoría de áridos reciclados.

Viabilidad de aplicación		Categoría del Árido Reciclado				
		ARH	ARMh	ARMc	ARMa	MI
Clase de uso	Clase 1	X	X			
	Clase 2	X	X			
	Clase 3			X		
	Clase 4			X		

Tabla 10.54. Viabilidad de aplicación por categoría de árido y clase de uso.

Nota:

El estudio sobre los áridos reciclados presentado en el capítulo 4 de esta Guía recoge los resultados analíticos de las muestras ensayadas el normal cumplimiento de la tabla 13.2. Sin embargo, la clasificación no debe ser utilizada como un elemento limitador de uso del material en una determinada clase.

La calidad técnica del material, independiente de su composición, es el elemento que determina la viabilidad de uso del material en una aplicación. Si el árido reciclado no se adapta a la categoría indicada para una determinada aplicación pero, aun así, presenta características geométricas, físico-mecánicas y químicas adecuadas a su uso en ella (de acuerdo con los límites presentados en estas recomendaciones), el material puede ser utilizado en el uso planteado.

10.4.3 Requisitos de los áridos

10.4.3.1 Requisitos geométricos

Granulometría

La granulometría del material deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos granulométricos recogidos en la tabla 10.55.

Aplicación		Granulometría - EN 933-1 Cernido acumulado (% en masa mínimo-máximo)													
		40	25	20	12,5	10	8	6,3	4	2	1	0,500	0,250	0,125	0,063
Clase 1	BD.-1	-	-	-	95 - 100	80 - 95	60 - 90	60 - 85	50 - 75	35 - 60	25 - 40	14 - 25	9 - 20	4 - 15	0 - 15
	BV.-1														
	BNC.-1	95 - 100	88 - 97	80 - 90	60 - 75	50 - 65	40 - 60	37 - 55	25 - 48	17 - 38	13 - 27	10 - 21	6 - 15	3 - 12	0 - 8
	BLQ.-1														
Clase 2	BD.-2	-	-	-	95 - 100	80 - 95	60 - 90	60 - 85	50 - 75	35 - 60	25 - 40	14 - 25	9 - 20	4 - 15	0 - 15
	BV.-2														
	BNC.-2	95 - 100	88 - 97	80 - 90	60 - 75	50 - 65	40 - 60	37 - 55	25 - 48	17 - 38	13 - 27	10 - 21	6 - 15	3 - 12	0 - 8
	BLQ.-2														
Clase 3	BD.-3	-	-	-	95 - 100	80 - 95	62 - 90	58 - 85	50 - 75	35 - 62	25 - 45	14 - 35	9 - 27	4 - 22	0 - 18
	BV.-3														
	BNC.-3	95 - 100	88 - 97	80 - 90	62 - 75	52 - 65	42 - 60	35 - 55	25 - 48	17 - 40	13 - 30	10 - 25	6 - 18	3 - 14	0 - 10
	BLQ.-3														
Clase 4	BD.-4	-	-	-	95 - 100	80 - 95	62 - 90	58 - 85	50 - 75	35 - 62	25 - 45	14 - 35	9 - 27	4 - 22	0 - 18
	BV.-4														
	BNC.-4	95 - 100	88 - 97	80 - 90	62 - 75	52 - 65	42 - 60	35 - 55	25 - 48	17 - 40	13 - 30	10 - 25	6 - 18	3 - 14	0 - 10
	BLQ.-4														

Tabla 10.55. Husos granulométricos para los áridos reciclados.

Nota 1:

La abertura de los tamices (mm) se especifica en la norma EN 933-2. Serie básica + serie 2.

Nota 2:

Se ha tenido en cuenta que los áridos reciclados con presencia mayoritaria de material cerámico, tienen mayor contenido en finos.

En la figura 13.1 se observan los límites máximo y mínimo del huso granulométrico para los áridos reciclados de subclase 1/2 y subclase 3/4 empleados en la fabricación de bordillo y bovedilla. En la figura 13.2. se observan los límites máximo y mínimo del huso granulométrico para los áridos reciclados de subclase 1/2 y subclase 3/4 empleados en la fabricación de bancos y bloques.

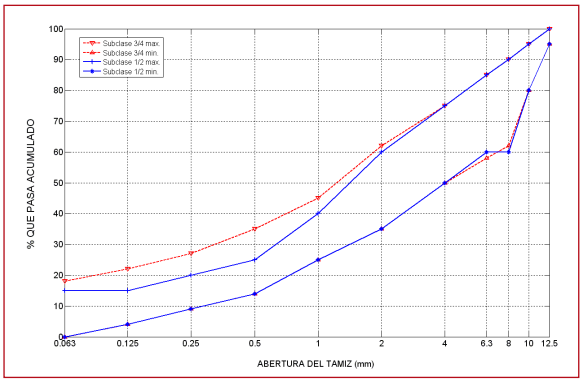


Figura 10.1. Huso granulométrico subclases 1/2 y 3/4 (bordillo - BD y bovedilla - BV).

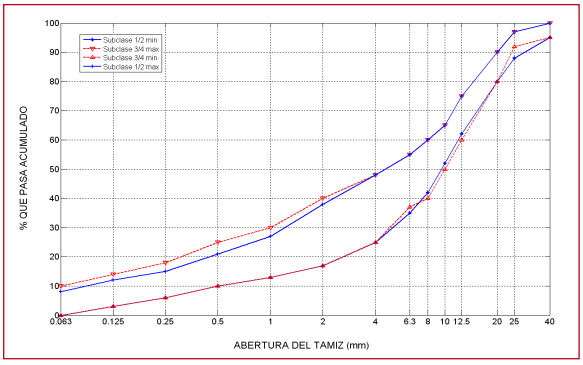


Figura 10.2. Huso granulométrico subclases 1/2 y 3/4 (banco - BNC y bloque - BLQ).

Forma

La forma del árido grueso, según el ensayo de determinación del índice de lajas UNE-EN 933-3, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.56 en las aplicaciones descritas.

Clase / Aplicación	Índice de lajas (%) - UNE-EN 933-3
Clase 1	< 35
Clase 2	
Clase 3	
Clase 4	

Tabla 10.56. Índice de lajas del árido grueso reciclado.

Comentario:
La forma de las partículas del árido grueso afecta fundamentalmente al esqueleto granular mineral del árido. Los tipos de árido reciclado incluidos en estas recomendaciones no suelen presentar problemas en el cumplimiento del límite presentado. Se debe poner especial atención a este parámetro en la producción de áridos reciclados de categoría ARMc por su tendencia a generar formas más lajosas. Se recomienda la utilización de machacadoras de impacto en el proceso de producción de esa clase o realizar dos trituraciones sucesivas.

Contenido fracción 0/4 mm

El contenido de la fracción 0/4 mm debe cumplir las recomendaciones establecidas en la tabla 10.57.

Clase / Aplicación	Contenido fracción 0/4 mm (%) - EN 933-1
Bordillos (BD)	≤ 75
Bovedillas (BV)	≤ 75
Bancos (BNC)	≤ 48
Bloques (BLQ)	≤ 48

Tabla 10.57. Contenido de la fracción 0/4 mm.

Contenido en finos (<0,063 mm)

El contenido en finos debe cumplir las recomendaciones establecidas en la tabla 10.58.

Aplicación	Clase	Contenido en finos (%) - EN 933-1
Bordillos (BD)	1/2	≤ 15
	3/4	≤ 18
Bovedillas (BV)	1/2	≤ 15
	3/4	≤ 18
Bancos (BNC)	1/2	≤ 8
	3/4	≤ 10
Bloques (BLQ)	1/2	≤ 8
	3/4	≤ 10

Tabla 10.58. Contenido en finos (<0,063 mm).

Nota:
Hay datos experimentales que avalan este porcentaje.

10.4.3.2 Requisitos físicos

Composición

La composición de los áridos reciclados se determinará según la norma EN 933-11. Los áridos se clasificarán según las categorías indicadas en la tabla 10.59.

Categoría	Descripción	Cantidad de elementos (% del peso total)[4]				
		Ru (Productos pétreos)	Rc (Hormigón y mortero)	Rb (Cerámico)	Ra (Asfalto)	X (Otros)
ARH	Árido reciclado de hormigón	≥ 90%		≤ 10%	≤ 5%	≤ 1%
ARMh	Árido reciclado mixto de hormigón	≥ 70%		≤ 30%	≤ 5%	≤ 1%

Categoría	Descripción	Cantidad de elementos (% del peso total)[4]				
		Ru (Productos pétreos)	Rc (Hormigón y mortero)	Rb (Cerámico)	Ra (Asfalto)	X (Otros)
ARMc	Árido reciclado mixto de cerámico	< 70%		> 30%	≤ 5%	≤ 1%
ARMa	Árido reciclado mixto con asfalto	-		-	5%-30%	≤ 1%

Tabla 10.59. Categorías de los áridos reciclados procedentes de RCD.

Comentario:
Esta tabla se basa en los resultados obtenidos en el plan de control de la producción de áridos reciclados del Proyecto GEAR, sobre un universo de 65 plantas de reciclaje de toda España. Sin embargo, este estudio también demuestra que la composición no es el único determinante de la calidad del árido reciclado, y que debe ser completado con los resultados técnicos de los ensayos realizados.

Absorción de agua

La absorción de agua debe cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.60.

Clase / Aplicación	Absorción (%) - EN 1097-6
Clase 1	≤ 11
Clase 2	≤ 11
Clase 3	≤ 8
Clase 4	≤ 8

Tabla 10.60. Absorción de agua de los áridos reciclados.

Nota:
Hay datos experimentales que avalan este porcentaje.

Resistencia a la fragmentación

La resistencia a la fragmentación de los áridos reciclados en las aplicaciones contempladas deberán cumplir con los requisitos establecidos en la tabla 10.61.

Clase / Aplicación	Coeficiente Los Ángeles (%) - UNE-EN 1097-2
Clase 1	< 50
Clase 2	< 50
Clase 3	< 45
Clase 4	< 40

Tabla 10.61. Resistencia a la fragmentación de los áridos reciclados.

Nota:
La normativa técnica española prescribe el ensayo de desgaste de Los Ángeles como medida de la resistencia al desgaste en los áridos. Sin embargo, este ensayo puede resultar bastante riguroso por el contenido típico de mortero adherido en los áridos reciclados de RCD.
La Orden FOM/891/2004 admite que los materiales que no satisfagan los requisitos aplicables pueden ser utilizados si la aptitud para el uso es demostrada mediante experiencias positivas, y en el caso concreto del ensayo de Los Ángeles permite 5 puntos más de coeficiente para las clases 2 y 3 (y hasta 10 puntos para la 4) para los áridos reciclados de hormigón, cuando se hagan las siguientes comprobaciones adicionales sobre el material ya compactado: la granulometría, la plasticidad y el equivalente de arena deben cumplir los límites marcados en estas recomendaciones técnicas para el material antes de compactar. De esta forma se asegura que una previsible resistencia a la fragmentación baja influya en la distribución de tamaños de la zahorra y en la generación de un exceso de finos perniciosos durante la compactación.

Comentario:
Los resultados de las investigaciones del Proyecto GEAR han demostrado que, el habitual mayor coeficiente en los áridos reciclados no repercute en la resistencia ni capacidad de carga del firme, una vez compactado. Normalmente el próctor suele resultar superior al material no reciclado.

Equivalente de arena

El equivalente de arena del árido reciclado debe cumplir las recomendaciones establecidas en la tabla 10.62.

Clase / Aplicación	Equivalente de arena (%) - EN 933-8
Clase 1	≥ 50 ó ≥ 20 y M.B. < 6.5
Clase 2	≥ 50 ó ≥ 20 y M.B. < 6.5
Clase 3	≥ 50 ó ≥ 20 y M.B. < 4.5
Clase 4	≥ 50 ó ≥ 20 y M.B. < 4.5

Tabla 10.62. Calidad de finos de los áridos reciclados.

10.4.3.3 Requisitos químicos

Materia orgánica

El contenido en materia orgánica debe cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.63.

Clase / Aplicación	Contenido en materia orgánica - EN 1744-1
Clase 1	Exento
Clase 2	Exento
Clase 3	Exento
Clase 4	Exento

Tabla 10.63. Contenido en materia orgánica de los áridos reciclados.

Compuestos de azufre

El contenido total de azufre de los áridos reciclados ha de cumplir las condiciones de la tabla 10.64.

4 Para la obtención de la composición de los áridos reciclados por tipo, se recomienda la realización del ensayo EN 933-11 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los constituyentes del árido reciclado grueso.

Clase / Aplicación	Compuestos de azufre (%SO_3) - EN 1744-1
Clase 1	≤ 1
Clase 2	≤ 1
Clase 3	≤ 1
Clase 4	≤ 1

Tabla 10.64. Contenido en compuestos de azufre de los áridos reciclados.

Nota:
Se recomienda no sobrepasar el valor establecido en la tabla aunque este valor se puede superar siempre y cuando los ensayos realizados sobre el producto final proporcionen resultados satisfactorios.

Sulfatos solubles en ácido

El contenido de sulfatos solubles en ácido debe cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.65.

Clase / Aplicación	Sulfatos solubles en ácido (%) - EN 1744-1
Clase 1	≤ 0,8
Clase 2	≤ 0,8
Clase 3	≤ 0,8
Clase 4	≤ 0,8

Tabla 10.65. Contenido en sulfatos solubles en ácido para los áridos reciclados.

Nota:
Se recomienda no sobrepasar el valor establecido en la tabla, aunque este valor se puede superar siempre y cuando los ensayos realizados sobre el producto final proporcionen resultados satisfactorios.

Cloruros totales

El contenido de cloruros totales debe cumplir las recomendaciones presentadas en la tabla 10.66.

Clase / Aplicación	Cloruros totales (%) - EN 1744-1
Clase 1	≤ 0,05
Clase 2	≤ 0,05
Clase 3	≤ 0,05
Clase 4	≤ 0,05

Tabla 10.66. Contenido de cloruros totales para los áridos reciclados.

Nota:
Se recomienda no sobrepasar el valor establecido en la tabla aunque este valor se puede superar siempre y cuando los ensayos realizados sobre el producto final proporcionen resultados satisfactorios.

Contenido en yeso

El contenido en yeso debe cumplir las recomendaciones presentadas en la tabla 10.67.

Clase / Aplicación	Contenido en yeso (%) - NLT - 115
Clase 1	≤ 1
Clase 2	≤ 1
Clase 3	≤ 1
Clase 4	≤ 1

Tabla 10.67. Contenido en yeso para los áridos reciclados.

Nota:
Se recomienda no sobrepasar el valor establecido en la tabla aunque este valor se puede superar siempre y cuando los ensayos realizados sobre el producto final proporcionen resultados satisfactorios.

10.4.3.4 Requisitos de durabilidad

Los bordillos deben cumplir los requisitos establecidos en la tabla 10.67 y 10.68.

Las recomendaciones referentes a la(s) clase(s) de resistencia climática necesarias a efectos de asegurar la durabilidad del elemento para el país en cuestión, para los usos para los que el producto se comercializa, pueden ser determinados a nivel nacional.

Clase/Aplicación	Marcado	Absorción de agua (% en masa)
Clase 1	A	Sin medición de esta característica
Clase 2	B	≤ 6 como media

Tabla 10.67. Absorción del agua.

Cuando existan condiciones específicas como el contacto frecuente de las superficies con sales descongelantes en condiciones de helada, pueden ser necesarios los requisitos definidos en la tabla 10.68.

Clase	Marcado	Pérdida de masa después del ensayo hielo-deshielo (kg/m^2)
3	D	≤ 1,0 como media Ningún valor individual >1,5

Tabla 10.68. Pérdida de masa después del ensayo hielo-deshielo.

10.4.3.5 Requisitos ambientales

Se aplicará el ensayo de lixiviación UNE EN 12457-4 y los valores límite de la UE DOCE 16/1/03 con carácter transitorio hasta que existan valores y recomendaciones españolas o UE para el ensayo de percolación.

10.4.3.6 Resumen de los requisitos técnicos

Requisitos técnicos	Clase / Aplicación			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Granulometría	Tabla 13.3	Tabla 13.3	Tabla 13.3	Tabla 13.3
Índice de lajas	< 35%	< 35%	< 35%	< 35%
Contenido fracción 0/4 mm	≤ 75 % (para BD y BV) ≤ 48 % (para BNC y BLQ)	≤ 75 % (para BD y BV) ≤ 48 % (para BNC y BLQ)	≤ 75 % (para BD y BV) ≤ 48 % (para BNC y BLQ)	≤ 75 % (para BD y BV) ≤ 48 % (para BNC y BLQ)
Contenido en finos (<0,063 mm)	≤ 15% (para BD y BV) ≤ 8% (para BNC y BLQ)	≤ 15% (para BD y BV) ≤ 8% (para BNC y BLQ)	≤ 18% (para BD y BV) ≤ 10% (para BNC y BLQ)	≤ 18% (para BD y BV) ≤ 10% (para BNC y BLQ)
Absorción	≤ 11%	≤ 11%	≤ 8%	≤ 8%
Coeficiente Los Ángeles	< 50%	< 50%	< 45%	< 40%
Equivalente de arena	≥ 50% ó ≥ 20% y M.B. < 6.5	≥ 50% ó ≥ 20% y M.B. < 6.5	≥ 50% ó ≥ 20% y M.B. < 4.5	≥ 50% ó ≥ 20% y M.B. < 4.5
Composición (*)	Tabla 13.7	Tabla 13.7	Tabla 13.7	Tabla 13.7
Materia orgánica	Exento	Exento	Exento	Exento
Compuestos de azufre	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%
Sulfatos solubles en ácido	≤ 0,8%	≤ 0,8%	≤ 0,8%	≤ 0,8%
Cloruros totales	≤ 0,05%	≤ 0,05%	≤ 0,05%	≤ 0,05%
Yeso	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%

Tabla 10.69. Resumen de los requisitos técnicos.

(*) Requisito orientativo y no limitador

10.4.4 Control de calidad

El productor de áridos debe tener en funcionamiento un sistema de control de producción en fábrica que cumpla con los requisitos especificados en la GEAR-RT-01 (capítulo 9).

El objetivo es garantizar que todos los áridos producidos cumplirán los requisitos exigidos para la aplicación prevista de acuerdo con las recomendaciones técnicas aplicables.

En lo que se refiere específicamente al control de producción en fábrica de áridos reciclados para ser utilizados en hormigones destinados a la fabricación de bordillo, bovedilla, bancos y bloques prefabricados, se establece la realización de ensayos iníciales de tipo e inspecciones periódicas de control del producto de acuerdo con los siguientes puntos de este documento.

10.4.4.1 Ensayos iniciales de tipo

El productor deberá realizar ensayos iniciales de tipo para asegurar que el producto cumple con estas recomendaciones técnicas.

Se deben realizar los ensayos iniciales de tipo, correspondientes a la utilización prevista, con objeto de verificar la conformidad con los requisitos especificados en la recomendación técnica en los casos siguientes:

- Cuando se vayan a utilizar áridos procedentes de una nueva fuente (demolición o residuos de construcción).
- Cuando se haya producido un cambio significativo en la naturaleza del material de construcción o demolición reciclado de una misma fuente o en las condiciones de almacenamiento o tratamiento que puedan afectar a las propiedades de los áridos.

Se deben tomar muestras del material para los ensayos que deben realizarse conforme a la norma UNE EN 932-2. El proceso de la toma de muestras tiene que registrarse en un documento que será firmado por las personas presentes durante la toma de la muestra. Si la evaluación inicial da un resultado negativo, se llevará a cabo un segundo examen inmediatamente. Si el resultado de esta segunda evaluación es negativo, el material afectado no cumple con los requisitos de la directriz definitivamente.

La evaluación inicial debe realizarse, como mínimo, una vez por cada planta de producción, por cada tipo de árido reciclado y por cada granulometría entregada.

Los ensayos que deben efectuarse se indican en la tabla 10.70.

Ensayos Iniciales de tipo	Necesidad de realización por clase / Aplicación			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Granulometría	X	X	X	X
Índice de lajas	X	X	X	X
Contenido fracción 0/4 mm	X	X	X	X
Contenido en finos (<0,063 mm)	X	X	X	X
Absorción	X	X	X	X
Coeficiente Los Ángeles	X	X	X	X
Equivalente de arena	X	X	X	X
Composición (*)	X	X	X	X
Materia orgánica	X	X	X	X
Compuestos de azufre	X	X	X	X
Sulfatos solubles en ácido	X	X	X	X
Cloruros totales	X	X	X	X
Yeso	X	X	X	X

Tabla 10.70. Ensayos iniciales de tipo necesarios en el contexto del control de producción en fábrica de los áridos considerados en estas recomendaciones.

Los resultados de los ensayos iniciales se deben documentar como punto de partida para el control de producción en fábrica del material.

10.4.4.2 Inspección y ensayos

El productor deberá realizar inspecciones periódicas de control del producto para asegurar que los materiales producidos mantienen sus propiedades y, consecuentemente, mantienen el cumplimiento de estas recomendaciones técnicas.

La frecuencia de los muestreos y de los ensayos requeridos se especifican en la tabla 10.71.

Ensayos de inspección	Frecuencias mínimas por clase / Aplicación			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Granulometría	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3
Índice de lajas	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3
Contenido fracción 0/4 mm	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3
Contenido en finos (<0,063 mm)	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3
Absorción	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3
Coeficiente Los Ángeles	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3
Equivalente de arena	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3
Composición (*)	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3

Ensayos de inspección	Frecuencias mínimas por clase / Aplicación			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Materia orgánica	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3	1 cada 2.000 m^3
Compuestos de azufre	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3
Sulfatos solubles en ácido	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3
Cloruros totales	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3
Yeso	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3	1 cada 10.000 m^3

Tabla 10.71. Frecuencias de los ensayos a realizar en el contexto del control de producción en fábrica de los áridos considerados en estas recomendaciones.

Nota 1:
Las frecuencias mínimas de ensayo no se definen en función del tiempo transcurrido sino de la cantidad de material procesado.

Nota 2:
Los requisitos para el control de producción en fábrica pueden conllevar inspecciones visuales. Cualquier divergencia indicada por estas inspecciones puede llevar a incrementar las frecuencias de las pruebas.

Nota 3:
Cuando un valor medido está cerca de un límite especificado la frecuencia de las pruebas puede necesitar un incremento.

10.4.5 Ejecución de la obra

Durante la realización de obras los productos objeto de las presentes recomendaciones técnicas deben ser tratados igual a sus equivalentes convencionales siguiendo las precauciones y recomendaciones que, a continuación, se indican:

- La fabricación de bordillos se realizará siguiendo las indicaciones de la normas EN 1340 y UNE 127340
- La fabricación de bovedillas se realizará teniendo en cuenta la norma prEN 15037-2.

Se tendrá en cuenta que la utilización de áridos reciclados podrá exigir mayor demanda de agua en la dosificación del hormigón. El empleo de este tipo de áridos también dará lugar, por lo general, a un aumento en la consistencia del hormigón y a una disminución de la resistencia a compresión del mismo.

Los apartados siguientes presentan las recomendaciones específicas para la fabricación del bordillo y de la bovedilla.

Bordillos

En lo que se refiere al almacenaje de los áridos reciclados en planta, antes de ser empleados en la fabricación de los bordillos, los acopios se formarán y explotarán del siguiente modo:

- Se evitará la contaminación de los materiales, principalmente en lo que se refiere a la superficie de formación de los acopios.
- Se evitará la exposición prolongada del material a la intemperie.
- Se mantendrá la segregación adecuada de los materiales para impedir la mezcla de distintos tipos de materiales.

La altura de los acopios, el estado de sus separadores y de sus accesos deberán ser vigilados. Además, durante la descarga de los áridos reciclados al acopio, estos deberán ser examinados. Los materiales que, a simple vista, presenten restos de tierra vegetal, materia orgánica o tamaños superiores al máximo aceptado en el proyecto deberán ser separados. Se acopiarán aparte aquellos que presenten alguna anomalía de aspecto (distinta coloración, segregación, lajas, plasticidad, etc).

Bovedillas

Los cuidados necesarios para el almacenaje de los áridos reciclados en planta, antes de ser empleados en la fabricación de las bovedillas, son los mismos que los empleados para bordillos.

10.5 GEAR-RT-05: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigones en masa

10.5.1 Ámbito de aplicación

Estas recomendaciones técnicas se aplican a los áridos procedentes del reciclado de material inorgánico previamente utilizado en la construcción, para su utilización en la fabricación de hormigón en masa.

Estas recomendaciones establecen los requisitos y propiedades de los áridos reciclados procedentes de

residuos de construcción y demolición (en adelante RCD) que se destinan a dichos usos. También indican los procedimientos del control de calidad en planta (ensayos a realizar y frecuencia) a los que se deben someter estos áridos en el proceso de reciclado.

El presente documento no afecta al reprocesado de residuos o subproductos industriales realizado en plantas de tratamiento de otro tipo de residuos (plantas de la industria de materiales de construcción), ni a otro tipo de áridos reciclados distintos de los procedentes de residuos de construcción y demolición (por ejemplo, áridos siderúrgicos o áridos bituminosos).

Las aplicaciones consideradas en esta recomendación son:

- Hormigones estructurales (HE) hasta una resistencia característica de 30MPa.
- Hormigones no estructurales (HNE) hasta una resistencia característica de 20MPa.
- Hormigones de limpieza (HL) con un contenido mínimo de cemento de 150 kg/m^3.

Esta propuesta contempla la legislación y normativa técnica vigente en España correspondiente a esta aplicación:

- Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 y, especialmente, su Anejo 15 (Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados) y su Anejo 18 (Hormigones de uso no estructural).
- Norma UNE- EN 12620. Áridos para hormigón.

10.5.2 Categorías de áridos utilizables y clases de uso

Para las aplicaciones contempladas en estas recomendaciones técnicas, pueden utilizarse áridos reciclados de las siguientes categorías, según establece el capítulo 5 de esta Guía:

- Categoría ARH: Áridos Reciclados de Hormigón.
- Categoría ARMh: Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón.
- Categoría ARMc: Áridos Reciclados Mixtos Cerámicos.

Las posibles aplicaciones de los áridos reciclados incluidas en estas recomendaciones técnicas se dividen en clases de uso según su grado de exigencias técnicas (tabla 10.72).

Clases	Aplicación
Clase 1	Hormigón estructural con $f_{ck} \leq 30$MPa
Clase 2	Hormigón no estructural con $f_{ck} \leq 20$MPa
Clase 3	Hormigón de limpieza con un contenido mínimo de cemento de 150 kg/m^3

Tabla 10.72. Clases de uso para el hormigón en masa.

La posibilidad de utilización de los áridos reciclados en las aplicaciones detalladas en la tabla anterior quedará sujeta al cumplimiento de los requisitos técnicos particulares de cada aplicación, establecidos en estas recomendaciones técnicas.

A modo informativo, en la tabla 10.73 se detallan las categorías de áridos reciclados aptas para las aplicaciones abarcadas en el presente documento, según la clase de uso, teniendo en cuenta las propiedades habitualmente satisfechas por el material por cada categoría de áridos reciclados

Viabilidad de aplicación		Categoría del Árido Reciclado				
		ARH	ARMh	ARMc	ARMa	MI
Clase de uso	Clase 1	X	X	X		
	Clase 2	X	X	X		
	Clase 3	X	X	X		

Tabla 10.73. Viabilidad de aplicación por categoría de árido y clase de uso.

Nota:
La clasificación no debe ser utilizada como un elemento limitador de uso del material en una determinada clase.
La calidad técnica del material, independientemente de su composición, es el elemento que determina la viabilidad de uso del material en una aplicación. Si el árido reciclado no se adapta a la categoría indicada para determinada aplicación pero, aun así, presenta características geométricas, físico-mecánicas y químicas adecuadas a su uso en ella (de acuerdo con los límites presentados en estas recomendaciones), el material puede ser utilizado en el uso planteado.

10.5.3 Requisitos de los áridos

10.5.3.1 Requisitos geométricos

Tamaño mínimo

El tamaño mínimo del árido reciclado, según el ensayo de la norma UNE-EN 933-1 y la abertura de tamices de la norma UNE-EN 933-2, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.74.

Clase / Aplicación	Tamaño mínimo(mm) - UNE-EN 933-1 y 933-2
Clase 1	4

Clase / Aplicación	Tamaño mínimo(mm) - UNE-EN 933-1 y 933-2
Clase 2	4
Clase 3	4

Tabla 10.74. Tamaño mínimo para los áridos reciclados.

Forma

La forma del árido grueso combinación del natural y reciclado, según el ensayo de determinación del índice de lajas UNE-EN 933-3, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.75.

Clase / Aplicación	Índice de lajas (%) - UNE-EN 933-3
Clase 1	< 35
Clase 2	< 35
Clase 3	< 35

Tabla 10.75. Índice de lajas para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

Contenido en desclasificados inferiores

El contenido en desclasificados inferiores para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según el ensayo de la norma UNE-EN 933-1 y la abertura de tamices de la norma UNE-EN 933-2, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.76.

Clase / Aplicación	Contenido en desclasificados inferiores (%) - UNE-EN 933-1 y 933-2
Clase 1	≤ 10
Clase 2	≤ 10
Clase 3	≤ 10

Tabla 10.76. Contenido en desclasificados inferiores para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

Contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm

El contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según el ensayo de la norma UNE-EN 933-1 y la abertura de tamices de la norma UNE-EN 933-2, deberá respetar el límite establecido la tabla 10.77.

Clase / Aplicación	Contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm (%) - UNE-EN 933-1 y 933-2
Clase 1	≤ 5
Clase 2	≤ 5
Clase 3	≤ 5

Tabla 10.77. Contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

10.5.3.2 Requisitos físico-mecánicos

Composición

La composición de los áridos reciclados se determinará según la norma EN 933-11. Los áridos se clasificarán según las categorías indicadas en la tabla 10.78.

Categoría	Descripción	Cantidad de elementos (% del peso total)[5]				
		Ru (Productos pétreos)	Rc (Hormigón y mortero)	Rb (Cerámico)	Ra (Asfalto)	X (Otros)
ARH	Árido reciclado de hormigón	≥ 90%		≤ 10%	≤ 5%	≤ 1%
ARMh	Árido reciclado mixto de hormigón	≥ 70%		≤ 30%	≤ 5%	≤ 1%
ARMc	Árido reciclado mixto de cerámico	< 70%		> 30%	≤ 5%	≤ 1%
ARMa	Árido reciclado mixto con asfalto	-		-	5%-30%	≤ 1%

Tabla 10.78. Categorías de los áridos reciclados procedentes de RCD.

Comentario:
Esta tabla se basa en los resultados obtenidos en el plan de control de la producción de áridos reciclados del Proyecto GEAR, sobre un universo de 65 plantas de reciclaje de toda España. Sin embargo, este estudio también demuestra que la composición no es el único determinante de la calidad del árido reciclado, que debe ser completado con los resultados técnicos de los ensayos realizados.

Además, la composición del árido reciclado deberá cumplir las condiciones presentadas en la tabla 10.79.

5 Para la obtención de la composición de los áridos reciclados por componente, se recomienda la realización del ensayo EN 933-11 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los constituyentes del árido reciclado grueso.

Clase / Aplicación	Impurezas (%) - UNE-EN 933-11
Clase 1	Partículas flotantes (FL) ≤ 2 cm^3/kg Materiales bituminosos (Ra) ≤ 1% Otros materiales (metales, plásticos, vidrio,...) (Rg+X) ≤ 1%
Clase 2	
Clase 3	

Tabla 10.79. Composición de los áridos reciclados.

Contenido en terrones de arcilla

El contenido de terrones de arcilla para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según la norma UNE 7133, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.80.

Clase / Aplicación	Contenido en terrones de arcilla (%) - UNE 7133
Clase 1	≤ 0,25
Clase 2	≤ 0,6
Clase 3	≤ 0,6

Tabla 10.80. Contenido de terrones de arcilla para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

Absorción

La absorción para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según la norma UNE-EN 1097-6, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.81.

Clase / Aplicación	Absorción (%) - UNE-EN 1097-6
Clase 1	≤ 9
Clase 2	≤ 12
Clase 3	≤ 12

Tabla 10.81. Absorción de agua para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

Nota:
En la práctica, la limitación de la absorción del árido conjunto (combinación del árido grueso natural y árido reciclado mixto) implica limitar el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado. Admitiendo que la absorción del árido es lineal con el porcentaje de sustitución, el empleo de un árido reciclado con poca absorción permite mayores sustituciones.

Resistencia a la fragmentación

El coeficiente Los Ángeles para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según la norma UNE-EN 1097-2, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.82.

Clase / Aplicación	Coeficiente Los Ángeles (%) - UNE-EN 1097-2
Clase 1	≤ 50
Clase 2	≤ 50
Clase 3	No es de aplicación

Tabla 10.82. Resistencia a la fragmentación para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

Pérdida de peso con sulfato magnésico

La pérdida de peso con sulfato magnésico para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según la norma UNE-EN 1367-2, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.83.

Clase / Aplicación	Pérdida de peso con sulfato magnésico (%) - UNE-EN 1367-2
Clase 1	≤ 18
Clase 2	≤ 18
Clase 3	≤ 18

Tabla 10.83. Pérdida de peso con sulfato magnésico para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

10.5.3.3 Requisitos químicos

Sulfatos solubles

El contenido de sulfatos solubles para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según la norma UNE-EN 1744-1, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.84.

Clase / Aplicación	Contenido de sulfatos solubles (%) - UNE-EN 1744-1
Clase 1	≤ 0,8
Clase 2	≤ 0,8
Clase 3	≤ 0,8

Tabla 10.84. Condiciones del contenido de sulfatos solubles para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto.

Cloruros totales

El contenido de cloruros totales para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según la norma UNE-EN 1744-1, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.85.

Clase / Aplicación	Contenido de cloruros totales (%) - UNE-EN 1744-1
Clase 1	≤ 0,05
Clase 2	≤ 0,05
Clase 3	No es de aplicación

Tabla 10.85. Contenido de cloruros totales para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

Contenido total de compuestos de azufre

El contenido total de compuestos de azufre para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según la norma UNE-EN 1744-1, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.86.

Clase / Aplicación	Contenido total de compuestos de azufre (%) - UNE-EN 1744-1
Clase 1	≤ 1
Clase 2	≤ 1
Clase 3	≤ 1

Tabla 10.86. Contenido total de compuestos de azufre para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

Contenido de partículas ligeras

El contenido de partículas ligeras para la combinación de árido grueso natural y árido reciclado mixto, según la norma UNE 7244, deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.87.

Clase / Aplicación	Contenido de partículas ligeras (%) - UNE 7244
Clase 1	≤ 1
Clase 2	≤ 1
Clase 3	≤ 1

Tabla 10.87. Contenido de partículas ligeras para la combinación de árido grueso natural y reciclado.

10.5.3.4 Requisitos de durabilidad

Los resultados obtenidos del ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión (UNE-EN 12390-8) no revelan peores condiciones en los hormigones reciclados para ningún porcentaje de sustitución.

No obstante, la mayor porosidad del hormigón reciclado exige limitar su uso a los ambientes I y II, salvo que se realicen estudios específicos para un ambiente determinado.

10.5.3.5 Requisitos ambientales

Se aplicará el ensayo de lixiviación UNE EN 12457-4 y los valores límite de la UE DOCE 16/1/03 con carácter transitorio hasta que existan valores y recomendaciones españolas o UE para el ensayo de percolación.

La Recomendación GEAR-RT-09 (capítulo 17) establece criterios y orientaciones sobre el control de los requisitos ambientales en los productos reciclados.

10.5.4 Propiedades esperables en el hormigón con áridos reciclados

El uso de árido reciclado mixto, por la presencia de material cerámico, influye en diversas propiedades del hormigón. Si se sustituye parte del árido grueso natural por árido reciclado, son de esperar las siguientes particularidades:

- El agua debe incrementarse para garantizar la relación agua/cemento eficaz. El árido reciclado mixto puede tener una absorción de entre el 10 y el 12%, por lo que parte del agua será absorbida por el árido.
- La trabajabilidad empeora.
- La densidad disminuye por la menor densidad del árido reciclado mixto, aproximadamente un 0,7% por cada 10% de sustitución.
- La fluencia y la retracción son superiores, aproximadamente entre un 25 y un 50% en función del tipo de árido mixto.
- La porosidad es más elevada.

Además, para el caso de hormigones estructurales y no estructurales definidos por su resistencia característica, se debe tener en cuenta que:

- La dosificación puede exigir algo más de cemento, en función de la resistencia que se desee alcanzar.
- La resistencia a compresión, para contenidos equivalentes de cemento a los de un hormigón en masa convencional, disminuye:
  - ✓ para hormigones estructurales, alrededor de un 2,5% por cada 10% de sustitución, y
  - ✓ para hormigones no estructurales y de limpieza, alrededor de un 2% por cada 10% de sustitución.
- La deformación de pico para la máxima tensión aumenta en los hormigones estructurales un 0,45% por cada 10% de sustitución (se acepta que la del hormigón convencional es del 2‰)
- La resistencia a tracción indirecta es aproximadamente igual a la de un hormigón convencional equivalente.
- El módulo E de deformación longitudinal se reduce aproximadamente un 3,4% por cada 10% de sustitución del de un hormigón en masa convencional.
- El coeficiente de Poisson es equivalente al del hormigón convencional.

10.5.5 Resumen de los requisitos técnicos

La tabla 10.88 resume los requisitos técnicos que se acaban de presentar.

Requisitos técnicos	Clase / Aplicación		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Tamaño mínimo	4 mm	4 mm	4 mm
Índice de lajas (%)	< 35%	< 35%	< 35%
Contenidos en desclasificados inferiores	≤ 10%	≤ 10%	≤ 10%
Contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4mm	≤ 5%	≤ 5%	≤ 5%
Composición(*)	ARH, ARMh o ARMc	ARH, ARMh o ARMc	ARH, ARMh o ARMc
Partículas flotantes (FL)	≤ 2 cm^3/kg	≤ 2 cm^3/kg	≤ 2 cm^3/kg
Materiales bituminosos (Ra)	≤1%	≤1%	≤1%
Otros materiales (metales, plásticos, vidrio (Rg+X)	≤1%	≤1%	≤1%
Contenido de terrones de arcilla	≤ 0,25%	≤ 0,6%	≤ 0,6%
Absorción	≤ 9%	≤ 12%	≤ 12%
Coeficiente Los Ángeles	≤ 50%	≤ 50	-
Pérdida de peso con sulfato magnésico	≤ 18%	≤ 18%	≤ 18%
Sulfatos solubles	≤ 0,8%	≤ 0,8%	≤ 0,8%
Cloruros totales	≤ 0,05%	≤ 0,05%	-
Contenido total de compuestos de azufre	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%
Partículas ligeras	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%

Tabla 10.88. Resumen de los requisitos técnicos.

(*) Requisito orientativo y no limitador

10.5.6 Control de calidad

El productor de áridos debe tener en funcionamiento un sistema de control de producción en fábrica que cumpla con los requisitos especificados en la GEAR-RT-01 (capítulo 9).

El objetivo es garantizar que todos los áridos producidos cumplirán los requisitos exigidos para la aplicación prevista de acuerdo con las recomendaciones técnicas aplicables.

En lo que se refiere específicamente al control de producción en fábrica de áridos reciclados para ser utilizados en hormigón, se establece la realización de ensayos iníciales de tipo e inspecciones periódicas de control del producto de acuerdo con los siguientes puntos de este apartado.

10.5.6.1 Ensayos iniciales de tipo

El productor deberá realizar ensayos iniciales de tipo para asegurar que el producto cumple con estas recomendaciones técnicas.

Se deben realizar nuevos ensayos iniciales de tipo cuando se modifique significativamente el proceso o los equipos del proceso productivo.

La toma de muestras del material destinadas a ensayo ha de ser realizada conforme a la norma UNE EN 932-2. El proceso de la toma de muestras tiene que ser registrado en un documento que será firmado por las personas presentes durante la toma de la muestra.

Si la evaluación inicial da un resultado negativo, se debe llevar a cabo un segundo examen inmediatamente. Si el resultado de esta segunda evaluación es negativo de nuevo, el material afectado definitivamente no cumple con los requisitos de la directriz.

La evaluación inicial debe ser llevada a cabo, como mínimo, una vez por cada planta de producción, por tipo de árido y por granulometría entregada.

Los ensayos a realizar en la caracterización inicial se indican en la tabla 10.89.

Ensayos Iniciales de tipo	Necesidad de realización por clase / Aplicación		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Tamaño mínimo	X	X	X
Índice de lajas	X	X	X
Granulometría - Desclasificados inferiores	X	X	X
Contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4mm	X	X	X
Composición	X	X	X
Contenido de terrones de arcilla	X	X	X
Absorción	X	X	X
Coeficiente Los Ángeles	X	X	
Pérdida de peso con sulfato magnésico	X	X	X
Sulfatos solubles	X	X	X
Cloruros totales	X	X	
Contenido total de compuestos de azufre	X	X	X
Partículas ligeras	X	X	X

Tabla 10.89. Ensayos iniciales de tipo en el control de producción de áridos para hormigón.

Los resultados de los ensayos iniciales se deben documentar como punto de partida para el control de producción en fábrica.

10.5.6.2 Inspección y ensayos

El productor deberá realizar inspecciones periódicas de control del producto para asegurar que los materiales producidos mantienen sus propiedades y, consecuentemente, mantienen el cumplimiento de estas recomendaciones técnicas.

La frecuencia de los muestreos y de los ensayos requeridos de las características más importantes será la que se especifica en la tabla 10.90.

Ensayos de inspección	Frecuencias mínimas por clase / Aplicación		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Tamaño mínimo	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Índice de lajas	1 cada 10.000 t	1 cada 10.000 t	1 cada 10.000 t
Granulometría - Desclasificados inferiores	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4mm	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Composición	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Contenido de terrones de arcilla	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Absorción	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Coeficiente Los Ángeles	1 cada 10.000 t	1 cada 10.000 t	-
Pérdida de peso con sulfato magnésico	1 cada 60.000 t	1 cada 60.000 t	1 cada 60.000 t
Sulfatos solubles	1 cada 30.000 t	1 cada 30.000 t	1 cada 30.000 t
Cloruros totales	1 cada 30.000 t	1 cada 30.000 t	-
Contenido total de compuestos de azufre	1 cada 30.000 t	1 cada 30.000 t	1 cada 30.000 t
Partículas Ligeras	1 cada 10.000 t	1 cada 10.000 t	1 cada 10.000 t

Tabla 10.90. Frecuencias de los ensayos a realizar en el contexto del control de producción en fábrica de los áridos considerados en estas recomendaciones.

Nota 1:
Las frecuencias mínimas de ensayo no se definen en función del tiempo transcurrido, sino de la cantidad de material procesado.

Nota 2:
Los requisitos para el control de producción en fábrica pueden conllevar inspecciones visuales. Cualquier divergencia indicada por estas inspecciones puede llevar a incrementar las frecuencias de las pruebas. Cuando un valor medido está cerca de un límite especificado, la frecuencia de las pruebas puede requerir ser aumentada.

Nota 3:
La reiteración en el cumplimiento y la reducción de la variación de los valores analizados de un parámetro determinado permite reducir la frecuencia del ensayo.

10.5.7 Ejecución de la obra

Durante la ejecución de la obra, los productos objeto de las presentes recomendaciones técnicas deben ser tratados igual que sus equivalentes convencionales.

De cara a la fabricación de hormigón, sus componentes deben cumplir una serie de requisitos definidos por normas o recomendaciones. Se presentan a continuación.

Cementos a utilizar

En principio serán los mismos que los indicados en la EHE para hormigón en masa.

Requisitos del hormigón

Generalmente, no se fabricará el hormigón con los áridos saturados a causa de los trastornos que puede introducir en la planta de hormigón. En cualquier caso, la variación de la demanda de agua depende mucho de la humedad y la absorción del árido, por lo que conviene haber ajustado previamente las dosificaciones en varios casos.

Los métodos de dosificación habituales para los hormigones convencionales son válidos para los hormigones reciclados con un porcentaje de árido reciclado mixto. En cualquier caso, se recomienda realizar ensayos previos para ajustar la dosificación y el tiempo de amasado.

Es conveniente realizar los ensayos definidos en el Anejo 22 de la EHE. Especialmente los ensayos característicos se llevarán a cabo para comprobar las posibles variaciones en los resultados de consistencia y resistencia del hormigón, debidas a la utilización de diferentes partidas de áridos reciclados procedentes de la planta suministradora. Asimismo, estos ensayos permitirán ajustar el tiempo de amasado, comprobar el efecto del tiempo de transporte sobre la consistencia y evaluar la necesidad de corregir ésta en obra añadiendo aditivos plastificantes o superplastificantes, siguiendo las indicaciones del fabricante.

Control del hormigón

El control durante el suministro contempla el control de la docilidad del hormigón y el control estadístico de la resistencia. El primero se realizará mediante el ensayo del Cono de Abrams, y el segundo mediante la rotura de probetas siguiendo las indicaciones de la EHE. Se recomienda que los lotes de control sean de tamaño inferior a los indicados en la EHE, no superándose los 50 m^3 de hormigón o una semana de tiempo de hormigonado. En todos los casos, el control se realizará determinando la resistencia de $N \geq 6$ amasadas por lote.

En función del tipo de aplicación y la exposición ambiental, puede ser interesante determinar la impermeabilidad al agua del hormigón, mediante el método de determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión, según la UNE EN 12390-8.

10.6 GEAR-RT-06: Recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigones compactados con rodillo

10.6.1 Ámbito de aplicación

Estas recomendaciones técnicas se aplican a los áridos procedentes del reciclado de material inorgánico previamente utilizado en la construcción, para su utilización como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigón compactado con rodillo (HRCR) en firmes de carreteras y caminos.

Estas recomendaciones establecen los requisitos y propiedades de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (en adelante, RCD) que se destinan a dichos usos. También indican los procedimientos del control de calidad en planta (ensayos a realizar y frecuencia) a las que se deben someter estos áridos en el proceso de reciclado.

El presente documento no afecta al procesado de residuos o subproductos industriales realizado en plantas de tratamiento de otro tipo de residuos (plantas de la industria de materiales de construcción), ni a otro tipo de áridos reciclantes distintos de los procedentes de residuos de construcción y demolición (por ejemplo, áridos siderúrgicos o áridos bituminosos).

Las aplicaciones consideradas en esta recomendación son:

- Capa de rodadura
- Base para pavimentos

Esta propuesta contempla la legislación y normativa técnica vigente en España correspondiente a esta aplicación:

- UNE-EN 12620:2009. "Áridos para hormigón";
- EHE-08 , anejo 15 Hormigones con árido reciclado y anejo 18 Hormigones de uso no estructural

10.6.2 Categorías de áridos utilizables y clases de uso

Para las aplicaciones contempladas en estas recomendaciones técnicas pueden utilizarse áridos reciclados de las siguientes categorías, según establece el capitulo 5 de esta Guía:

- Categoría ARH: Áridos Reciclados de Hormigón.
- Categoría ARMh: Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón.
- Categoría ARMc: Áridos Reciclados Mixtos Cerámicos.

Las posibles aplicaciones de los áridos reciclados incluidas en estas recomendaciones técnicas se dividen en clases de uso, según su grado de exigencia técnica (tabla 10.91).

Clases	Aplicación
Clase 1	Bases para vías de tráfico T00 a T2.
Clase 2	Capa de rodadura para vías de tráfico T3 y T4, o caminos secundarios sin exigencia de índice de regularidad.

Tabla 10.91. Clases de uso para hormigón reciclado compactado con rodillo, según grado de exigencia técnica.

La posibilidad de utilización de los áridos reciclados en las aplicaciones detalladas en la tabla anterior quedará sujeta al cumplimiento de los requisitos técnicos particulares de cada aplicación, establecidos en estas recomendaciones técnicas.

A modo informativo, en la tabla 10.92 se detallan las categorías de áridos reciclados aptas para las aplicaciones contempladas en el presente documento según clase de uso, teniendo en cuenta las propiedades habitualmente satisfechas por el material por cada categoría de áridos reciclados.

Viabilidad de aplicación		Categoría del Árido Reciclado				
		ARH	ARMh	ARMc	ARMa	MI
Clase de uso	Clase 1	X	X	X		
	Clase 2	X	X	X		

Tabla 10.92. Viabilidad de aplicación por categoría de árido y clase de uso.

Nota:
El estudio sobre los áridos reciclados presentado en el capítulo 4 de esta Guía, recoge los resultados analíticos de las muestras ensayadas y su normal cumplimiento de esta tabla. Sin embargo, la clasificación no debe ser utilizada como un elemento limitador de uso del material en una determinada clase.
La calidad técnica del material, independiente de su composición, es el elemento que determina la viabilidad de uso del material en una aplicación. Si el árido reciclado no se adapta a la categoría indicada para una determinada aplicación, pero, aun así, presenta características geométricas, físico-mecánicas y químicas adecuadas a su uso en ella (de acuerdo con los límites presentados en estas recomendaciones), el material puede ser utilizado en el uso planteado.

10.6.3 Requisitos de los áridos

10.6.3.1. Requisitos geométricos

Granulometría

La granulometría en volumen, determinada según la UNE-EN 933-1, de los materiales granulares (incluidos áridos gruesos y áridos finos) debe ajustarse al huso granulométrico indicado en la tabla 10.94.

Para hormigón reciclado compactado con rodillo se podrá usar como áridos reciclados únicamente la fracción gruesa, es decir, con tamaño mayor o igual a 4 mm. El árido fino será de origen natural.

Para la determinación de la granulometría se tendrá en cuenta que los áridos reciclado y los naturales presentan normalmente densidades diferentes.

Clase / Aplicación	Cernido acumulado (% en masa mínimo-máximo) [b]									
	32	25	20	16	12,5	8	4	2	0,5	0,063
Clase 1	100	90-100	78-100	67-100	55-85	44-68	28-51	19-39	7-22	1-7
Clase 2	100	90-100	78-100	67-100	55-85	44-68	28-51	19-39	7-22	1-7

Tabla 10.93. Husos granulométricos para los áridos reciclados.

[b] La abertura de los tamices es definida por la UNE-EN 933-2 (mm)

En la figura 10.3 se observan los límites máximo y mínimo del huso granulométrico para los áridos reciclados.

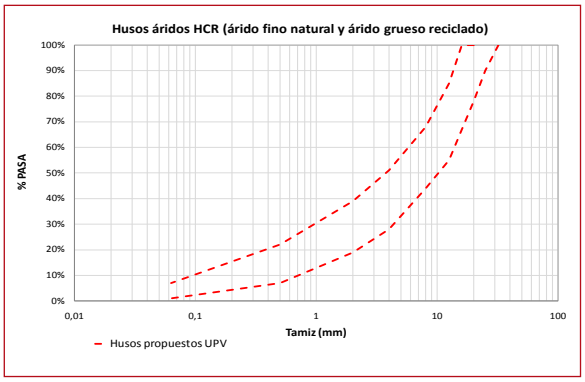


Figura 10.3. Huso granulométrico.

Forma

La forma del árido grueso, según el ensayo de determinación del índice de lajas UNE-EN 933-3, en las aplicaciones descritas deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.94.

Clase / Aplicación	Índice de lajas (%) - UNE-EN 933-3	Categoría según UNE 12620:09
Clase 1	≤ 30	FI_{35}
Clase 2	≤ 35	FI_{35}

Tabla 10.94. Índice de lajas del árido grueso reciclado.

Comentario:

La forma de las partículas del árido grueso afecta fundamentalmente al esqueleto mineral del árido. Los tipos de árido reciclado incluidos en estas recomendaciones no suelen presentar problemas en el cumplimiento del límite presentado. Se debe poner especial atención a este parámetro en la producción de áridos reciclados de categoría ARMc por su tendencia a generar formas más lajosas. Se recomienda la utilización de machacadora de impacto en el proceso de producción de esa clase o realizar dos trituraciones sucesivas.

10.6.3.2 Requisitos físico-mecánicos

Composición

La composición de los áridos reciclados se determinará según la norma EN 933-11.

Además de la clasificación propuesta en la presente Guía GEAR, la categoría del árido reciclado se establecerá según los residuos que lo componen bajo las definiciones establecidas en UNE-EN 12620 Áridos para hormigón.

La composición del árido reciclado grueso en las aplicaciones descritas deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.95.

Componente	Porcentaje en masa (%)	Categoría según UNE 12620:09
Rc (hormigón, productos de hormigón, mortero, elementos de albañilería de hormigón)	Rc+Ru > 50%	R_{cu50}
Ru (áridos no ligados, piedra natural, árido ligado hidráulicamente)		
Rb (elementos de albañilería de arcilla, de silicato cálcico y hormigón aireado no flotante)	Rb < 50%	R_{b50-}
Ra (materiales bituminosos)	Ra <5%	R_{a5-}
X (arcilla, tierra, yeso, plástico, madera y otros)	X+Rg<1%	XR_{g1-}
Rg (vidrio)		
FL (materiales flotantes)	< 2 cm^3/kg	FL_{2-}

Tabla 10.95. Composición del árido reciclado grueso.

Nota:

Se debe tomar precauciones en caso de uso de áridos reciclados cerámicos con superficie vitrificada, debido a que el acabado superficial puede dificultar la adherencia y producir desprendimientos.

Absorción y Densidad

La densidad (kg/m^3) y absorción (%) del árido reciclado grueso, determinados según la norma EN 1097-6, en las aplicaciones descritas deberá respetar los límites establecidos en la tabla 10.96.

Propiedad	Clase / Aplicación	Límite estimado
Densidad	Clase 1	≥ 2100 kg/m^3
	Clase 2	
Absorción	Clase 1	≤ 10%
	Clase 2	

Tabla 10.96. Absorción y densidad del árido reciclado grueso.

Resistencia a la fragmentación

La resistencia a la fragmentación de los áridos gruesos determinada de acuerdo con la norma EN 1097-2 por medio del coeficiente Los Ángeles deberá cumplir los requisitos establecidos en la tabla 10.97.

Clase	Aplicación	Coeficiente Los Ángeles (%) - UNE-EN 1097-2	Categoría según UNE 12620:09
Clase 1	T00 a T02	≤ 35	LA_{35}
	T3 y T4	≤ 40	LA_{40}
Clase 2	T3 y T4	≤ 35	LA_{35}

Tabla 10.97. Resistencia a la fragmentación de los áridos reciclados.

Limpieza

La limpieza superficial de los áridos del árido reciclado grueso en las aplicaciones descritas deberá respetar el límite establecido en la tabla 10.98.

Clase / Aplicación	Coeficiente de limpieza (%) - NLT 172/86
Clase 1	≤ 2
Clase 2	≤ 2

Tabla 10.98. Limpieza superficial de los áridos reciclados.

10.6.3.3 Requisitos químicos

Materia orgánica

El árido total, es decir, la mezcla de áridos finos naturales y áridos gruesos reciclados, debe cumplir el límite establecido en la tabla 10.100 (artículo 513 apartado 513.2.2.2 del PG3).

Clase / Aplicación	Contenido en materia orgánica (%) - UNE 103204
Clase 1	≤ 1
Clase 2	≤ 1

Tabla 10.99. Contenido en materia orgánica para el material granular.

Compuestos de azufre

El árido total, es decir, la mezcla de áridos finos naturales y áridos gruesos reciclados, debe cumplir el límite establecido en la tabla 10.100. (artículo 513 apartado 513.2.2.2 del PG3).

Aplicación	Compuestos de azufre (%SO_3) - EN 1744-1
Clase 1	≤ 1
Clase 2	≤ 1

Tabla 10.100. Contenido en compuestos de azufre para el material granular.

Sulfatos solubles en ácido

El árido total, es decir, la mezcla de áridos finos naturales y áridos gruesos reciclados, debe cumplir el límite establecido en la tabla 10.10a (artículo 513 apartado 513.2.2.2 del PG3).

Clase / Aplicación	Sulfatos solubles en ácido (%SO_3) - EN 1744-1	Categoría según UNE 12620:09
Clase 1	≤ 0,8	AS_{08}
Clase 2	≤ 0,8	AS_{08}

Tabla 10.101. Contenido en sulfatos solubles en ácido para el material granular.

10.6.3.4 Requisitos ambientales

Se aplicará el ensayo de lixiviación UNE EN 12457-4 y los valores límite de la UE DOCE 16/1/03 con carácter transitorio hasta que existan valores y recomendaciones españolas o UE para el ensayo de percolación.

10.6.4 Resumen de los requisitos técnicos

Requisitos técnicos		Clase / Aplicación	
		Clase 1	Clase 2
Granulometría	Tamaño mínimo	4 mm	4 mm
	Huso	Tabla 15.3	Tabla 15.3
Índice de lajas		≤ 30%	≤ 35%
Composición (*)		Tabla 15.5	Tabla 15.5
Absorción de agua		≤ 10%	≤ 10%
Densidad		≥ 2100 kg/m³	≥ 2100 kg/m³
Coeficiente Los Ángeles		≤ 35%	≤ 40%

Requisitos técnicos	Clase / Aplicación	
	Clase 1	Clase 2
Coeficiente de limpieza	≤ 2%	≤ 2%
Materia orgánica	≤ 1 %	≤ 1 %
Compuestos de azufre	≤ 1 %	≤ 1 %
Sulfatos solubles en ácido	≤ 0,8 %	≤ 0,8 %
Sulfuros oxidables	No debe contener	No debe contener
Compuestos solubles en agua	≤ 1 %	≤ 1 %

Tabla 10.102. Resumen de los requisitos técnicos.

(*) Requisito orientativo y no limitador

10.6.5 Control de calidad

El objetivo es garantizar que todos los áridos producidos cumplirán los requisitos exigidos para la aplicación prevista de acuerdo con las recomendaciones técnicas aplicables.

En lo que se refiere específicamente al control de producción en fábrica de áridos reciclados a ser utilizados como material granular para hormigón compactado con rodillo, se establece la realización de ensayos iníciales de tipo e inspecciones periódicas de control del producto de acuerdo con los siguientes puntos de este documento.

10.6.5.1 Ensayos iniciales de tipo

El productor deberá realizar ensayos iniciales de tipo para asegurar que el producto cumple con estas recomendaciones técnicas.

Se deben realizar nuevos ensayos iniciales de tipo cuando se modifique significativamente el proceso o los equipos del proceso productivo, o cuando se haya producido un cambio significativo en la naturaleza del material que pueda afectar a las propiedades de los áridos.

La toma de muestras del material destinados a ensayar ha de ser realizada conforme a la norma UNE EN 932-2. El proceso de la toma de muestras tiene que ser registrado en un documento que será firmado por las personas presentes durante la toma de la muestra.

Si la evaluación inicial da un resultado negativo, se debe llevar a cabo un segundo examen inmediatamente. Si el resultado de esta segunda evaluación es negativo de nuevo, el material afectado definitivamente no cumple con los requisitos de la directriz.

La evaluación inicial debe ser llevada a cabo, como mínimo, una vez por cada planta de producción, por tipo de árido y por granulometría entregada.

Las pruebas que deben ser realizadas están indicadas en la tabla 10.103.

Ensayos Iniciales de tipo		Necesidad de realización por clase / Aplicación	
		Clase 1	Clase 2
Granulometría	Tamaño mínimo	X	X
	Huso	X	X
Índice de lajas		X	X
Composición		X	X
Absorción de agua		X	X
Densidad		X	X
Coeficiente Los Ángeles		X	X
Coeficiente de limpieza		X	X

Ensayos Iniciales de tipo	Necesidad de realización por clase / Aplicación	
	Clase 1	Clase 2
Materia orgánica	X	X
Compuestos de azufre	X	X
Sulfatos solubles en ácido	X	X
Sulfuros oxidables	X	X
Compuestos solubles en agua	X	X

Tabla 10.103. Ensayos iniciales de tipo necesarios para los áridos reciclados a ser utilizados como material granular para hormigón compactado con rodillo.

Los resultados de los ensayos iniciales se deben documentar como punto de partida para el control de producción en fábrica del material.

10.6.5.2 Inspección y ensayos

El productor deberá realizar inspecciones periódicas de control del producto para asegurar que los materiales producidos mantienen sus propiedades y, consecuentemente, mantienen el cumplimiento de estas prescripciones y recomendaciones técnicas.

La frecuencia de los muestreos y de los ensayos requeridos de las características más importantes será la que se especifica en la tabla 10.104.

Ensayos de inspección		Frecuencias mínimas por clase / aplicación	
		Clase 1	Clase 2
Granulometría	Tamaño mínimo	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
	Huso	1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Índice de lajas		1 cada 10.000 t	1 cada 10.000 t
Composición		1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Equivalente de arena		1 cada 10.000 t	1 cada 10.000 t
Absorción de agua		1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Densidad		1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Coeficiente Los Ángeles		1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Coeficiente de limpieza		-	-
Materia orgánica		1 cada 2.000 t	1 cada 2.000 t
Compuestos de azufre		1 cada 20.000 t	1 cada 20.000 t
Sulfatos solubles en ácido		1 cada 20.000 t	1 cada 20.000 t
Sulfuros oxidables		-	-
Compuestos solubles en agua		-	-
Cloruros totales		1 cada 20.000 t	1 cada 20.000 t
Contenido de yeso		1 cada 20.000 t	1 cada 20.000 t

Tabla 10.104. Frecuencias de los ensayos a realizar en el contexto del control de producción en fábrica de los áridos considerados en estas prescripciones.

Nota 1:
Las frecuencias mínimas de ensayo no se definen en función del tiempo transcurrido, sino de la cantidad de material procesado.

Nota 2:
Los requisitos para el control de producción en fábrica pueden conllevar inspecciones visuales. Cualquier divergencia indicada por estas inspecciones puede llevar a incrementar las frecuencias de las pruebas. Cuando un valor medido está cerca de un límite especificado, la frecuencia de las pruebas puede precisar ser incrementada.

Nota 3:
La reiteración en el cumplimiento y la reducción de la variación de los valores analizados de un parámetro determinado, permite reducir la frecuencia del ensayo.

10.6.6 Ejecución de la obra

Durante la ejecución de la obra, los productos objeto de las presentes recomendaciones técnicas deben ser tratados igual a sus equivalentes convencionales, siguiendo las precauciones y recomendaciones indicadas a continuación:

- Se deben realizar ensayos previos a la ejecución que permitan un ajuste de la dosificación, según la calidad del árido reciclado, ajustando la cantidad de cemento a las resistencias exigidas.
- El procedimiento para establecer adecuadamente la composición de la mezcla se inicia realizando un primer tanteo con el contenido de cemento, que será tal que permita obtener las resistencias necesarias para el proyecto, según el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. El contenido en cemento estará entre el 12% y el 17% del total en peso de los materiales secos.
- A continuación se determina la densidad máxima y humedad óptima, según el ensayo Próctor Modificado UNE 103501. Posteriormente, sobre la mezcla que presenta la densidad y humedad óptima se ajusta la cantidad de cemento para obtener la resistencia exigida.
- La humedad de los áridos reciclados debe ser medida e intentar que las condiciones de laboratorio reproduzcan las presentadas en obra, de manera que la cantidad de agua del hormigón sea la estimada en los ensayos previos. En obra puede ser necesario trabajar con un valor menor al de la humedad óptima establecida bajo condiciones de laboratorio.
- Para el caso de uso como base de pavimento (clase 1), la resistencia media a compresión a 28 días, según la NLT-305, será mayor que 20 MPa y la resistencia mínima a tracción indirecta a 28 días, según UNE 833046, será mayor que 3,3 MPa.
- Cuando la aplicación se trate como capa de rodadura (clase 2), la resistencia mínima a tracción indirecta a 28 días, según UNE 833046, será mayor que 4Mpa. Puede permitirse un valor de resistencia a tracción indirecta de 3,5 MPa, si se aumenta en 2 cm el espesor de la capa de HRCR.
- En los ensayos previos las probetas se compactaran según la NLT-310, con la energía que proporcione la densidad mínima requerida mediante el uso del martillo Kango. En obra se tomaran testigos para confirmar la resistencia exigida.
- La superficie de la capa terminada deberá presentar una textura uniforme, exenta de segregaciones y ondulaciones, cumpliendo lo establecido en la tabla 10.105. En caso de que en capas de rodadura no se alcance el IRI requerido o si se pretende mejorar dicho IRI, se recomienda colocar una capa de rodadura de máximo 5 cm de espesor.

Clase / Aplicación	Porcentaje de hectómetros		
	50	80	100
Clase 1	< 2,5	< 3,0	< 3,5
Clase 2	< 3,0	< 3,5	< 4,0

Tabla 10.105. IRI Índice de Regularidad Internacional (Según la NLT 330).

Equipo necesario para la ejecución de las obras

Será de aplicación lo indicado en el artículo 513.4 del PG3 respecto a los apartados de:

- Central de fabricación
- Elementos de transporte
- Equipo de extensión
- Equipo de compactación
- Equipo para la ejecución de juntas

Debe garantizarse la homogeneidad de la mezcla. Siempre que sea posible, la mezcla se extenderá por anchos completos.

Ejecución de las obras

La ejecución del HCR no se podrá iniciar hasta que el director de la obra haya aprobado la correspondiente formula de trabajo estudiada en el laboratorio y verificada en la central de fabricación y en el tramo de prueba.

Cada camión debe entregar el albarán donde se reflejen:

- La dosificación en masa de agua, cemento, áridos y aditivos en su caso;
- La humedad de los áridos naturales y reciclados;
- El plazo de trabajabilidad de la mezcla.

El espesor de la capa se comprobará mediante extracción de testigos cilíndricos, sobre los que además se efectuaran ensayos de tracción indirecta y/o compresión.

En lo relativo a la compactación, terminación, ejecución de juntas de trabajo y curado será de aplicación lo indicado en el artículo 513 del PG3.

También será de aplicación lo indicado en el artículo 513 del PG3 respecto a:

- El tramo de prueba;
- La comprobación de la densidad;
- El control de calidad;
- Los criterios de aceptación o rechazo;
- Las especificaciones técnicas y los distintivos de calidad (Marcado CE).

11. Catálogo de obras

El presente Catálogo de Obras es una selección de las obras realizadas con áridos reciclados procedentes de materiales inorgánicos previamente utilizados en construcción, en las que se ha recopilado información analítica y empírica por el equipo investigador del Proyecto GEAR.

La categoría de "Obra adscrita al Proyecto GEAR" significa que se ha realizado un procedimiento de control y seguimiento de la misma diseñado por el equipo del Proyecto, llevado a cabo por un responsable de la empresa de reciclaje suministradora del árido reciclado utilizado, bajo la supervisión de un investigador del proyecto (la Universidad o Centro Tecnológico asignado), con el objeto de obtener información normalizada, empírica y contrastada para la etapa de aplicación experimental del Proyecto GEAR.

Esta etapa se ha desarrollado entre septiembre de 2009 y marzo de 2011, y se ha realizado el seguimiento de un centenar de obras de diversa entidad y nivel de exigencia.

Para obtener obras "adscritas al proyecto", el equipo de coordinación y el equipo investigador han realizado presentaciones del proyecto ante clientes seleccionados de las plantas de reciclaje participantes, o ante empresarios de la construcción en actos públicos convocados por organismos públicos o en reuniones con directores de obras de los Ayuntamientos y otras entidades promotoras.

En otros casos, las propias empresas de reciclaje han seleccionado obras y convencido a los clientes para que una obra pasara a ser "adscrita".

Los Centros Tecnológicos/Universidades participantes en el Proyecto GEAR han sido los responsables del seguimiento del control de las obras, el análisis de los resultados obtenidos y la elaboración del informe final. Para eso, han realizado las siguientes actividades:

- Visita a la obra;
- Revisión de las informaciones indicadas en el *check list* y garantizar que la ficha sea cumplimentada correctamente;
- Análisis de todos los ensayos de caracterización y de control *in situ* realizados.

Áridos reciclados como material granular en firmes

Código de la obra	OBP12.2
Suministrador de AR	Contemax Gestión Medioambiental, S.L.
Promotor	Ayuntamiento de Gijón
Ubicación	Gijón
Descripción de obra	Reurbanización de enlace de autopista A-66 con Av. de Portugal.
Uso específico del árido reciclado	Subbase de viales en el último tramo de Autopista.
Tipo de árido	25/50 mm árido reciclado mixto
Cantidad utilizada (t)	1.152
Procedimientos realizados	Se fresó y saneó el tramo de autopista, empleando posteriormente árido reciclado mixto 0-25 mm como subbase en todo el tramo, extendiéndose con retrocargadora y compactando con rodillo de 20 t. Posteriormente, se extendió y compactó una base de zahorra artificial, aplicándose el asfalto en la zona de rodadura y bordillo, y tierra vegetal en la rotonda y taludes.
Conformidad del producto utilizado	El material se comporta según las exigencias del PG3 para subbases.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	El resultado final ha sido satisfactorio teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.





Áridos reciclados como material granular en firmes

Código de la obra	OBP17.1
Suministrador de AR	Germans Cañet Xirgu, S.L.
Promotor	Ayuntamiento de Caldes de Malavella
Ubicación (provincia)	Caldes de Malavella
Descripción de obra	Pavimentación de 252 m del camino de enlace del cementerio con la urbanización Aigües Bones.
Uso específico del árido reciclado	Subbase
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 0/32 mm
Cantidad utilizada (t)	250 m^3
Procedimientos realizados	El material se ha aplicado según las especificaciones técnicas solicitadas por la dirección de obra.
Conformidad del producto utilizado	Se han realizado ensayos de caracterización del material según protocolo de control del Proyecto GEAR. Se han realizado ensayos de densidad-humedad in situ, Próctor Modificado (UNE 103501) e índice CBR (UNE 103502). Por lo general, el árido reciclado estuvo conforme a las características indicadas por el PG3. Los resultados de compactación y CBR fueron considerados satisfactorios, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La conformidad del producto utilizado y fabricado fue considerada satisfactoria, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.





Áridos reciclados como material granular en firmes

Código de la obra	OBP19.2
Suministrador de AR	Gestora de Runes del Bages
Promotor	Ayuntamiento de Manresa
Ubicación (provincia)	Manresa
Descripción de obra	Construcción Rotonda Sant Marc: La empresa Gestora de Runes del Bages suministró Árido Reciclado a La Empresa Excover, que como contratista del Ayuntamiento de Manresa tenía el encargo de realizar la obra de la rotonda de Sant Marc. Se trata de una de las entradas más importantes a la ciudad de Manresa, con lo que se considera que es una obra de importante calado. La obra consistía en la construcción de la rotonda así como sus calles adyacentes. El material se utilizó como subbase de carreteras.
Uso específico del árido reciclado	Subbase
Tipo de árido	Árido reciclado mixto ARMh 0/25 mm
Cantidad utilizada (t)	2.000
Procedimientos realizados	El material se transportó habitualmente con camión bañera desde la planta de Callús. Ocasionalmente, también se utilizó el dúmper. No había acopio de material en obra, ya que el suministro era en pequeñas cantidades a diario, con lo que se utilizaba conforme iba llegando a la obra. En este caso y debido a que ya se habían ajustado las fórmulas en el laboratorio, en la obra se pesó el material. El material fue sometido a humectación.
Conformidad del producto utilizado	Se han realizado los ensayos de caracterización inicial del árido y los ensayos de control in situ según el PG3 y el protocolo de control del Proyecto GEAR. Por lo general, el árido reciclado estuvo conforme las características indicadas por el PG3. Los resultados de densidad-humedad in situ fueron considerados muy buenos.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La conformidad del producto utilizado y fabricado fue considerada satisfactoria, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.



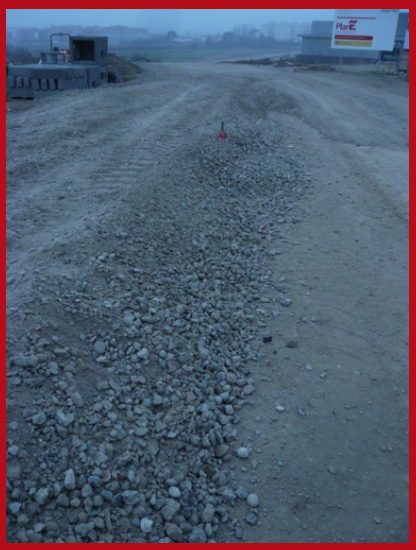




Áridos reciclados como material granular en firmes

Código de la obra	OBP20.5
Suministrador de AR	Gestora de Runes de la Construcción – UTE Segria
Promotor	Ayuntamiento de LLeida
Ubicación	Lleida
Descripción de obra	Pavelló Balàfia-Secà de Sant Pere (2ª fase): Zahorra 0/40 mm para base en tramo de camino asfaltado para paso provisional de vehículos. Se extiende la zahorra en una única tongada de 30 cm y se compacta con rodillo de >15 t. Posteriormente, se aplica la capa asfáltica de rodadura.
Uso específico del árido reciclado	Base para camino asfaltado
Tipo de árido	Árido reciclado 0/40 mm
Cantidad utilizada (t)	6.600
Procedimientos realizados	Realización de ensayos de control sobre el material granular según PG3, protocolo del Proyecto GEAR y exigencias de la dirección de obra.
Conformidad del producto utilizado	Por lo general, el árido reciclado estuvo conforme a las características indicadas por el PG3. Los resultados de densidad-humedad in situ fueron considerados muy buenos.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	El pavimento fue ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio. Según los resultados obtenidos, el material presenta una absorción del 12 - 13%. Se determina que requiere de mayor aportación de agua en la obra durante el proceso de compactación.





Áridos reciclados como material granular en firmes

Código de la obra	OBP25.2
Suministrador de AR	Reciclaje de Inertes del Noroeste, S.L. (RECINOR)
Promotor	Concello de Ferrol
Ubicación	A Coruña
Descripción de obra	Vial secundario de acceso de tráfico pesado a la cantera de Las Calenas y renovación de las redes de saneamiento en San Pablo (Ferrol).
Uso específico del árido reciclado	Los trabajos realizados han consistido en la renovación de las redes de saneamiento existentes, de forma que la aplicación de los materiales ha sido fundamentalmente para asentamiento o envolvente de tubería y relleno de canalizaciones - zanjas. También se han empleado áridos 0/20 mm y 20/60 mm para rellenos o explanación; y la zahorra como subbase. Por su parte, la gravilla reciclada mixta se ha utilizado como componente de hormigones en masa fabricados con sustituciones del 20 y del 40%.
Tipo de árido	Zahorra artificial reciclada 0/20 mm de hormigón, arena reciclada mixta y de hormigón 0/6 mm, grava reciclada 20/60 mm
Cantidad utilizada (t)	Arena 0/6 mm hormigón: 26,00, Arena 0/6 mm mixta: 619,38, Gravilla 12/25 mm hormigón: 241,84, Árido 0/20 mm: 865,54, Árido 20/60: 107,76, Zahorra de hormigón: 2.374,30
Procedimientos realizados	Extensión y compactación del material. Recogidas varias series de probetas testigo del HM con gravilla 12/25 mixta, al 20 y 40% de árido reciclado. Realizadas analíticas a la zahorra reciclada.
Conformidad del producto utilizado	El árido reciclado no cumplía con todos los requisitos del PG3. El material reciclado mixto cumple los requisitos de la EHE-08 excepto la cantidad de material cerámico presente, la absorción y el coeficiente Los Ángeles.
Conformidad del producto fabricado	Los ensayos de compactación in situ son satisfactorios. El hormigón con 20% de árido reciclado presentó resistencia media a 7 días 24,8 MPa, a 28 días 28,9 MPa y consistencia blanda. El hormigón con 20% de árido reciclado presentó resistencia media a 7 días 20,7 MPa y consistencia fluida.
Conclusiones y observaciones	La obra se ha ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio.





Áridos reciclados como material granular en firmes

Código de la obra	OBP26.1
Suministrador de AR	Sudismin, S.L.
Promotor	Ayuntamiento de Zaragoza
Ubicación (provincia)	Zaragoza
Descripción de obra	Ejecución de subbase para firme de carretera y para carril del tranvía, en obras de construcción del Tranvía de Zaragoza.
Uso específico del árido reciclado	Base de firme de zahorra artificial
Tipo de árido	Árido reciclado 0/25 mm
Cantidad utilizada (t)	7.745 (hasta octubre de 2010)
Procedimientos realizados	El transporte se realiza mediante dúmper desde la planta de tratamiento, bien hasta la traza, o bien hasta la zona de acopio temporal de materiales para su uso en fines de semana cuando las instalaciones se encuentran cerradas. Procedimientos de producción según Pliego de Condiciones de la obra: Transporte, vertido, extendido, regado y compactado por medios mecánicos. Árido fabricado en planta con marcado CE.
Conformidad del producto utilizado	Por lo general, el árido reciclado estuvo conforme a las características indicadas por el PG3.
Conformidad del producto fabricado	La conformidad del producto utilizado y fabricado fue considerada satisfactoria, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.
Conclusiones y observaciones	El almacenamiento temporal y prolongado del material reciclado puede provocar que éste se disgregue, por lo que se sugiere que sea empleado sin acopio en obra. El material es regado intensamente antes de compactarse mediante tractor equipado con cuba. No siendo suficiente el riego en el extendido, se solicita a la empresa suministradora del árido la humectación del mismo en el acopio o sobre el camión, mediante tractor y cuba o manualmente con manguera.



Áridos reciclados como material granular en firmes

Código de la obra	OBP27.1
Suministrador de AR	Tecnocatalana de Runes, S.L.
Promotor	
Ubicación (provincia)	Lliçà de Vall
Descripción de obra	Vial Paseo de la Iglesia en Lliçà de Vall
Uso específico del árido reciclado	Base / subbase
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 0/20 mm
Cantidad utilizada (t)	
Procedimientos realizados	Realización de ensayos de control: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado, según UNE-EN 933-1:1998/A1:2006; Determinación de los límites de Atterberg, según Normas UNE 103-103-94, 103-104-94; Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena, según UNE-EN 933-8; Ensayo Próctor Modificado s/UNE 103,501/94; Indice de C. B. R. en laboratorio, sin incluir ensayo Próctor (tres puntos), s/UNE 103-502-95 con compactación Próctor Modificado; Determinación de Desgaste Los Angeles UNE 1097-2/99; Determinación del porcentaje de caras de fractura en las partículas de árido grueso, según UNE-EN 933-5; Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas, según UNE-EN 933-3:1997; Determinación del coeficiente de limpieza, según el anexo C de la norma UNE 146130:2000.
Conformidad del producto utilizado	El árido presenta un huso granulométrico coherente con un todo uno natural ZN20 o ZA20. Ségun los resultados, el árido reciclado estuvo conforme las características indicadas por el PG3.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La conformidad del producto utilizado y fabricado fue considerada satisfactoria, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.



Áridos reciclados como material granular en firmes

Código de la obra	OBP27.4
Suministrador de AR	Tecnocatalana de Runes, S.L.
Promotor	Ayuntamiento de Lliça d'Amunt
Ubicación (provincia)	Lliça d'Amunt (Barcelona)
Descripción de obra	Camino de la Serra
Uso específico del árido reciclado	Subbase
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 0/20 mm
Cantidad utilizada (t)	5.000
Procedimientos realizados	Se han realizado ensayos de control ségun PG3 y protocolo de control del Proyecto GEAR.
Conformidad del producto utilizado	Por lo general, el árido reciclado estuvo conforme las características indicadas por el PG3.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La conformidad del producto utilizado y fabricado fue considerada satisfactoria, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.



Áridos reciclados como material granular en rellenos y explanaciones

Código de la obra	OBP9.1
Suministrador de AR	Áridos Reciclados, S.A.
Promotor	Metro de Madrid
Ubicación	Madrid
Descripción de obra	Línea 9 Metro Madrid
Uso específico del árido reciclado	Zahorra artificial para rellenos de zanjas
Tipo de árido	0/50 mm árido reciclado de hormigón
Cantidad utilizada (t)	4.544
Procedimientos realizados	El total de la obra consiste en la prolongación de la Línea 9 de Metro de Madrid. Como parte de esta obra, se construyeron una serie de pilotes con el objeto de servir de apoyo a la losa que hará de cubierta en la nueva estación de metro. Una vez pasado el tiempo de fraguado del hormigón de esta losa, se procedió a la demolición de los pilotes de apoyo. El hormigón procedente de estos pilotes de machaco in situ finalmente se utilizó como material de relleno en el hueco perimetral de la viga de arriostramiento de la losa anteriormente citada. Se realizó compactación manual y posterior humectación
Conformidad del producto utilizado	En general, el árido reciclado estuvo conforme las características indicadas por el PG3.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	El pavimento fue ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio.



Áridos reciclados como material granular en rellenos y explanaciones

Código de la obra	OBP21.2
Suministrador de AR	Mac Insular, S.L.
Promotor	Abaqua
Ubicación	Pollença
Descripción de obra	Paseo peatonal entre el camino de Can Seguinot y Pollença para las obras de sustitución del colector general de agua residual entre el puerto y la depuradora de Pollensa. Longitud de 3,5 km y 2,5 m de ancho.
Uso específico del árido reciclado	Explanada mejorada
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 0/8 y 8/40 mm
Cantidad utilizada (t)	2.000
Procedimientos realizados	Realización de ensayos de control sobre el material granular según aplicación dada en obra.
Conformidad del producto utilizado	En general, el árido reciclado estuvo conforme las características indicadas por el PG3.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La obra fue ejecutada sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio.





Áridos reciclados como material granular en rellenos y explanaciones

Código de la obra	OBP22.1
Suministrador de AR	Noulas Resevi, S.L.
Promotor	Cespa GR
Ubicación (provincia)	Moncofar (Castellón)
Descripción de obra	Campa para camiones Cespa Moncofar (zona de aparcamiento)
Uso específico del árido reciclado	Explanada (zona de aparcamiento)
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 0/40 mm
Cantidad utilizada (t)	262,2
Procedimientos realizados	Se han realizado inspección visual y los ensayos de control ségun PG3 y protocolo de control del Proyecto GEAR.
Conformidad del producto utilizado	Por lo general, el árido reciclado estuvo conforme las características indicadas por el PG3.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La conformidad del producto utilizado y fabricado fue considerada satisfactoria, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.





Áridos reciclados como material granular en rellenos y explanaciones

Código de la obra	OBP22.2
Suministrador de AR	Noulas Resevi, S.L.
Promotor	Cespa GR
Ubicación (provincia)	Vila-Real (Castellón)
Descripción de obra	Explanada para camiones Cespa en Vila-Real (zona de aparcamiento)
Uso específico del árido reciclado	Explanada (zona de aparcamiento)
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 0/40 mm
Cantidad utilizada (t)	459,90
Procedimientos realizados	Se han realizado inspección visual y los ensayos de control ségun PG3 y protocolo de control del Proyecto GEAR.
Conformidad del producto utilizado	Por lo general, el árido reciclado estuvo conforme las características indicadas por el PG3.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La conformidad del producto utilizado y fabricado fue considerada satisfactoria, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.



Áridos reciclados como material granular en rellenos y explanaciones

Código de la obra	OBP25.2
Suministrador de AR	Reciclaje de Inertes del Noroeste, S.L. (RECINOR)
Promotor	Concello de Ferrol
Ubicación	A Coruña
Descripción de obra	Vial secundario de acceso de tráfico pesado a la cantera de Las Calenas y renovación de las redes de saneamiento en San Pablo (Ferrol)
Uso específico del árido reciclado	Los trabajos realizados han consistido en la renovación de las redes de saneamiento existentes, de forma que la aplicación de los materiales ha sido fundamentalmente para asentamiento o envolvente de tubería y relleno de canalizaciones - zanjas. También se han empleado áridos 0/20 y 20/60 mm para rellenos o explanación; y la zahorra como sub base. Por su parte, la gravilla reciclada mixta se ha utilizado como componente de hormigones en masa fabricados con sustituciones del 20 y del 40%.
Tipo de árido	Zahorra artificial reciclada 0/20 mm de hormigón, arena reciclada mixta y de hormigón 0/6 mm, grava reciclada 20/60 mm
Cantidad utilizada (t)	Arena 0/6 mm hormigón: 26,00, Arena 0/6 mm mixta: 619,38, Gravilla 12/25 mm hormigón: 241,84, Árido 0/20 mm: 865,54, Árido 20/60 mm: 107,76, Zahorra de hormigón: 2.374,30
Procedimientos realizados	Extensión y compactación del material. Recogidas varias series de probetas testigo del HM con gravilla 12/25 mm mixta, al 20 y 40% de árido reciclado. Realizadas analíticas a la zahorra reciclada.
Conformidad del producto utilizado	El árido reciclado no cumplía con todos los requisitos del PG3. El material reciclado mixto cumple los requisitos de la EHE-08 excepto la cantidad de material cerámico presente, la absorción y el coeficiente Los Ángeles
Conformidad del producto fabricado	Los ensayos de compactación in situ son satisfactorios. El hormigón con 20% de árido reciclado presentó resistencia media a 7 días 24,8 MPa, a 28 días 28,9 MPa y consistencia blanda. El hormigón con 20% de árido reciclado presentó resistencia media a 7 días 20,7 MPa y consistencia fluida.
Conclusiones y observaciones	La obra se ha ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio. Ningún problema destacable.





Áridos reciclados como material granular en rellenos y explanaciones

Código de la obra	OBP29.1
Suministrador de AR	UTE Navalcarnero
Promotor	Gedesma
Ubicación	Madrid
Descripción de obra	Reparación del camino de La Zarzuela (parte 1)
Uso específico del árido reciclado	El trabajo realizado ha consistido en el empleo de áridos reciclados en la explanada de reparación de un camino
Tipo de árido	Árido reciclado mixto de hormigón (zahorra reciclada 0/20 mm + 0/50 mm)
Cantidad utilizada (t)	326
Procedimientos realizados	Extensión, humectación y compactación del material
Conformidad del producto utilizado	El árido reciclado cumple con los requisitos del PG3
Conformidad del producto fabricado	Los ensayos de compactación in situ no son satisfactorios
Conclusiones y observaciones	El material de árido reciclado cumple satisfactoriamente todos los usos de la aplicación como explanada para camino; parece ser que el tipo de explanada que se ha dimensionado no está acorde con las exigencias del tráfico que soporta (tránsito de tráfico pesado y gran cantidad de tráfico ligero), lo que influirá en un deficiente comportamiento del camino.





Áridos reciclados como material granular en rellenos y explanaciones

Código de la obra	OBP30.1
Suministrador de AR	BTB A.B.
Promotor	Autoridad Portuaria de Bilbao
Ubicación	Bilbao
Descripción de obra	Ferrovial – Puerto de Bilbao
Uso específico del árido reciclado	Explanada mejorada
Tipo de árido	Árido reciclado mixto
Cantidad utilizada (t)	180.000
Procedimientos realizados	Puesta en obra del árido reciclado, extendido y compactación del mismo para la realización de una explanada para la ampliación del puerto de Bilbao. Realización de ensayos de control de caracterización e in situ.
Conformidad del producto utilizado	Por lo general, el árido reciclado estuvo adecuado las características exigidas por el PG3. Los resultados in situ han sido bastante satisfactorios.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	El árido reciclado estaba almacenado en la planta de BTB y acopiado al aire libre. Cuenta con una humedad óptima.



Áridos reciclados como material granular en rellenos y explanaciones

Código de la obra	OB P5.C2.1
Ubicación (provincia)	Sondika - Vizcaya
Descripción de obra	Ejecución de explanada con árido reciclado. Tramo experimental (aprox. 100 metros) con árido reciclado para formación de explanada mejorada en vial de tráfico T00, en sustitución de árido de cantera utilizado en el resto de las zonas. El proyecto establece en explanada suelo seleccionado tipo 3.
Uso específico del árido reciclado	Explanada mejorada
Tipo de árido	Zahorra artificial de árido reciclado mixto de hormigón
Cantidad utilizada (t)	-
Procedimientos realizados	El árido reciclado se dispuso en dos tongadas para alcanzar los 35 cm finales, de acuerdo con el siguiente proceso: TONGADA 1: Extendido del material Regado del material + 3 pasadas sencillas de compactodor + 1er control de densidad/humedad 2º regado + 2 pasadas sencillas + 2ª medición (parcial) de densidad/humedad 3er regado + 2 pasadas sencillas + 3er control de densidad/humedad TONGADA 2: Extendido del material Regado intenso del material (3 pasadas) + 4 pasadas sencillas de compactador + 4ª medición de densidad/humedad. Sellado de la explanada (compactación sin vibración) + 5ª medición de densidad/humedad (en masa) + determinación de densidad por método de arena
Conformidad del producto utilizado	El árido reciclado no cumple con los requisitos del PG3
Conformidad del producto fabricado	Se realizaron mediciones de densidad in situ y ensayos de placas de carga (NLT-357)
Conclusiones y observaciones	El árido reciclado estaba seco por lo que se necesitó regarlo en agua, asimismo se decidió regar la explanada con un riego bituminoso para no tener problemas de curado en la grava cemento dispuesto sobre la explanada



Áridos reciclados como material granular en rellenos y explanaciones

Código de la obra	OB P5.C2.2
Ubicación (provincia)	Guipúzcoa - Bilbao
Descripción de obra	Reposición de saneamiento
Uso específico del árido reciclado	Relleno localizado en zanjas
Tipo de árido	Zahorra artificial de árido reciclado mixto (0/25 mm)
Cantidad utilizada (t)	3.000
Procedimientos realizados	Extensión, humectación y compactación del material
Conformidad del producto utilizado	El árido reciclado cumple con los requisitos del PG3
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	El material de árido reciclado cumple satisfactoriamente todos los usos de la aplicación.



Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en firmes y explanaciones

Código de la obra	OBP24.1
Suministrador de AR	Reciclajes y Derribos Santa Bárbara, S.A.
Promotor	Consell Insular d'Eivissa
Ubicación	Ibiza
Descripción de obra	Acondicionamiento de la carretera PM-804 del PK 0,000 al 11,250
Uso específico del árido reciclado	Suelo cemento mejorado tipo SC20
Tipo de árido	Árido reciclado mixto do 0/10 mm
Cantidad utilizada (t)	788
Procedimientos realizados	La ejecución de la obra siguió los procedimientos indicados en el PG3.
Conformidad del producto utilizado	El árido reciclado cumple con los requisitos indicados por el PG3 para su uso en suelo estabilizado "in situ" con cemento, concretamente el material es apto para su uso como suelo estabilizado S-EST-3.
Conformidad del producto fabricado	No se dispone de los resultados de los ensayos a compresión simple de la mezcla final y, por tanto, no es posible evaluar la aptitud del producto. Por otra parte, se han efectuado ensayos sobre el material puesto en obra: "densidades in situ", que cumplen los valores de compactación requeridos. También se han efectuado ensayos de placa de carga sobre el material ya compactado, dando como resultado un módulo de compresibilidad apto para su clasificación como suelo estabilizado con cemento SEST3.
Conclusiones y observaciones	El pavimento fue ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio.







Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en firmes y explanaciones

Código de la obra	OBP25.3
Suministrador de AR	Reciclaje de Inertes del Noroeste, S.L. (RECINOR)
Promotor	-
Ubicación	A Coruña
Descripción de obra	Senda Peatonal (Paseo Marítimo San Valentín)
Uso específico del árido reciclado	Suelo cemento
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 0/6 mm
Cantidad utilizada (t)	77
Procedimientos realizados	La ejecución de la obra siguió los procedimientos indicados en el PG3.
Conformidad del producto utilizado	En general, el árido reciclado estuvo conforme las características indicadas por el PG3.
Conformidad del producto fabricado	Los ensayos a compresión de la mezcla fabricada en laboratorio cumple las especificaciones del PG3 para su uso como suelo cemento, obteniendo unas resistencias de 4 MPa para el contenido mínimo exigible de cemento del 3%.
Conclusiones y observaciones	El pavimento fue ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.





Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en firmes y explanaciones

Código de la obra	OBP27.3
Suministrador de AR	Tecnocatalana de Runes, S.L.
Promotor	
Ubicación (provincia)	La Garriga
Descripción de obra	Mejora del enlace de la carretera C-17 con la BP-1432. Carretera C-17 de Barcelona a Rpoll, PK 28+474. Tramo: La Garriga.
Uso específico del árido reciclado	Suelo cemento
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 0/20 mm
Cantidad utilizada (t)	
Procedimientos realizados	Realización de estudio específico para analisis del material: Granulometría, Próctor Modificado, Materia orgánica, Plasticidad, reactividad Alcali silice con cemento tipo CEM II 32,5, Coeficiente Los Ángeles, Absorción, Índice de lajas, Sulfatos solubles en ácido, Resistencia à compresión del suelo cemento a la edad de 7 días.
Conformidad del producto utilizado	Por lo general, el material cumple los límites del PG3. El contenido de sulfatos supera el limite del PG3 solo en la segunda decimal.
Conformidad del producto fabricado	El árido reciclado presenta características adecuadas para suelo cemento y también para suleo estabilizado tipo 3.
Conclusiones y observaciones	La conformidad del producto utilizado y fabricado fue considerada satisfactoria, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.





Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en firmes y explanaciones

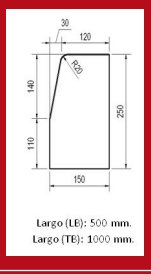
Código de la obra	OBP1.C1.1
Suministrador de AR	Verbena
Promotor	-
Ubicación	Villanueva de Castellón (Valencia)
Descripción de obra	Tramo experimental en la CV-560
Uso específico del árido reciclado	Suelo cemento mejorado tipo SC40
Tipo de árido	Suelo y Zahorra artificial reciclada (0/40) mm
Cantidad utilizada (t)	500 m^3
Procedimientos realizados	La ejecución de la obra siguió los procedimientos indicados en el PG3.
Conformidad del producto utilizado	Se han realizado los ensayos de caracterización de la zahorra reciclada para su uso en la fabricación de suelo cemento. La granulometría se adapta al uso previsto como un suelo cemento SC40, y los ensayos de plasticidad, materia orgánica y sulfatos, cumplen las exigencias previstas en el PG3 para tal fin.
Conformidad del producto fabricado	Los ensayos a compresión de la mezcla fabricada en laboratorio, cumple las especificaciones del PG3 para su uso como suelo cemento, obteniendo unas resistencias de 4 MPa para el contenido mínimo exigible de cemento del 3%.
Conclusiones y observaciones	El pavimento fue ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio, teniendo en cuenta el uso destinado al tramo.







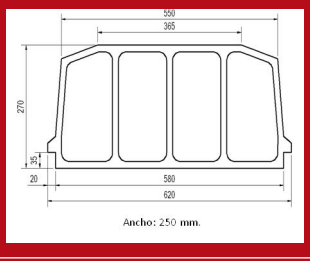
Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en prefabricados

Código de la obra	OB P5.C1.1
Suministrador de AR	Asociación La Belonga, Impulso Industrial Alternativo
Promotor	Universidad de Oviedo
Ubicación	Latores, Oviedo (Asturias)
Descripción de obra	Producción de bordillos de hormigón con 0% (Hormigón de control); 20%; 50%; 70%; 100% de sustitución de árido natural por árido reciclado.  Largo = 500 mm.
Uso específico del árido reciclado	Material granular para la producción de bordillo de hormigón
Tipo de árido	Árido reciclado mixto de hormigón. ARM-h. Fracción: 0-10 mm. Presencia mayoritaria de residuos de hormigón. Composición (Hormigón: 71%; Áridos: 29%)
Cantidad utilizada (t)	3,4
Procedimientos realizados	El bordillo se ha fabricado siguiendo los mismos procedimientos como si se hubiese hecho a partir de hormigón con árido natural. Se ha ajustado el agua de amasado.
Conformidad del producto utilizado	El acabado no presenta variaciones significativas respecto a las piezas fabricadas con árido natural cuando el porcentaje de sustitución es inferior al 50%.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	El bordillo se ha fabricado siguiendo los mismos procedimientos como si se hubiese hecho a partir de hormigón con árido natural. Se ha ajustado el agua de amasado.





Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en prefabricados

Código de la obra	OB P5.C1.2
Suministrador de AR	Asociación La Belonga, Impulso Industrial Alternativo
Promotor	Universidad de Oviedo
Ubicación	Latores, Oviedo (Asturias)
Descripción de obra	Producción de bovedillas de hormigón con 0% (Hormigón de control); 20%; 50%; 70%; 100% de sustitución de árido natural por árido reciclado.  Ancho: 250 mm.
Uso específico del árido reciclado	Material granular para la producción de bovedilla de hormigón para forjados
Tipo de árido	Árido reciclado mixto de hormigón. ARMh. Fracción: 0-10 mm. Presencia mayoritaria de residuos de hormigón. Composición (Hormigón: 71%; Áridos: 29%)
Cantidad utilizada (t)	3,83
Procedimientos realizados	La bovedilla se ha fabricado siguiendo los mismos procedimientos como si se hubiese hecho a partir de hormigón con árido natural. Se ha ajustado el agua de amasado.
Conformidad del producto utilizado	El acabado no presenta variaciones significativas respecto a las piezas fabricadas con árido natural cuando el porcentaje de sustitución es inferior al 50%.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La bovedilla se ha fabricado siguiendo los mismos procedimientos como si se hubiese hecho a partir de hormigón con árido natural. Se ha ajustado el agua de amasado.





Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en prefabricados

Código de la obra	OB P10.1
Suministrador de AR	Arids Pérez, S.L.
Promotor	Arids Pérez ,S.L.
Ubicación	Can Cararact – Caldes Montbui (Barcelona)
Descripción de obra	Producción comercial de bloques GDP de hormigón para cerramientos. El porcentaje de sustitución de árido natural por reciclado puede oscilar entre el 50% y el 100%. Los bloques son macizos ya que a la empresa le interesa colocar la máxima cantidad de árido reciclado, y al ser un muro que trabaja por presión, conviene que sea pesado. Los bloques se fabrican con elementos de encaje para evitar el deslizamiento de los mismos. Los bloques que se colocan en la parte superior del muro presentan un acabado liso.
Uso específico del árido reciclado	Material granular para la producción de bloques GDP de hormigón para cerramientos
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 5/10 y 12/40 mm
Cantidad utilizada (t)	15.600 t/año
Procedimientos realizados	La mezcla de hormigón se fabricó con áridos reciclados y a continuación se introdujo en un molde o en un encofrado para obtener la forma deseada. Se pueden añadir los colorantes apropiados para conseguir el aspecto de roca natural.
Conformidad del producto utilizado	El árido que conforma el bloque GDP está exento de agentes contaminantes, de materia orgánica, de sulfatos, tiene una baja proporción de finos y hay un continuo control de calidad. El hormigón posee buena consistencia, óptima resistencia a la compresión y buen comportamiento a la retracción. Además los bloques permiten un montaje sencillo, rápido y seguro, un impacto ambiental reducido, tienen gran solidez y son económicos.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La mezcla de hormigón se fabricó con áridos reciclados y a continuación se introdujo en un molde o en un encofrado para obtener la forma deseada. Se pueden añadir los colorantes apropiados para conseguir el aspecto de roca natural.





Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en prefabricados

Código de la obra	OB P17.4
Suministrador de AR	Cañet Xirgu
Promotor	Cañet Xirgu
Ubicación	Girona
Descripción de obra	Producción de bloques de hormigón para muro.
Uso específico del árido reciclado	Material granular para la producción de bloques para muro
Tipo de árido	Árido reciclado
Cantidad utilizada (t)	
Procedimientos realizados	
Conformidad del producto utilizado	
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	





Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en prefabricados

Código de la obra	OB P19.1
Suministrador de AR	Gestora de Runes del Bages, S.L.
Promotor	Gestora de Runes del Bages, S.L.
Ubicación	Callus (Cataluña)
Descripción de obra	Producción de bancos macizos con forma de cubo que presenta un acabado liso y con dos coloraciones diferentes. Sustitución del 100% de la fracción de árido 20/40 mm por material reciclado. La fracción 0/20 mm no se ha sustituido por árido reciclado.
Uso específico del árido reciclado	Material granular para la producción de bancos de hormigón
Tipo de árido	Árido mixto 20-40 mm
Cantidad utilizada (t)	5
Procedimientos realizados	Primero se realizaron las pruebas del árido reciclado en el laboratorio. Teniendo en cuenta los resultados, se determinó la dosificación del hormigón. Posteriormente, se fabricaron las probetas. Una vez determinada la cantidad de cada componente en la mezcla del hormigón, se realizó un encofrado de madera y se rellenó con la mezcla del hormigón dándole dos colorantes distintos para ver dos acabados diferentes.
Conformidad del producto utilizado	Los ensayos realizados sobre el nuevo producto demuestran que posee buenas condiciones de durabilidad. El árido reciclado presenta un nivel de satisfacción muy bueno en los aspectos referidos a la ubicación y el transporte así, como al precio en relación con el árido natural. Respecto a los parámetros de limpieza, uniformidad y el cumplimiento de los límites técnicos exigidos, también presentan un nivel de satisfacción adecuado aunque todavía pueden mejorar.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	Primero se realizaron las pruebas del árido reciclado en el laboratorio. Teniendo en cuenta los resultados, se determinó la dosificación del hormigón. Posteriormente, se fabricaron las probetas. Una vez determinada la cantidad de cada componente en la mezcla del hormigón, se realizó un encofrado de madera y se rellenó con la mezcla del hormigón dándole dos colorantes distintos para ver dos acabados diferentes.



Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigón en masa

Código de la obra	OB P25.1
Suministrador de AR	Reciclaje de Inertes del Noroeste, S.L. (RECINOR)
Promotor	Concello de Ferrol
Ubicación (provincia)	Ferrol (A Coruña)
Descripción de obra	Urbanización de O Bertón - Ferrol
Uso específico del árido reciclado	Hormigones en masa para aceras, fabricados con áridos reciclados de hormigón y áridos reciclados mixtos. Sustituciones del 41 y del 69%.
Tipo de árido	12/25 mm de árido reciclado de hormigón y 12/25 mm de árido reciclado mixto.
Cantidad utilizada (t)	25 t de 12/25 mm de árido reciclado de hormigón y 28 t de 12/25 mm de árido reciclado mixto
Procedimientos realizados	El material se sirve en obra con camiones hormigonera
Conformidad del producto utilizado	El material reciclado mixto cumple los requisitos de la EHE-08 excepto la cantidad de material cerámico presente, la absorción y el coeficiente Los Ángeles
Conformidad del producto fabricado	Hormigón susti. del 41%: resistencia media a 28 días 22,3 MPa y consistencia blanda. Hormigón susti. del 69%: resistencia media a 28 días 17,8 MPa y consistencia fluida.
Conclusiones y observaciones	Ningún problema destacable.





Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigón en masa

Código de la obra	OBP25.2
Suministrador de AR	Reciclaje de Inertes del Noroeste, S.L. (RECINOR)
Promotor	Concello de Ferrol
Ubicación	A Coruña
Descripción de obra	Renovación de las redes de saneamiento en San Pablo (Ferrol)
Uso específico del árido reciclado	Los trabajos realizados han consistido en la renovación de las redes de saneamiento existentes, de forma que la aplicación de los materiales ha sido fundamentalmente para asentamiento o envolvente de tubería, relleno de canalizaciones – zanjas, rellenos o explanación; y la zahorra como sub base. Por su parte, la gravilla reciclada mixta se ha utilizado como componente de hormigones en masa fabricados con sustituciones del 20 y del 40%.
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 12/25 mm
Cantidad utilizada (t)	241,84
Procedimientos realizados	Recogidas varias series de probetas testigo del HM con gravilla 12/25 mm mixta, al 20 y 40% de árido reciclado. Realizadas analíticas a la zahorra reciclada.
Conformidad del producto utilizado	El material reciclado mixto cumple los requisitos de la EHE-08 excepto la cantidad de material cerámico presente, la absorción y el coeficiente Los Ángeles
Conformidad del producto fabricado	El hormigón con 20% de árido reciclado presentó resistencia media a 7 días 24,8 MPa, a 28 días 28,9 MPa y consistencia blanda. El hormigón con 20% de árido reciclado presentó resistencia media a 7 días 20,7 MPa y consistencia fluida.
Conclusiones y observaciones	La obra se ha ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio. Ningún problema destacable.





Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigón en masa

Código de la obra	OBP25.4
Suministrador de AR	Reciclaje de Inertes del Noroeste, S.L. (RECINOR)
Promotor	Concello de Ferrol
Ubicación	A Coruña
Descripción de obra	Centro Cívico San Pablo (Ferrol)
Uso específico del árido reciclado	Hormigón con 10% de árido reciclado aplicado a zapatas, cimentación y soleras
Tipo de árido	Árido reciclado mixto 12/25 mm
Cantidad utilizada (t)	-
Procedimientos realizados	Realización de analíticas a la zahorra reciclada y ensayos de control in situ de resistencia a compresión a 7 y 28 días.
Conformidad del producto utilizado	El material reciclado mixto cumple los requisitos de la EHE-08 excepto la cantidad de material cerámico presente, la absorción y el coeficiente Los Ángeles
Conformidad del producto fabricado	Zapatas: resistencia media a 7 días de 23,9 MPa y a 28 días de 29,5 MPa, Cimentación: resistencia media a 7 días 29,1 MPa y a 28 días 35,5 MPa, Soleras resistencia media a 7 días de 24,8 MPa y a 28 días de 29,5 MPa.
Conclusiones y observaciones	La obra se ha ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio. Ningún problema destacable.



Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigón en masa

Código de la obra	OBP31.4
Suministrador de AR	Casalé Transporte y Excavaciones S.L.
Promotor	Diputación Provincial de Zaragoza
Ubicación	Zaragoza
Descripción de obra	La obra consiste en la construcción de un edificio de servicios y vestuarios en la localidad de Cinco Olivas. Se desarrolla en una única planta con una superficie construida de 224,5 m^2. Toda la cimentación y estructura se proyectó de origen con HRA y se ha ejecutado de acuerdo a esas exigencias. La cimentación se ha resuelto con zapatas aisladas bajo pilares y vigas riostras como apoyo de los muros de fachada. La estructura es de pórticos ortogonales de hormigón armado con forjados unidireccionales de 25+5/70 cm con bovedilla de hormigón. En alguna de las zonas el forjado se sustituye por losas de HRA-25 de 20 cm de espesor. El volumen de HRA-25 empleado en los distintos elementos es como sigue: zapatas, ristras y muretes: 55,44 m^3, pilares: 5,13 m^3, forjado y losas: 40,9 m^3 y solera: 33,7 m^3.
Uso específico del árido reciclado	Hormigón armado con 20% de árido reciclado grueso aplicado a cimentación, pilares, forjado y solera
Tipo de árido	Árido reciclado de hormigón 4/20 mm
Cantidad utilizada (t)	25,8
Procedimientos realizados	El árido reciclado se sometió a ensayos de acuerdo al articulo 28º de la Instrucción EHE08, al objeto de determinar la idoneidad del mismo como árido para dosificar hormigones con fines estructurales. Tanto el proceso de amasado del hormigón como en su puesta en obra no se ha realizado ningún procedimiento específico. Se han respetado las exigencias impuestas por la Instrucción EHE08 como en cualquier otra estructura de hormigón convencional, controlando los plazos de curado del hormigón. El AR no se sometió a ningún proceso de presaturación.
Conformidad del producto utilizado	Todos los ensayos quedaron con valores dentro de los límites establecidos por la Instrucción EHE08. El árido reciclado presentó absorción de 4,6% y contenido de material cerámico de 3,4%. La resistencia media de todos los elementos estructurales producidos fue de 23 Mpa y 30 Mpa a 7 y 28 dias, respectivamente.
Conformidad del producto fabricado	
Conclusiones y observaciones	La obra se ha ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio. Ningún problema destacable.







Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigón compactado con rodillo

Código de la obra	OBP18.1
Suministrador de AR	Gestión y Reciclaje Belcaire
Promotor	Conselleria D'infraestructures y Transports
Ubicación	Castellón - Valencia
Descripción de obra	Vial de acceso a la nueva zona pesquera e industrial en el puerto de Vinaroz.
Uso específico del árido reciclado	Material granular para la producción de hormigón compactado con rodillo como base para pavimento de tráfico T32
Tipo de árido	Árido reciclado de hormigón 4/20 mm (ARH)
Cantidad utilizada (t)	100
Procedimientos realizados	Dosificación: En planta de hormigón preparado, Amasado: En camión hormigonera, a falta de planta con amasadora propia, Transporte: camión hormigonera y camión volquete, Tramo de prueba e inspección de la mezcla, el material exigió mayor humectación, Extendido: extendedora de grava cemento, Compactación: Rodillo metálico liso vibrante, Curado – riego con agua, Juntas de retracción: longitudinal en el centro; transversales variables para analizar resultados: 3; 3,5 y 4m, Corte con sierra de disco: 4-5 cm – Entre 6 y 24 h después de la puesta en obra, Sellado de juntas: Se sella la junta longitudinal y las transversales impares, Textura: Acabado de obra
Conformidad del producto utilizado	En general, el árido reciclado de hormigón, presento características aceptables para la aplicación prevista.
Conformidad del producto fabricado	Se realizaron mediciones de la densidad del hormigón compactado in situ, con densímetro nuclear, obteniendo valores entre 98% y 100% de la densidad de referencia obtenida en el laboratorio para todos los tramos puestos en obra. Se destaca la disminución de densidad al utilizar árido reciclado, pero garantizando un nivel de compactación similar en todos los resultados y tipos de hormigón.
Conclusiones y observaciones	El pavimento fue ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio, los valores de resistencia alcanzados por los testigos extraídos del HRCR cumplen los valores exigidos: 3,3 MPa de resistencia a tracción indirecta y 20 MPa de resistencia a compresión. Se ha dispuesto una capa final de rodadura con mezcla bituminosa, únicamente con el fin de mejorar la regularidad de la superficie.







Áridos reciclados como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigón compactado con rodillo

Código de la obra	OBP18.2
Suministrador de AR	Gestión y Reciclaje Belcaire
Promotor	Conselleria D'infraestructures y Transports
Ubicación	Castellón - Valencia
Descripción de obra	Vial de acceso a la nueva zona pesquera e industrial en el puerto de Vinaroz.
Uso específico del árido reciclado	Material granular para la producción de hormigón compactado con rodillo como base para pavimento de tráfico T32
Tipo de árido	Árido reciclado de mixto 4/20 mm (ARMh)
Cantidad utilizada (t)	100
Procedimientos realizados	Dosificación: En planta de hormigón preparado, Amasado: En camión hormigonera, a falta de planta con amasadora propia, Transporte: camión hormigonera y camión volquete, Tramo de prueba e inspección de la mezcla, el material exigió mayor humectación, Extendido: extendedora de grava cemento, Compactación: Rodillo metálico liso vibrante, Curado – riego con agua, Juntas de retracción: longitudinal en el centro; transversales variables para analizar resultados: 3; 3,5 y 4m, Corte con sierra de disco: 4-5 cm – Entre 6 y 24 h después de la puesta en obra, Sellado de juntas: Se sella la junta longitudinal y las transversales impares, Textura: Acabado de obra
Conformidad del producto utilizado	En general el árido reciclado mixto presentó características aceptables para la aplicación prevista. aunque su influencia sobre el contenido de agua de la mezcla es mayor.
Conformidad del producto fabricado	Se realizaron mediciones de la densidad del hormigón compactado in situ, con densímetro nuclear, obteniendo valores entre 98% y 100% de la densidad de referencia obtenida en el laboratorio para todos los tramos puestos en obra. Se destaca la disminución de densidad al utilizar árido reciclado, pero garantizando un nivel de compactación similar en todos los resultados y tipos de hormigón
Conclusiones y observaciones	El pavimento fue ejecutado sin problemas y el resultado final ha sido satisfactorio, los valores de resistencia alcanzados por los testigos extraídos del HRCR cumplen los valores exigidos, 3,3 MPa de resistencia a tracción indirecta y 20 MPa de resistencia a compresión. Se ha dispuesto una capa final de rodadura con mezcla bituminosa, únicamente con el fin de mejorar la regularidad de la superficie.

