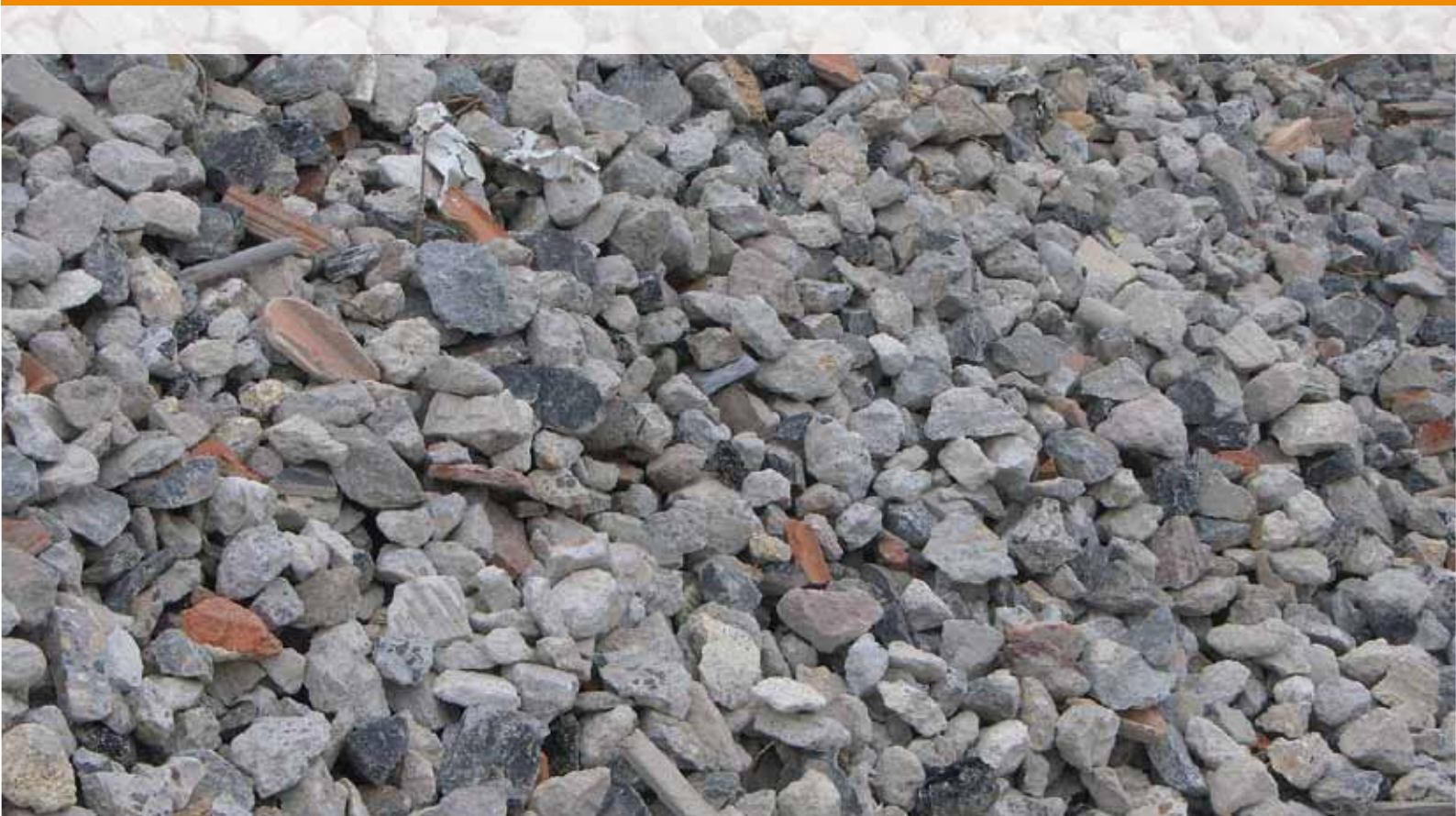


Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición



Investigación prenORMATIVA



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE Y
MEDIO RURAL Y MARINO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

ETXEBIZITZA, HERRI LAN
ETA GARRAIO SAILA
Garraio eta
Herri Lan Sailordetza

INGURUMEN, LURRALDE
PLANGINTZA, NEKAZARITZA
ETA ARANTZA SAILA

DEPARTAMENTO DE VIVIENDA,
OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES
Viceconsejería de
Transportes y Obras Públicas

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE,
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL,
AGRICULTURA Y PESCA

Índice

1. PRESENTACIÓN	4
2. ANCLAJE Y RAZONES DE LA INVESTIGACIÓN	6
3. OBJETO Y ALCANCE	8
4. INVESTIGACIÓN PRENORMATIVA	9
4.1. Consideraciones técnicas sobre el uso de áridos reciclados mixtos	9
4.1.1 Aplicaciones no ligadas para firmes de carretera	9
4.1.1.1 Protocolo de recogida y preparación de muestras	9
4.1.1.2 Metodología experimental	10
4.1.1.3 Resultados y discusión a escala de laboratorio	11
4.1.1.4 Estudio de correlación entre los constituyentes del árido reciclado y sus propiedades intrínsecas	25
4.1.1.5 Tramos de prueba	26
4.1.2 Aplicaciones de hormigón no estructural	30
4.1.2.1 Objeto	30
4.1.2.2 Análisis de la normativa actual sobre áridos reciclados	31
4.1.2.3 Propiedades tecnológicas de los áridos reciclados	31
4.1.2.4 Análisis comparativo entre las tecnologías de tratamiento de los RCDs y las características de los áridos reciclados obtenidos	37
4.1.2.5 Estudio de dosificación	39
4.1.2.6 Propiedades del hormigón reciclado	40
4.2. Consideraciones medioambientales sobre el uso de áridos reciclados mixtos	43
4.2.1 Análisis del potencial de lixiviación de los áridos reciclados mixtos	43
4.2.2 Áridos reciclados en aplicaciones granulares en contacto con el terreno	43
4.2.3 Lixiviación del hormigón reciclado	46
4.3. Conclusiones	47
4.3.1 Recomendaciones para las plantas de reciclado de escombros	47
4.3.2 Parámetros técnicos	47
4.3.2.1 Aplicaciones no ligadas para firmes de carretera	47
4.3.2.2 Recomendaciones para la utilización de árido reciclado mixto en hormigón no estructural	48
4.3.3 Parámetros ambientales	49
4.3.3.1 Aplicaciones no ligadas para firmes de carretera-Estudio ambiental de muestras de áridos reciclados	49
4.3.3.2 Recomendaciones para la utilización de árido reciclado mixto en hormigón no estructural	53
5. ANEXOS	54
5.1. Glosario de términos	54
5.2. Normativa de aplicación en los ensayos	56
6. BIBLIOGRAFÍA	57

1. Presentación

Los ratios actuales de valorización de residuos de construcción y demolición en la Comunidad Autónoma del País Vasco están muy por debajo de los objetivos marcados por la Unión Europea y los respectivos Planes de Residuos estatales y autonómicos. En concreto valorizamos en torno al 15%-40% de los Residuos de Construcción y Demolición, lo que resulta insostenible teniendo en cuenta que se genera per cápita una tonelada de este tipo de residuos por habitante y año.

El trabajo que presentamos quiere constituirse en el punto de partida para cambiar radicalmente estos indicadores ya que contribuirá de forma efectiva a dar cuerpo a la disposición segunda del Real Decreto 105/2008 de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en el que se aboga porque las administraciones públicas promuevan el uso de materiales reciclados en las obras. Esto significará la consolidación de un subsector económico vinculado por vocación al desarrollo sostenible.

Con la difusión de los trabajos llevados a cabo desde diversas instituciones y entidades en relación con la caracterización técnica y ambiental de los áridos reciclados mixtos, con el objetivo de normalizar su uso para diversas aplicaciones constructivas, se quiere ayudar al conjunto de actores del sector de la construcción a lograr una correcta y masiva valorización de residuos de construcción y demolición, de cara a propiciar un correcto fin de vida de los mismos para pasar a ser materiales reinsertables en el ciclo productivo.

Resultan de especial mención los trabajos realizados para la caracterización de los Residuos de Construcción y Demolición en materia de carreteras, así como las conclusiones extraídas de su observación en zahorras y explanadas, que permitirán determinar los beneficios de uso y limitaciones de aplicación de estos materiales, estableciendo las bases de las especificaciones técnicas para su empleo. En cualquier caso, el estudio del comportamiento de estos materiales, en estas y otras aplicaciones, es un proceso que aún no está cerrado.

Se aportan también importantes consideraciones técnicas en otras aplicaciones constructivas y, quizá por primera vez en nuestro entorno, se clarifica su uso desde el punto de vista ambiental.

Las conclusiones de este documento son el resultado de la colaboración de los Departamentos de Vivienda Transportes y Obras Públicas, y de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco, dentro del compromiso crear infraestructuras integradas de forma sostenible en el nuestro entorno.

Esta publicación es un ejemplo de las sinergias necesarias para aumentar la eficiencia del progreso investigador, y para fomentar la aplicación de políticas de gestión eficaz que permitan desarrollar procesos de innovación con aportación de valor para la sociedad.



Pilar Unzalu Pérez de Eulate

Consejera de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca
Gobierno Vasco



Iñaki Arriola López

Consejero de Vivienda Transportes y Obras Públicas
Gobierno Vasco

Presentación

En el campo de la construcción es cada día mayor la presión social impulsada por la concienciación ciudadana para potenciar el reciclaje de los residuos, tanto los derivados de su propia actividad, como los procedentes de otros sectores. La ventaja más destacada de este reciclaje es la solución, a un mismo tiempo, de la problemática originada por la gran cantidad de residuos que se destinan a vertedero sin aprovechamiento, así como la obtención de una nueva materia prima, con lo que se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer.

En el reciclaje de materiales en la construcción, los áridos reciclados tienen un papel protagonista, derivado de los ingentes volúmenes de residuos de construcción y demolición que su utilización podría eliminar. Así, en España se estima una generación anual de una tonelada por habitante, un 80% de las cuales se almacenan en vertedero. Es deseable que esta situación cambie en un futuro próximo y las cifras nos acerquen, cuanto menos, a los valores medios europeos con tasas de reciclaje del 40%.

Para fomentar una cultura del reciclaje, desde las Administraciones públicas (Central, Autonómica y Local) se están tomando medidas de diversa índole encaminadas a incrementar la utilización de áridos reciclados: medidas legislativas que favorezcan o incluso obliguen a poner en práctica tecnologías constructivas más sostenibles o el desarrollo de normativa técnica para avalar un uso garantizado y seguro de los Residuos de Construcción y Demolición.

El CEDEX, que participa de forma activa en esta labor, ha realizado diversos trabajos encaminados a obtener un mayor conocimiento de los residuos con posibilidades de reciclaje en el campo de la construcción.

Uno de los primeros trabajos, el Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción, se desarrolló a instancias del Ministerio de Medio Ambiente en el año 2002 (actualizado en 2009 en la página web www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx), con el objetivo de contribuir al conocimiento público de los residuos que pueden tener su utilidad en las actividades de construcción.

Este trabajo ha dado pie a otros posteriores, como la participación del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX en el estudio e incorporación a la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) de los Hormigones Reciclados Estructurales, así como su asesoramiento en la ejecución de experiencias pioneras reales de utilización de áridos reciclados, como la ejecución de un puente atirantado en la carretera CV-371, que une los municipios de Manises y Paterna, proyecto llevado a cabo gracias a la colaboración estrecha y coordinada de administraciones y empresas privadas.



Mariano Navas Gutiérrez

Director del Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas (CEDEX)

2. Anclaje y razones de la investigación

Desde su reciente publicación, la Directiva 2008/98/CE⁽¹⁾ sobre residuos decreta, entre otras consideraciones, la perentoriedad de “reducir el uso de recursos y favorecer la aplicación práctica de la jerarquía de residuos”; es decir, el establecimiento del siguiente “orden de prioridades en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de los residuos:

- Prevención
- Preparación para la reutilización
- Reciclado
- Otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética
- Eliminación

La Directiva de residuos preconiza, asimismo, “transformar la Unión Europea en una sociedad del reciclado, que trate de evitar la generación de residuos y que utilice los residuos como un recurso”. En su artículo 11 “Reutilización y reciclado”, apartado 2, establece que los Estados miembros deberán adoptar las medidas necesarias que permitan avanzar hacia una sociedad europea del reciclado con un alto nivel de eficiencia de los recursos. Concretamente, sugiere que “antes del 2020, deberá aumentarse hasta un mínimo del 70% (en peso) la reutilización, reciclado y valorización de materiales de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones, con exclusión de los materiales presentes de modo natural definidos en la categoría 17 05 04 de la lista de residuos”.

Según el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCDD), incluido en el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015, se define residuo de construcción y demolición (RCD) como cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de “residuo” del artículo 3.a) de la Ley 10/1998, de 21 de abril, se genera en una obra de construcción y demolición.

El concepto de obra de construcción y demolición, a los efectos de este Plan abarca las actividades consistentes en la construcción, reparación, reforma o demolición de un bien inmueble, tal como un edificio, carretera, puerto, aeropuerto, ferrocarril, canal, presa, instalación deportiva o de ocio, u otro análogo de ingeniería civil, con la excepción de:

- a) Las tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas
- b) Los residuos que se generen en obras de construcción y/o demolición regulados por una legislación específica, cuando no estén mezclados con otros residuos de construcción y demolición (residuos de aceites industriales usados, de los residuos peligrosos en general, de los residuos de envases, de los neumáticos fuera de uso, de las pilas y baterías o de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos).
- c) Los residuos regulados por la Directiva 2006/21/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas.

Los RCD aparecen codificados en la Lista Europea de Residuos, aprobada por Orden MAM/304/2002 (BOE número 43 del 19 de febrero de 2002), en el capítulo 17 de la manera siguiente:

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

El II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCDD) 2007-2015⁽²⁾, que diagnostica la situación actual de los RCD en España e incentiva las prácticas de reutilización y reciclaje frente a su eliminación o vertido, establece unos objetivos cuantitativos a alcanzar para una gestión eficaz de esta corriente residual:

- Recogida controlada y correcta gestión del 95% de los RCD a partir de 2011
- Reducción o reutilización del 15% de RCD en 2011
- Reciclaje del 40% de RCDs a partir de 2011
- Valorización del 70% de los residuos de envases de materiales de construcción a partir de 2010

Por su parte, el II Programa Marco Ambiental de la Comunidad Autónoma del País Vasco 2007-2010⁽³⁾ adopta un objetivo de reciclaje del 70% para el año 2010. En este contexto, desde la Administración Medioambiental vasca, se vienen impulsando iniciativas varias dirigidas no sólo hacia la consecución de los ratios de reciclaje establecidos, sino también a dotar de verdadero sentido a dicha actividad de manera que se aprovechen los materiales resultantes en los potenciales ciclos productivos.

La tasa de reciclaje en España se estima en torno al 15%, mientras que en la Comunidad Autónoma del País Vasco ronda el 40%. El producto que con mayor profusión se genera en las plantas de reciclaje de RCD es el árido reciclado con origen en la fracción pétreo inorgánica, constituyendo ésta más del 80% del total del residuo tratado.

La penetración del árido reciclado en el sector de la construcción ha evolucionado satisfactoriamente durante los últimos años, si bien la mayor parte se destina a aplicaciones de bajo valor añadido, tales como rellenos, capas de coberturas para vertederos o pistas provisionales en obras constructivas para el paso de vehículos.

Se pone de manifiesto, por lo tanto, la necesidad de seguir desarrollando instrumentos que incentiven la utilización de este material granular alternativo; sobre todo, en mercados de mayor valor añadido promovidos por administraciones varias, con importantes consumos de material granular.

Algunas de las razones que desincentivan el uso de los áridos reciclados en aplicaciones de mayor valor añadido se exponen a continuación:

- Hasta ahora no ha existido marco normativo específico para este tipo de áridos, existiendo únicamente iniciativas particulares y experimentos puntuales cuyo objetivo ha sido fomentar la utilización de los áridos reciclados. La nueva Instrucción de Hormigón Estructural (EHE 08)⁽⁴⁾ incluye en sus Anejos nº15 “Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados” y nº18 “Hormigones de uso no estructural” la posibilidad de utilizar áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón en reducidos porcentajes. Esta aplicación presenta importantes limitaciones, al tratarse por una parte de uno de los usos más exigentes, y por otra, al permitir exclusivamente áridos gruesos procedentes de residuos de hormigón seleccionado (porcentaje que supone aproximadamente un 12% del total de los RCD generados), excluyendo, por lo tanto, la utilización de los áridos reciclados mixtos (material granular procedente del tratamiento de escombros mezclado con presencia mayoritaria de hormigón y material cerámico). Por su parte, la ORDEN FOM/891/2004 actualiza determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG3), posibilitando la utilización de áridos reciclados. De forma análoga a lo esgrimido anteriormente, dicha actualización del PG3 excluye el uso de áridos reciclados mixtos, toda vez que no incluye prescripciones específicas para aplicaciones de rellenos tipo terraplén (Artículo 330).
- El árido reciclado genera desconfianza y necesita un control más amplio para garantizar su conformidad en las distintas aplicaciones donde se utiliza.
- Para obtener un árido reciclado apto, es necesario procesar adecuadamente los residuos y realizar además un adecuado control de los materiales de entrada a la planta. Adicionalmente, es imprescindible el desarrollo de técnicas adecuadas de procesamiento es imprescindible para garantizar un árido reciclado de buena calidad.

A modo de corolario en este apartado introductorio, cabe enunciar que la penetración total y sistemática de los áridos reciclados pasa por garantizar una correcta calidad de los mismos, así como por desarrollar un cuerpo normativo y experimental específico capaz de eliminar incertidumbres asociadas a la naturaleza de dichos materiales.

3. Objeto y alcance

El objeto del presente documento es aunar los resultados de investigaciones recientes realizadas por diferentes Instituciones y Entidades sobre la caracterización de los áridos reciclados mixtos y su utilización en diversas aplicaciones constructivas (aplicaciones no ligadas de rellenos, explanadas y zahorras, así como hormigones no estructurales). Todo lo anterior, orientado a sentar las bases científico-tecnológicas de futuras prescripciones en la utilización de este tipo de áridos reciclados.

La información recogida forma parte de los siguientes proyectos de investigación:

Proyecto PREAR “Investigación prenORMATIVA sobre la utilización de áridos reciclados de RCD en aplicaciones no ligadas de firmes de carreteras”

- **Coordinador Ihobe:** D. Aitor Sáez de Cortázar.
- **Coordinador científico de la investigación:** Dr. Iñigo Vegas (TECNALIA-Construcción).
- **Apoyo científico:** Dña. Amaia Lisbona y D. Ekain Cagigal (TECNALIA-Construcción).
- **Vocales de la Mesa de Firmes:** Dña. Ana Isabel Fonseca (Departamento de Transportes del Gobierno Vasco); D. José Luis Ruiz Ojeda, D. Carlos Gascón (Diputación Foral de Bizkaia); D. José Antonio Navarro (Diputación Foral de Gipuzkoa); D. Miguel Ángel Ortiz de Landaluce (Diputación Foral de Araba); Aurelio Ruiz (Intevia).

El objetivo principal de este proyecto es sentar las bases técnicas de utilización de áridos reciclados mixtos en firmes de carreteras; concretamente, en aplicaciones no ligadas de rellenos, explanadas y capas de zahorra.

La metodología consistió en un exhaustivo estudio de caracterización y análisis estadístico de muestras de áridos reciclados generados en plantas de tratamiento estacionarias de la CAPV, así como en diversos tramos de pruebas donde se evaluaron aspectos relacionados con la ejecución de capas no ligadas, comportamiento mecánico de las mismas y lixiviación del material compactado.

Sobre la base de los resultados de este proyecto, se pretende elaborar prescripciones específicas que regulen el uso de los áridos reciclados en la construcción de firmes de carretera en la CAPV.

Proyecto CLEAM-Tarea 2.2: “Reciclado de RCDs como Aridos de Hormigones no Estructurales”

- **Coordinador SACYR:** D. Antonio Ramírez y Dña. María Dolores Carvajal (SACYR),
- **Coordinador científico de la investigación:** Dra. Marta Sánchez de Juan (CEDEX).
- **Vocales:** Dra. Pilar Alaejos (CEDEX), D. Victor-Luis Geraldés (CEDEX), Dr. Iñigo Vegas (TECNALIA-Construcción), Dra. Isabel Girbes, Dña. Pilar Marti (AIDICO), Dr. Francisco Agrela (Área Ingeniería de la Construcción. Universidad de Córdoba), Dr. Jesús Ayuso (Área Ingeniería de la Construcción. Universidad de Córdoba).

El objetivo general del proyecto CLEAM (*Construcción Limpia, Eficiente y Amigable con el Medioambiente*) es abrir una serie de líneas de investigación que tienen como fin la generación de nuevos conocimientos en el área de las infraestructuras de transporte lineal, buscando, mediante su actuación sinérgica, nuevos modelos de mayor sostenibilidad y respeto medioambiental.

El proyecto CLEAM se estructuró en 7 áreas temáticas o actividades generales. La línea aquí difundida, relativa a “Reciclado de RCD como Áridos de Hormigones no Estructurales”, se enmarcó dentro de la Actividad 2: RESIDUOS. REUTILIZACIÓN, RECICLADO Y REMEDIACIÓN DE SUELOS.

Este trabajo se concibió con el propósito de incentivar la utilización del árido reciclado mixto en la ejecución de hormigón no estructural, justificando mediante la experimentación la validez tanto del árido reciclado como del hormigón fabricado con él.

Este documento NO formula prescripciones en ninguna de sus aplicaciones, si bien aporta resultados científicos destinados a orientar en su redacción a los organismos prescriptores.

4. Investigación prenORMATIVA

4.1. Consideraciones técnicas sobre el uso de áridos reciclados mixtos

4.1.1 Aplicaciones no ligadas para firmes de carretera

4.1.1.1 Protocolo de recogida y preparación de muestras

Dada la heterogeneidad de los áridos reciclados mixtos, un procedimiento sistemático de recogida y preparación de muestras se erige como fundamental, al fin de reducir incertidumbres asociadas a esta primera parte del proceso experimental y por ende, poder obtener resultados de caracterización suficientemente significativos.

La toma de muestras se realizó por técnicos de la Unidad de Construcción de TECNALIA en las tres plantas de tratamiento fijas implantadas en la CAPV. La fecha de recogida de las muestras, así como la identificación de las mismas se presentan en la Tabla 1.

Identificación de la muestra	Tipología	Lugar de recogida	Fecha de recogida
ARB-1	Árido reciclado mixto	BTB, S.A. (Bizkaia)	17/06/2009
ARG-1	Árido reciclado mixto con poca presencia de material cerámico	Gardelegui (Araba)	17/06/2009
ARV-1	Árido reciclado mixto	VOLBAS, S.A. (Bizkaia)	17/06/2009
ARB-2	Árido reciclado mixto	BTB, S.A. (Bizkaia)	01/07/2009
ARG-2	Árido reciclado mixto con poca presencia de material cerámico	Gardelegui (Araba)	01/07/2009
ARV-2	Árido reciclado mixto	VOLBAS, S.A. (Bizkaia)	01/07/2009
ARB-3	Árido reciclado mixto	BTB, S.A. (Bizkaia)	15/07/2009
ARG-3	Árido reciclado mixto con poca presencia de material cerámico	Gardelegui (Araba)	15/07/2009
ARV-3	Árido reciclado mixto	VOLBAS, S.A. (Bizkaia)	15/07/2009
ARB-4	Árido reciclado mixto	BTB, S.A. (Bizkaia)	29/07/2009
ARG-4	Árido reciclado mixto con poca presencia de material cerámico	Gardelegui (Araba)	29/07/2009
ARV-4	Árido reciclado mixto	VOLBAS, S.A. (Bizkaia)	29/07/2009
ARB-5	Árido reciclado seleccionado procedente de 100% escombros de hormigón	BTB, S.A. (Bizkaia)	09/09/2009
ARG-5	Árido reciclado seleccionado procedente de 100% aglomerado asfáltico	Gardelegui (Araba)	09/09/2009
ARV-5	Árido reciclado seleccionado procedente de 100% escombros cerámicos rojos	VOLBAS, S.A. (Bizkaia)	09/09/2009
ARB-6	Árido reciclado mixto	BTB, S.A. (Bizkaia)	23/09/2009
ARG-6	Árido reciclado mixto con poca presencia de material cerámico	Gardelegui (Araba)	23/09/2009
ARV-6	Árido reciclado mixto	VOLBAS, S.A. (Bizkaia)	23/09/2009
ARB- I	Árido reciclado mixto utilizado en el tramo de prueba de la Orkonera	BTB, S.A. (Bizkaia)	mayo 2010
ARV- II	Árido reciclado mixto utilizado en el tramo de prueba del Txorierrí	VOLBAS, S.A. (Bizkaia)	julio 2010

Tabla 1. Identificación de muestras.

Cabe mencionar que las muestras de la quinta recogida (ARB-5; ARG-5 y ARV-5) corresponden a áridos reciclados procedentes de escombros seleccionados ex profeso para la presente investigación. Dichas muestras se caracterizaron para determinar el comportamiento específico de los materiales predominantes en el árido reciclado mixto.

El muestreo se acometió de acuerdo a la Norma UNE EN 932-1, a partir de cantidades de árido reciclado comprendidas entre 6 y 10 toneladas, sobre la base de las producciones diarias de cada una de las plantas. Una vez formado el acopio, se distribuyeron cinco cangilones alrededor de aquél, procediendo a su llenado de acuerdo a lo establecido en la norma. El material granular se homogeneizó en laboratorio mediante métodos de volteo y cuarteo.

La preparación de muestras, para la determinación de las diferentes características químicas objeto de estudio, se efectuó de acuerdo al siguiente protocolo:

- Determinación de la curva granulométrica de acuerdo a la UNE EN 933-1 para cada muestra.
- Cálculo del porcentaje de material granular retenido y que pasa por el tamiz de 4 mm.
- Preparación de una submuestra de unos 5 kg constituida por una fracción gruesa (> 4 mm) proporcional al “porcentaje retenido” y una fracción fina (< 4 mm) proporcional al “porcentaje pasa”.
- Molienda conjunta de la fracción gruesa y fina garantizando tamaños inferiores a 2 mm, de acuerdo a los diferentes procedimientos de analítica química a considerar en el presente estudio.

El protocolo anterior se establece al objeto de asegurar que las características químicas del árido reciclado se corresponden con el conjunto del material granular y no sólo con la fracción fina.

4.1.1.2 Metodología experimental

Con relación a las aplicaciones de relleno/explanadas y zahorras cabe profundizar acerca de determinados parámetros sobre los que existe incertidumbre, bien a nivel de procedimiento de ensayo, bien a nivel de límite a aplicar, según establecen las conclusiones de estudios previos⁽⁵⁾. Los ensayos realizados se describen a continuación, atendiendo a la naturaleza de aquéllos.

El análisis de componentes de los áridos gruesos reciclados se efectuó de acuerdo a la norma UNE EN 933-11. Este ensayo permitió determinar la influencia de los materiales constituyentes del árido reciclado en el comportamiento físico-mecánico y químico de dicho material granular, tal y como se abordará en la discusión de resultados. Todo ello, dirigido a argumentar las bases de regulación de los áridos reciclados en aplicaciones no ligadas de carreteras.

La caracterización físico-mecánica se llevó a cabo a partir de los métodos normalizados establecidos en los Artículos 330 y 510 del PG-3. La Tabla 2 presenta los ensayos de caracterización físico-mecánica acometidos.

Ensayo	Norma
Distribución granulométrica	UNE EN 933-1
Índice de lajas	UNE EN 933-3
Resistencia a la fragmentación (Desgaste Los Ángeles)	UNE EN 1097-2
Índice CBR (tras 4 y 90 días de inmersión en agua)	UNE 103502
Plasticidad	UNE 103103:93 y UNE 103103:94
Próctor modificado	UNE 103501
Ensayo de colapso	NLT-254
Ensayo de hinchamiento libre	UNE 103601

Tabla 2. Procedimientos de caracterización físico-mecánica.

La caracterización química se efectuó mediante métodos normalizados establecidos en los Artículos 330 y 510 del PG-3, así como otros procedimientos complementarios orientados a discutir la idoneidad de determinados ensayos aplicados a áridos reciclados. La Tabla 3 recopila los ensayos de caracterización química efectuados.

Ensayo	Norma
Determinación de materia orgánica	UNE 103204
	Pérdida por calcinación a 500°C
Determinación de compuestos de azufre total	UNE EN 1744-1
Determinación de sulfatos solubles en agua	UNE EN 103201
Contenido en yeso	NLT 115
Salas solubles en agua	NLT 114 y valoración química

Tabla 3. Procedimientos de caracterización química.

Al objeto de apoyar la discusión de resultados, se emplearon técnicas de difracción de rayos X y análisis térmico diferencial.

Los análisis mineralógicos se llevaron a cabo mediante la técnica de difracción de rayos X. Las medidas difractométricas se efectuaron con un difractómetro Philips X'Pert Pro MPD pw3040/60, equipado con tubo cerámico de cobre. Las condiciones instrumentales de las medidas fueron: barrido continuo durante una hora de 2 a 75° 2 θ , con una tensión del generador de 40kV y 40 mA. Para su adecuado procesamiento, las muestras analizadas fueron molidas y homogeneizadas manualmente en un mortero de ágata.

La termogravimetría, por su parte, es una técnica en la que la masa de una sustancia es medida continuamente en función de la temperatura. Una curva termogravimétrica representa el peso de la muestra en cada instante en ordenadas, así como la temperatura y/o el tiempo en el eje de abscisas. El peso se puede representar en “mg” o bien en tanto por ciento (%) de muestra original. La curva TG aporta información sobre la estabilidad térmica y composición de la muestra inicial, de los productos intermedios que pudieran formarse y de la composición del residuo, si éste existiera. El instrumento de análisis térmico diferencial/termogravimétrico simultáneo utilizado fue un analizador STANTON, modelo STA 781, con temperatura de trabajo desde temperatura ambiente hasta unos 1000°C

Adicionalmente, se estudió el potencial puzolánico de la fracción cerámica. El término actividad puzolánica engloba todas las reacciones que ocurren entre los constituyentes activos de las puzolanas (fases vítreas más o menos alteradas), el hidróxido cálcico y el agua. El hidróxido cálcico reacciona con los componentes ácidos del material puzolánico (sílice y alúmina) para formar silicatos y aluminatos cálcicos hidratados. El método utilizado en el presente estudio consistió en poner en contacto muestras de árido de naturaleza cerámica (ladrillos, tejas) finamente molido con una disolución saturada en Ca(OH)₂ a 40°C. Las muestras de finos cerámicos se sumergieron en la disolución de cal durante 1, 7, 28 y 90 días.

4.1.1.3 Resultados y discusión a escala de laboratorio

Los resultados de la caracterización de las 15 muestras correspondientes a áridos reciclados de naturaleza mixta se presentan en la Tabla 4. Asimismo, dicha tabla recoge la caracterización de muestras utilizados en los tramos de prueba de la Orkonera (ARB-I) y Txorierri (ARV-II), cuyo alcance se describirá en apartados ulteriores.

Característica		Tramos de prueba		Investigación prenormativa laboratorio																	
		ARB-I	ARV-II	Media	Mín.	Máx.	ARB1	ARG1	ARV1	ARB2	ARG2	ARV2	ARB3	ARG3	ARV3	ARB4	ARG4	ARV4	ARB6	ARG6	ARV6
Composición																					
Re	Hormigón y mortero	51,3	51,1	57	42	79	79	56	48	52	73	59	48	71	57	45	69	42	49	63	48
Ru	Piedra natural	34,7	34,78	16	4	29	4	29	5	13	17	17	14	16	18	17	04	20	20	23	16
	Rc+Ru	86	85,8	74	53	90	83	85	53	65	90	76	62	87	75	62	86	62	69	86	64
Rb	Ladrillos, azulejos	11,6	9,1	19	1	43	16	1	43	31	2	12	34	4	14	30	3	34	28	5	32
Ra	Materiales bituminosos	1,2	4,9	6	0	14	0	14	2	2	8	12	3	9	10	7	11	3	1	9	2
Rg	Vidrio	0,3	0,02	0,2	0,0	0,7	0,4	0	0,6	0,7	0	0	0,3	0	0,3	0,1	0	0	0,2	0	0,4
Rx1	Yeso	0,4	0,13	0,4	0,0	1,0	0,6	0	0,6	0,9	0	0	0,8	0	0,7	0,3	0	0,3	1,0	0	0,9
Rx2	Metal, madera no flotante, plástico	0,4	0,03	0,2	0,0	0,8	0	0	0,8	0,4	0	0	0	0	0	0,6	0	0,7	0,5	0	0,3
Granulometría (acumulado %)																					
	40 mm	100	100	100,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	25 mm	73,1	92,3	83,1	71,9	95,8	72,9	93,1	85	95,6	85,0	84	95,8	84,1	89,8	71,9	82,6	77	73,6	77,6	78,5
	20 mm	61,8	87,1	73,7	56,5	87,6	68,2	87,6	70,4	86,4	78,5	76,4	85,3	78,2	81,2	62,4	75,4	63	68,2	67,4	56,5
	8 mm	30,4	62,2	42,3	23,2	62,8	48,2	49,7	17,7	50,9	42,5	59,4	51,2	40,2	62,8	34,6	45,2	24,3	47,2	37,1	23,2
	4 mm	20,0	46,8	29,6	10,0	49,5	37,8	29,5	7,3	38,6	30,0	46,5	39,3	28,1	49,5	22,0	28,6	10	37,8	23,0	15,5
	2 mm	15,4	35,8	20,6	3,8	34,9	29,4	19,1	6,9	27,7	20,8	33,1	28,5	20,0	34,9	14,1	17,8	3,8	27,2	14,2	11
	0,5 mm	10,2	15,9	9,0	0,8	20,0	16,9	8,2	5,6	12,9	8,4	13,8	13,4	8,1	14,5	5,5	7,3	0,8	9,7	5,5	4,9
	0,25 mm	8,1	9,8	5,9	0,4	19,2	11,0	4,6	4,9	9,0	5,4	9,6	9,2	5,3	9,8	3,6	4,6	0,4	4,0	2,8	3,6
	0,063 mm	5,2	3,1	2,9	0,3	17,7	5,1	1,3	3,1	4,0	1,8	4	4,3	2,0	3,8	2,0	2,3	0,3	3,2	2,6	3,3

Tabla 4a. Caracterización de áridos reciclados mixtos para su uso en aplicaciones no ligadas de firmes de carretera.

Característica	Tramos de prueba		Investigación prenormativa laboratorio																	
	ARB-I	ARB-II	Media	Min.	Máx.	ARB1	ARG1	ARV1	ARB2	ARG2	ARV2	ARB3	ARG3	ARV3	ARB4	ARG4	ARV4	ARB6	ARG6	ARV6
Índice de bajas (%)	16	13	17	9	32	9	14	31	20	9	17	20	9	20	13	17	14	22	11	32
Plasticidad	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	-	-	-	NP	NP	NP	-	-	-	-	-	-
Resistencia a la fragmentación (%)	34	38	38	29	41	39	31	41	40	34	38	39	30	37	39	29	29	39	32	41
Densidad máxima Próctor modificado (kg/m³)	191 5	190 1	2003	1884	2067	1884	2037	1937	-	-	-	2055	2067	2035	-	-	-	-	-	-
Humedad óptima de compactación Próctor (%)	12,9	13,5	7	5	9,14	7,9	5	5,3	-	-	-	9,14	5,6	6,2	-	-	-	-	-	-
CBR (4 días de inmersión)	100,2	103,1	99	76,7	130,2	89,5	78,7	80,3	-	-	-	130,2	105,4	111,1	-	-	-	-	-	-
CBR (28 días de inmersión)	244,3	187,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materia orgánica. Reacción con permanganato (%)	-	0,49	0,79	0,59	1,17	0,82	0,83	0,59	0,6	0,82	0,85	1,17	0,95	0,86	0,84	0,85	0,59	0,72	0,88	0,73
Materia orgánica. Pérdida por calcinación a 500°C (%)	-	-	2,78	2,05	4,41	3,08	2,45	3,34	2,68	2,56	2,18	4,41	2,80	2,95	2,42	2,05	2,12	3,49	2,37	2,81
Compuestos de azufre total (% SO ₃)	-	0,46	0,85	0,21	2,13	0,97	0,21	1,66	1,23	0,23	0,65	1,77	0,28	2,13	0,73	0,13	0,47	0,97	0,38	0,98
Sulfatos solubles en agua (% SO ₃)	0,21	0,13	0,24	0,02	0,6	0,30	0,02	0,47	0,35	0,02	0,19	0,51	0,03	0,8	0,22	0,02	0,14	0,31	0,04	0,32
Contenido en sales solubles en agua (%)	0,87	0,72	2	0,68	3,74	1,81	0,7	2,48	2,01	0,68	0,99	2,55	0,98	3,74	1,01	0,76	1,05	1,44	0,77	1,87
Contenido en yeso según NLT 115 (%)	-	-	0,52	0,03	1,34	0,65	0,07	1,11	0,78	0,03	0,41	1,15	0,07	1,34	0,47	0,04	0,3	0,66	0,1	0,69
Estabilidad ante disolución de sulfato magnesio (%)	22	5	19,3	4	25	-	-	-	-	-	-	25	9	24	-	-	-	-	-	-

Tabla 4b. Caracterización de áridos reciclados mixtos para su uso en aplicaciones no ligadas de firmes de carretera.

Análisis de componentes

El análisis de constituyentes revela que el material predominante en los áridos reciclados producidos en la CAPV es referido a continuación:

Componente	Proporción (%)
Hormigón	57
Materiales cerámicos	19
Materiales granulares naturales	16
Asfalto	6
Yeso + fracciones orgánicas (madera, plástico, papel) + otros impropios	<2

Tabla 5.

Comparando los diferentes procesos, se aprecia cierta similitud de composición entre los productos ARB_i y ARV_i , mientras que los valores medios ARG_i se caracterizan por un mayor contenido de áridos de hormigón y asfalto, en detrimento del material cerámico.



Figura 1. Constituyentes de áridos reciclados (series ARB y ARG).

Análisis granulométrico

Del análisis granulométrico se puede concluir que el árido reciclado generado en la CAPV, para su uso en zahorras, se ajusta a un ZA25 con porcentajes de fracción fina (< 4 mm) por debajo del 30%. Asimismo, cumple los requerimientos granulométricos para la utilización de materiales granulares como suelo seleccionado en explanadas.

Índice de lajas

Con relación al índice de lajas, se puede concluir que las diferentes muestras de árido reciclado mixto presentan valores medios en torno al 17%. En todas las muestras analizadas se evidencian índices inferiores al 35%, siendo éste el umbral establecido en el Artículo 510 del PG3 para su uso como material de zahorra.

Plasticidad

En lo concerniente a la plasticidad, los áridos reciclados resultan ser no plásticos, en concordancia con estudios previos⁽⁵⁾.

Resistencia a la fragmentación

Atendiendo a la resistencia a la fragmentación cabe enunciar las siguientes tendencias:

- Los áridos reciclados de naturaleza mixta con porcentajes en cerámicos comprendidos entre el 20% y 30% (series ARB y ARV) evidencian valores de resistencia a la fragmentación comprendidos, mayoritariamente, entre 35 y 40, lo que limita su aplicación en capas de firme.
- Los áridos reciclados de naturaleza mixta con porcentajes en cerámicos por debajo del 5% (serie ARG) y contenidos en asfalto superiores al 8% presentan valores de resistencia a la fragmentación inferiores a 35.

Actualmente PG-3 hace la salvedad de que si se utilizan áridos reciclados procedentes de demoliciones de resistencia a la compresión final superior a 35 MPa el valor del coeficiente de Los Ángeles podrá ser superior en 5 unidades a los valores exigidos. Esta especificación es de difícil aplicación práctica.

No obstante, en este sentido, la generación de finos cerámicos constituye un efecto favorable en el proceso de consolidación del material granular, puesto que aquéllos coadyuvan a potenciar la reacción puzolánica, según se demuestra en las Figuras 4 y 5. De esta manera, el mayor desgaste de estos materiales se puede compensar por una mejor cohesión

Densidades máximas y humedades óptimas de compactación

Los áridos reciclados mixtos presentan densidades máximas y humedades óptimas de compactación similares a la de suelos naturales y otro tipo de material granular⁽⁶⁾. Se observa un incremento de la humedad óptima cuanto mayor contenido de material cerámico ofrezca el árido reciclado (ver Figura 2). Asimismo, la combinación de hormigón y cerámico parece inducir mayores densidades de compactación, como consecuencia de una mayor generación de finos procedentes de la fragmentación tanto del mortero adherido al árido reciclado de hormigón, como del material cerámico. Los resultados obtenidos manifiestan tendencias similares a los obtenidos por el Profesor Poon⁽⁷⁾ de la universidad de Hong Kong, tal y como se ilustra en la Figura 3.

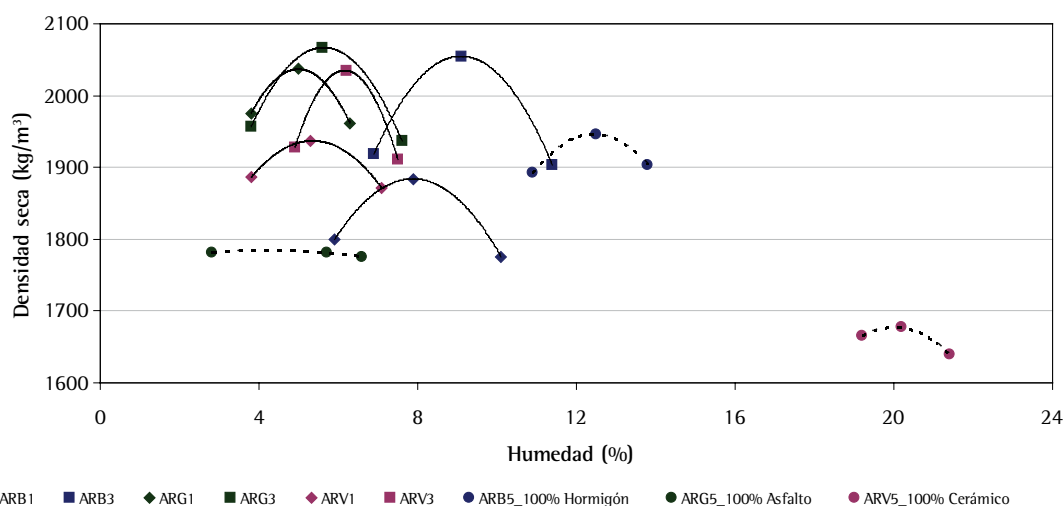


Figura 2. Humedad óptima y densidad máxima de compactación.

Blend ratio, % (By weight)						
Control						
Blend	40 mm	20 mm	10 mm		<5 mm	
Control	20	10	40		30	
Series I (with recycled concrete aggregate as fine aggregate)						
Blend	40 mm	20 mm	10 mm		<5 mm	
	RCA	RCA	CB	RCA	CB	RCA
100RCA	20	10	0	40	0	30
75RCA	20	7.5	2.5	30	10	30
50RCA	20	5	5	20	20	30
Series II (with crushed clay brick as fine aggregate)						
Blend	40 mm	20 mm	10 mm		<5 mm	
	RCA	RCA	CB	RCA	CB	CB
100RCA	20	10	0	40	0	30
75RCA	20	7.5	2.5	30	10	30
50RCA	20	5	5	20	20	30

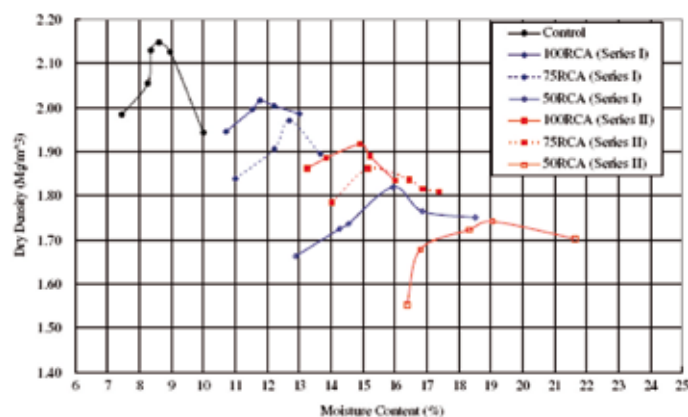


Figura 3. Relación humedad-densidad de compactación para diferentes mezclas de áridos reciclados [Poon et al, 2006^[7]].

Análisis de la capacidad portante a partir del índice CBR

Se puede explicar una mayor capacidad portante, medida a partir de su índice CBR, asociada a la presencia conjunta de hormigón y material cerámico en el árido reciclado. El incremento de resistencia mecánica se puede atribuir, bien a reacciones puzolánicas entre los finos cerámicos y la portlandita presente en el hormigón, en presencia de agua, bien a cierta hidraulicidad remanente del cemento contenido en los áridos reciclados de hormigón. La demostración de la actividad puzolánica del material cerámico se ilustra en las Figuras 4 y 5 para dos muestras de cerámico seleccionado correspondientes a diferentes acopios.

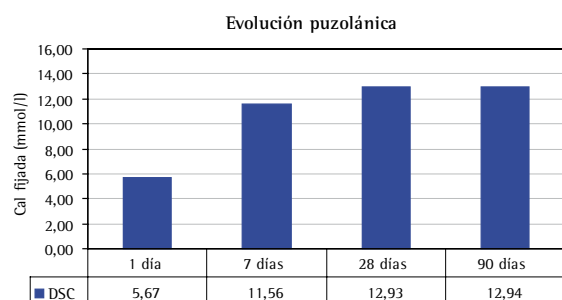


Figura 4. Actividad puzolánica de cerámico reciclado finamente molido: 1ª muestra.

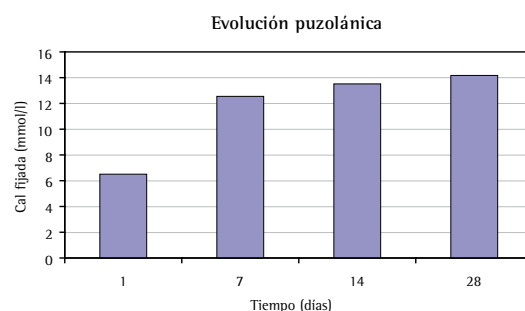


Figura 5. Actividad puzolánica de cerámico reciclado finamente molido: 2ª muestra.

Los valores de actividad puzolánica obtenidos ponen de manifiesto la fijación de altos contenidos de cal por los finos cerámicos durante los primeros días de reacción. A 7 días de reacción, la cal fijada por el material cerámico alcanza el 65,4% del total de cal disponible en la disolución. La cinética de reacción puzolánica se ralentiza a edades comprendidas entre 7 y 28 días, fijando a dicha edad en torno al 73% de la cal disponible. A los 90 días de reacción, apenas se detecta actividad puzolánica.

Con el fin de constatar la mejora de capacidad portante a lo largo del tiempo, se determinó el índice CBR de diferentes muestras a dos edades: a 4 días de inmersión en agua, de acuerdo al ensayo normalizado, y tras 90 días garantizando, así, el máximo potencial puzolánico. Los valores obtenidos se ilustran comparativamente en la Figura 6.

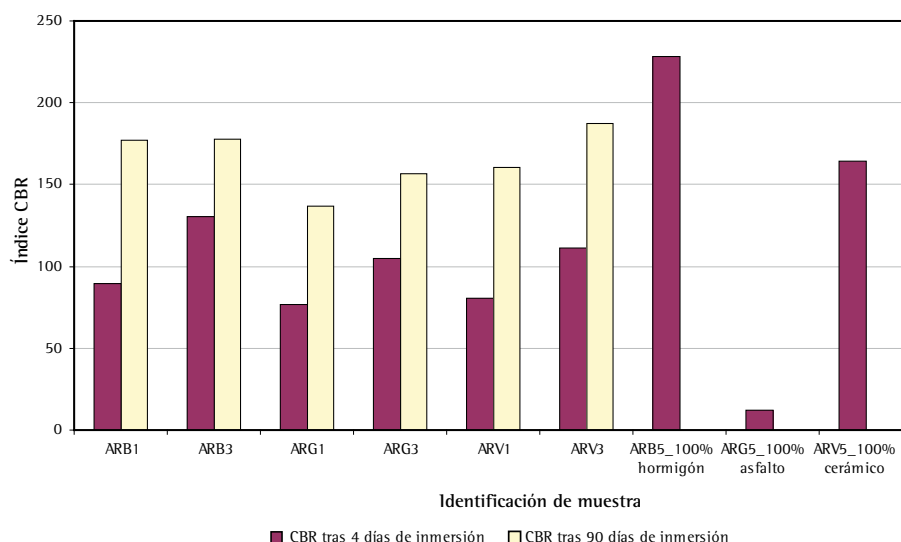


Figura 6. Evolución del índice CBR tras 4 y 90 días de inmersión en agua.

Adicionalmente, la Figura 7 compara la evolución del índice CBR de muestras de árido reciclado (ARB-I y ARV-II utilizados en los tramos de prueba) con una muestra de árido de cantera de naturaleza caliza. Mientras que el material compactado con árido reciclado mixto revela una ganancia de capacidad portante hasta 28 días de inmersión en agua, el material compactado con árido calizo evidencia un comportamiento mecánico constante a lo largo de dicho período de tiempo.

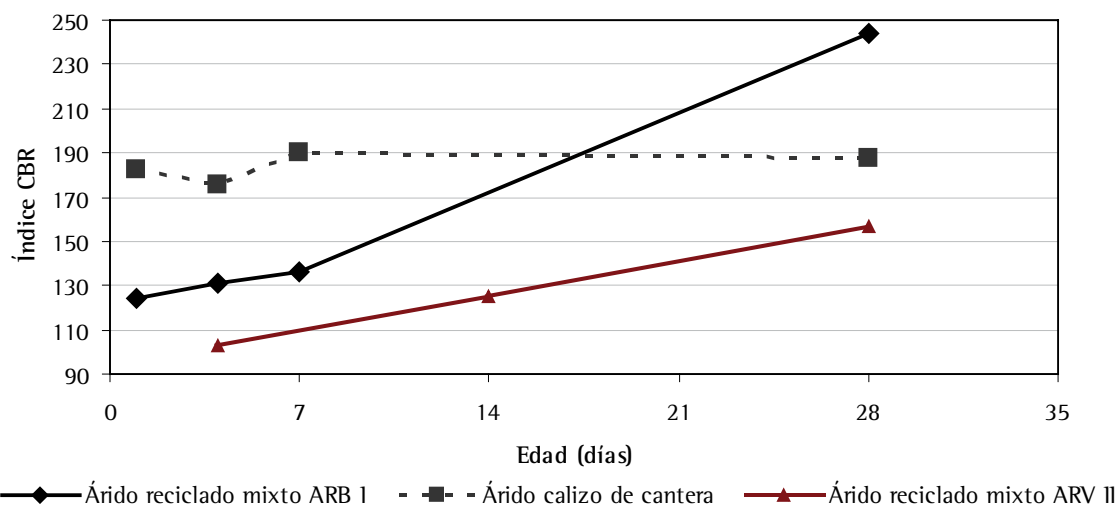


Figura 7. Evolución de la capacidad portante a lo largo del tiempo: árido reciclado (ARB-I y ARV-II) y árido calizo.

A tenor de los resultados de la Figura 7, el índice CBR a 14 días resulta ser entre un 20% y 30% superior al obtenido a 4 días para las muestras de árido reciclado mixto. Asimismo, el índice CBR a 28 días resulta ser superior en un 50% al obtenido a 4 días.

Materia orgánica

Trabajos previos⁽⁵⁾ a esta investigación concluyeron que la utilización de permanganato potásico para determinar el contenido de materia orgánica podría no ser adecuado cuando se aplican a productos secundarios procedentes de la valorización de residuos o subproductos industriales. En este sentido, se planteó obtener dicho parámetro a partir de la pérdida por calcinación a 500°C, habiendo utilizado satisfactoriamente dicha técnica con residuos con alto contenido en materia orgánica, tales como los lodos de procesos de fabricación del papel⁽⁸⁾. De los resultados presentados en la Tabla 4, se puede observar una completa discordancia entre los diferentes métodos.

El contenido de materia orgánica obtenido mediante el ensayo de composición resulta ser inferior a los valores determinados mediante la valoración con permanganato potásico. A su vez, estos últimos también son inferiores a los resultados de pérdida por calcinación a 500°C. Se antoja necesario, por lo tanto, profundizar sobre los compuestos minerales de las diferentes series objeto de estudio (muestras ARB1, ARG1 y ARV1), mediante técnicas de difracción de rayos X, termogravimetría, análisis térmico diferencial y determinación de materia orgánica para áridos naturales y cementos Portland.

Los compuestos cristalinos relativos a las muestras ARB1, ARG1 y ARV1 se identifican en la Tabla 6:

Fase mineral	ARB1	ARG1	ARV1
Basanita: $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$			☐
Calcita: CaCO_3	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Cuarzo: SiO_2	☐ ☐ ☐	☐ ☐ ☐	☐ ☐ ☐
Dolomita: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	☐	☐	☐
Plagioclasa: $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$	☐	☐	☐
Feldespato potásico: KAlSi_3O_8	☐		
Moscovita: $(\text{K},\text{Na})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	☐		☐
Portlandita: $\text{Ca}(\text{OH})_2$		☐	

Tabla 6. Mineralogía áridos reciclados mixtos.

Puesto que la difracción realizada para una muestra de árido reciclado mixto puede enmascarar la detección de las diferentes fases de sulfatos presentes en el hormigón, se analizaron fracciones enriquecidas en pasta de cemento obtenidas a partir de los fragmentos de hormigón constituyentes de las muestras ARB1, ARG1 y ARV1H, las cuales se denominaron, respectivamente, «ARB-1H», «ARG-1H» y «ARV-1H». Para extraer los concentrados en pasta de cemento, se seleccionaron muestras representativas de material granular de hormigón presente en cada muestra de árido reciclado mixto.

A continuación, se desagregó la pasta de cemento del árido mediante una maza, tamizando el material resultante a través de una columna compuesta por los tamices de 500 μm , 230 μm y 90 μm . El análisis se realizó a partir del material que pasó por el tamiz de 90 μm .

Los compuestos cristalinos relativos a las muestras ARB-1H, ARG-1H y ARV-1H se identifican en la Tabla 7.

Fase mineral	ARB-1H	ARG-1H	ARV-1H
Calcita: CaCO_3	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Cuarzo: SiO_2	☐ ☐	☐ ☐ ☐	☐ ☐
Ettringita: $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	☐	☐	☐
Feldespato potásico: KAlSi_3O_8	☐		
Hidrocalumita: $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$			☐
Portlandita: $\text{Ca}(\text{OH})_2$	☐	☐	☐
Yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	☐	☐	☐

Tabla 7. Mineralogía la pasta de cemento presente en los áridos reciclados.

Se pone de manifiesto la presencia de yeso, ettringita y portlandita en las tres muestras de árido reciclado analizadas. Dada su baja concentración con respecto a los minerales mayoritarios (calcita y cuarzo), dichos compuestos no se detectan cuando se parte de muestras de árido reciclado mixto. Sin embargo, la confirmación de tales compuestos resulta relevante en la discusión de la solubilidad de sulfatos de los áridos reciclados.

Adicionalmente, la Figura 8 exhibe la termogravimetría asociada a la evolución de la pérdida de peso de las muestras ARB1, ARG1 y ARV1. Los resultados muestran evoluciones muy similares entre las diferentes procedencias de producto reciclado, en consonancia con lo apuntado en la difracción de rayos X. En el rango de temperaturas comprendido entre 20°C y 700°C, los áridos reciclados evidencian una disminución lenta y paulatina de peso. Entre 700°C y 830°C, los áridos experimentan una drástica disminución de peso, asociada al proceso de descarbonatación de la calcita. A partir de 830°C, el peso se mantiene constante con el incremento de la temperatura.

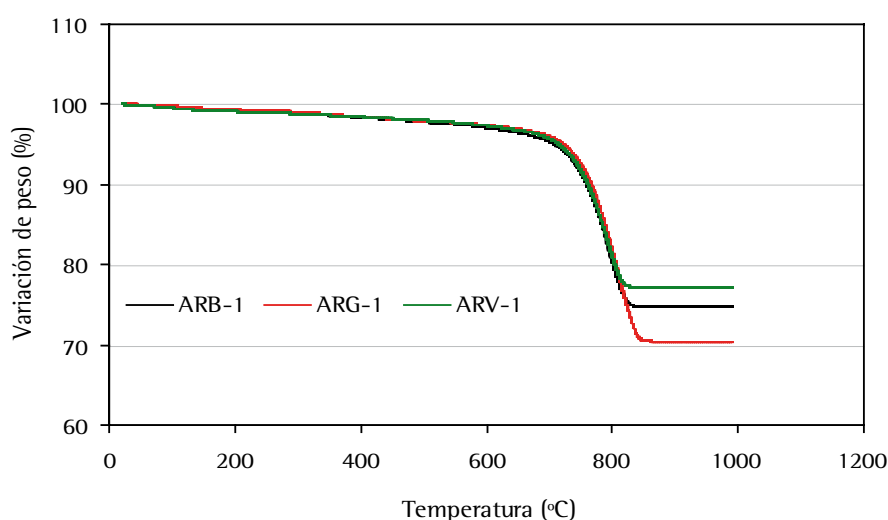


Figura 8. Termogravimetría realizada sobre muestras de árido reciclado mixto.

La Tabla 8 recoge los valores de pérdida de peso para los diferentes intervalos de temperatura. Los resultados revelan pérdidas muy similares para los tres áridos; excepto para el proceso de descarbonatación de la caliza. El árido ARG1 presenta un mayor contenido en caliza, seguido del árido ARB1 y finalmente por ARV1.

Pérdidas (%)	0-200°C	200-500°C	500-1000°C	CO ₂ (CO ₃ Ca)	0-1000°C
ARB-1	0,717	1,446	23,11	21,40	25,27
ARG-1	0,677	1,394	27,60	26,29	29,67
ARV-1	0,885	1,076	20,84	19,56	22,80

Tabla 8. Pérdidas de peso de las muestras ARB1, ARG1 y ARV1.

Los análisis térmicos diferenciales (ATD) se ilustran en la Figura 9. La gráfica pone de manifiesto 3 bandas endotérmicas a temperaturas situadas en torno a 51,6°C, 104°C y 800-830°C. La banda a 51,6°C corresponde a la pérdida de agua de humedad. La banda localizada a 104°C podría corresponder a la deshidroxilación parcial del yeso dihidrato (2*H₂O) a yeso hemihidratado o basanita (1/2*H₂O), y éste a anhidrita III. Por difracción de rayos X se constata la presencia de basanita y yeso. Una vez más, se evidencia la presencia de sulfatos cálcicos en sus diferentes variantes de hidratación. La muestra ARG1 presenta desplazamientos de la banda hacia temperaturas superiores, en torno a 130°C, asociada a una mayor concentración de geles CSH procedentes de la hidratación del cemento Pórtland. La banda a 490°C podría atribuirse a trazas de portlandita.

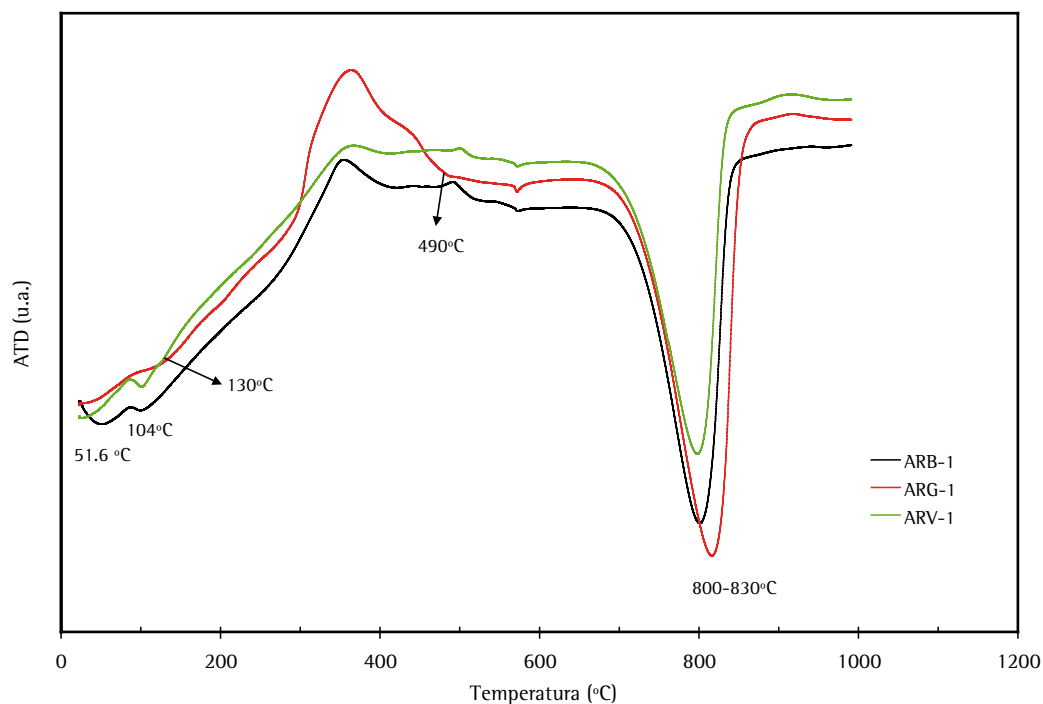


Figura 9. Evolución de los ATD obre muestras de árido reciclado mixto.

La banda endotérmica principal (800-830°C) se puede asociar a la presencia de contenidos importantes de material calizo, bien procedente de los áridos (finos o gruesos), bien de la carbonatación de la portlandita una vez hidratado el cemento. Debido a la forma de la banda y temperatura de descomposición, se podría inferir una presencia mayoritaria de calcita, acompañada con algo de dolomita, de acuerdo a las conclusiones establecidas en el análisis de difracción de rayos X.

El rango entre 300°C y 350°C, asociado a la descomposición de la materia orgánica, presenta registros bastantes parecidos para las muestras ARBI y ARVI, siendo el efecto ligeramente más pronunciado en la muestra ARG1 como consecuencia de una mayor presencia de asfalto en composición. De haber un elevado contenido de materia orgánica biodegradable (madera, papel, plásticos), se habrían obtenido bandas endotérmicas características en las muestras ARBI y ARVI. Asimismo, la combustión de la madera es lenta y prolongada con el tiempo y por ende, difícilmente detectable por ATD en concentraciones mínimas.

La Tabla 9 compendia los resultados de materia orgánica, determinada mediante valoración con permanganato potásico (UNE 103204), para muestras de árido de cantera caliza y cementos Portland.

Material ensayado	Contenido en materia orgánica según UNE 103204 (%)
Árido natural de cantera caliza	0,53
CEM I	0,16
CEM II	0,18

Tabla 9. Determinación de materia orgánica en árido calizo y cementos.

Se observa que la valoración es sensible tanto para áridos naturales como para cementos. En el caso de los áridos calizos, el permanganato puede reaccionar con materia orgánica inherente a la propia génesis de la roca sedimentaria⁽⁹⁾. Por su parte, dicho reactivo puede oxidar ciertos metales presentes en los cementos. Comparando los resultados anteriores con los presentados en la Tabla 4, se puede deducir que los áridos reciclados presentan contenidos de materia orgánica similares al árido de cantera.

Toda la disertación anterior permite enunciar las siguientes conclusiones relativas a la determinación de materia orgánica:

- La pérdida por calcinación a 500°C no resulta ser válido para tal propósito puesto que dicho ensayo afecta no sólo a la materia orgánica, sino también a diversas fases minerales presentes en los áridos reciclados (yeso, geles CSH, portlandita).
- La determinación de la materia orgánica mediante el ensayo de permanganato es un método poco selectivo de cara a determinar la presencia de impurezas orgánicas (madera, papel, plástico) en los áridos reciclados mixtos.
- La determinación del contenido de impurezas orgánicas resulta ser más efectivo a partir del ensayo de componentes regulado por la norma EN 933-11.
- Otro tipo de impurezas sobre la fracción fina del árido reciclado se puede determinar mediante los ensayos de equivalente de arena (UNE-EN 933.8) o contenido de terrones de arcilla (UNE 7133).

Compuestos de azufre total, sulfatos solubles en agua y contenido en yeso

La limitación de los compuestos de azufre para el uso de material granular en aplicaciones estructurales no ligadas (explanadas y sub-bases) de firmes de carretera se establece con arreglo a tres tipos de ensayo diferentes. Los materiales a utilizar en la ejecución de explanadas regulan su contenido de compuestos de azufre mediante la determinación, bien de sulfatos solubles en agua de acuerdo a la norma UNE 103201 (ver apartado 330.4.1.1 del PG3), bien a la valoración del contenido en yeso con arreglo a la norma NLT 115 (ver apartado 330.4.4.3 del PG3). Por su parte, la utilización de zahorras como capa de firme regula el contenido ponderal de compuestos de azufre totales según la norma UNE-EN 1744-1 (ver apartado 510.2.2 del PG-3). Adicionalmente, la norma EN 933-11 determina el yeso en composición mediante inspección visual. En cualquier caso, la finalidad de cualquiera de los procedimientos citados es coincidente: limitar la solubilidad de sulfatos de cara a garantizar la estabilidad dimensional de la sección, así como evitar potenciales patologías por sulfatos hacia estructuras de hormigón colindantes.

Bajo esta perspectiva, el presente subapartado discute la relación entre resultados obtenidos para los diferentes ensayos, así como las fases minerales que más influyen en la solubilidad. La relación entre los diferentes ensayos se ilustra en las Figuras 10 a 12.

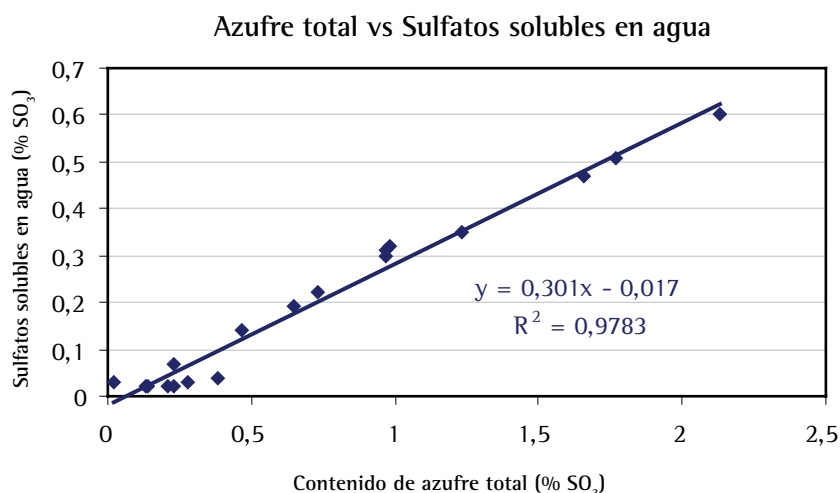


Figura 10. Relación entre compuestos de azufre total y sulfatos solubles en agua.

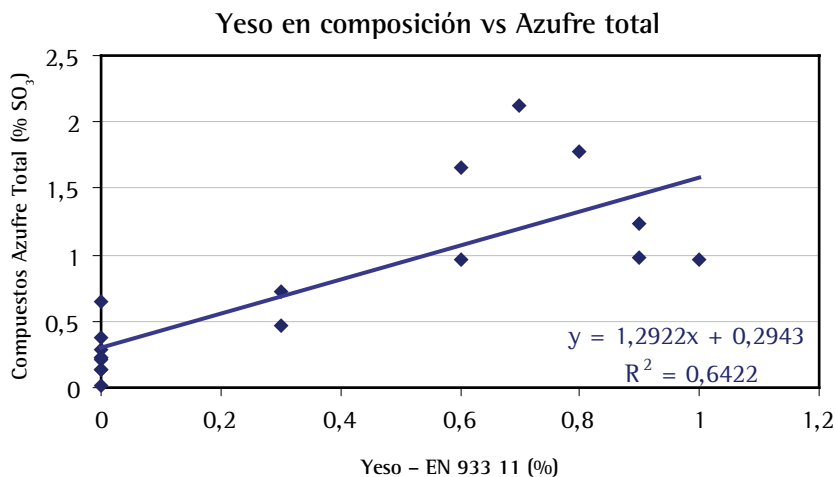


Figura 11. Relación entre yeso en composición y compuestos de azufre total.

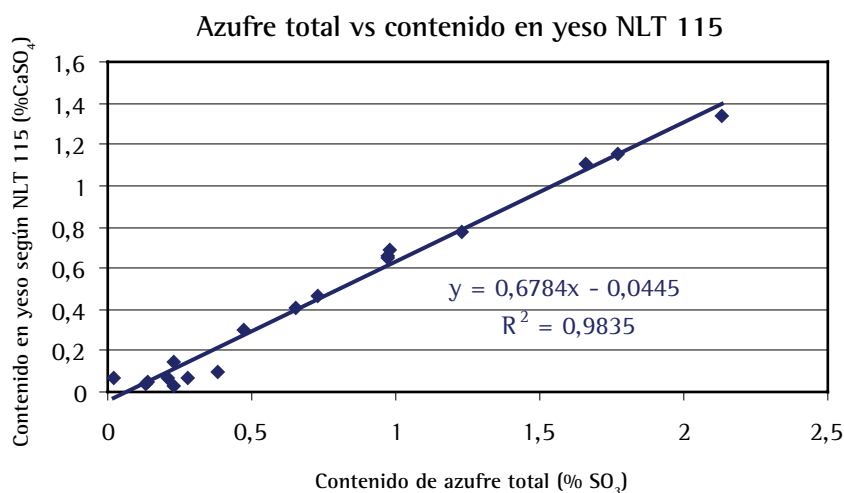
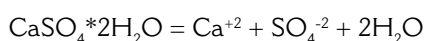


Figura 12. Relación entre compuestos de azufre total y contenido en yeso según NLT 115.

A partir de las tres gráficas arriba representadas se relacionan los 4 tipos de ensayo relativos a compuestos de azufre. Se observa una perfecta correlación entre el contenido de compuestos de azufre total y la solubilidad de los mismos en agua, pudiendo establecer que aproximadamente 1/3 de los compuestos de azufre son solubles en medio acuoso (ver pendiente de la recta de regresión en la Figura 10). Existe, asimismo, una buena correlación entre el contenido de compuestos de azufre total y el contenido de yeso obtenido por valoración química, según la NLT 115. A tenor de estas evidencias, se puede concluir que a partir de un único ensayo se obtiene información relativa a compuestos de azufre total, solubilidad de los mismos y contenido en yeso.

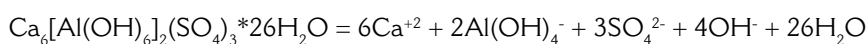
Por su parte, la Figura 11 revela que para aquellas muestras donde no se evidencia yeso granular de manera visual, se detectan compuestos de azufre totales en torno a un 0,3% (ver intersección de la recta de regresión con el eje de ordenadas). Este hecho obedece a que el árido reciclado de hormigón contiene yeso y ettringita, de acuerdo a lo demostrado en la Tabla 7. En cuanto a estos compuestos cabe razonar sobre su solubilidad. Las reacciones de disolución de estas dos fases minerales, en agua a 25°C pura, pueden describirse del modo siguiente⁽¹⁰⁾:

(1) Reacción de disolución del yeso:



Para esta reacción, el logaritmo del producto de solubilidad en agua pura y dilución infinita es $\log K_{sp} = -4,58$.

(2) Reacción de disolución de la ettringita:



Para esta reacción, el logaritmo del producto de solubilidad en agua pura y dilución infinita es $\log K_{sp} = -44,91$ en un rango de pH de 10 a 13.

Los valores de solubilidad para las reacciones arriba expresadas muestran, inequívocamente, que el yeso es mucho más soluble que la ettringita. Por lo tanto, en un medio alcalino, es previsible que el yeso sea la principal fuente de sulfato soluble.

En el sistema $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{-Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O}$, a $\text{pH} > 10,5$, son posibles las fases de ettringita, monosulfoaluminato, yeso, hidrogranate, portlandita e hidróxido de aluminio (gibbsite). *La ettringita es la fase más estable en presencia de soluciones muy alcalinas y ricas en sulfatos*, puesto que el pH, la temperatura, el CO_2 disuelto y la cantidad de agua afectan a la estabilidad de dicho compuesto⁽¹¹⁾. La ettringita es estable a pH de entre 11 y 12,5. Una caída del pH por debajo de 10,5 favorecería su solubilización. *La presencia de portlandita en el hormigón contribuye a mantener elevados niveles de alcalinidad*. Este compuesto tiene un producto de solubilidad superior al del yeso ($\log K_{sp} = 22,8$) y cuando el agua se satura de portlandita, el pH alcanza un valor de 12,4.

Atendiendo a los factores mencionados, los sulfatos solubles provendrán mayoritariamente de la disolución del yeso. La ettringita permanecerá estable mientras el material granular preserve su alcalinidad, favorecido por la presencia de la portlandita presente en el hormigón. En este contexto, *el ensayo de sulfatos solubles en agua se erige como relevante de cara a garantizar un correcto comportamiento de las secciones ejecutadas con áridos reciclados mixtos*.

Para aquellos escenarios caracterizados por ausencia de yeso granular procedente de revocos, escayolas, etc., se ha demostrado que los compuestos de azufre total rondan el 0,3%, siendo la solubilidad asociada en torno al 0,1%. Esta evidencia sugiere incrementar el umbral máximo permitido de compuestos de azufre total de 1% a 1,3% para aplicaciones de zahorra. *Estableciendo el umbral máximo permitido en 1,3%, se obtendría una solubilidad aproximada del 0,4%*. Tales condiciones, se corresponderían a contenidos de yeso granular inferiores al 0,8%.

Sales solubles

El contenido de sales solubles se prescribe para rellenos y explanadas en aras de asegurar la estabilidad dimensional de las secciones a ejecutar. De entre las muestras analizadas, los resultados obtenidos varían de 0,68% a 3,74%. Los valores más elevados de sales solubles corresponden a las muestras ARB3 (2,55%) y ARV3 (3,74%). Para determinar el tipo de sales solubles asociadas a cada material, se analizaron los iones disueltos en agua, correspondientes a los áridos reciclados seleccionados de hormigón (ARB5) y de naturaleza cerámica (ARV5). Con el propósito de fundamentar la determinación de especies iónicas, se estudiaron las correspondientes fases minerales, de acuerdo a lo apuntado en la Tabla 10. Las concentraciones de los diferentes iones se presentan en la Tabla 11.

Fase mineral	ARB5 Hormigón seleccionado	ARG5 Asfalto seleccionado	ARV5 Cerámico seleccionado
Calcita: CaCO_3	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Clorita: $(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$		☐	
Cuarzo: SiO_2	☐ ☐	☐ ☐	☐ ☐ ☐ ☐ ☐
Dolomita: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	☐		
Hematites: Fe_2O_3			☐
Illita: $(\text{K,H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	☐		☐ ☐
Plagioclase: $(\text{Ca,Na})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$		☐ ☐	
Feldespato potásico: KAlSi_3O_8			☐ ☐

Tabla 10. Mineralogía áridos reciclados seleccionados.

Concentración	ARB5 Hormigón seleccionado	ARV5 Cerámico seleccionado
pH	11,5	10,1
Cl ⁻ (mg/l)	14	11
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	81	100
Ca ²⁺ (mg/l)	120	47
Mg ²⁺ (mg/l)	0,54	0,97
Na ⁺ (mg/l)	13,4	16,6
K ⁺ (mg/l)	27,1	32,8
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	25	50
Bicarbonato (mg/l)		32
OH ⁻ (mg/l)	180	

Tabla 11. Especies iónicas de los áridos reciclados disueltas en agua.

Las sales solubles predominantes en los áridos reciclados de hormigón son hidróxido cálcico (portlandita), sulfatos y carbonatos. Otras como el cloruro sódico se presentan en concentraciones bajas. Por su parte, las sales procedentes del material cerámico son sulfatos (sódico o magnésico) y en menor medida carbonatos, bicarbonatos y cloruro sódico. En el conjunto de los áridos reciclados mixtos, los sulfatos constituyen, aproximadamente, 1/5 del total de especies iónicas, tal y como se demuestra, a partir de la buena correlación obtenida en la Figura 13. En consecuencia, *el parámetro de sales solubles se puede gobernar, también, mediante la determinación de los sulfatos solubles en agua, lo cual refuerza el argumento de articular el control del contenido de compuestos solubles a partir del mencionado ensayo.*

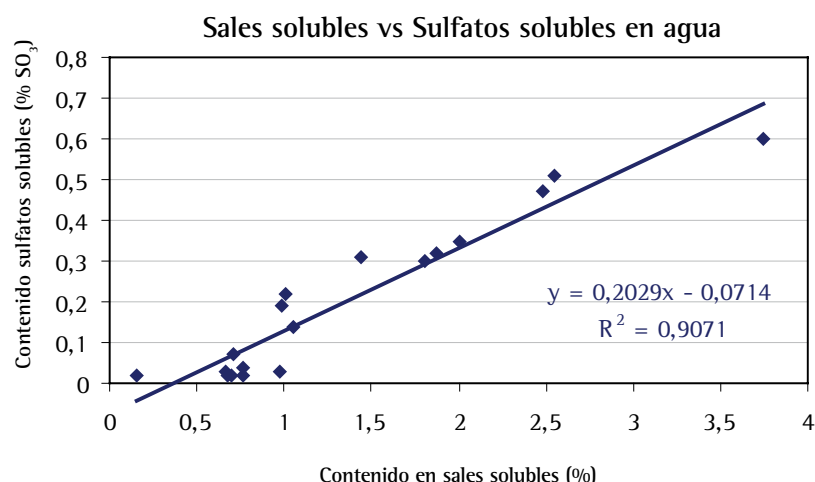


Figura 13. Relación entre sales solubles y sulfatos solubles en agua.

Al objeto de profundizar sobre la solubilidad de las sales una vez compactado el material reciclado, se realizó el siguiente ensayo a escala de laboratorio (Figura 14). Se sumergió completamente en agua una probeta de árido reciclado compactada a su nivel de densidad máxima de referencia (Próctor Modificado). La probeta se fabricó con el material puesto en uno de los tramos de prueba (ARV-II), utilizando los moldes de CBR. Tras 4 días se retiró el molde y, manteniendo la sobrecarga del ensayo CBR, el material compactado se sumergió en agua durante 28 días. Durante este período, la probeta no se desmoronó y el seguimiento de la variación dimensional con comparador indicó hinchamiento 0. Después de los 28 días se determinó el contenido de sales solubles en el agua, comparando el resultado con el obtenido según el ensayo normalizado de NLT 114. Los resultados resultaron ser:

- Sales solubles del árido reciclado según NLT 114: 0,74%
- Sales solubles determinadas a partir del ensayo arriba descrito: 0,12%

La prueba revela que el contenido de sales solubilizadas en agua, a partir del material compactado, es inferior al obtenido por el ensayo de NLT 114, coincidiendo el resultado con el valor de sulfatos solubles.



Figura 14. Disposición de ensayo de solubilidad sobre muestra compactada.

Al fin de ahondar acerca de la estabilidad dimensional de aquellas muestras con mayor contenido en sales solubles, se determinaron el índice de colapso (NLT-254) y el valor del hinchamiento libre (UNE 103601). Los resultados ponen de manifiesto que los valores de índice de colapso ($ARB3=0,19\%$; $ARV3=0,23\%$) e hinchamiento libre ($ARB3=0,095\%$; $ARV3=0,004\%$) están bastante alejados de los umbrales respectivos del 1% y 3% establecidos en los apartados 330.4.4.1, relativo a suelos colapsables, y 330.4.4.2, relativo a suelos expansivos, del PG3. Adicionalmente, el hinchamiento a 28 días medido a través del ensayo de CBR también resulta ser nulo. De esta manera, se puede inferir que contenidos de sales solubles inferiores al 3,74% no presentan problemas de inestabilidad dimensional.

4.1.1.4 Estudio de correlación entre los constituyentes del árido reciclado y sus propiedades intrínsecas

Los coeficientes de correlación miden el grado de asociación entre dos variables. El coeficiente de correlación lineal, o de Pearson (r), calculado para cada par de variables puede variar entre -1 y $+1$. Valores negativos indican relación inversa, toda vez que valores positivos indican relación directa. Valores cercanos a cero indican que no hay relación lineal.

En la Tabla 12 se expone la matriz de correlaciones para las diferentes variables objeto de análisis. Se han destacado los coeficientes de correlación más elevados. Asimismo, se ha determinado que las correlaciones lineales son significativas para un nivel de confianza del 95% cuando el valor de correlación es igual o superior a 0,54. Adicionalmente, cabe destacar que para valores de correlación superior a 0,65 el nivel de confianza es del 99%.

	Asfalto	Cerámicos	Hormigón	Áridos No ligados	Yeso granular	Vidrio	Índice de lajas	Desgaste Los Ángeles	Materia Orgánica-UNE103204	Materia Orgánica-Pérdida a 500°C	SO ₃ total	SO ₃ soluble en agua	Yeso NLT 115	Sales solubles
Asfalto	1,00													
Cerámicos	-0,77	1,00												
Hormigón	0,30	-0,77	1,00											
Áridos No ligados	0,63	-0,46	-0,18	1,00										
Yeso granular	-0,78	0,74	-0,47	-0,40	1,00									
Vidrio	-0,68	0,66	-0,26	-0,67	0,80	1,00								
Índice de lajas	-0,39	0,66	-0,61	-0,25	0,65	0,62	1,00							
Desgaste Los Ángeles	-0,74	0,90	-0,63	-0,49	0,78	0,69	0,60	1,00						
Materia Orgánica-UNE103204	0,24	-0,34	0,29	0,14	-0,13	-0,29	-0,34	-0,40	1,00					
Materia Orgánica-Pérdida a 500°C	0,54	0,47	-0,20	-0,40	0,67	0,50	0,37	0,42	0,44	1,00				
SO ₃ total	-0,44	0,61	-0,39	-0,47	0,76	0,73	0,58	0,68	0,05	0,69	1,00			
SO ₃ soluble en agua	-0,51	0,68	-0,44	-0,49	0,82	0,75	0,62	0,76	0,00	0,69	0,99	1,00		
Yeso NLT 115	-0,50	0,67	-0,44	-0,50	0,80	0,75	0,63	0,74	0,00	0,69	0,99	0,99	1,00	
Sales solubles	-0,37	0,49	-0,27	-0,44	0,72	0,70	0,54	0,56	0,07	0,61	0,97	0,95	0,95	1,00

Tabla 12. Matriz de correlaciones.

A partir de la matriz de correlaciones se pueden constatar los siguientes enunciados:

- El *contenido de yeso granular*, obtenido a través del ensayo visual de composición, *se correlaciona de forma directa con el contenido de cerámicos*. Esto obedece al hecho de que los enlucidos de yeso sobre mampostería cerámica son una de las fuentes habituales de sulfato cálcico. En este sentido, limitando el contenido de yeso al 1%, se acotaría indirectamente el contenido máximo de material cerámico a valores máximos del 35%.

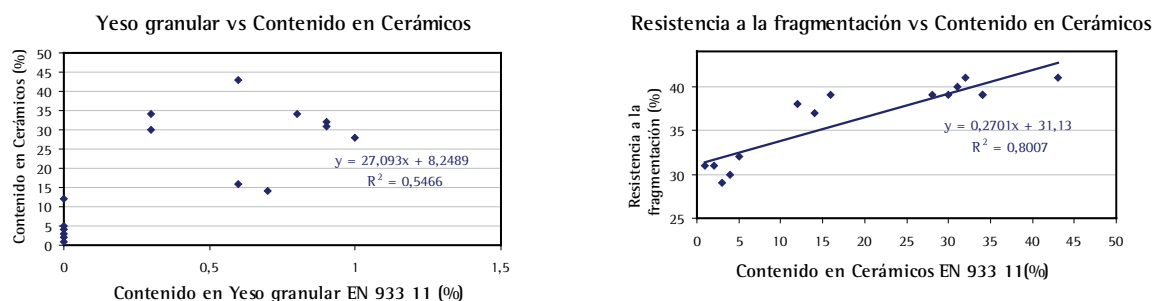


Figura 15. Análisis de material cerámico máximo en los áridos reciclados.

- La *resistencia a la fragmentación o desgaste de Los Ángeles* adopta un alto coeficiente de correlación directa con el material cerámico, seguido del yeso granular. Por lo tanto, los áridos reciclados mixtos presentan mayor desgaste cuanto mayor sea el contenido de material cerámico y yeso granular. Por el contrario, cuanto mayor es el contenido de asfalto, menor desgaste. Análogamente a lo expuesto en el párrafo anterior, valores máximos de desgaste del 40% se corresponderían con contenidos máximos de material cerámico en torno al 35%.
- La *materia orgánica determinada mediante el método del permanganato* revela bajos coeficientes de correlación con los constituyentes de los áridos reciclados, lo cual viene a confirmar la no idoneidad de este ensayo de cara a caracterizar este tipo de material granular.
- Todas las *determinaciones de compuestos de azufre (azufre total, sulfatos solubles y valoración de yeso según NLT 115)* exhiben muy altos coeficientes de correlación entre sí, tal y como se había constatado en las representaciones gráficas (Figuras 10 a 12). Una vez más se demuestra la idoneidad de establecer un único ensayo que regule el contenido de sulfatos. Adicionalmente, se comprueba que *los sulfatos solubles provienen mayoritariamente del yeso granular* y en menor medida del material cerámico. También cabe destacar que *los sulfatos solubles en agua se correlacionan de forma inversa con el hormigón*, lo cual viene a cotejar toda la disertación en torno a la baja solubilidad de la ettringita.
- Las *sales solubles resultan ser función, principalmente, del contenido en yeso* y en menor medida del material cerámico. Con relación a este parámetro también se demuestra la elevada relación con los compuestos de azufre, reforzando la sugerencia de limitar esta propiedad a partir del contenido de sulfatos solubles.

4.1.1.5 Tramos de prueba

El estudio en laboratorio se complementó con dos tramos de prueba para comprobar, a escala real, algunas características del árido reciclado relacionadas con su puesta en obra, su comportamiento mecánico y el riesgo asociado a su potencial lixiviación.

El primero de estos dos tramos experimentales, el banco de pruebas, sito en el barrio de la Orkonera perteneciente al término municipal de Ortuella (Bizkaia), es un tramo de pruebas de reducida escala y fue especialmente diseñado para realizar un estudio controlado de la lixiviación del material. El segundo tramo experimental se construyó en la ampliación del Corredor del Txorierrri (N-637), disponiendo el árido reciclado en formación de explanada mejorada. En este vial el tráfico es intenso (categoría de tráfico T00).

SECCIÓN TIPO

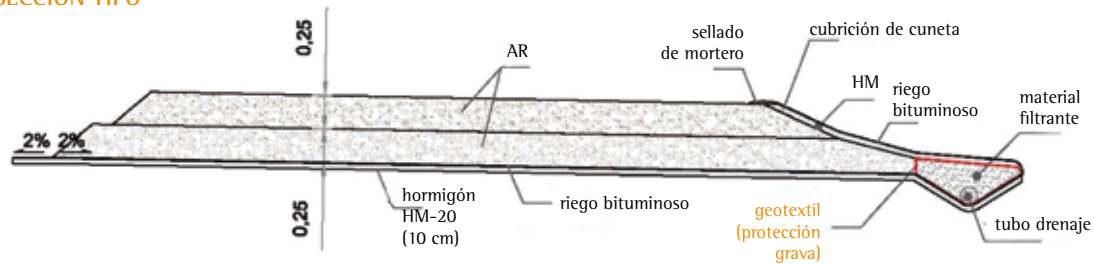


Figura 16. Sección tipo del tramo de prueba de la Orkonera.

El banco de pruebas en la Orkonera consiste en un tramo de 25 metros de longitud y una anchura mínima de 4,5 metros. El árido reciclado (muestra ARB-I) se dispuso en dos capas de 25 centímetros de espesor sobre una losa de hormigón, que se construyó con el objetivo de generar una superficie impermeable y con una cierta pendiente transversal, que condujese hacia un borde lateral el agua que se infiltrase a través de los 50 centímetros de árido reciclado. Este lixiviado se conducía a través de una cuneta longitudinal al tramo para ser recogido finalmente en un depósito, cuyo contenido se recogió y analizó periódicamente. Para evitar que el lixiviado procedente de la infiltración a través del árido reciclado se diluyera en la cuneta mezclándose con aguas de otras procedencias (el agua de lluvia que directamente cayese sobre la cuneta o la que por escorrentía sobre la superficie del tramo fuese a llegar a la cuneta), la cuneta se rellenó con una grava drenante, hasta una altura igual al espesor alcanzado por las dos tongadas de material reciclado, y se recubrió con hormigón (ver Figura 17). De este modo, se aisló el lixiviado para su estudio. Este estudio se recoge en el apartado 4.2. *Consideraciones ambientales sobre el uso de áridos reciclados mixtos: 4.2.2. Áridos reciclados en aplicaciones granulares en contacto con el terreno.*



Figura 17. Tramo de prueba en la Orkonera.



Compactación de la explanada. Tramo de prueba del Txorierri.

El segundo tramo experimental se enmarca en la obra del “Proyecto complementario del Proyecto de aumento de capacidad de la carretera BI-631, Bilbao (A8)-Bermeo, tramo: Enlace de Galbarriatu - Enlace de acceso Este Aeropuerto. Conexión Txorierri”, promovido por la Diputación Foral de Bizkaia. El tramo se sitúa, en concreto, en la zona de ampliación de la calzada izquierda (sentido Santander) del Corredor del Txorierri, que se corresponde con el carril de tráfico lento. La categoría de tráfico de proyecto es T00. El árido reciclado mixto testado (muestra ARV-II) se dispuso en un tramo de 85 metros constituyendo la explanada mejorada; en el resto de la obra se utilizó para ello material todo uno de cantera. Los resultados del árido de cantera se tomaron como patrón de referencia para valorar el comportamiento del material reciclado.

Compactación del árido reciclado

El árido reciclado se compactó con compactador liso vibratorio de 12 toneladas en la Orkonera y de 14,5 toneladas en el Txorierri.

En los dos tramos experimentales se ha recurrido a métodos nucleares no destructivos (Ensayo no destructivo mediante Isótopos Radioactivos según la norma ASTM D 3017) para el control de la evolución de la densidad con la compactación, así como para determinar la humedad en cada momento. Adicionalmente, se ha recurrido al método de la arena (UNE 103 503) para determinar, complementariamente, la densidad del material compactado. Los resultados se recogen en las Tabla 13 y Tabla 14.

Tongada	nº pasadas (sencillas)	Humedad (%)	Densidad seca (% dmax.PM)
Tongada 1	2	11,7	87,0
	4	12,2	90,6
	6	11,7	94,8
	8	12,0	98,8
	10	12,8	98,1
Tongada 2	2	11,4	92,9
	4	12,4	94,4
	6	12,5	98,3
	8	12,3	98,6
	10	12,3	99,7

Tabla 13. Densidad y humedad en la compactación. TRAMO DE LA ORKONERA.

Tongada	nº pasadas (sencillas)	Humedad (%)	Densidad seca (% dmax.PM)
Tongada 1	3	9,2	95,3
	5	9,0	97,5
	7	10,5	98,1
Tongada 2	4	11,7	99,9
	5	11,7	99,2

Tabla 14. Densidad y humedad en la compactación. TRAMO DEL TXORIERRI.

Los resultados muestran que el árido reciclado presenta un buen comportamiento a compactación, alcanzándose densidades en torno a la óptima con un número de pasadas habitual.

Comparando la compactación del árido reciclado con la del árido de cantera, se estableció que:

- La densidad del árido reciclado es inferior a la del árido de cantera, debido a su propia naturaleza.
- La humedad óptima de compactación del árido reciclado es superior a la humedad de compactación del árido de cantera, debido a la absorción asociada a los componentes del árido reciclado.

Capacidad de soporte del árido reciclado compactado

La capacidad de soporte de los elementos contruidos con árido reciclado se estudió mediante dos tipos de prueba: ensayos de carga con placa (en el tramo experimental del Txorierri) y auscultaciones con deflectómetro de impacto (en los dos tramos).

Los resultados de los ensayos de carga con placa (NLT-357/98) se incluyen en la Tabla 15. Los resultados implican que el árido reciclado presenta una alta capacidad de soporte, asimilable a la del árido de cantera que sustituye en esta explanada del Txorierri.

Asimismo, cabe destacar que este ensayo se realizó sin dejar madurar la construcción (a los 6 días), lo que implica que, debido a las reacciones de endurecimiento que se dan en el árido reciclado por sus características intrínsecas, los resultados podrían mejorar en un plazo medio en una medida notable.

Material	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E2/E1
Material de cantera	132,35	281,25	2,13
	140,63	250,00	1,78
	80,36	180,00	2,24
Árido reciclado ARV-II	109,76	225,00	2,05
	100,00	225,00	2,25
	118,42	236,84	2,00

Tabla 15. Ensayo de carga con placa.

El análisis de los datos obtenidos mediante la auscultación por deflectómetro de impacto permite, en primera instancia, la estimación de un módulo del macizo sobre el que se realiza el ensayo. Este valor resulta interesante para conocer la aptitud del conjunto, de manera similar a la que estima el ensayo de placa de carga. El análisis de los resultados a través de la metodología del cálculo inverso iterativo de los resultados obtenidos, en cambio, conduce a la determinación del módulo de deformación del árido reciclado. Este módulo del árido reciclado permite una sencilla comparación del árido reciclado con las zahorras artificiales y, por otra parte, permite tener un dato de referencia para la consideración de este material en cálculos analíticos de firmes.

Las medidas por deflectómetro se realizaron:

- En el tramo de la orkonera: sobre la superficie terminada (sobre la segunda tongada de árido reciclado).
- En el tramo del txorierri:
 - Sobre la explanada de árido reciclado y sobre la explanada de árido de cantera.
 - Sobre la gravacemiento dispuesta sobre la explanada (tanto en la zona de explanada con árido reciclado como en la de árido de cantera).

El valor de los módulos elásticos calculados a través del cálculo inverso se recogen en la Tabla 16.

Atendiendo a los resultados del tramo del Txorierri, se observa que la respuesta mecánica de la explanada de árido reciclado es semejante a la respuesta de la explanada construida con árido de cantera, tanto en las sollicitaciones sobre explanada como sobre gravacemiento.

Tramo	Superficie de ensayo	Material de explanada	Módulo equivalente (MPa)	Módulo del árido (MPa)
Orkonera	Árido reciclado	Árido reciclado	322	322
Txorierri	Explanada	Material de cantera	209	361
		Árido reciclado	214	326
	Gravacemento	Material de cantera	3429	1028
		Árido reciclado	3814	1275

Tabla 16. Módulos equivalentes de macizo y módulos elásticos.

El módulo del árido reciclado es del mismo orden que el módulo del árido de cantera. Ambos materiales presentan un comportamiento de marcada no-linealidad, del mismo tipo que la de los suelos; es decir, el módulo aumenta al disminuir las tensiones que recibe. Se aprecia la tendencia al aplicar golpes de distinto nivel, pero especialmente al medir bajo gravacemento, en cuyo caso las tensiones son muy reducidas.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que para los materiales granulares se considera que el módulo elástico desarrollado depende del de las capas sobre las que apoyan, aumentando con el de éstas hasta alcanzar su valor máximo, correspondiente a la capacidad de soporte del material. En el tramo de Orkonera, el árido reciclado se dispuso sobre una losa de hormigón, por lo que se consideró que se movilizaba el módulo máximo del material. Sin embargo, el módulo desarrollado por el material, también ante solicitaciones directas (ensayo sobre la explanada) en el tramo del Txorierri, fue el mismo, aunque la explanada de árido reciclado se sitúa sobre un relleno de suelos.

Teniendo en cuenta que los valores obtenidos para el módulo son valores mínimos al no haberse desarrollado todavía toda la capacidad portante del material (ambas auscultaciones se realizaron a menos de tres semanas tras la disposición del material), puede establecerse que la capacidad de soporte del árido reciclado es, al menos análoga a la de un material granular procedente de cantera.

4.1.2 Aplicaciones de hormigón no estructural

4.1.2.1 Objeto

El proyecto presentado en este documento pretende cubrir algunos aspectos que complementen la normativa española actual, centrándose en el estudio de la utilización de los áridos reciclados de origen mixto, para poder permitir su empleo en hormigones de aplicaciones no estructurales.

La Tabla 17 recoge los requisitos fijados por las diferentes normativas internacionales consultadas para los áridos reciclados cerámicos (Rilem, Bélgica, Reino Unido y Alemania) y mixtos (Reino Unido, Alemania y Brasil). En algunos de los límites, se observan grandes diferencias; posiblemente, debidas a los condicionantes locales de cada país (disponibilidad de recursos naturales, experiencia previa, etc.).

Debido a la gran heterogeneidad que presentan los áridos reciclados, según el análisis realizado del estudio bibliográfico (Tablas 17 y 18), se han seleccionado plantas de reciclaje de RCDs de diferentes ámbitos geográficos (en total 10 plantas): País Vasco, Andalucía, Comunidad Valenciana y Comunidad de Madrid, realizando un control periódico del árido mixto reciclado que producen (caracterizando un total de 36 muestras).

Se han estudiado las correlaciones que existen entre las diferentes propiedades evaluadas, con el fin de encontrar criterios de selección del árido reciclado en planta. Además, se ha analizado la influencia de las tecnologías de producción en las plantas de reciclaje sobre las propiedades de los áridos reciclados mixtos.

Se ha seleccionado finalmente un árido reciclado con características límite admisibles por lo que se refiere a estas propiedades, y se han estudiado hormigones fabricados con un 100% de árido reciclado para comprobar su idoneidad en aplicaciones no estructurales.

4.1.2.2 Análisis de la normativa actual sobre áridos reciclados

El Anejo nº18 de la Instrucción EHE-08 “Hormigones de uso no estructural”, establece que podrá emplearse hasta un 100% de árido grueso reciclado procedentes del machaqueo de residuos de hormigón, siempre que cumplan las especificaciones definidas para el mismo en el Anejo nº15 “Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados” (Tabla 17).

Para las propiedades no recogidas en el anexo, se mantienen las mismas especificaciones que en el árido natural (coeficiente de los Ángeles, terrones de arcilla, contenido de cloruros y contenido de sulfatos). Se observa que las limitaciones en España son mucho más restrictivas que en el resto de normativas, debido a que las especificaciones de la EHE se establecen para los áridos reciclados procedentes de hormigón.

	ÁRIDO RECICLADO CERÁMICO				ÁRIDO RECICLADO MIXTO			ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN
	Rilem (Tipo 1)	Bélgica (GBSB-I)	Reino Unido DIGEST 433 (RCA I)	Alemania (Tipo 3)	Reino Unido DIGEST 433 (RA)	Brasil (MRA)	Alemania (Tipo 2)	ESPAÑA EHE-08 ^(***)
Densidad seca kg/m ³	≥1500	>1600	-	≥1800	-	-	≥2000	-
Absorción	≤20%	<18%	-	≤20%	-	≤12%	≤15%	≤7%
Material de densidad ≤1800 kg/m ³	≤10%	≤10%	-	-	-	-	-	-
Material de densidad ≤1000 kg/m ³	≤1%	≤1%	≤1%	-	≤1%	-	-	≤1%
Contenido de metales, vidrios, materiales blandos, betún	≤5%	≤1%	≤5%	(*)	≤1%	≤3%	(*)	≤1%
Contenido de asfalto	-	-	≤5%	≤1%	≤10%	-	≤1%	≤1%
Contenido de material cerámico	≤100%	≤100%	≤100%	≥80	≤100%	-	≤30%	≤5%
Contenido de finos (<0.063 mm)	≤3%	<5%	-	<4%	≤3%	-	<4%	-
Contenido de arena (<4 mm)	≤5%	-	-	-	-	-	-	≤5%
Desclasificados inferiores (%)	-	-	-	-	-	-	-	≤10%
Contenido de sulfatos (SO ₃) ^(**)	≤1%	<1%	≤1%	-	≤1%	≤1%	-	≤ 0,8%
Contenido de cloruros	-	<0,06%	-	<0,15%	-	≤1%	<0,04	≤ 0,05%

(*) Para el árido reciclado cerámico (>80% de cerámicos), se especifica un límite de componentes minerales (vidrio etc) del 2% y un límite de contenidos no minerales (plástico, madera, papel etc) del +0,5%. Para el árido reciclado mixto (mezcla de RCDs con mas del 80% de árido de hormigón), se fija en un 20% el límite del conjunto de compuestos minerales, asfalto, hormigón ligero, cerámicos etc y en un 0,5% el contenido de materiales no minerales.

(**) Limitación al contenido de sulfatos solubles en ácido, expresado en SO₃, excepto en las especificaciones de la Rilem, que establece la limitación al contenido de sulfatos solubles en agua, expresados también en SO₃.

(***) Límite establecido para los áridos reciclados procedentes de hormigón.

Tabla 17. Especificaciones internacionales para el árido reciclado cerámico o mixto⁽¹²⁾ a ⁽¹⁷⁾.

4.1.2.3 Propiedades tecnológicas de los áridos reciclados

Para la caracterización de los áridos reciclados mixtos se ha realizado un análisis del material procedente de diez plantas de reciclaje de RCDs de diferentes ámbitos geográficos, realizando además, un análisis del tipo de procesamiento que realiza la planta, para poder evaluar su influencia en la calidad del árido reciclado producido.

En cada una de las plantas se han tomado muestras periódicas de árido reciclado mixto, tomando la fracción granulométrica que producía cada la planta pero intentando que fuese lo más próxima a la fracción 4/40 mm, fracción sobre la que se basa este estudio. Finalmente el número total de muestras ha sido de 36 (Tabla 19).

El estudio del árido reciclado mixto se ha realizado en dos fases.

En una *primera fase*, se realizó una *caracterización preliminar* de las 36 muestras de árido reciclado determinando la absorción, la composición y el contenido total de compuestos totales de azufre y sulfatos solubles.

Los ensayos considerados en esta caracterización preliminar han sido elegidos por ser considerados de especial importancia en este tipo de áridos.

- El *contenido de sulfatos* suele ser elevado en los áridos reciclados mixtos, (precedentes en su mayoría del yeso), pudiendo producir expansiones en el hormigón que pueden producir su deterioro.
- El ensayo de *composición* permite, entre otras cosas, detectar elevados porcentajes de partículas no deseadas, como el vidrio, que puede provocar reacciones álcali-sílice, o el yeso, que causa los efectos descritos en el punto anterior.
- El ensayo de *absorción* se ha seleccionado también por ofrecer un índice de calidad el árido reciclado.

En una *segunda fase*, se realizó la *caracterización completa* de 17 muestras que cumplieron los siguientes requisitos:

- Contenido de vidrio (UNE-EN 933-11) inferior al 1%, de acuerdo con el Anejo nº15 de la Instrucción EHE-08.
- Sulfatos solubles en ácido (UNE EN 1744-1) (expresado en SO_3) inferior al 1%, de acuerdo con la mayoría de las normativas internacionales consultadas sobre árido reciclado cerámico o mixto (Tabla 17).

Esta caracterización incluyó los siguientes ensayos:

- Granulometría
- Contenido de finos
- Índice de lajas
- Coeficiente de Los Ángeles
- Partículas ligeras
- Resistencia a la helada

De este estudio de los áridos reciclados, se han destacado relaciones entre las propiedades que intervienen en la primera fase. Las diferentes correlaciones permiten proponer criterios de calidad de un árido reciclado mixto para un hormigón reciclado.

El árido reciclado mixto (Figura 18) está compuesto mayoritariamente por partículas cerámicas, hormigón o áridos naturales, y en menor medida de otros materiales que se pueden considerar impurezas (plásticos, madera, vidrio, metales, etc).



Figura 18. Árido reciclado mixto.

Los áridos reciclados mixtos analizados contienen entre 2-54% de **materiales cerámicos** en su composición (Tabla 19). Otros componentes mayoritarios son los áridos procedentes de hormigón (con porcentajes de árido mas mortero entre 17-75%), y áridos naturales (entre 2-73%).

Los áridos reciclados mixtos pueden presentar una gran heterogeneidad en sus propiedades debido, principalmente, a la calidad del material que entra en la línea de reciclaje y al tipo de procesamiento en planta. Sin embargo, mediante el control de estos dos parámetros, se puede obtener un árido de calidad adecuada para ciertas aplicaciones.

Propiedades físico-químicas de los áridos reciclados mixtos

La Tabla 18 presenta las propiedades físico-químicas del árido reciclado mixto, comparando los resultados experimentales con los rangos obtenidos en el estudio bibliográfico.

Propiedades	Estado del arte	Estudio experimental
Absorción 24 horas (%)	5-15 ⁽¹⁾	2-14
Densidad de partículas saturada con superficie seca (kg/dm ³)	2,1-2,5 ⁽¹⁾	2,0-2,6
Densidad tras secado en estufa (kg/dm ³)	1,0-1,9 ⁽¹⁾	1,8-2,5
Contenido en finos (%)	-	0,5-18,0
Índice de lajas (%)	12,5-44,0 ⁽¹⁾	6,0-30,0
Coficiente de LA (%)	28-43 ⁽¹⁾	33-47

⁽¹⁾ 6 datos tomados de las referencias Refs 10-11.

⁽¹⁾ Rango de valores tomados de la Ref. 12.

Tabla 18. Rango de valores de parámetros físicos del árido reciclado mixto.

Confrontando los resultados experimentales con los valores consultados en la bibliografía, se observan rangos similares en ambos casos.

Asimismo, la Tabla 18 recopila los rangos obtenidos en distintas propiedades de las muestras tomadas de cada una de las plantas estudiadas.

La fracción fina suele presentar peor calidad que la fracción gruesa, por lo que en las normativas consultadas se suele permitir únicamente la utilización del árido grueso reciclado.

Los áridos reciclados presentan **un contenido de finos** muy variable, comprendido el 0,5% y el 18%. Según la clasificación de la norma UNE-EN 12620:03 “Áridos para hormigón”, el 85% de los áridos reciclados mixtos son de categoría f_{10} .

La **absorción** es una de las propiedades físicas del árido reciclado mixto que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural. La mayor parte de las normas internacionales establecen límites a la absorción de los áridos reciclados mixtos, si bien no hay consenso entre ellas (Tabla 16), variando entre un 12% un 20%, muy por encima del límite que establece actualmente la EHE-08 del 7% tanto para hormigones estructurales como no estructurales. La absorción de agua de los áridos reciclados mixtos analizados en este estudio varía entre un 2% y un 14% al considerar 36 muestras analizadas. Sólo el 36% de estas muestras cumplen el límite del 7% de absorción. Se debería, por lo tanto, establecer un nuevo límite más adecuado para las aplicaciones no estructurales, siempre que se garantice una calidad adecuada del hormigón, y de esta forma se permita dar salida en esta aplicación a un mayor volumen de material granular reciclado.

Además de la absorción, las normativas establecen también límites a la **densidad** seca de los áridos reciclados, entre 1500 y 1600 kg/m³ para los áridos cerámicos, y una densidad mínima de 1800 kg/m³ para los áridos mixtos (Tabla 17). Mientras que todos los resultados experimentales cumplen estos requisitos, parte de los valores recopilados en el estudio bibliográfico presentan densidades inferiores (Tabla 18).

Los áridos reciclados presentan en general una forma adecuada, con **índices de lajas** entre el 6-44% (Tabla 18). En general, cuanto mayor es el contenido de material cerámico, mayor es el contenido de lajas del árido reciclado (Tabla 18). En todos los casos, los áridos mixtos analizados (Figura 18) presentan un índice de lajas inferior al 35%, por lo que se incluyen en la categoría FI₃₅, según la clasificación de la norma UNE-EN 12620 “Áridos para hormigón”.

	Comunidad de Madrid		Andalucía		País Vasco			Comunidad Valenciana		
	Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5	Planta 6	Planta 7	Planta 8	Planta 9	Planta 10
Nº total de muestras ensayadas	3	5	3	4	2	1	2	7	6	3
Asfalto (%)	0,8-4,7	3-5	0,3-0,6	0,1-0,3	0-1	0	0-1	0-5,1	1-17	0-7
Rechazadas (1%)	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	57%	100%	66%
Rechazadas (5%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	66%	33%
Cerámicos (%)	36-48	15-30	14-20	52-53	7-33	15	2-21	13-40	7-17	39-49
Base cemento (%)	22-54	24-57	46-49	33-34	47-75	61	65-86	27-43	17-42	19-47
Áridos no ligados (%)	2-14	20-41	29-38	10-12	11-17	19	11	20-50	41-73	10-26
Arcilla (%)	3-7	0-1	0,2-0,7	0,3-0,5	0-4	4	0-2	0	0	0
Vidrio (%)	0,3-2,1	0,0-0,3	0,3-0,5	0,3-0,4	0-1	0	0-0	0-1,5	0	0,8-10
Rechazadas	67%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	43%	0%	67%
Yeso (%)	7,5-19,0	1,0-2,7	0,42-1,1	1,1-1,7	4	1	0-1	0-3	0-1	0,1-10
Otros (plástico, materia orgánica, madera, papel, etc.) (%)	0,24-2,67	0-0,4	-	-	-	-	-	-	-	-
Absorción 10 min. (%)	5,0-11,5	5,0-6,2	6,7-8,5	11,4-12,7	6,7-10,5	8,2	4,5-5,9	-	-	-
Absorción 24 horas (%)	5,3-14,4	6,9-8,8	7,4-8,8	13,2-14,3	7,3-12,2	7,8	5,2-7,3	4,7-8,8	2,1-5,5	7,3-12,5
Rechazadas (10%)	100%	0%	0%	100%	50%	0%	0%	0%	0%	67%
Rechazadas (12%)	100%	0%	0%	100%	50%	0%	0%	0%	0%	33%
Densidad seca (kg/dm ³)	1,66-1,88	2,08-2,15	2,06-2,18	1,80-1,87	1,9-2,2	2,10	2,11-2,23	2,09-2,35	2,22-2,52	1,83-2,26
Dss (kg/dm ³)	2,0-2,15	2,23-2,29	2,24-2,34	2,06-2,12	2,10-2,35	2,30	2,27-2,34	2,22-2,44	2,35-2,58	2,06-2,15
Sulfatos solubles (% SO ₃)	-	0,5-0,6	0,38-0,75	0,7-1,7	0,2-0,6	0,23	0,3-0,4	0,8-2,1	0,1-0,7	0,4-4,4
Rechazadas (0,8%)	100%	0%	0%	75%	0%	0%	0%	86%	0%	66%
Compuestos totales de azufre (% S)	-	0,26-0,5	0,2-0,35	0,35-0,76	0,6-0,7	0,76	0,5-0,6	0,5-0,9	0,1-0,7	0,4-4,4
Rechazadas (1% S)	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%
% Muestras rechazadas según los criterios anteriores	100%	0%	0%	75%	50%	0%	0%	70%	0%	70%
Nº Total de muestras ensayadas	0	3	3	4	1	1	1	1	2	1
Contenido de finos (%)	-	3,2-8,4	0,8-1,6	0,4-1,5	3,0	2,8	1,3	5,3-17,9	1,0-10,4	3,8-16,7
Índice de lajas (%)	-	13-16	11-15	20-30	6	15	8	25	10-15	15
Coeficiente de Los Ángeles (%)	-	42-47	35-36	37-38	38	33	34	38	34-35	42
Resistencia a la helada (%)	-	13-25	8	47-55	18	11	7	18	16-39	17
Partículas ligeras (%)	-	6-9,3	11	12-14	1,2	4,9	8,6	1,0	1,2-3,0	1,5

Tabla 19. Resultados experimentales de las muestras de árido reciclado mixto.

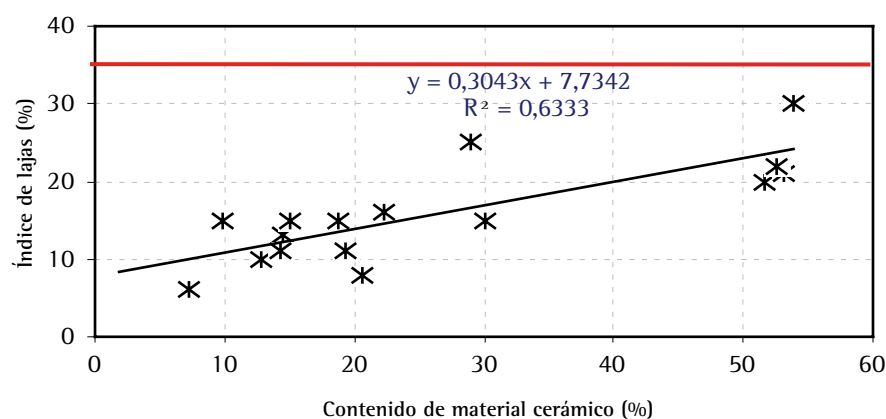


Figura 19. Relación entre el contenido de materiales cerámicos y el índice de lajas.

El **coeficiente de Los Ángeles** es superior al del árido natural, y suele variar entre 28% y 47%, cumpliendo en la mayoría de los casos el límite actual fijado en la EHE-08 para hormigones no estructurales (40%). En general, los valores más elevados corresponden a muestras con un elevado contenido de partículas con mortero, y los valores más reducidos a muestras mayoritariamente de origen cerámico. Todas las muestras se incluyen en la categoría LA_{50} (coeficiente de Los Ángeles inferior al 50%) que recoge la norma UNE-EN 12620:03 “Áridos para hormigón” (Tabla 19).

El contenido de **partículas ligeras** del árido reciclado mixto puede ser elevado, entre 1-14% (Tabla 19). Sin embargo, la mayor parte de las partículas detectadas en este ensayo corresponden a partículas de mortero ligero y partículas cerámicas con densidad inferior a 2,0, por lo que no se considera un ensayo adecuado para evaluar el contenido de partículas que pueden dar lugar a la formación de ampollas y descascarillamientos superficiales. Se aconseja su determinación a través del ensayo de composición del árido reciclado o mediante el ensayo de partículas con densidad inferior a 1,0, manteniendo el límite del 1% establecido en la EHE.



Figura 20. Partículas ligeras procedentes del árido reciclado mixto.

Los áridos reciclados mixtos no presentan un buen comportamiento frente a **ciclos hielo-deshielo**, especialmente cuando presentan un elevado contenido de material cerámico.

Otro de los requisitos establecidos para los áridos utilizados en hormigón es el contenido de sulfatos, ya que éstos pueden provocar reacciones de tipo expansivo en el hormigón. Aunque los límites actuales establecidos para áridos en hormigón (tanto estructural como no estructural) fijados en la EHE08 son: un contenido de **compuestos totales de azufre** expresados en S, inferior al 1% y un contenido de **sulfatos solubles en ácido** expresados en SO_3 , inferior al 0,8%, se propone limitar este último parámetro al 1%, equiparándolo al valor fijado por la mayoría de las normativas internacionales (Tabla 17).

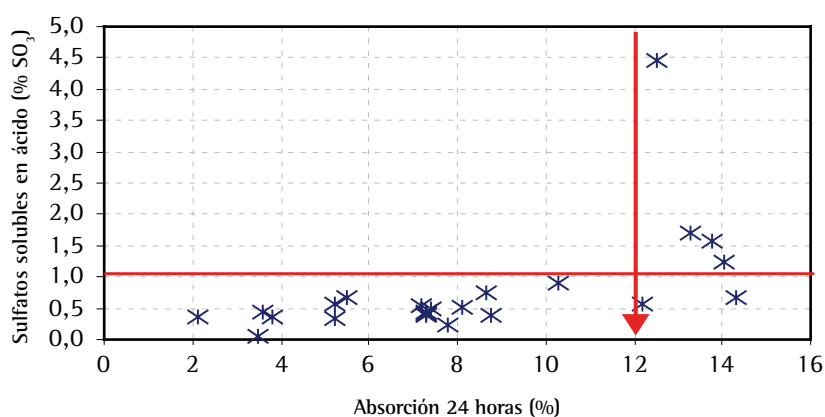


Figura 21. Relación entre la absorción y el contenido de sulfatos solubles en ácido (SO_3).

La Figura 21 relaciona el contenido de sulfatos solubles en ácido y la absorción de los áridos reciclados. A partir de esta gráfica se propone establecer un coeficiente de absorción máximo del 12%, ya que las muestras que cumplen este requisito presentan un contenido de sulfatos solubles en ácido (SO_3) inferior al 1,0%.

Estas dos propiedades, coeficiente de absorción y contenido de sulfatos, están relacionadas ya que en general, las muestras que presentan un mayor contenido de material cerámico, y por lo tanto una mayor absorción (Figura 22), son las muestras que suelen incorporar un mayor contenido de impurezas como el yeso, debido a que proceden mayoritariamente de obras de edificación.

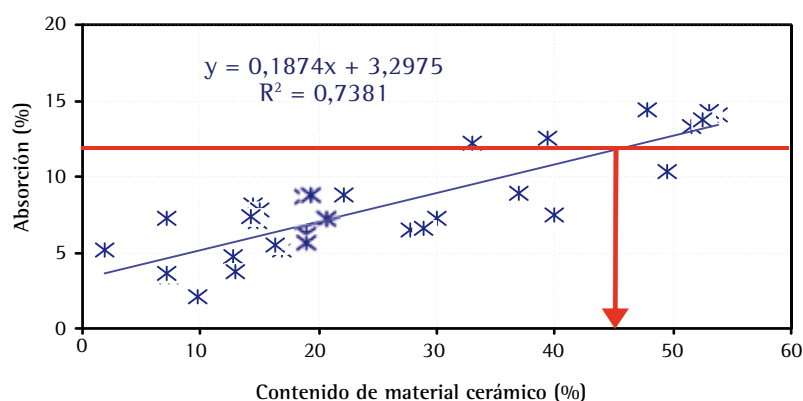


Figura 22. Relación entre la absorción y el contenido de material cerámico.

A partir de este límite, se podrían establecer valores orientativos para otros parámetros relacionados con la absorción, como el contenido de material cerámico ($<45\%$, Figura 22), la densidad saturada con superficie seca ($>2,1 \text{ kg/dm}^3$, Figura 23) o la densidad aparente de partícula secada en estufa ($>1,9 \text{ kg/dm}^3$, Figura 24).

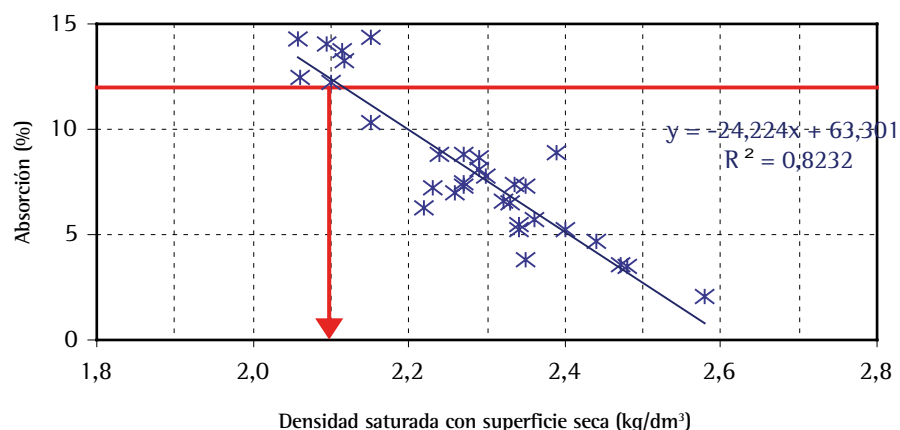


Figura 23. Relación entre la absorción y la densidad de partículas saturada con superficie seca.

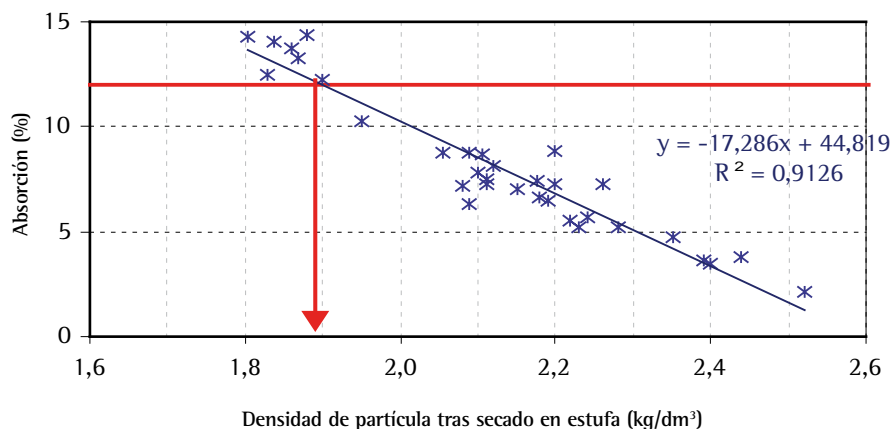


Figura 24. Relación entre la absorción y la densidad aparente de partícula secada en estufa.

Los áridos reciclados mixtos pueden contener altos porcentajes de **impurezas** como vidrio, metales, madera, yeso, tierras etc, si no se realiza un tratamiento adecuado en la planta de reciclado. Estas impurezas pueden influir negativamente en las propiedades del hormigón. No existe uniformidad en las limitaciones al contenido de impurezas de las distintas normativas, estableciendo límites entre el 1% y el 5% (Tabla 17).

Las impurezas que presentan mayores porcentajes en las muestras analizadas son el **asfalto y el yeso**, con porcentajes de hasta un 17% y un 19% respectivamente.

La actual limitación al contenido de asfalto (1%) es muy exigente para este tipo de áridos, incumpliendo este requisito un 57% de las muestras analizadas. Se recomienda, por lo tanto, aumentar este límite al 5% (valor establecido en la normativa inglesa DIGEST 433).

El contenido de yeso máximo vendrá limitado a partir de la limitación del contenido máximo de sulfatos. Sin embargo, como valor orientativo se puede establecer un contenido máximo de yeso del 2,1%, obtenido a partir de la relación estequiométrica (% de SO_3 procedente del yeso $\times 2,15 = \% \text{ yeso}$).

Por su parte, el contenido de **vidrio** ha sido inferior al 1% en el 80% de las muestras analizadas (Tabla 19).

4.1.2.4 Análisis comparativo entre las tecnologías de tratamiento de los RCDs y las características de los áridos reciclados obtenidos

La bibliografía especializada en tecnologías de tratamiento de RCD establece tres niveles de tecnología para las plantas de tratamiento. Así, niveles de tecnología baja se basan en equipos de machaqueo autónomos que constan exclusivamente de tolvas de alimentación, sistemas de trituración, separadores magnéticos y cintas transportadoras. Los equipos de nivel intermedio, o plantas semifijas, constan de equipamiento móvil en un emplazamiento fijo. Por último, niveles superiores de tecnología están concebidos para tratar residuos de entrada muy mezclados. Se trata de plantas estacionarias compuestas por algunos de los siguientes equipos: sistemas de machaqueo (de impacto o mandíbulas), cabinas de triaje y separadores neumáticos (hidrociclones y soplantes), hidráulicos (por flotación) y/o magnéticos. Más recientemente, se han incorporado novedades tecnológicas dirigidas a una mayor separación de la fracción yeso durante el proceso de tratamiento. Tal es el caso de un sistema automático de detección por infrarrojos, y posterior eliminación mediante soplado, de yeso y otras impurezas.

El estudio de la influencia del proceso de tratamiento de los RCDs sobre las características del árido reciclado mixto se fundamentó en la determinación del tipo de material de entrada procesado por cada planta, así como en un exhaustivo análisis de su proceso de tratamiento y correlación de estos datos con las características del producto final obtenido.

En función del tipo de RCD admitido para su tratamiento, se han establecido las siguientes categorías de planta:

- **Categoría 1:** Plantas que admiten RCD muy mezclado (planta 4, planta 7 y planta 10).
- **Categoría 2:** Plantas que admiten RCD mezclado pero con predominio de la fracción pétreo (planta 2, planta 5, planta 6, planta 8 y planta 9)
- **Categoría 3:** Plantas que sólo admiten RCD seleccionado (planta 3)

El análisis de la influencia de las tecnologías de tratamiento de RCD en la idoneidad de los áridos reciclados mixtos permitió identificar las claves de proceso que garantizan productos reciclados de calidad suficiente para su uso en hormigón no estructural y otras aplicaciones de construcción.

El **contenido en impurezas** presentes en los áridos reciclados mixtos decrece a medida que aumenta el número de los siguientes sistemas de eliminación dispuestos: separadores magnéticos y neumáticos, separadores por flotación y triajes manuales, tal y como se puede observar en la Figura 25. A medida que se reduce el contenido de impropios en el RCD admitido en las plantas de tratamiento, se obtienen menores contenidos en impurezas en el producto final y con menor variabilidad que la presentada por los contenidos en impurezas de las otras categorías.

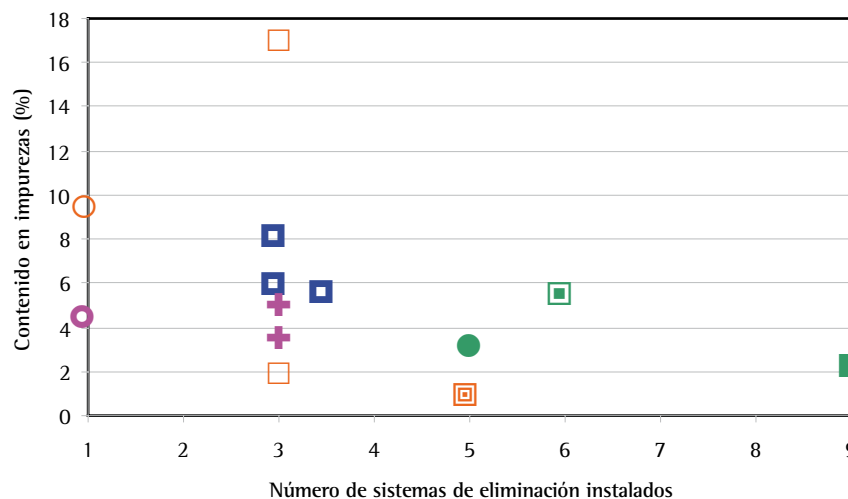


Figura 25. Relación entre nº de sistemas de separación instalados y contenido en impurezas.

El **contenido en yeso** depende del número de puntos de triaje, así como del grado de selección de RCD de entrada.

A mayor número de puntos de triaje, menores contenidos en yeso. La instalación de un sistema automático de detección por infrarrojos contribuye a garantizar porcentajes de yeso por debajo del 1%.

El **contenido en partículas ligeras** depende tanto del número de separadores neumáticos instalados, como de la diferencia de tamaños máximo y mínimo de los áridos tratados (Figura 26). A mayor número de soplantes y ciclones, y menor diferencia de tamaños en las partículas tratadas, menores contenidos de dichos improprios. Se observa que someter a separación neumática a una misma fracción dos veces (planta 6) parece menos efectivo, a igualdad del resto de condiciones, que tratar el mismo material dividido en dos fracciones y sometido cada uno a su separación neumática correspondiente.

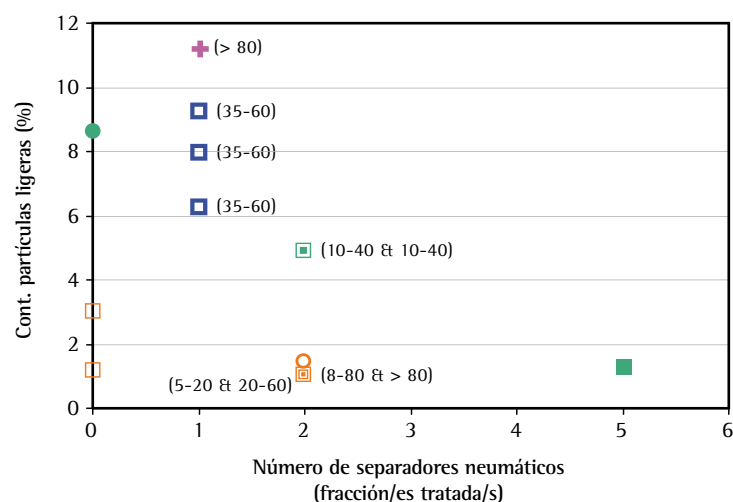


Figura 26. Contenido en partículas ligeras en función del número de separadores neumáticos instalados (y la fracción tratada).

El **índice de lajas** depende del número de equipos de machaqueo, así como del número de puntos de cribado. Cuantos más elementos de machaqueo y puntos de cribado se instalen, áridos con menores índices de laja se generan (Figura 27).

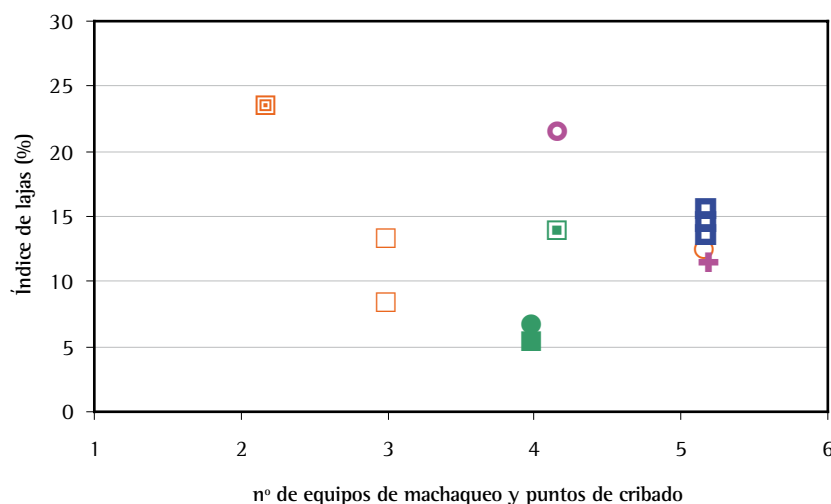


Figura 27. Influencia del número total de equipos de machaqueo más puntos de cribado en el índice de lajas del árido reciclado.

En la Tabla 19 que recoge la caracterización preliminar de las muestras de árido reciclado mixto, se advierte que cinco de las diez plantas estudiadas no cumplen los requisitos establecidos (celdas sombreadas). Realizando un adecuado sistema de control de producción, se puede obtener un material con calidad suficiente para la fabricación de hormigón no estructural, pudiendo llegar a admitir el 100% de su producción.

4.1.2.5 Estudio de dosificación

En el hormigón reciclado se pueden utilizar los mismos materiales y los mismos métodos de dosificación que habitualmente se utilizan en un hormigón convencional para aplicaciones no estructurales:

La elevada absorción de los áridos reciclados, provoca que durante el amasado, éstos absorban un elevado contenido de agua, aumentando considerablemente la consistencia del hormigón. Este hecho puede ser compensado realizando una presaturación de los áridos reciclados mixtos. La presaturación debería realizarse hasta conseguir un estado próximo al de saturación con superficie seca. En los estudios realizados en laboratorio, los áridos fueron sumergidos en agua durante 10 minutos y escurridos durante otros 10 min, consiguiendo con este procedimiento una absorción entre un 75-85% de la absorción total, según se recoge en la Figura 28.

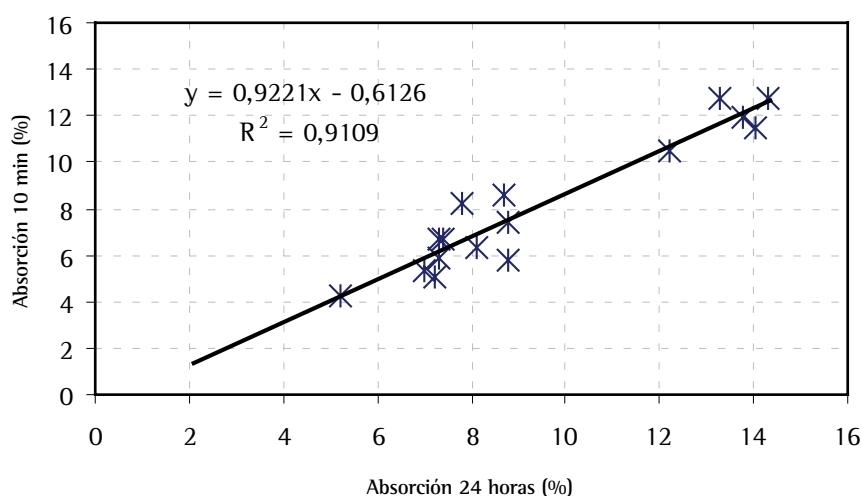


Figura 28. Relación entre la absorción a los 10 minutos y la absorción a las 24 horas.

Para el estudio del hormigón reciclado, se seleccionó una partida de árido reciclado con una absorción de 10,5% (cumpliendo los requisitos establecidos para el resto de propiedades de la Tabla 26). Se han estudiado las características de un hormigón de control (con árido natural) y un hormigón reciclado H20 (con un 100% de árido grueso reciclado de naturaleza mixta), cuyas dosificaciones se recogen en la Tabla 20.

Cuando se realiza la presaturación de los áridos, puede no ser necesario el empleo de aditivo plastificante en la dosificación del hormigón reciclado.

Dosificación por m ³	Hormigón de control (HC)	Hormigón reciclado (HR)
Agua (l)	187,5	187,5
Cemento (kg) – CEM I 42,5 R	250	250
a/c	0,75	0,75
Aditivo plastificante (kg)	1	0
Arena (0/4 mm) (kg)	866	998
Gravilla (4/8 mm) (kg)	400	0
Grava (8/32 mm) (kg)	707	0
Árido reciclado (4/32 mm) (kg)	0	730

Tabla 20. Dosificaciones del hormigón de control y hormigón reciclado.

La peor calidad de los áridos reciclados mixtos, hace que para conseguir un hormigón reciclado de la misma calidad que un hormigón convencional (con árido natural) sea necesario al incremento del contenido de cemento (pudiendo alcanzar incrementos de hasta un 20%). Este incremento puede reducirse considerablemente:

- Cuando se utilice un árido reciclado de mejor calidad.
- Cuanto menor sea la categoría resistente del hormigón que se quiera fabricar.

4.1.2.6 Propiedades del hormigón reciclado

Propiedades del hormigón fresco

La **densidad** del hormigón fresco reciclado es inferior a la del hormigón convencional debido a la menor densidad que presenta el árido reciclado. Según los estudios realizados, la densidad del hormigón reciclado puede ser aproximadamente un 10% inferior a la de un hormigón convencional.

Tal y como se apuntaba anteriormente, debido a la elevada absorción de los áridos reciclados, para obtener **consistencias** adecuadas, se deberá tener en cuenta el agua que absorberán los áridos reciclados durante el amasado, aconsejándose la presaturación de los áridos reciclados o la utilización de aditivos plastificantes.

Propiedades del hormigón endurecido

A continuación se presentan las propiedades del hormigón reciclado con un 100% de árido mixto, comparándose los resultados experimentales con los rangos que se han obtenido en el estudio bibliográfico (Tabla 21). Se han encontrado grandes diferencias entre los resultados de los diferentes estudios consultados, y a su vez con los resultados obtenidos en el estudio experimental, debidos principalmente a los siguientes factores:

- La calidad del árido reciclado mixto utilizado en el estudio experimental (10,5% de absorción y un contenido de material cerámico del 32%) es superior a la del árido reciclado cerámico (encontrado mayoritariamente en la bibliografía), que en general produce descensos mayores en la calidad del hormigón.
- La diferencia entre la resistencia a compresión de un hormigón convencional y un hormigón reciclado disminuye en hormigones de reducida resistencia.

Propiedad	HC	HR		Estado del arte Variación (%)
		Rango	Variación (%)	
Densidad (g/cm ³)	[2,36-2,37]	[2,13-2,15]	-9,7%	-3% a -15% ⁽ⁱ⁾
Resistencia compresión (N/mm ²)	[27-28]	[20-22]	-25%	-25% a -70% ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	29.310	21.218	-28%	-25% a -50% ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Retracción 7 meses (µm/m)	415,00	571,42	+38%	+20% a +80% ^(iv)
Fluencia	-	-	-	+10% a -55% ⁽ⁱⁱⁱ⁾
Penetración de agua (mm) (max y med)	59	69	+17%	-
	37	57	+54%	
Porosidad (%)	10,5	22	+110%	-

⁽ⁱ⁾ 4 valores tomados de las referencias bibliográficas Ref 22-23.

⁽ⁱⁱⁱ⁾ 3 valores tomados de las referencias bibliográficas Ref 21-22.

⁽ⁱⁱⁱ⁾ 2 valores tomados de las referencias bibliográficas Ref 24-25.

^(iv) 9 valores tomados de las referencias bibliográficas Ref 20-23-26-27.

Tabla 21. Caracterización del hormigón reciclado y comparación con rangos del estudio bibliográfico.

La **densidad** del hormigón fabricado con árido grueso reciclado es inferior a la de un hormigón convencional debido a la menor densidad de los áridos reciclados. Los descensos respecto a un hormigón convencional suelen variar entre un 3% y un 15%, obteniéndose en el estudio experimental un descenso medio del 10%.

Como orden de magnitud, la **resistencia a compresión** de un hormigón con árido reciclado mixto suele estar comprendida entre 12 y 30 N/mm². Para un contenido del 100% de árido reciclado cerámico, se pueden obtener descensos en la resistencia a compresión de hasta un 70%. En el caso de áridos mixtos (estudio experimental) los descensos se sitúan entorno al 25% respecto a un hormigón convencional de la misma relación a/c.

Se puede, por lo tanto, conseguir hormigones de categoría resistente 15 N/mm², según especifica la Instrucción EHE-08 para hormigones no estructurales empleando un 100% de árido reciclado.

El **módulo de elasticidad** del hormigón reciclado presenta una reducción respecto al del hormigón de control similar a la obtenida en la resistencia a compresión, de 28%. Al igual que sucedía en la resistencia, este descenso se sitúa próximo al límite inferior del rango encontrado en la bibliografía (25-50%). Partiendo de la fórmula incluida en la EHE que relaciona la resistencia a compresión con el módulo de elasticidad $E = 8500 \cdot \alpha \cdot f_{cm}^{1/3}$, el coeficiente α que se obtiene es de 0,8. Este valor es ligeramente inferior al que recoge la EHE para los áridos naturales (0,9).

La **retracción** es una de las propiedades del hormigón reciclado donde se ha obtenido más dispersión de resultados, situándose los incrementos habituales entre un 20% y un 80%.

Según el estudio experimental realizado, a los 7 meses de ensayo de retracción, la retracción del hormigón reciclado resulta ser un 40% superior a la del hormigón convencional. Sin embargo, la retracción obtenida en ambos casos es inferior a la que estima la EHE para un hormigón de su resistencia a compresión (Figura 29). Por lo tanto, aunque los valores son más elevados que los del hormigón de control, podrían considerarse como adecuados, al menos para estas edades. Según la tendencia encontrada, es previsible que a edades mayores, la retracción del hormigón reciclado sea superior. Esto hace necesario que para las aplicaciones de hormigón en las que sea esta propiedad importante (especialmente en grandes superficies de hormigonado en las que la fisuración pueda afectar negativamente a la funcionalidad de la obra), se tomen medidas para evitar una fisuración excesiva del hormigón, recomendándose reducir el distanciamiento de las juntas de hormigonado cuando éstas sean necesarias.

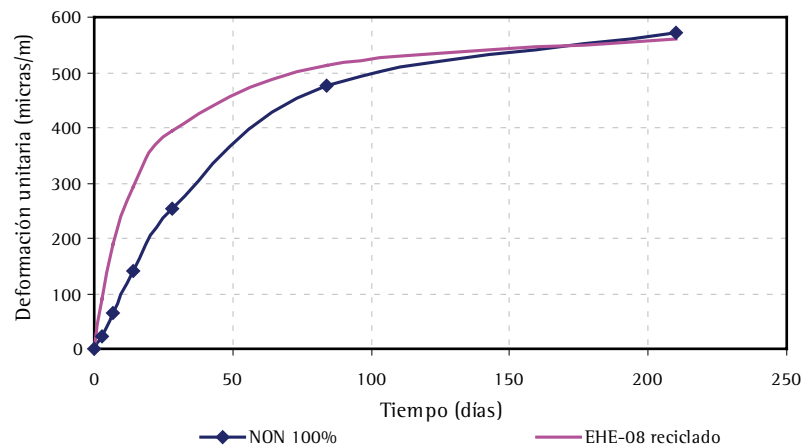


Figura 29. Retracción del hormigón reciclado.

La **fluencia** de un hormigón con un 100% de árido reciclado es otro factor desfavorable, llegando a alcanzar incrementos de hasta el 55% respecto al hormigón de referencia correspondiente (Tabla 5). Este factor, sin embargo no es importante para los hormigones de aplicaciones no estructurales.

Durabilidad del hormigón reciclado

A continuación se resumen algunas conclusiones obtenidas de los estudios bibliográficos consultados, consideradas principalmente para áridos reciclados cerámicos:

Debido a la alta **porosidad** del árido reciclado, el hormigón reciclado tiene una elevada capacidad para absorber agua. La bibliografía consultada es muy escasa respecto a estos aspectos pero se ha contemplado en estudios puntuales un incremento del 50% de la penetración de agua o una absorción de agua entre dos y tres veces superior, del hormigón reciclado respecto al hormigón convencional.

- La **velocidad de carbonatación** del hormigón con árido reciclado cerámico es superior a la de un hormigón convencional.
- La **resistencia a las heladas** del hormigón con material cerámico triturado se considera inadecuada.
- El hormigón fabricado con áridos reciclados cerámicos presenta una buena **resistencia al fuego** si se conserva convenientemente seco.

Los estudios experimentales realizados para complementar la información disponible, se han centrado en los siguientes ensayos:

- Los hormigones fabricados con árido reciclado mixto, presentan una mayor porosidad, y como consecuencia una mayor **profundidad de penetración de agua**, que en el caso de utilizar áridos naturales con las mismas dosificaciones. Debido a las bajas cantidades de cemento utilizadas, no se podrían utilizar estos hormigones en los ambientes definidos en el artículo 37.7.7 de la EHE-08.
- En cuanto a la **resistencia a los sulfatos**, se puede concluir que los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado se comportan ligeramente peor que el hormigón convencional; no obstante, su comportamiento general no es tan diferenciado como para concluir que el árido reciclado analizado no resista la acción de sulfatos.

4.2. Consideraciones medioambientales sobre el uso de áridos reciclados mixtos

4.2.1 Análisis del potencial de lixiviación de los áridos reciclados mixtos

El estudio de lixiviación tuvo como finalidad evaluar el impacto ambiental derivado del empleo de los áridos reciclados mixtos como material granular en aplicaciones en contacto con el terreno (ampliando así el alcance original del estudio).

Para ello se llevaron a cabo estudios preliminares de lixiviación en columna (según norma NEN7373). Se analizó el comportamiento de Sb, As, Ba, Br, Cu, Cr, Sn, F, Mo, Pb, SO₄ y V. Los resultados de lixiviación se modelizaron de acuerdo a la metodología descrita en el Building Decree holandés para la evaluación de aplicaciones de residuos en contacto con el terreno.

Los valores de inmisión calculados para los áridos reciclados mixtos mostraban algunos parámetros críticos para su empleo en aplicaciones no ligadas: **molibdeno, sulfatos, bromuros**. Algunas normativas más avanzadas, como la holandesa, ya han identificado bario, fluoruros, sulfatos y vanadio como parámetros críticos y han revisado los valores de aceptación con objeto de favorecer su aplicación como materiales granulares.

La composición de los áridos y los resultados de la lixiviación muestran que parece haber una clara correlación entre el porcentaje de material cerámico en la composición del árido y su riesgo ambiental, aumentando los valores de inmisión (y superando los valores límite) en los áridos con alto porcentaje de cerámicos.

4.2.2 Áridos reciclados en aplicaciones granulares en contacto con el terreno

La caracterización del árido empleado en el tramo de prueba de la Orkonera (Apartado 4.1.1.5. *Tramos de prueba*) desde el punto de vista medioambiental (potencial emisión de contaminantes) consistió en un ensayo de lixiviación EN-12457-2. Este ensayo se realizó tanto sobre el propio material de relleno como sobre la grava drenante para descartar posibles aportes adicionales de esta última (ver resultados en la Tabla 22). Los parámetros analizados se diseñaron sobre la base de estudios previos relativos a la lixiviación de áridos reciclados, abordando aquellos potencialmente peligrosos.

		Grava	Árido
Sb	mg/Kg	< 0,050	< 0,050
Br	mg/Kg	< 0,50	< 0,50
Cu	mg/Kg	< 0,020	0,084
Cr	mg/Kg	< 0,020	0,10
Mo	mg/Kg	< 0,050	0,080
SO ₄	mg/Kg	290	1500
V	mg/Kg	0,050	1,2

Tabla 22. Resultados del ensayo de lixiviación (EN-12457-2) para los materiales colocados en el tramo de prueba: árido y grava.

A partir de estos resultados se realizó un estudio de la lixiviación a largo plazo¹ (modelización) como criterio para identificar los parámetros potencialmente peligrosos asociados a este uso del material. La modelización revela que para el uso establecido en el tramo de prueba los componentes que podrían resultar peligrosos son **sulfatos, molibdeno y vanadio**, que han sido los parámetros que posteriormente se han monitorizado en el tramo.

¹ De acuerdo a la metodología descrita en el Building Decree holandés.



Figura 30. Tramo de prueba de la Orkonera.

Para llevar a cabo un análisis detallado de la lixiviación en el tramo se ha mantenido un seguimiento de las precipitaciones en la zona a través de la estación meteorológica de La Arboleda (perteneciente a la Agencia Vasca de Meteorología), muy próxima al emplazamiento de la experiencia. Asimismo, y al objeto de inducir los procesos de lixiviación y reducir los tiempos de la experiencia se efectuó un regado controlado del tramo a modo de “lluvia artificial”. El control de la precipitación total sobre el tramo junto con el de los volúmenes infiltrados permitió realizar un estudio tanto de la lixiviación como de la infiltración/permeabilidad del material.

El estudio de la lixiviación en el tramo corresponde a un período de 3 meses aproximadamente durante los cuales se han registrado las precipitaciones y volúmenes de infiltración recogidos en la Tabla 23.

		2 días	8 días	14 días	30 días	37 días	46 días	53 días	93 días	...
Precipitación*	L	6000	4814	994	8814	12275	2359	20027	2031	...
Precipitación acumulada	L	6000	10814	11808	20623	32898	35257	55285	57316	...
Infiltración	L	250	250	250	180	50	250	1000	75	...
Infiltración acumulada	L	250	500	750	930	980	1230	2230	2305	...
% Infiltración	%	4,17	4,62	6,35	4,51	2,98	3,49	4,03	4,02	...
L/S	L/Kg	0,0021	0,0042	0,0063	0,0078	0,0082	0,0103	0,0186	0,0192	...

* Los valores de precipitación corresponden a la suma de la precipitación natural más la artificial (o regado).

Tabla 23. Evolución temporal de la precipitación y la infiltración en el tramo de prueba. Cálculo de la relación líquido/sólido (L/S).

Para el cálculo de la infiltración se ha trabajado con los valores de precipitación e infiltración acumulado de cara a disponer de un valor promediado a lo largo de toda la experiencia. Según estas medidas los valores de infiltración se sitúan en torno al 4% de volumen infiltrado sobre el volumen total precipitado. Esta infiltración implica un coeficiente de permeabilidad $K = 2,8 \cdot 10^{-6}$ m/s, lo cual se corresponde con un material muy poco permeable². En este sentido, el potencial de lixiviación y, por tanto, las tasas de liberación de contaminantes en el tiempo hacia el medio que soporta el material (el suelo subyacente en este caso) se ve altamente reducido y minimiza el potencial riesgo asociado. En cualquier caso, esta afirmación se formula exclusivamente atendiendo a la infiltración y queda condicionada a las concentraciones de lixiviación, evaluadas a continuación.

En cuanto al seguimiento de la lixiviación se midieron las siguientes concentraciones en las sucesivas muestras recogidas.

		M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
L/S	L/Kg	0,0021	0,0042	0,0063	0,0078	0,0082	0,0103	0,0186	0,0192
Sulfato	mg/L	1600	1300	1600	1200	1100	1100	1100	1200
Molibdeno (Mo)	µg/L	110	160	170	140	110	130	130	110
Vanadio (V)	µg/L	1200	1000	1100	850	780	740	850	610

Tabla 24. Valores de lixiviación del tramo de prueba.

Estos valores se representan gráficamente a continuación como lixiviación acumulada (mg/Kg ó µg/Kg) en función de la relación líquido:sólido, L/S (L/Kg).

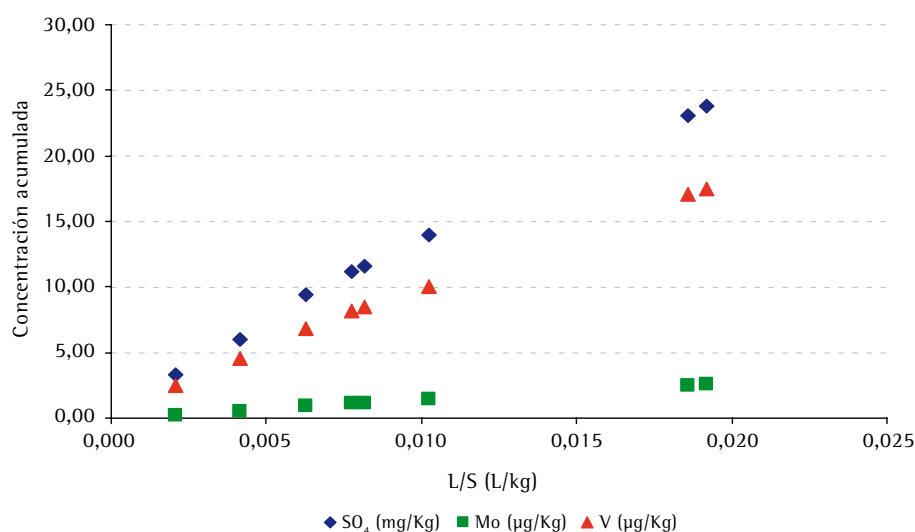


Figura 31. Lixiviación acumulada del tramo de prueba: SO₄, Mo y V.

Como se aprecia, los tres parámetros muestran tendencias claramente lineales. Ello puede asociarse a los procesos de lavado del material (*wash-off*) que ocurren en las primeras fases de lixiviación de un material.

La baja permeabilidad del material supone unos volúmenes de infiltración muy reducidos a lo largo del tiempo y, por lo tanto, también unas bajas relaciones líquido:sólido (L/Kg). Este hecho provoca que las predicciones a largo plazo, o lo que es lo mismo, a altas relaciones L/S³, lleven asociadas extrapolaciones de las concentraciones con incertidumbres muy altas. Los procesos de lixiviación de materiales están regidos por diferentes mecanismos físico-químicos

² U.S. Soil Conservation Service.

³ En este caso las propiedades del árido en un entorno pluviométrico como el de la CAPV indicarían que una lixiviación a 100 años se correspondería con una relación L/S = 3,9 L/Kg aproximadamente.

que se dan secuencialmente. Es habitual que en primer lugar se den procesos de lavado (*wash-off*) del material y posteriormente predominen otros procesos, como disolución, desorción o difusión, hasta que finalmente ocurra un “agotamiento”. A partir de dicho momento, la lixiviación no resulta significativa. Así, la extrapolación a partir de una tendencia lineal en lugar de una tendencia logarítmica (que suele ser la habitual) puede conllevar una sobreestimación de la lixiviación.

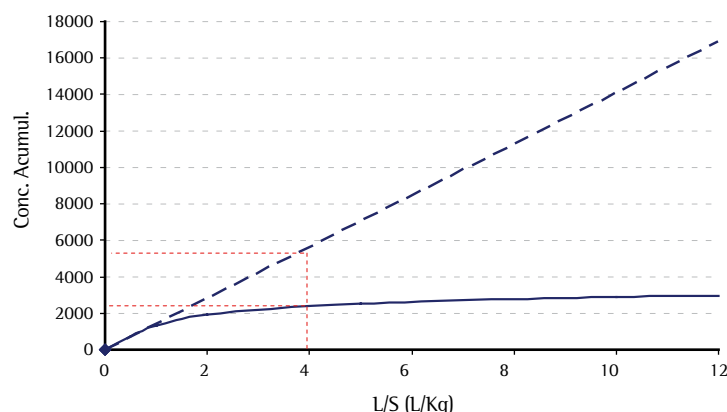


Figura 32. Tendencias de lixiviación acumulada: lineal (a) y logarítmica (b).

La experiencia se mantiene en activo de tal modo que a lo largo de la duración de la misma se irá disponiendo de una tendencia más amplia y detallada que permita extrapolar el comportamiento de los componentes frente a la lixiviación con menor grado de incertidumbre.

4.2.3 Lixiviación del hormigón reciclado

El potencial de lixiviación de los áridos reciclados mixtos incorporados en una matriz cementicia, tal es el caso de la aplicación de hormigón no estructural, se gobierna mayoritariamente mediante **mecanismos de difusión**.

Los ensayos de lixiviación en tanque (lixiviación por difusión), según norma NEN7375, han mostrado que la fabricación del hormigón **estabiliza los componentes contaminantes** asociados a los áridos reciclados, **reduciendo sus tasas de movilización** muy significativamente. Como se aprecia en la tabla, los valores de inmisión a largo plazo se sitúan muy por debajo de los valores máximos aceptables para le escenario de estudio.

	$I_{100 \text{ años}}$ (mg/m ²)	$I_{\text{máx corregida}}$ (mg/m ²)
Cr	1,37	795
Br	8,93	1.408
SO ₄	2.361	295.097
V	6,8	1.020
Mo	0,11	15

Tabla 25. Comparativa de Inmisión e Inmisión máxima aceptable.

La modelización de los valores de inmisión de los parámetros críticos muestra que se hallan muy por debajo de los límites de inmisión aceptables de acuerdo al modelo de impacto considerado y, por lo tanto, **se valida ambientalmente la utilización de áridos mixtos en la fabricación de hormigones** para aplicaciones en contacto con el terreno.

4.3. Conclusiones

4.3.1 Recomendaciones para las plantas de reciclado de escombros

- La *separación en origen* y un adecuado *control en la recepción* de los materiales en planta son dos aspectos fundamentales para poder producir un árido reciclado mixto de calidad adecuada para su utilización en hormigón.
- La incorporación de materiales no deseados (vidrio, metales, materiales ligeros, etc) hace necesario que la planta de reciclado incluya, además de los mecanismos habituales de trituración, sistemas de separación magnética y de separación de materiales ligeros (por ejemplo ciclón o soplador).
- El contenido de sulfatos de los áridos reciclados (mayoritariamente provenientes del yeso) es una de las propiedades críticas del árido reciclado mixto. En primer lugar, se recomienda a la planta acopiar por separado partidas que incluyan un elevado contenido de placas de yeso. Además, mediante la eliminación de la fracción más fina (menor de 4 mm) y la incorporación de sistemas de separación de materiales ligeros se puede reducir también su contenido.

4.3.2 Parámetros técnicos

4.3.2.1 Aplicaciones no ligadas para firmes de carretera

De la investigación prenORMATIVA relativa a la utilización de áridos reciclados mixtos en aplicaciones no ligadas de firmes de carreteras, se infieren las siguientes conclusiones:

- La fracción cerámica parece gobernar el desgaste del árido reciclado mixto. La generación de mayor cantidad de finos cerámicos constituye un efecto favorable en el proceso de consolidación del material granular, puesto que las partículas finas de naturaleza cerámica inducen, en presencia de agua, reacciones puzolánicas con el hidróxido cálcico del hormigón.
- El árido reciclado mixto manifiesta ganancia de capacidad portante, medida a través de su índice CBR, como consecuencia de reacciones hidráulicas y/o puzolánicas entre las diferentes fases minerales constitutivas de este tipo de material granular. El índice CBR a 14 días resulta ser entre un 20% y 30% superior al obtenido a 4 días para las muestras de árido reciclado mixto. Asimismo, el índice CBR a 28 días resulta ser superior al 50% al obtenido a 4 días.
- Los áridos reciclados resultan ser no plásticos al no mezclar el tratamiento de escombros y tierras de excavación.
- Con relación a la determinación de materia orgánica, los ensayos de pérdida por calcinación a 500°C y oxidación mediante permanganato potásico resultan ser poco selectivos, y por ende, inapropiados a la hora de valorar el contenido de impurezas orgánicas tales como madera, plástico, cartón o papel. A tal efecto, el ensayo de componentes regulado por la norma EN 933-11 se antoja más efectivo.
- A partir del ensayo de sulfatos solubles en agua se puede regular el contenido de compuestos de azufre total, contenido en yeso y sales solubles, sobre la base de la alta correlación existente entre los diferentes parámetros.
- En este sentido, se pueden establecer umbrales máximos permitidos de sulfatos solubles en agua en torno al 0,4% para aquellas aplicaciones de mayor compromiso estructural.

A tenor de los resultados obtenidos en los tramos de prueba, se pueden establecer las siguientes conclusiones generales relativas al uso de árido reciclado mixto en aplicaciones no ligadas:

- El proceso de compactación del árido reciclado se lleva a cabo de manera adecuada, obteniéndose las densidades elevadas (entre el 98 y el 100% de la densidad de referencia) con un número de pasadas reducido (3 - 5 pasadas dobles).
- La alta absorción del árido reciclado requiere una elevada humedad de compactación, lo que exige una humectación bastante intensa en obra. En los casos en que el material servido desde la planta de reciclado está más húmedo, este problema se reduce (o incluso desaparece).

- La capacidad de soporte alcanzada por el árido reciclado resulta adecuada para una explanada de carretera. Los valores de módulo de compresibilidad E_{v2} y la relación k obtenidos en los ensayos de carga con placa establecen que se trata de una explanada de categoría E2.
- El estudio de las deflexiones por deflectómetro de impacto y su análisis por el procedimiento del cálculo inverso han establecido que el material presenta un módulo dinámico del mismo orden a la del material todo uno de cantera, aunque con módulos ligeramente inferiores (aproximadamente el 10% inferior).
- Los módulos dinámicos de respuesta estructural conjunta ante solicitaciones aplicadas sobre la gravacemiento y sobre la explanada, son semejantes para los tramos con árido de cantera y con árido reciclado.
- El módulo dinámico del árido reciclado tiene una marcada no-linealidad, del mismo tipo que la de los suelos; es decir que aumenta el módulo al disminuir las tensiones que recibe. Esta tendencia se aprecia al aplicar golpes de distinto nivel, pero especialmente al medir bajo gravacemiento, en cuyo caso las tensiones son muy reducidas.
- En las pruebas realizadas el árido reciclado desarrolla un módulo de en torno a 325 MPa ante solicitaciones directas; mientras que ante un nivel de carga más reducido (por encontrarse bajo la capa de gravacemiento, por ejemplo), el módulo desarrollado se situó en torno 1275 MPa).

4.3.2.2 Recomendaciones para la utilización de árido reciclado mixto en hormigón no estructural

Especificaciones del árido reciclado mixto

- Se recomienda el empleo de árido grueso reciclado (mayor de 4 mm).
- Se recomiendan los siguientes requisitos para los áridos reciclados:

	Requisitos
Absorción a 24 horas	$\leq 12\%$
Contenido de sulfatos solubles en ácido (SO_3)	$\leq 1\%$
Contenido de materiales no deseados (plástico, materia orgánica, madera, papel, etc)*	$\leq 1\%$
Contenido de vidrio (%)	$\leq 1\%$
Contenido de asfalto (%)	$\leq 5\%$
Coefficiente de Los Ángeles (%)	$\leq 50\%$
Índice de lajas (%)	$\leq 35\%$

* Determinado en el ensayo de composición de acuerdo a la UNE EN 933-11 o de partículas de densidad inferior a 1,0.

Tabla 26 Especificaciones para los áridos reciclados mixtos.

- Aunque éstos son los requisitos propuestos, el control de calidad del árido reciclado se podría hacer a través de otros parámetros, que según el estudio realizado se relacionan con la absorción del árido reciclado y el contenido de compuestos de azufre. Estos parámetros se consideran únicamente orientativos, no limitativos.

	Parámetros Orientativos
Contenido de material cerámico	$\leq 45\%$
Densidad saturada con superficie seca	$\geq 2,10 \text{ g/dm}^3$
Densidad de partícula tras secado en estufa	$\geq 1,90 \text{ g/dm}^3$
Absorción a los 10 min.	$\leq 10\%$
Contenido de yeso	$\leq 2,1\%$

Tabla 27. Recomendaciones adicionales para los áridos reciclados mixtos.

- Se puede emplear hasta un 100% de árido grueso mixto reciclado.
- Dada la elevada absorción que presenta el árido reciclado, para evitar que durante el proceso de amasado una cierta cantidad de agua quede retenida por los áridos, generando un aumento de la consistencia y una reducción de la relación agua/cemento efectiva, es conveniente emplear los áridos presaturados hasta una condición de saturación con superficie seca.

Propiedades del hormigón reciclado

- Con una dosificación adecuada, se pueden obtener hormigones de categoría resistente H15, con un 100% de árido reciclado (con hasta un 12% de absorción).
- La retracción del hormigón reciclado puede alcanzar valores elevados. Esto hace necesario que para aplicaciones en la que la retracción sea una propiedad importante (especialmente grandes superficies de hormigonado) se tomen medidas para evitar una fisuración excesiva del hormigón.
- La durabilidad de este tipo de hormigones es muy inferior a la de un hormigón convencional: su elevada porosidad produce unos valores muy altos en el ensayo de profundidad de penetración de agua, una elevada velocidad de carbonatación y una elevada penetrabilidad de cloruros. La resistencia a los sulfatos ha resultado ser adecuada, aunque ligeramente inferior al hormigón convencional.
- Por todo esto, se recomienda limitar el uso de hormigones reciclados con áridos mixtos a hormigones en masa. En el caso de utilizar algún tipo de armadura, se debería limitar su uso a una clase de exposición I (no agresiva).
- Como conclusión final, se propone una modificación en los requisitos que actualmente establece la EHE-08 en su anejo N°15 para los áridos reciclados, permitiendo la utilización de áridos reciclados mixtos con una absorción de hasta un 12% y un contenido de asfalto inferior al 5%, eliminando la especificación del 5% de material cerámico.

4.3.3 Parámetros ambientales

4.3.3.1 Aplicaciones no ligadas para firmes de carretera – Estudio ambiental de muestras de áridos reciclados

Principio metodológico

La movilización de contaminantes inorgánicos de material valorizado en aplicaciones como material granular tiene lugar de manera preferente por percolación. Por tanto, para calcular la carga contaminante que este material emite al suelo y, posteriormente, la cantidad de contaminante que llega al mismo (I_{max}) o el incremento de la carga contaminante en el medio receptor, se aplica el llamado test de lixiviación en columna y la metodología de modelización relacionada con el mismo y que se presentan a continuación.

La magnitud de la lixiviación de un material y, por tanto, la inmisión de contaminantes debida a su presencia, depende de la disponibilidad de los contaminantes y el volumen y características del agente lixivante. En el tipo de aplicaciones consideradas, el agente que origina la lixiviación será el agua de lluvia, por lo que la infiltración en el suelo que esté por encima del material valorizado una vez aplicado es una entrada clave al modelo de cálculo de la inmisión debida al material.

Los valores de inmisión (I_{max}) se definen de forma que garanticen la protección de la multifuncionalidad de los medios receptores. Esta definición implica, para el caso de aplicaciones sobre el suelo o en el subsuelo, la permisividad de un incremento menor del 1% en la concentración de diversos contaminantes respecto a los valores de referencia establecidos para un suelo natural, para un periodo de aplicación de 100 años y promediado para una capa de suelo homogéneo de 1m de espesor. Se asume que estos valores límite implican la protección de la calidad de las aguas subterráneas. Sólo en el caso de los cloruros y los sulfatos se establece un valor de inmisión máxima permisible basado en el impacto sobre la calidad de las aguas subterráneas. En este caso se considera como valor de inmisión máximo permisible aquel que supone un incremento menor del 100% en la concentración de referencia para las aguas subterráneas para el primer año de aplicación y dependerá de la permeabilidad del suelo de la zona o de las condiciones de aislamiento de la aplicación.

Los valores de infiltración aplicables se definen en función de la permeabilidad del suelo del área donde está planificado ubicar el material valorizado y las condiciones de la aplicación, pudiendo seleccionar la opción más realista de las siguientes:

Escenario		Infiltración (mm/año)
En contacto con el suelo	Permeabilidad 60%	390
	Permeabilidad 40%	260
	Permeabilidad 15%	650
Aislado		6

Tabla 28.

La determinación de la emisión se realiza mediante los test de lixiviación en columna ya mencionados. El mecanismo operativo de los ensayos de columna consiste en hacer circular el lixiviante mediante una bomba peristáltica a través de una columna vertical rellena con el material a ensayar. De esta manera se simula la percolación real e un suleo finado un caudal de lixiviación similar al de las condiciones naturales. Los lixiviados se recogen a determinados intervalos a los largo el ensayo y se analizan para establecer su contenido en compuestos contaminantes, es decir, la emisión (*Emat*).

En este caso el protocolo a seguir es el establecido en la norma NEN7373, que define las recogidas de lixiviado a las siguientes relaciones líquido/sólido (L/S, l/kg) L/S=0,1; L/S=0,2; L/S=0,5; L/S=1; L/S=2; L/S=5; L/S=10, lo que supone una duración aproximada del ensayo de 21 días. Este ensayo se llevará a cabo sobre tres réplicas de cada una de las muestras del material a analizar

Descripción y caracterización de las muestras

Las muestras objeto de análisis hacen un total de cuatro:

- **Planta de Gardelegi:** 1 muestra fruto de la combinación de dos submuestras.
- **Planta de BTB:** 1 muestra fruto de la combinación de dos submuestras.
- **Planta de VOLBAS:** Dos muestras disjuntas.

Comparación de los valores obtenidos en matriz sólida con los Valores Indicativos de Evaluación-B (VIE-B)

Es un estándar que indica la concentración de una sustancia en el suelo por encima de la cual el suelo está alterado y existe la posibilidad de que este contaminado, es decir, que puede existir un riesgo inaceptable para la salud humana y para el medio ambiente. Los VIE-B se encuentran definidos para los distintos usos del suelo.

En las tablas adjuntas se puede observar la comparación de los valores obtenidos en matriz sólida en comparación con los VIE-B:

Resultados laboratorio: Ensayo matriz sólida

Características		VIE-B uso industrial	Volbas 1	Volbas 2	Gardelegi	BTB
			VF- 1.1	VF-1.2	GF-1.1 + GF-1.2	BF-1.1 + BF-1.2
Materia seca	% (m/m)		52.1	88.7	93.5	79.8
COT	g/kg ms		35	18	1.7	26
Carbonatos (CaCO ₃)	% (m/m) ms		61.6	49.6	47.1	51.4
Elementos						
Arsénico (As)	mg/kg ms	200	6	7	4	8
Bario (Ba)	mg/kg ms		99	100	73	99
Berilio (Be)	mg/kg ms		<1	<1	<1	<1
Cadmio (Cd)	mg/kg ms	50	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3

Características		VIE-B uso industrial	Volbas 1	Volbas 2	Gardelegí	BTB
			VF- 1.1	VF-1.2	GF-1.1 + GF-1.2	BF-1.1 + BF-1.2
Cobalto (Co)	mg/kg ms		5	4	3	4
Cromo (Cr)	mg/kg ms	550	30	20	14	16
Cobre (Cu)	mg/kg ms	3	50	51	11	55
Mercurio (Hg)	mg/kg ms	40	<0.05	0.10	<0.05	0.06
Molibdeno (Mo)	mg/kg ms	750	3.2	2.2	1.2	2.7
Níquel (Ni)	mg/kg ms	800	20	17	11	14
Plomo (Pb)	mg/kg ms	1000	27	69	13	56
Antimonio (Sb)	mg kg/ms		<3	<3	<3	<3
Selenio (Se)	mg/kg ms		<5	<5	<5	<5
Estaño (Sn)	mg/kg ms		<5	<5	<5	<5
Talio (Tl)	mg/kg ms		<5	<5	<5	<5
Vanadio (V)	mg/kg ms		33	18	27	22
Zinc (Zn)	mg/kg ms		110	140	46	210
Hidrocarburos Monoaromáticos						
Benceno	mg/kg ms	10	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050
Tolueno	mg/kg ms	200	0.14	0.14	<0.050	0.081
Etilbenceno	mg/kg ms	100	0.086	0.056	<0.050	0.095
o-Xileno	mg/kg ms		<0.050	<0.050	<0.050	0.11
m,p-Xileno	mg/kg ms		0.23	0.16	<0.050	0.30
Xilenos (sum)	mg/kg ms	200	0.23	0.16	--	0.41
BTEX (suma)	mg/kg ms		0.46	0.35	--	0.58
Bifenilos Policlorados						
PCB 28	mg/kg ms		0,003	0.002	0,003	0,083
PCB 52	mg/kg ms		0,004	0.005	0,001	0,026
PCB 101	mg/kg ms		0,006	0.007	0,002	0,011
PCB 118	mg/kg ms		0,003	0.007	<0.001	0,006
PCB 138	mg/kg ms		0,01	0.007	0,005	0,011
PCB 153	mg/kg ms		0,009	0.007	0,005	0,011
PCB 180	mg/kg ms		0,008	0.005	0,004	0,008
PCB (6) (suma)	mg/kg ms		0,04	0.035	0,02	0,16
PCB (7) (suma)	mg/kg ms	0,8	0,043	0.042	0,02	0,15
TPH						
TPH C10-C16	mg/kg ms		<24	<12	<12	93
TPH C16-C22	mg/kg ms		80	17	22	170
TPH C22-C30	mg/kg ms		310	120	150	340
TPH C30-C40	mg/kg ms		360	110	290	360
TPH Suma	mg/kg ms	50	750	240	460	950
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, HAP						
Naftaleno	mg/kg ms	100	0.14	0.14	0.16	24
Acenaftileno	mg/kg ms			<0.050	<0.050	<0.050
Acenafteno	mg/kg ms	100	0.099	0.061	0.40	2.4
Fluoreno	mg/kg ms	100	0.13	0.063	0.50	2.1
Fenantreno	mg/kg ms		0.63	0.41	1.9	13
Antraceno	mg/kg ms	700	0.11	0.081	0.45	2.0
Fluoranteno	mg/kg ms	80	0.86	0.46	2.5	23
Pireno	mg/kg ms	100	0.65	0.27	1.4	18
Benzo(a)antraceno	mg/kg ms	20	0.32	0.19	0.82	0.34
Criseno	mg/kg ms	100	0.29	0.19	0.74	13

Características		VIE-B uso industrial	Volbas 1	Volbas 2	Gardelegi	BTB
			VF- 1.1	VF-1.2	GF-1.1 + GF-1.2	BF-1.1 + BF-1.2
Benzo(b)fluoranteno	mg/kg ms	20	0.33	0.22	0.90	10
Benzo(k)fluoranteno	mg/kg ms	100	0.14	0.094	0.41	5.5
Benzo(a)pireno	mg/kg ms	2	0.34	0.19	0.95	13
Dibenzo(ah)antraceno	mg/kg ms	3	0.064	0.023	0.10	0.64
Benzo(ghi)perileno	mg/kg ms		0.21	0.14	0.58	6.7
Indeno(123cd)pireno	mg/kg ms		0.26	0.17	0.78	9.4
HAP 16 EPA (suma)	mg/kg ms		4.6	2.7	13	140
HAP 10 VROM (suma)	mg/kg ms		3.3	2.1	9.4	110

Resultados laboratorio: Ensayo DIN 12457-4

Características		Limites norma UNE-EN 12457-4	BD-1.1 + BD-1.2	GD-1.1 + GD-1.2	VD-1	VD-1
Materia seca	% (m/m)		90.7	93.1	91.5	88.2
Lixiviación						
Ensayo de lixiviación corto (L/S 10)	L/g ms		0.0100 ₁₎	0.0101 ₂₎	0.0100 ₃₎	0.00998 ₄₎
Antimonio (Sb) lixiviable	mg/kg ms	0,06	<0.0040	<0.0040	0.0055	<0.0040
Arsénico (As) lixiviable	mg/kg ms	0,5	<0.050	<0.050	<0.050	<0.050
Bario (Ba) lixiviable	mg/kg ms	20	0.91	<0.60	<0.60	<0.60
Cadmio (Cd) lixiviable	mg/kg ms	0,04	<0.0010	<0.0010	<0.0010	<0.00100
Cromo (Cr) lixiviable	mg/kg ms	0,5	0.13	0.20	0.22	0.32
Cobalto (Co) lixiviable	mg/kg ms		<0.030	<0.030	<0.030	<0.030
Cobre (Cu) Lixiviable	mg/kg ms	2	0.22	0.13	0.21	0.33
Mercurio (Hg) lixiviable	mg/kg ms	0,01	<0.00040	<0.00040	<0.00040	<0.00040
Níquel (Ni) lixiviable	mg/kg ms	0,4	<0.050	<0.050	0.052	0.060
Molibdeno (Mo) lixiviable	mg/kg ms	0,5	0.17	0.046	0.10	0.11
Plomo (Pb) lixiviable	mg/kg ms	0,5	<0.10	<0.10	<0.10	<0.100
Selenio (Se) lixiviable	mg/kg ms	0,1	0.0071	<0.0071	<0.0070	<0.0070
Estaño (Sn) lixiviable	mg/kg ms		<0.030	<0.030	<0.030	<0.030
Vanadio (V) lixiviable	mg/kg ms		<0.20	0.24	<0.20	0.59
Zinc (Zn) lixiviable	mg/kg ms	4	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20
Bromuro lixiviable	mg/kg ms		<0.80	<0.80	<0.80	<0.80
Cloruro lixiviable	mg/kg ms	800	190	54	77	120
Fluoruro lixiviable	mg/kg ms	10	2.9	3.5	3.7	2.6
COD	mg/kg ms	500	84	45	48	98
Sulfato lixiviable	mg/kg ms	1000	2800	4300	1100	16000
Cianuro total	mg/kg ms		<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Cianuro fácil de lib.	mg/kg ms		<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
Índice de fenol	mg/kg ms	1	9.6	0.019	0.038	<0.010
Fracción 1						
Conductividad eléctrica 25 °C	µS/cm		1400	1200	1300	2500
Conductividad eléctrica 25 °C	mS/m		140	120	130	250
Conductividad eléctrica 20°C	µS/cm		1300	1100	1200	2200
Conductividad eléctrica 20°C	mS/m		130	110	120	220
Temperatura de medición (pH)	°C		20.2	20.1	20.0	20.1
Acidez (pH)			11.6	11.2	11.7	10.7

Se puede comprobar que ninguno de los valores supera el valor VIE-B de uso industrial.

Comparación de los valores obtenidos en el test 12457-4 con los valores del Decreto 49/2009

El test regido por la norma UNE-EN 12457-4:2003 marca un ensayo de lixiviación por percolación con una proporción líquido/sólido de 10l/kg. En el caso del Decreto Vasco 49/2009 de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos, ese ensayo sirve para determinar los valores de lixiviación límite para la aceptación de residuos en los distintos tipos de vertedero. En el ámbito que nos ocupa, la aplicación de áridos reciclados procedentes de RCDs en contacto con el suelo debe respetar unos valores para dicho ensayo por debajo de los estimados para el vertido en un vertedero de residuos inertes.

En la tabla siguiente se muestran los resultados al respecto, siendo masiva el cumplimiento de este requisito con excepción hecha de los sulfatos, que si superan en general los valores establecidos.

Conclusiones

El estudio de lixiviación en columna de materiales de áridos reciclados granulares procedentes de las plantas de tratamiento de RCDs del País Vasco no presenta parámetros críticos en aplicaciones aisladas, siempre y cuando se controle el contenido en sulfatos del material de partida, siguiendo el criterio de no aumentar por encima del 1% el valor del VIE-A en cien años.

Por el contrario se desestima la aplicación de estos materiales en aplicaciones no aisladas, como es el caso de su aplicación directa en pistas forestales

En el marco del proyecto PREAR, y dentro de uno tramo de prueba concebido como prueba piloto del mismo, se ha construido na base de carretera aplicando material procedente de RCDs en contacto directo con la atmósfera, es decir, sin condición de aislamiento alguna.

A través de esta experiencia se han podido verificar niveles de infiltración reales del 5%. Por tanto, niveles de infiltración notablemente inferiores a los correspondientes al escenario de baja permeabilidad (15%) contemplado en el proyecto AMATEUR-VAURCOS. Estos niveles de infiltración se deben, por un lado, a la compactación a la que se somete a los áridos participantes en la construcción de una carretera, y por otro a las reacciones surgidas en el propio árido que puedan dar lugar a un efecto aglomerante del residuo. En este sentido, cabe destacar que existen estudios de investigación que señalan que a ciertos niveles de compactación, la lixiviación en algunos residuos está gobernada por procesos de difusión, en lugar de procesos de percolación

4.3.3.2 Recomendaciones para la utilización de árido reciclado mixto en hormigón no estructural

Los ensayos de lixiviación validan ambientalmente la utilización de áridos reciclados mixtos en la fabricación de hormigones para aplicaciones en contacto con el terreno.

5. Anexos

5.1. Glosario de términos

Residuos de construcción y demolición

Los *residuos de construcción y demolición* son residuos de naturaleza fundamentalmente inerte generados en obras de excavación, nueva construcción, reparación, remodelación, rehabilitación y demolición, incluyendo los de obra menor y reparación domiciliaria.

Árido reciclado

Se entiende por *árido reciclado* el árido obtenido del procesamiento de residuos de construcción y demolición. Se puede establecer una tipología de los áridos según la naturaleza de los escombros de procedencia:

- El *árido reciclado de hormigón* es como su nombre indica, el árido que proviene del procesamiento de escombros de hormigón: contiene en mayoría árido de hormigón y mortero adherido.
- El *árido reciclado cerámico* es el árido que proviene del procesamiento de escombros tipo cerámico como pueden ser ladrillos, tejas, azulejos, etc.
- El *árido reciclado mixto* es el árido reciclado que procede de una mezcla de residuos de hormigón y cerámicos.

Hormigón reciclado

Se entiende por *hormigón reciclado* el hormigón fabricado incorporando total o parcialmente árido reciclado.

Hormigón no estructural

Se entiende por *hormigón no estructural* un elemento que no aporta responsabilidad estructural a la construcción pero que colabora en mejorar las condiciones durables del hormigón estructural o que aporta el volumen necesario de un material resistente para conformar la geometría requerida para un fin determinado ⁽⁹⁾.

Índice de lajas

Porcentaje en peso de áridos considerados como lajas según la norma *UNE-EN 933-3*. Se define como laja aquella partícula en la cual una dimensión es mucho más pequeña que las otras dos.

Índice CBR

El índice CBR es un ensayo que valora la capacidad de soporte de suelos que serán empleados en rellenos compactados. No es un valor intrínseco del suelo, sino que depende de las condiciones de ensayo. Puede realizarse sobre muestras compactadas en laboratorio en condiciones determinadas o muestras inalteradas tomadas del terreno.

Próctor modificado

Ensayo de compactación que tiene por objeto determinar, en un suelo, la relación entre la densidad seca y la humedad, para una energía de compactación determinada, y definir la densidad seca máxima y su humedad correspondiente, denominada óptima, que se puede conseguir en ese suelo en el laboratorio.

Coficiente de Los Ángeles

El coeficiente de desgaste de Los Ángeles es la diferencia entre la masa original de un árido y su masa tras ser sometido a una carga abrasiva y rechazando el material que pasa por el tamiz 1,6 UNE, expresada en tanto por ciento de masa inicial. UNE-EN 1097-2:1999/A1:2007.

Coefficiente de absorción

Se denomina coeficiente de absorción de un árido al porcentaje máximo de agua que absorbe con respecto al peso en seco del mismo. UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006.

Densidad

Relación entre la masa y el volumen de un cuerpo. Se distinguen los siguientes tipos de densidades (UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006):

- *Densidad de partículas tras secado en estufa*: relación entre la masa de una muestra de árido secada en estufa y el volumen que ocupa en agua, con inclusión de los huecos interiores estancos y los huecos accesibles al agua (densidad aparente).
- *Densidad de partículas aparente*: relación entre la masa de una muestra de árido secada en estufa y el volumen que ocupa en agua, con inclusión de los huecos interiores estancos y con exclusión de los huecos accesibles al agua (densidad real).
- *Densidad de partículas con saturación y secado de la superficie del árido*: relación entre la masa combinada de una muestra de árido y la masa de agua contenida en los huecos accesibles al agua, y el volumen que ocupa la muestra en agua, con inclusión de los huecos interiores estancos y los huecos accesibles al agua (densidad real de la muestra saturada con la superficie seca).

Partículas ligeras

Partículas de densidad real inferior a 2.0, tales como lignito o carbón, que pueden producir manchas o ampollas en la superficie de los hormigones. UNE-EN 1744-1:99.

Consistencia

La consistencia es la oposición que presenta el hormigón fresco a experimentar deformaciones.

Resistencia a compresión

Esfuerzo máximo que presenta un material a la compresión sin romperse. UNE-EN 12390-3:2009.

Retracción

Reducción del volumen del hormigón por la pérdida del agua que contiene. UNE 83.318:94.

Módulo de elasticidad

Relación entre la tensión y la correspondiente deformación unitaria en un material sometido a un esfuerzo que está por debajo del límite de elasticidad del material. UNE 83.316:96.

Fluencia

Deformación plástica del hormigón cuando se le somete a una tensión fija y mantenida.

Porosidad

Porcentaje entre el volumen de huecos de un material y su volumen total incluyendo los poros.

5.2. Normativa de aplicación en los ensayos

- **UNE-EN 1097-2:1999/A1:2007.** “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 1097-6:2001/A1:2006.** “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”.
- **UNE-EN 1744-1:99.** “Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos: Parte 1: Análisis químico”.
- **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 933-2/1M:1999.** “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”.
- **UNE-EN 933-3/A1:2004.** “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas”.
- **UNE-EN 933-11:2009.** “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de componentes de los áridos gruesos recalcados”.
- **UNE-EN 1367-2:2010.** “Ensayo para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2: Ensayo de sulfato de magnesio”.
- **UNE-EN 12620:2003+A1:2009.** “Áridos para hormigón”.
- **UNE-EN 12390-3:2009.** “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”.
- **UNE-EN 12390-5:2009.** “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas”.
- **UNE-EN 12390-6:2001.** “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas”.
- **UNE-EN 12390-7:2009.** “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido”.
- **UNE-EN 12390-8:2009.** “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión”.
- **UNE 83.316:96.** “Determinación del módulo de elasticidad en compresión”.
- **UNE 83.318:94.** “Ensayos de Hormigón. Determinación de los cambios de longitud”.
- **UNE EN 932-1.** “Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo”.
- **UNE EN 12457-4.** “Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos”.

6. Bibliografía

1. DIRECTIVA 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre residuos.
2. PLAN NACIONAL INTEGRADO DE RESIDUOS (PNIR) 2007-2015.
3. II PROGRAMA MARCO AMBIENTAL de la CAPV 2007-2010.
4. Instrucción EHE-08.
5. Vegas, I.; J.A. Ibañez, J.T. San Jose, A. Urzelai, 2008, "Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction", Waste Management 28, pp. 565-574.
6. Thom, N. H. and Brown, S. F., 1989, "The mechanical properties of unbound aggregates from various sources" In: Proc. International Symposium of Unbound Aggregates in Roads (UNBAR3), held at University of Nottingham, U.K., 1989, Jones, R. H. and Dawson, A. R. (eds), pp. 130-142. Butterworths, London.
7. Poon, C.S., Chan, D., 2006, "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base", Construction and Building Materials 20, pp. 578-585.
8. Frías, M., M.I. Sánchez de Rojas, O. Rodríguez, R. García, R. Vigil, 2008, "Characterization of calcined paper sludge as an environmentally friendly source of metakaolin for manufacture of cementitious materials", Adv. Cement Res. 20, pp. 23-30.
9. Hatch, J.R., J. S. Leventhal, 1997, "Early diagenetic partial oxidation of organic matter and sulfides in the Middle Pennsylvanian (Desmoinesian) Exello Shale member of the Fort Scott Limestone and equivalents, northern Midcontinent region, USA", Chemical Geology, Volume 134, Issue 4, pp. 215-235.
10. Perkins, R.B., Palmer, C.D., 1999, "Solubility of ettringite at 5-75°C", Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 63, Nº 13/14, pp 1969-1980.
11. Chrysochouuu, M., Dermatas, D., 2006, "Evaluation of ettringite and hydrocalumite formation for heavy metal immobilization: literature review and experimental study", Journal of hazardous materials 136, pp. 20-33.
12. RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures): "Specifications for Concrete with Recycled Aggregates". Materials and Structures, Nº27. p.p. 557-559, 1994.
13. VINCKE, J.; ROUSSEAU, E.: "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry.
14. "Recycled Aggregates: BRE Digest 433".
15. DIN 4226-1:2000: "Concrete Aggregate".
16. BS 8500-2:2002: "Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2: Specification for Constituent Materials and Concrete".
17. "Recycled Aggregate Standardization in Brazil". Universidade Estadual Paulista, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Universidade de Taubaté.
18. Chen, H.J. Yen, T. Chen. KH. Use of buildings rubbles as recycled aggregates. Cement and Concrete Research. 33 (2003) 125-132.
19. Debieb F, Kenai S, The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete, Construction and Building Materials (2007), doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013.
20. Kibriya, Speare – 1996 - Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. Construction and building materials.
21. Brito J., Pereira A.S., Correia J.R. – 2005 – Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates – Cement and concrete composites 27(05) 429-433.
22. Poon, C.S., Chan, D. 2004 "Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick", Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University. .
23. Poon, C.S., S.C. Kou, L. Lam. 2002. "Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks", Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University.
24. Pakvor, M.; Muravljov, M.; Kovacevic, T. "Exploration of concrete and structural concrete elements made of reused masonry", Ref.11, p. 391-404.
25. Mansur, m.a.; Wee, t.h.; Lee, s.c. "Crushed Bricks as Coarse Aggregate for Concrete", Ref.8, p. 505-514.
26. Rilem Report 6 "Recycling of Demolished Concrete and Masonry" Edited by T.C Hansen.
27. Cirelli Angulo "Variabilidade de agregados graúdos de residuos de construção e demolição reciclados". São Paulo 2000.



Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental

Alda. Urquijo, 36 6º Planta

48011 Bilbao

Tel: 900 15 08 64

www.ihobe.net

