

# Caracterización del comportamiento ambiental de áridos procedentes del reciclado de los residuos de construcción y demolición para su empleo en construcción de carreteras

## *Construction and Demolition Waste Aggregates Environmental Performance Assessment in Road Construction*

Antonio Sánchez Trujillano<sup>1</sup>, Laura Parra Ruiz<sup>1\*</sup>, Julio Termenón Delgado<sup>1</sup>

### Resumen

Una de las líneas de investigación del Centro de Estudios del Transporte del CEDEX está dirigida al estudio de las posibilidades de utilización de los áridos procedentes del tratamiento de residuos para firmes de carreteras. Para ello, se ha de verificar que dichos áridos cumplan los requisitos técnicos que sean de aplicación en la misma medida que los áridos naturales. Adicionalmente, se ha de comprobar que su uso no suponga una afección al medio ambiente. Para verificar este último aspecto, el CEDEX ha realizado para la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural (DGCEAMN) del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) un trabajo consistente en el “Estudio del comportamiento ambiental de los áridos procedentes del reciclado de los residuos de construcción y demolición (RCD) y de las escorias de acería de horno eléctrico (EAHE) para su utilización en la construcción de firmes de carretera”. Los resultados obtenidos de la caracterización ambiental de los áridos procedentes de RCD se presentan en este primer artículo, al que seguirá otro con los resultados de las EAHE.

**Palabras clave:** RCD, comportamiento ambiental, lixiviación.

### Abstract

*One of the research areas undertaken by the Transport Research Centre of CEDEX is focused on the assessment of the possibilities to reuse aggregates that come from waste in road pavement construction. In order to do so, these aggregates have to comply with the technical specifications in the same way as natural aggregates do. Moreover, it has to be confirmed that these aggregates do not produce any harm to the environment. To verify this latter feature, CEDEX has carried out for the General Directorate of Quality and Environmental Assessment and Natural Environment of the Ministry of Agriculture and Fisheries, Food and Environment of Spain some work consisting in the assessment of the environmental performance of Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates and Electric Arc Furnace Slags (EAFS) aggregates for use in road pavement construction. Results obtained from the environmental characterization of CDW aggregates are presented in this first paper, which will be followed by another one with the results of the EAFS.*

**Keywords:** CDW, environmental performance, leaching.

## 1. LOS ÁRIDOS RECICLADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

La utilización de áridos procedentes de residuos en la construcción de carreteras está directamente relacionada con el impulso que se está dando al empleo de los recursos disponibles de una forma más eficiente y, por ende, más sostenible. Todo ello en el marco de lo que se ha dado en llamar “economía circular” (ilustración 1); concepto éste que no es, en definitiva, nada nuevo, ya que se trata de la implantación de un esquema en el que se procura desear lo menos posible, aprovechando como materia prima aquellos productos que han llegado al final de lo que podríamos denominar “primera vida útil”. De esta manera,

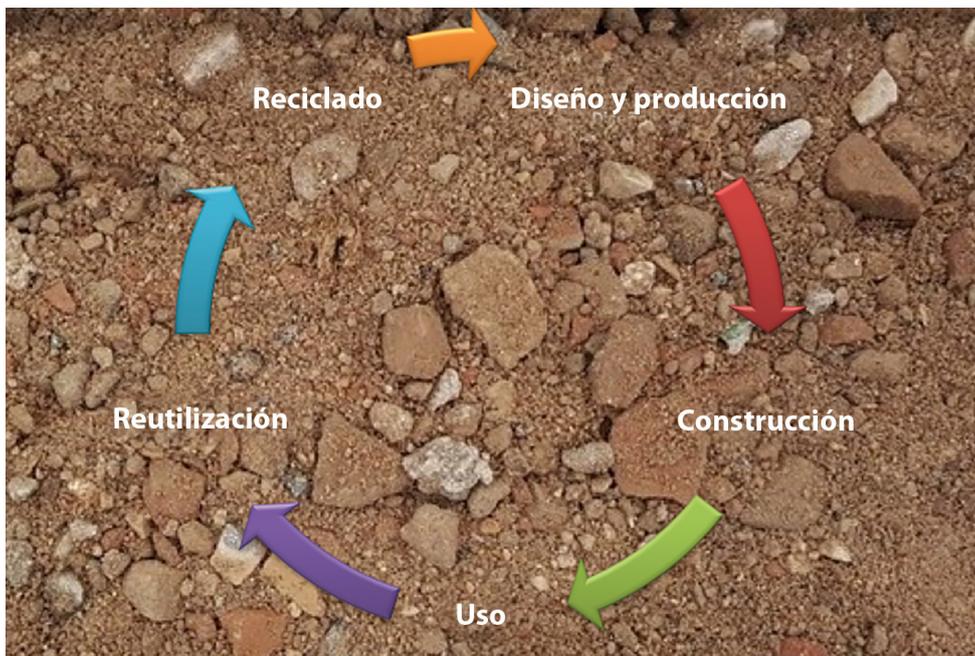
los productos tendrían “varias vidas útiles”, pues sería posible su reciclado y/o reutilización.

Este planteamiento viene apoyado por las políticas medioambientales de la Unión Europea, que buscan proteger, conservar y mejorar el capital natural de la Unión; convertir a la Unión en una economía hipocarbónica, eficiente en el uso de los recursos, ecológica y competitiva; y proteger a los ciudadanos de la Unión frente a las presiones y riesgos medioambientales para la salud y el bienestar (Séptimo Programa de Acción en Materia de Medio Ambiente de la Unión Europea).

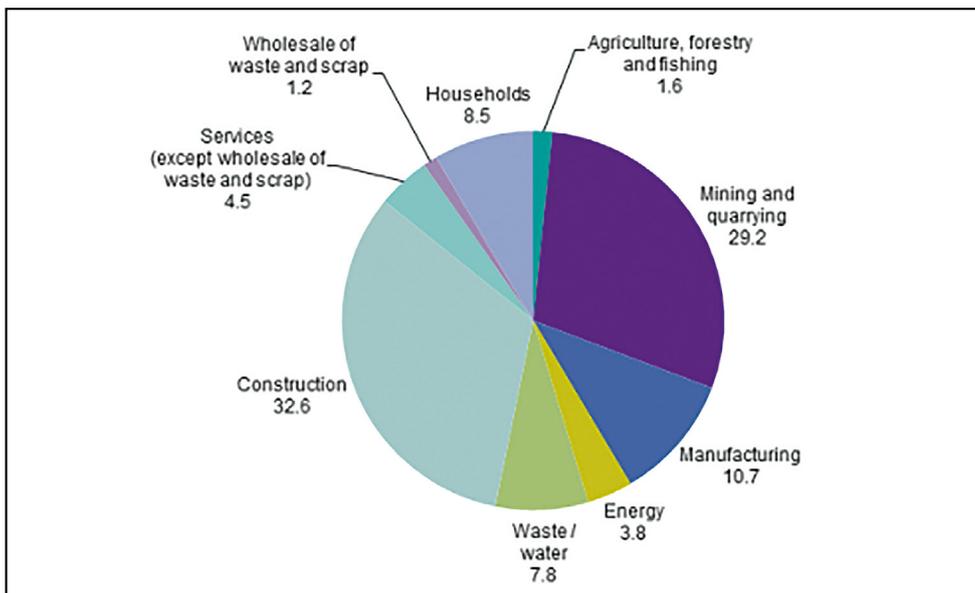
En el sector de la construcción queda mucho por hacer, ya que se trata, además, de uno de los sectores en los que más recursos naturales se consumen. No es fácil encontrar cifras al respecto, pero se suele hablar de que la industria de la construcción consume cerca del 40% de los recursos naturales y genera en torno al 40% de los residuos, según información extractada de la Guía de construcción

\* Autora de contacto: [laura.parra@cedex.es](mailto:laura.parra@cedex.es)

<sup>1</sup> Centro de Estudios del Transporte del CEDEX.



**Ilustración 1.** La economía circular aplicada al sector de la construcción.



**Figura 1.** Generación de residuos por actividades económicas y hogares, EU-28, 2012 (%). Fuente: Eurostat (env\_wasgen).

sostenible del 2005<sup>1</sup>. Datos algo más recientes de eurostat referidos a la generación de residuos, arrojan que la construcción y la demolición contribuyeron con un 33 % (figura 1) del total de residuos generados en la UE-28 en 2012 (821 millones de toneladas respecto de un total de 2.515 millones de toneladas<sup>2</sup>). Estas cifras se traducen en un significativo impacto medioambiental.

Conocida esta situación, es preciso implementar políticas que fomenten la eficiencia en la utilización de los recursos en la construcción. Para ello existen distintos mecanismos; por un lado se han de desarrollar técnicas constructivas que impliquen un menor consumo de

recursos naturales y, por otro lado, se ha de buscar reducir la generación de residuos. En ambos casos, un aspecto clave pasa por la incentivación del empleo de áridos reciclados, procedentes de residuos o de subproductos industriales, como materia prima en la construcción. Otro aspecto a tener en cuenta es que los diseños deben ser tales que favorezcan la reutilización de distintos materiales al final de su vida útil.

Uno de los obstáculos que aparecen a la hora de poner en marcha este tipo de actuaciones se encuentra en la ausencia de guías o recomendaciones para el empleo de los áridos reciclados, especialmente en lo referente a su comportamiento ambiental. Así por ejemplo, en el caso del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) se contempla el empleo de áridos reciclados para la ejecución de determinadas unidades de obra, pero lo condiciona al cumplimiento de la legislación vigente en materia

<sup>1</sup> [http://www.mapama.gob.es/es/ceneam/programas-de-educacion-ambiental/hogares-verdes/guia-construccion-sostenible\\_tcm7-193266.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/ceneam/programas-de-educacion-ambiental/hogares-verdes/guia-construccion-sostenible_tcm7-193266.pdf)

<sup>2</sup> [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste\\_statistics/es](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics/es)

medio ambiental y, adicionalmente, prescribe la obligación de “garantizar tanto la durabilidad a largo plazo, como que no darán origen, con el agua, a disoluciones que puedan dañar a estructuras u otras capas del firme, o contaminar corrientes de agua. Por ello, en materiales en los que, por su naturaleza, no exista suficiente experiencia sobre su comportamiento, deberá hacerse un estudio especial sobre su aptitud para ser empleados, que tendrá que ser aprobado por el Director de las Obras”. Sin embargo, no existe tal legislación en materia medio ambiental.

Esta circunstancia genera incertidumbres y reticencias en los posibles usuarios. Es preciso, por tanto, contribuir a clarificar las condiciones y requisitos relacionados con la utilización de los áridos reciclados; lo que se ha de conseguir estableciendo los oportunos controles ambientales y criterios técnicos que deben regir su empleo.

## 2. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS PARA SU EMPLEO EN CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

La utilización de áridos reciclados debe llevarse a cabo de forma tal que su empleo no conlleve afección al medio ambiente y a la salud humana. Al respecto, el Reglamento (UE) N° 305/2011 de Productos de la Construcción (RPC) es claro, estableciendo que: “Al evaluar las prestaciones de un producto de construcción, deben tenerse en cuenta también los aspectos relativos a la salud y a la seguridad relacionados con el uso del producto durante todo su ciclo de vida”. En concreto, el requisito básico 3 del RPC, referido a “Higiene, salud y medio ambiente”, indica que: “Las obras de construcción deberán proyectarse y construirse de forma que, en todo su ciclo de vida, no supongan una amenaza para la higiene, la salud o la seguridad de los trabajadores, ocupantes o vecinos, ni tengan un impacto excesivamente elevado durante todo su ciclo de vida sobre la calidad del medio ambiente ni sobre el clima durante su construcción, uso y demolición, en particular como consecuencia de cualquiera de las siguientes circunstancias: [...] e) liberación de sustancias peligrosas en el agua potable o

sustancias que puedan tener de algún modo repercusiones negativas en la misma; [...]”

El estudio de la potencial emisión de contaminantes desde los materiales hacia los suelos, aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas marinas se suele hacer por medio de ensayos de lixiviación. Se da la circunstancia de que se ha desarrollado una amplia variedad de ensayos de lixiviación (más de 50 en todo el mundo) cuyos resultados no son siempre comparables; esta circunstancia puede haber contribuido también a dificultar la sistematización de métodos para la caracterización ambiental de los áridos reciclados.

En la actualidad, en materia ambiental las regulaciones vigentes en España relacionadas con el empleo de áridos procedentes de residuos en construcción de carreteras<sup>3</sup> se refieren al ensayo de volteo (UNE-EN 12457-4 Prueba de conformidad de lixiviación de los materiales granulares residuales). Los límites para determinar su aceptación, o no, están, en general, referidos a los umbrales recogidos en la Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2002 para admisión de residuos en vertederos (2003/33/CE), en la que se discrimina si un determinado residuo es inerte, no peligroso o peligroso al comparar los resultados obtenidos de los ensayos de volteo con los límites fijados (en general, para una relación líquido sólido L/S=10 l/kg).

No obstante, de cara a proponer una metodología a nivel nacional para la caracterización ambiental de los áridos empleados en construcción, se han de tener en cuenta también los métodos de ensayo que se han desarrollado en el seno del comité CEN/TC 351/WG1 “Assessment of release of dangerous substances”, cuyo fin es, precisamente, la caracterización horizontal de la liberación de sustancias peligrosas en los productos de construcción, dando cumplimiento al mandato M366<sup>4</sup>. Estas especificaciones se han elaborado partiendo de los ensayos disponibles para residuos.

La aplicación de estos métodos de ensayo está ligada a los escenarios de uso previsto. Se han considerado tres escenarios posibles, en función de la forma en la que el agua entra en contacto con el producto de construcción, según las condiciones de uso previstas a las que el producto estará

**Tabla 1.** Especificaciones técnicas relativas a los distintos ensayos de lixiviación desarrollados por el CEN/TC 351

NORMATIVA - MÉTODO DE ENSAYO	ÁMBITO DE APLICACIÓN
CEN/TS 16637-1:2014 Guía para determinar el método de lixiviación y las etapas de ensayo adicionales	Establece los criterios para seleccionar el ensayo de lixiviación más apropiado para determinar la liberación de sustancias peligrosas, en función del tipo de material y de sus características
CEN/TS 16637-2:2014 DSL <sup>T</sup> “Dynamic Surface leaching test” (Ensayo de lixiviación de superficie dinámica).	Representa la circulación del agua en materiales monolíticos.
CEN/TS 16637-2:2014 GLHC “Granular Low Hydraulic Conductivity” (Ensayo de lixiviación de productos granulares con baja conductividad hidráulica).	Reproduce el mismo escenario que el ensayo DSL <sup>T</sup> , pero aplicado a materiales granulares de granulometría fina y naturaleza arcillosa y aquellos que exhiben propiedades autocementantes. Aunque se trata de productos de construcción granulares, su limitada conductividad hidráulica impide su evaluación mediante el ensayo de columna de percolación.
CEN/TS 16637-3:2016 “Horizontal up-flow percolation test” (Ensayo de lixiviación en columna con flujo ascendente).	Ensayo aplicable a materiales granulares con una conductividad hidráulica adecuada para el desarrollo del ensayo y una granulometría definida.

<sup>3</sup> Normativas autonómica de País Vasco (Orden de 12 de enero de 2015, de la Consejera de Medio Ambiente y Política Territorial, por la que se establecen los requisitos para la utilización de los áridos reciclados procedentes de la valorización de residuos de construcción y demolición).

<sup>4</sup> El mandato M366 establece lo siguiente: “Horizontal complement to the Mandates to CEN/CENELEC concerning the execution of standardisation work for the development of horizontal standardised assessment methods for harmonised approaches relating to dangerous substances under Constructions Product Directive (CPD)”.

destinado. Estas especificaciones y su ámbito de aplicación se muestran en la tabla 1.

Algunas de las principales ventajas de los métodos de ensayos propuestos por el CEN/TC 351 son: dan una información detallada, se pueden comparar (con ciertas cautelas) con los límites de vertederos, pueden ser útiles para fin de condición de residuo (FCR) y servirían para la modelización.

Estos nuevos métodos propuestos por el CEN/TC351/WG1 se están poniendo a punto en el Centro de Estudios del Transporte del CEDEX con el objetivo de evaluar, entre otras cosas, si se pueden considerar adecuados como parte del proceso de caracterización ambiental de los áridos para la construcción de carreteras. A tal efecto, la Subdirección General de Residuos de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural (DGCEAMN) del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) encargó al CEDEX la realización de un estudio encaminado a profundizar en el comportamiento ambiental de dos corrientes de áridos reciclados: los procedentes de los residuos de construcción y demolición (RCD) y las escorias de acería de horno eléctrico (EAHE).

Ambos tipos de áridos tienen distintas posibilidades de utilización en la construcción de carreteras. Así por ejemplo, los RCD se pueden emplear como zahorra para capa de base, como árido para material tratado con cemento en capa de base o como árido para hormigón y mezcla bituminosa, en función de sus características y siempre que cumplan las especificaciones técnicas establecidas. De igual manera, las EAHE pueden emplearse como zahorra para capa de base y también como árido para mezclas bituminosas. Para este estudio se ha

analizado una alternativa común a ambos materiales: zahorra para la construcción de bases de carreteras. Partiendo de esta premisa, el ensayo de lixiviación que se adapta al escenario de uso previsto se correspondería con el ensayo en columna (CEN/TS 16637-3), ya que se trata de un material granular con una conductividad hidráulica apreciable. En paralelo, se ha llevado a cabo un ensayo experimental a escala intermedia entre el laboratorio y la escala real, con el fin de validar los resultados obtenidos en los ensayos en columna.

## 2.1. Ensayos en columna

El ensayo en columna llevado a cabo se ha ejecutado conforme a la especificación técnica CEN/TS 16637-3:2016 (foto 1). Esta especificación describe un procedimiento horizontal, desarrollado por el comité CEN/TC 351, que consiste en la lixiviación del material en columna con flujo ascendente.

Los materiales se han ensayado en columna de 50 mm y 100 mm de diámetro. El ensayo consiste en hacer pasar agua en sentido ascendente a través del material contenido en la columna, con una velocidad lineal de entre 260 y 340 mm/día. El lixiviado se recoge en siete fracciones para las siguientes relaciones L/S acumuladas: 0,1-0,2-0,5-1,0-2,0-5,0-10,0 l/kg.

La duración del ensayo depende de las características de la muestra ensayada: densidad, permeabilidad, porosidad, etc. En función de estos aspectos, la masa seca de muestra varía y, por lo tanto, los volúmenes de las fracciones que se recogen. Por ejemplo, con muestras de EAHE (alta densidad) el ensayo dura 25 días, aproximadamente. En cambio, con RCD (baja densidad) el ensayo dura 15 días, aproximadamente (foto 2).



**Foto 1.** Montaje de la columna de RCD para el ensayo de lixiviación (CEN/TS 16637-3:2016).



**Foto 2.** Ensayo de lixiviación en columna de RCD (CEN/TS 16637-3:2016).

## 2.2. Ensayos en cubetas

Adicionalmente, con el fin de realizar una primera validación de los resultados obtenidos, se han realizado una serie de ensayos a una escala intermedia entre el laboratorio y la escala real. Los llamados “ensayos de campo” han consistido en unos dispositivos diseñados *ad hoc* con el fin de reproducir una capa de zahorra artificial que se emplearía como base para un paquete de carretera con tráfico pesado T2 a T4. Los dispositivos han estado sometidos a un flujo de agua constante lo cual reproduce unas condiciones sensiblemente más desfavorables a las que, *a priori*, cabe esperar en una carretera, ya que no se debe perder de vista que éstas se diseñan con el objetivo de que el agua no penetre en su estructura.

Para ello, se diseñó un sistema de riego por goteo que, con ayuda de una bomba peristáltica con regulación de potencia, permitió mantener una circulación constante de agua a través del material. El sistema ha consistido en una red de tubos de riego que distribuyen el agua de manera uniforme por toda la superficie del material. El agua, por permeabilidad, atraviesa las capas del material saliendo por la parte inferior, donde se recoge en otro recipiente desde el que, mediante la bomba peristáltica, se impulsa de nuevo al contenedor del material (foto 3). De esta forma, se ha dispuesto de un circuito cerrado en el que se va concentrando el lixiviado. Dependiendo de la permeabilidad del material, se ajustó la potencia de la bomba para que el caudal de agua fuese el adecuado (evitando que se produjeran encharcamientos en la parte superior).

No obstante, por efecto de la temperatura y tratándose de un sistema abierto, se produjeron pérdidas de agua por evaporación. Ello obligó, en varias ocasiones, a añadir agua para continuar con el ensayo de campo. Por otro lado, el



**Foto 3.** Dispositivo para el ensayo de campo (cubeta superior con el material y cubeta inferior para recogida del lixiviado).

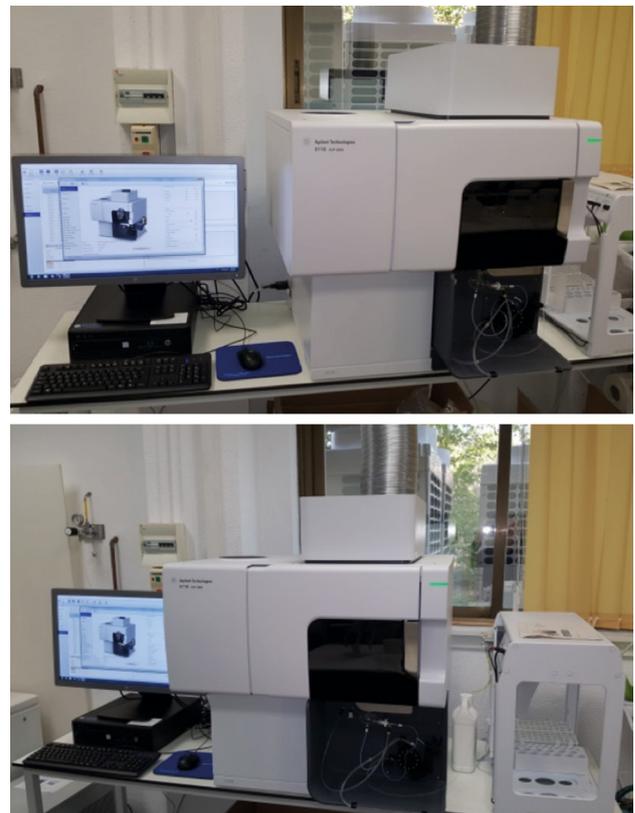
material absorbe cierta cantidad de agua, dependiendo de sus propiedades higroscópicas. Estos dos factores suponen una dificultad a la hora de cuantificar el volumen de lixiviado y, por tanto, la concentración real de los elementos contaminantes presentes en dicho lixiviado.

En consecuencia, este ensayo de campo sería adecuado para determinar de forma cualitativa la existencia de elementos contaminantes que pudieran estar presentes por lixiviación de los áridos. Si se quieren cuantificar dichos elementos, habría que realizar el ensayo de percolación en columna anteriormente descrito. Por ello, en el marco de los trabajos efectuados, los resultados obtenidos se han tenido en cuenta para detectar la presencia de posibles sustancias contaminantes de forma cualitativa, y contrastarlos posteriormente con los obtenidos de las columnas.

## 2.3. Ensayos de caracterización de los lixiviados

Una vez recogidas las muestras de lixiviado de las columnas y de las cubetas, se requiere su análisis químico para determinar la posible presencia de sustancias peligrosas reguladas, es decir, definir la composición del lixiviado. Para ello, se precisa de técnicas instrumentales avanzadas que permitan caracterizar sus componentes y, en particular, los considerados como sustancias peligrosas, cuya presencia o ausencia y sus respectivas concentraciones serán determinantes para evaluar las posibilidades de utilización de los materiales analizados y caracterizarlos desde el punto de vista ambiental.

Las muestras de lixiviado se han analizado en el Laboratorio de Geotecnia (LG) del CEDEX. El contenido en metales (cationes) ha sido analizado por medio de técnicas espectrométricas y las sales (aniones) han sido analizadas por medio de cromatografía iónica. Adicionalmente,



**Foto 4.** Espectrómetro ICP-OES del CET.

los resultados obtenidos por el LG han sido contrastados y complementados con los obtenidos en el Centro de Estudios del Transporte (CET) por medio de un espectrómetro óptico de emisión atómica, con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), recientemente adquirido (foto 4). Se trata de un equipo más completo, capaz de analizar incluso las muestras más complejas y determinar un mayor número de elementos químicos (por ej. Hg y Mo), con mejores límites de detección (hasta 0,1 µg/l o ppb) y, en definitiva, más rápido (muestreador automático) y preciso gracias a su tecnología “Dual View” vertical sincrónica (todas las líneas de emisión en una sola lectura).

Gracias a la adquisición de este equipo, se ha podido mejorar la respuesta al apoyo técnico solicitado al CET por la Subdirección General de Residuos de la DGCEAMN en las Encomiendas de Gestión, presente y futuras, en relación con los mecanismos de lixiviación y la prevención de la contaminación del agua o del suelo que pudiera ocasionar el empleo en carreteras de áridos procedentes de reciclado.

### 3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE LOS ÁRIDOS PROCEDENTES DEL RECICLADO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

#### 3.1. Los residuos de construcción y demolición

Según el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, residuo de construcción y demolición (RCD) es cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de “residuo”<sup>5</sup> se genera en una obra de construcción o demolición.

En la actualidad, una parte importante de estos residuos se lleva a plantas de tratamiento, pero debido a la falta de demanda clara en muchas ocasiones acaban constituyendo montañas de escombros en la propia planta o bien siendo llevados a vertedero, con el consiguiente impacto medioambiental. En otras ocasiones, son depositados sin control. No obstante, el objetivo fijado por la Directiva 2008/98/CE, de 19 de noviembre, sobre los residuos, establece que antes de 2020, la cantidad de residuos no peligrosos de construcción y demolición destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otra forma de valorización de los materiales, con exclusión de los materiales en estado natural definidos en la categoría 17 05 04 “Tierra y piedras que no contienen sustancias peligrosas” de la lista de residuos, deberá alcanzar como mínimo el 70% en peso de los residuos generados.

El Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 establece a su vez una serie de objetivos cualitativos y cuantitativos encaminados a dar cumplimiento al objetivo final previsto en la Directiva marco de residuos. Para ello, el PEMAR propone, entre otros aspectos, la promoción del empleo de los RCD, siempre y cuando se cumplan los requisitos de calidad y prescripciones de la normativa vigente; se refiere también al análisis de la

oportunidad de aplicar, en determinados casos, la aplicación del fin de la condición de residuo a los áridos procedentes de RCD. Para llevar a la práctica ambas cuestiones es preciso desarrollar criterios ambientales para el uso de los materiales procedentes del tratamiento de RCD no peligrosos en los destinos que se establezcan.

Otros aspectos clave, también recogidos en el PEMAR, pasan por el establecimiento de un Acuerdo Marco Sectorial para impulsar la utilización de áridos reciclados procedentes de RCD en obras de construcción, el impulso de la demolición selectiva que permita una adecuada separación en origen, la aplicación de sistemas de tarifas de admisión de RCD en vertederos que desincentiven esta forma de tratamientos para los RCD valorizables, etc.

#### 3.2. Resultados de la caracterización ambiental

A continuación, se presenta una serie de tablas con el resumen de los principales resultados obtenidos. Las tablas muestran los contenidos liberados de los distintos elementos analizados para una relación entre líquido y sólido (L/S) de 10 l/kg, tanto para la columna de diámetro 50 mm como para la de 100 mm. Estos resultados se han comparado con los límites recogidos en la Decisión 2003/33/CE del Consejo, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos. La Decisión 2003/33/CE indica que, con carácter general, los valores límite de referencia serán los de la columna L/S=10 l/kg, calculados mediante el método de ensayo UNE-EN 12457 Parte 4 (L/S= 10 l/kg, tamaño de las partículas < 10 mm). Los límites a los que se hace referencia en este caso se refieren a inertes.

Se ha de tener en cuenta que la comparación entre valores que se ha llevado a cabo es sólo orientativa ya que los valores enfrentados corresponden a dos métodos de ensayo distintos. Entre otros aspectos, se ha de precisar que el ensayo efectuado en el CET, según la especificación técnica CEN/TS 16637-3, es más exigente que el método de ensayo UNE-EN 12457 Parte 4. Ello es debido a que en el primer método de ensayo se alcanza la relación L/S al cabo de un número de días que, dependiendo de las características del material analizado, puede variar entre 15-30 días, mientras que en el segundo método, el ensayo tiene una duración limitada a 24 horas.

Con respecto a las tablas siguientes procede indicar que los valores de Hg y de Mo se determinaron con el ICP del CET (sólo para las muestras de la columna 8), ya que el LG no tenía opción de medir estos elementos. En cuanto a los resultados se aprecia en la tabla 2 y en la tabla 3 que se han superado los valores de Sb (columnas con diámetro 50 mm) y los valores de Se<sup>6</sup> (columnas de 50 y 100 mm de diámetro). También se ha detectado que el contenido de sulfatos es claramente superior al recogido en la Decisión 2003/33/CE de admisión de residuos en vertederos. Cabe también mencionar que los resultados obtenidos para las columnas de D=50 mm y D=100 mm son, en general, del mismo orden de magnitud (excepto para el Sb y el Se).

<sup>5</sup> La Ley de residuos y suelos contaminados (Ley 22/2011) con las modificaciones introducidas en la Ley 5/2013, define como “residuo” cualquier sustancia u objeto que su poseedor desecha o tenga la intención o la obligación de desechar.

<sup>6</sup> En el caso del Se las concentraciones de determinadas fracciones eran inferiores a los límites de detección del equipo, por lo que se tomó ese valor igual al límite de detección del equipo; por ello, los valores acumulados podrían ser inferiores a los recogidos en la tabla.

**Tabla 2.** Contenidos liberados acumulados para L/S=10 l/kg (RCD D=50 mm)

Id.CET →	RCD-D50-C7	RCD-D50-C8	RCD-D50-C9	RCD-D50-Media	Valor Máx. Inerte (Cantabria, Cataluña y País Vasco) UNE-EN 12457-4
Tipo Resultado	Acumulado	Acumulado	Acumulado		
Vol.Lixiv. (L)	8,827	8,678	8,854	8,786	
Masa Seca (kg)	0,883	0,868	0,885	0,879	
L/S (L/kg)	10,0	10,0	10,0	10,0	
Elemento / Ion	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
As	0,062	0,061	0,068	0,063	0,5
Ba	0,193	0,203	0,163	0,186	20
Cd	0,001	0,001	0,001	0,001	0,04
Cr	0,085	0,074	0,055	0,071	0,5
Cu	0,103	0,049	0,120	0,090	2
Hg		0,000			0,01
Mo		0,044			0,5
Ni	0,010	0,010	0,011	0,011	0,4
Pb	0,039	0,038	0,042	0,040	0,5
Sb	0,038	0,353	0,414	0,268	0,06
Se	0,425	1,322	1,281	1,010	0,1
Zn	0,022	0,023	0,025	0,023	4
Fluoruro	1,500	1,368	1,488	1,452	10
Cloruro	71,531	76,664	76,893	75,029	800
Sulfato	5467,570	5404,922	5133,778	5335,423	1000
<i>Nota 1: El Valor Máx. de Fluoruro en Cataluña 18 mg/kg</i>					
<i>Nota 2: El Valor Máx. de Sulfatos en País Vasco 6000 mg/kg</i>					

**Tabla 3.** Contenidos liberados acumulados para L/S=10 l/kg (RCD D=100 mm)

Id.CET →	RCD-D100-C7	RCD-D100-C8	RCD-D100-C9	RCD-D100-Media	Valor Máx. Inerte (Cantabria, Cataluña y País Vasco) UNE-EN 12457-4
Tipo Resultado	Acumulado	Acumulado	Acumulado		
Vol.Lixiv. (L)	32,621	33,042	32,798	32,820	
Masa Seca (kg)	3,262	3,305	3,280	3,282	
L/S (L/kg)	10,0	10,0	10,0	10,0	
Elemento / Ion	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
As	0,060	0,054	0,054	0,056	0,5
Ba	0,184	0,158	0,177	0,173	20
Cd	0,001	0,001	0,002	0,001	0,04
Cr	0,069	0,138	0,088	0,098	0,5
Cu	0,084	0,048	0,040	0,057	2
Hg					0,01
Mo					0,5
Ni	0,009	0,009	0,009	0,009	0,4
Pb	0,047	0,048	0,080	0,058	0,5
Sb	0,028	0,027	0,034	0,030	0,06
Se	0,407	0,370	0,370	0,382	0,1
Zn	0,031	0,043	0,030	0,035	4
Fluoruro	2,841	2,986	2,774	2,867	10
Cloruro	69,760	73,387	75,136	72,761	800
Sulfato	4548,801	4966,963	4856,186	4790,650	1000
<i>Nota 1: El Valor Máx. de Fluoruro en Cataluña 18 mg/kg</i>					
<i>Nota 2: El Valor Máx. de Sulfatos en País Vasco 6000 mg/kg</i>					

En cuanto a los resultados de los ensayos de campo, en la tabla 4 se muestra la composición de los lixiviados obtenidos al cabo de 150 y 300 horas. Estos resultados se deben tomar únicamente de forma cualitativa.

Como una segunda parte del trabajo, los resultados obtenidos se han contrastado con los obtenidos en otros estudios identificados como relevantes, si bien se ha de tener en cuenta que dada la gran heterogeneidad de este tipo de materiales, es previsible que, en función de su origen y de los tratamientos a los que hayan sido sometidos, presentarán una composición muy diferente y, por tanto, un comportamiento variable frente a la lixiviación. En todo caso, se puede indicar que, *a priori*, el aspecto crítico de estos materiales es la presencia de sulfatos solubles ya que, de forma general, se clasifican como suelos marginales según los criterios fijados en el PG-3 para terraplenes, bien por el

contenido de otras sales solubles o por yesos, aunque se ha de hacer notar que tal clasificación se efectúa por medio de ensayos distintos. Sin embargo, si la separación de sulfatos se realiza de forma sistemática se clasificarían como tolerables.

No obstante procede indicar también que en relación al límite de sulfatos en el lixiviado (1.000 mg/kg), que no se cumple en las muestras ensayadas, la Decisión 2003/33/CE establece lo siguiente: “Aunque el residuo no cumpla este valor correspondiente al sulfato, podrá considerarse que cumple los criterios de admisión si la lixiviación no supera ninguno de los siguientes valores: 1.500 mg/l en  $C_0$  con una relación = 0,1 l/kg y 6.000 mg/kg con una relación L/S = 10 l/kg. Será necesario utilizar el ensayo de percolación para determinar el valor límite con una relación L/S = 0,1 l/kg en las condiciones iniciales de equilibrio, mientras que el valor con una relación

**Tabla 4.** Composición de lixiviados obtenidos en el ensayo de campo de RCD

Id.CET →	RCD Cub.1-150h	RCD Cub.1-300h
Elemento / Ion	mg/l (CET)	mg/l (CET)
As	0,005	0,009
Ba	0,035	0,040
Cd	0,000	0,000
Cr	0,181	0,226
Cu	0,018	0,020
Hg	0,000	0,000
Mo	0,045	0,057
Ni	0,007	0,005
Pb	0,002	0,002
Sb	0,002	0,002
Se	0,010	0,012
Zn	0,003	0,005

*L/S = 10 l/kg se podrá determinar, bien mediante una prueba de lixiviación por lotes, bien mediante una ensayo de percolación en condiciones próximas al equilibrio local<sup>7</sup>.*

Por último, aunque en algunas de las muestras ensayadas en el CET se han obtenido resultados en Sb y Se superiores a los límites para vertedero de inertes, este hecho se puede considerar un aspecto puntual, objeto de estudio sin duda; pero se ha de poner de manifiesto que no se trata de elementos que, de forma sistemática, se hayan identificado en otros estudios de lixiviación con áridos procedentes de RCD (Barbudo (2012), Cano (2017)). Si bien esos ensayos de lixiviación se habrían efectuado por el método de volteo (UNE-EN 12457-4).

#### 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN CRÍTICA

Hay un claro consenso en la sociedad y en las instituciones sobre la necesidad de evolucionar hacia una economía circular baja en carbono; en definitiva, de avanzar hacia modos de vida y formas de relación con la naturaleza más sostenibles.

No es de extrañar, entonces, la existencia de un creciente interés por evaluar el comportamiento ambiental de las obras de construcción y, de forma concreta, de los áridos a tal fin destinados. En el caso de los áridos reciclados procedentes de residuos o áridos secundarios está clara la ventaja derivada de emplear un material que de otra forma estaría destinado a un vertedero y consignarlo a la construcción de carreteras, con la consiguiente reducción del consumo de recursos naturales. No obstante, se debe asegurar que la reutilización estos áridos no supone ningún tipo de perjuicio a la salud humana ni al medio ambiente.

En el marco normativo, se puede decir que la necesidad de caracterizar desde el punto de vista ambiental los productos de la construcción surge de la aplicación del Reglamento de Productos de la Construcción, que establece la incorporación de las exigencias que se derivan del requisito básico 3 (inicialmente RE3 “Salud, higiene y medio ambiente”), que todavía están pendientes. Con la implantación de este requisito, se pretende que el uso de los productos de construcción no entrañe riesgo para la salud del usuario ni para el medio ambiente.

El comité de normalización CEN está desarrollando distintas actividades para la incorporación del RE3 en las normas europeas armonizadas que han de cumplir todos

los productos de construcción que se comercializan con el distintivo del marcado CE. Con tal fin, el comité CEN/TC 351 está poniendo a punto procedimientos para evaluar la liberación de sustancias peligrosas procedentes de los productos de construcción.

Se da por tanto la circunstancia de que, en un futuro próximo, es previsible que haya que declarar las prestaciones “ambientales” de los áridos empleados en la construcción de carreteras por medio de los ensayos horizontales propuestos por el mencionado comité CEN/TC 351 para la determinación de la lixiviación de sustancias peligrosas.

Es por ello fundamental conocer de forma precisa el comportamiento de las distintas familias de áridos frente a la lixiviación, a sabiendas de que se trata de un fenómeno complejo, dependiente de una multitud de parámetros. De hecho, en estos momentos existen distintos tipos de ensayos de lixiviación cuyos resultados no son comparables entre sí. Igualmente, el grado de complejidad de los ensayos existentes tampoco es comparable.

Por ello, para caracterizar ambientalmente los áridos deberemos valernos de distintos ensayos, que se pueden clasificar como sigue: ensayos de caracterización del material, de conformidad y de verificación “in situ”.

Cabría entonces plantearse un sistema de control en dos etapas, una primera destinada a la caracterización del material, para lo que se emplearían los ensayos desarrollados por el CEN/TC 351 y una segunda etapa de control, para lo que serían suficientes los ensayos por el método de volteo (serie UNE-EN 12457).

Resulta por tanto fundamental definir los procedimientos que se deben seguir para regular o controlar el empleo de los áridos reciclados procedentes de residuos o áridos secundarios, bien para dar cumplimiento a futuras exigencias del marcado CE, bien para definir las condiciones de FCR o bien para asignar la categoría de subproducto.

Sucede, por tanto, que la ejecución de ensayos de lixiviación se convierte en un elemento clave de cara a la propuesta de metodologías para la aceptación de materiales secundarios como material de construcción de carreteras. Por ello, en el marco del trabajo que se describe en el presente artículo, se han aplicado los ensayos de lixiviación en columna (CEN/TS 16637-3:2016) para caracterizar el comportamiento ambiental de áridos procedentes de RCD como potenciales áridos para la construcción de subbases de carreteras, comprobándose que los métodos de ensayo son perfectamente aplicables.

En cuanto al desarrollo de metodologías que permitan la caracterización ambiental de áridos procedentes de residuos para su utilización en carreteras, merece la pena destacar la experiencia francesa. En este país, el SETRA (*Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes*) ha desarrollado una guía metodológica para su uso: “Aceptación de materiales alternativos en carreteras. Evaluación medioambiental”, de marzo de 2011. De acuerdo con esta guía, la caracterización ambiental reposa en tres niveles de investigación, que implican cada uno de ellos un grado de exigencia distinto en cuanto a los ensayos que se deben realizar, en función del riesgo ambiental de los materiales. Así, en el nivel 1 sólo se exige la realización de ensayos de lixiviación y de contenido total; en el nivel 2 se exigen ensayos de percolación y en el nivel 3 se exige la realización de un estudio específico. Adicionalmente, a fin de facilitar

y promover el empleo de los RCD, en 2015 el CEREMA (*Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement*) ha publicado una guía específica con las prescripciones y exigencias para su aceptación ambiental como material de construcción de carreteras. Esta guía distingue tres tipos de áridos procedentes de RCD (fundamentalmente hormigón, bituminosos y mixtos) y establece una serie de limitaciones a su uso y a su puesta en obra. En función del tipo (hormigón, bituminoso o mixto) y de su uso (se contemplan tres tipos de uso: 1, 2 ó 3; que depende de si la capa en la que se emplea está revestida o no y de la altura del relleno en el que se aplica) se establecen distintos requisitos ambientales. Los requisitos ambientales se refieren al cumplimiento de unos valores máximos, fijados a partir de los resultados del ensayo NF-EN 12457-4 (relación L/S=10 l/kg).

Cabría por tanto reflexionar sobre la oportunidad de avanzar en la propuesta de un sistema que permita efectuar una caracterización ambiental de los áridos procedentes de residuos, en general y de RCD en particular, de forma que éstos puedan ser reutilizados o reciclados como materiales de construcción de carreteras. Una posibilidad sería la implantación de un sistema como el anteriormente indicado, con distintos niveles de exigencia a los que se da cumplimiento por medio de ensayos de lixiviación que serán a su vez, más o menos demandantes.

La existencia de unas pautas que regulen estas cuestiones ayudaría a superar algunas de las barreras que limitan el empleo con normalidad de estos áridos alternativos. Por supuesto, en aquellos casos en los que su utilización es adecuada desde el punto de vista del cumplimiento de los requisitos técnicos que les sean de aplicación.

Los ensayos de lixiviación en laboratorio realizados en el marco del trabajo que se ha presentado en este artículo permiten concluir que son adecuados para la caracterización ambiental de los áridos procedentes de residuos. Adicionalmente, los ensayos de campo realizados han puesto de manifiesto que los resultados de laboratorio se pueden considerar realistas en relación con los resultados obtenidos en la escala intermedia. Cabría profundizar en esta cuestión llevando a cabo estudios en tramos reales de carretera o, en su defecto, en la Pista de Ensayo Acelerado de Firmes del Centro de Estudios del Transporte del CEDEX.

## 5. CONCLUSIONES

Las políticas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono, como medida imprescindible de prevención y mitigación del cambio climático y sus efectos sobre las condiciones de vida y salud de las personas han dado lugar, en lo que se refiere a la producción y gestión de residuos, a la necesidad de instrumentar medidas de prevención de su generación, y en su defecto, de reutilización, reciclado o valorización, dejando en último término como posible destino su eliminación en vertederos, por ser ésta la peor de las opciones posibles contempladas desde dicha óptica.

Esto ha dado lugar a numerosas iniciativas que tienen por finalidad conseguir que un material residual (en este caso se ha trabajado con residuo de construcción y demolición y escoria de acería de horno eléctrico) pueda ser valorizado o reciclado al término de su vida útil; o en su caso, si procede, pueda encontrar una aplicación posterior en

virtud de la cual pierda esa condición marginal de residuo y se convierta en un producto susceptible de ser utilizado e incorporado a un proceso productivo.

Estas iniciativas plantean un doble problema; por una parte que el material procedente del residuo cumpla unas condiciones mecánicas y unas prestaciones equiparables a las del material al que sustituye, y por otra, que por su anterior condición de residuo no se convierta en un agente transmisor de la contaminación que eventualmente pudiera contener a su nuevo uso, y por esta vía, convertirse en un motivo de afección a la salud humana, al suelo, las aguas o la atmósfera, y en general, a los valores ambientales que se deben preservar.

Respecto a la primera cuestión se entiende que las características mecánicas sobre resistencia, durabilidad, etc., que debe cumplir un material procedente de residuos han de ser exactamente las mismas que las que se le exigen a uno de primera manufactura preparado con materias primas vírgenes, de tal modo que es la normativa específica y los requisitos que emanen de ésta los que se le han de aplicar para su empleo en sustitución de materiales o productos de otras procedencias.

En cuanto al establecimiento de un método que garantice que el material procedente de un residuo, RCD o EAHE en el caso del presente trabajo, no aporte contaminación a la obra o actuación a la que se vaya a incorporar como árido, se han presentado en este artículo los resultados de los trabajos realizados al respecto, correspondientes a dos ensayos, uno de laboratorio y otro de campo, por los que se puede llegar a conocer con un nivel de precisión suficiente la composición del material analizado y, en función de ella, y de los límites que para cada contaminante se fijen, determinar si cumple los requisitos necesarios para ser empleado en sustitución de cualquier otro árido para el uso al que vaya a estar destinado.

El ensayo de laboratorio que se ha experimentado es el ensayo de lixiviación en columnas ejecutado de acuerdo con la especificación técnica CEN/TS 16637-3:2016. El ensayo de campo ha tenido carácter totalmente experimental y se basa en unos principios similares a los del ensayo en columnas.

Ambos ensayos son complementarios y se han aplicado con resultados satisfactorios a diversas muestras de RCD y EAHE, de las que se ha llegado a conocer su composición así como la concentración de los contaminantes eventualmente presentes en ellas. A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que, sin perjuicio de otros, éste sería un procedimiento válido para conocer la posible presencia de contaminantes y, a partir de esta información, determinar sus posibilidades de uso.

La circunstancia de que en este trabajo se hayan aplicado los métodos descritos únicamente a RCD y EAHE no significa que no puedan emplearse para otros materiales granulares procedentes de residuos, presumiblemente con resultados igualmente satisfactorios, si bien, esta experimentación no se ha abordado en este trabajo por no constituir la materia del encargo correspondiente.

Quedan por definir los techos o limitaciones aplicables a cada uno de los potenciales contaminantes presentes en un residuo, ya que estos dependerán del uso que haya de darse al material y de las condiciones ambientales y de contorno a las que vaya a estar expuesto, aunque acerca de

esta cuestión se han encontrado disposiciones normativas, formuladas a partir de estudios correctamente realizados y avaladas por la experiencia de su aplicación, que pueden emplearse como referencia.

Únicamente, quedaría por determinar el número de muestras o la periodicidad con la que deberían hacerse los análisis que se propongan para tener garantías de la inocuidad medioambiental de un material procedente de un residuo, dada la magnitud de su generación e incluso las posibles diferencias en su composición entre unos y otros centros de producción. A este respecto, se pueden apuntar soluciones en virtud de las cuales el control y la periodicidad de los análisis habrían de ser tanto más exigentes cuanto más heterogeneidad y dispersión presentasen los materiales analizados.

En definitiva, se considera necesario avanzar en la propuesta de metodologías que permitan la caracterización ambiental de los áridos procedentes de residuos, para lo cual se podría plantear la implantación de sistemas de control basados en distintos niveles de exigencia, dependiendo del riesgo asociado tanto al uso como a la posible presencia en los lixiviados de contenidos elevados de determinados elementos contaminantes. Para ello, se podrían aplicar ensayos de caracterización ambiental (serie CEN/TS 16637) y ensayos de control (ensayos de volteo de la serie UNE-EN 12457), junto con ensayos de contenido, dependencia de pH, conductividad eléctrica u otros.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Baño Nieva, A., y Vigil-Escalera del Pozo, A. (2005). *Guía de construcción sostenible*. Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS). Disponible en [http://www.mapama.gob.es/es/ceneam/programas-de-educacion-ambiental/hogares-verdes/guia-construccion-sostenible\\_tcm7-193266.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/ceneam/programas-de-educacion-ambiental/hogares-verdes/guia-construccion-sostenible_tcm7-193266.pdf)

Barbudo, M.A. (2012). *Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias*. Tesis de la Universidad de Córdoba. Córdoba: Universidad de Córdoba (Servicio de Publicaciones).

Cano, H., Santana, M., e Higuera, C. (2017). *Análisis y valoración de los ensayos químicos y medioambientales realizados en muestras de áridos reciclados mixtos*. Informe CEDEX. Madrid: CEDEX.

CEDEX (2014). *Catálogo de residuos utilizables en construcción. Residuos de construcción y demolición*. Madrid: CEDEX.

Chateau, L. (2009). Environmental and geotechnical acceptability of alternative material as road construction material –Methodological guide. *Congreso WASCON 2009, Lyon (Francia)*.

MAPAMA (2016). Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. Madrid: MAPAMA.

Moral, A., y Fernández, S. (2013). Especificaciones sobre sustancias peligrosas reguladas en las normas armonizadas de áridos. *Revista CARRETERAS*, nº 187. Madrid.

Moral, A. (2015a). *Tarea 1: Análisis de las actuaciones desarrolladas por el CEN/TC154 y CEN/TC351 hasta abril de 2015, en relación a las exigencias ambientales de aplicación a áridos procedentes de residuos y subproductos, empleados en la construcción de capas de firme de carreteras*. Informe CEDEX. Madrid: CEDEX.

Moral, A. (2015b). *Tarea 2: Análisis de la situación del reciclaje de RCD en España. Caracterización ambiental de áridos derivados de RCD destinados a la construcción de capas de firme de carreteras*. Informe CEDEX. Madrid: CEDEX.

Moral, A. (2016). *Tarea 1: Análisis de las actuaciones desarrolladas por el CEN/TC154 y CEN/TC351 hasta febrero de 2016, en relación a las exigencias ambientales de aplicación a áridos procedentes de residuos y subproductos, empleados en la construcción de capas de firme de carreteras*. Informe CEDEX. Madrid: CEDEX.

Parra, L., y Moral, A. (2015). *Análisis de las posibilidades de uso de los materiales procedentes de residuos en carreteras*. Informe CEDEX. Madrid: CEDEX.

SETRA (2011). *Acceptability of alternative materials in road construction. Environmental assessment*. Francia.

SETRA (2012). *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière. Les matériaux de déconstruction issus du BTP*. Francia.

Termenón, J., y Parra, L. (2017). *Comportamiento ambiental de áridos procedentes del reciclado de los RCD y de las EAHE*. Informe CEDEX. Madrid: CEDEX.