

Separación hidráulica mediante equipos de aceleración diferencial aplicada al sector de los residuos de construcción y demolición (RCD)

L. Fueyo⁽¹⁾, D. Gómez Limón⁽²⁾, A. Rodríguez-Avello⁽²⁾

(1) Fueyo Consultores, Calle Torrelaguna 127 posterior, 28043 Madrid
luisfueyo@fueyoconsultores.com

(2) Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Minas, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid
dulce.gomezlimon@upm.es
angel.rodriguezavello@upm.es

RESUMEN

Con el objeto de aprovechar al máximo los subproductos o materiales contenidos en este tipo de residuos, ya que potencialmente solo es recuperable aproximadamente el 65%, se ha investigado a nivel de laboratorio en la E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid nuevas técnicas tendientes a mejorar la calidad de algunos productos, ajustándose más a las especificaciones de calidad del mercado. En este estudio se analizan los equipos de separación hidráulica actuales aplicados en algunas plantas de tratamiento de RCD españolas, y se introduce la aplicación de los sistemas de separación gravimétrica con equipos de impulsión hidráulica (jig), para posteriormente depurar con separación magnética. Estas técnicas de separación se emplean en el procesamiento de minerales y rocas industriales.

Palabras clave: caudal, jig, mineral, residuo, roca

Hydraulic separation through differential acceleration applied to the sector of construction and demolition waste (C&Dw)

ABSTRACT

To maximize the recovery of by-products and materials contained in construction and demolition waste, given that only about 65% of these are potentially recoverable, laboratory research has been conducted at the Madrid School of Mining Engineering (E.T.S. de Ingenieros de Minas) into new techniques capable of enhancing the quality of some of these recovered products to meet the criteria required by the market. This study examines the hydraulic separators currently in use in many C&D waste processing plants in Spain and introduces the application of hydraulic gravity separators (jigs) prior to magnetic separation. These separating techniques are employed in industrial mineral and rock processing.

Key words: C&D waste, flow, jig, mineral, rock

Introducción

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son materiales de naturaleza inerte constituidos fundamentalmente por residuos procedentes de la deconstrucción o demolición de edificios, naves, estructuras civiles, etc. También se incluyen aquí las tierras de vaciados, desmontes y obras públicas.

La naturaleza de estos residuos depende del tipo de obra o infraestructura en la que se generan, de la calidad de los materiales que lo componen, y en parte también de la modalidad de demolición aplicada.

Los RCD pueden clasificarse, según el Gremio de Entidades del Reciclaje de Derribos, en diferentes tipos: Pétreo, entre los que se encuentran los de ori-

gen cerámico (ladrillos), el pétreo propiamente dicho (piedras), los hormigones y los asfaltos; y otros de naturaleza no pétreo, como son los plásticos, papel y cartones, madera, objetos voluminosos (colchones, muebles, electrodomésticos, etc.), etc. Por tanto, se consideran RCD los residuos de naturaleza única que entran a la planta, la mezcla de varias naturalezas o un conjunto de todos.

Es fundamental clasificar inicialmente los materiales en homogéneos (no mezclados o limpios), o en heterogéneos (mezclados o sucios), para poder tratarlos adecuadamente y de forma diferenciada, optimizando los procesos de valorización.

Como se ha podido ver hasta ahora, todos los RCD pueden considerarse mayormente como inertes, lo

cual no quiere decir que a la planta no puedan llegar otro tipo de materiales mezclados con ellos, como son las baterías, fibrocementos, pinturas, disolventes, que en algunos casos pueden resultar altamente peligrosos. Estos productos deben ser retirados previamente y almacenados en un lugar cerrado, hasta su recogida por el correspondiente gestor autorizado. Se estima que representan entre un 7-10%. Por tanto, la mayor parte de los RCD son de poder contaminante relativamente nulo.

Los denominados residuos inertes pueden proceder de carreteras e infraestructuras, excavaciones de suelos o ejecución de obras de reforma en casas del casco urbano, rechazos o piezas defectuosas de la fabricación de elementos de construcción, mezcla de los escombros de construcción o demolición de edificios, y materiales procedentes de las reformas domiciliarias.



Figura 1. RCD caracterizado como heterogéneo.
Figure 1. Heterogeneous C&D waste.

Productos obtenidos en una planta de reciclaje

Tras el procesamiento de los RCD en una planta de reciclaje, los productos obtenidos dependen tanto de la tipología del residuo alimentado, como de las características físicas del material y el régimen de marcha de la planta.

Los dos primeros factores vienen impuestos por el entorno socio-económico en el que se encuentran enclavada la planta, mientras que el tercero depende del saber hacer de los operadores. Las granulometrías finales de los productos dependerán principalmente de los equipos instalados, y pueden adaptarse fácilmente a las especificaciones del mercado.

Un aspecto importante es la caracterización física del residuo para determinar sus posibilidades de aprovechamiento: un material mixto procedente de

reformas domiciliarias suele llevar gran cantidad de ladrillos y mampostería fácilmente triturable, que motiva no solo la separación de la fracción 0-40 mm en el precibado, sino también posteriormente la trituración primaria o machaqueo. Por su parte, el hormigón, y en particular el hormigón armado, aporta una cantidad de producto grueso mayor de 40 mm, superior al procedente de otros orígenes. Si no existe circuito cerrado en la trituración, se puede producir un rechazo importante de tamaños mayores de 80 mm.

El precio de venta del árido reciclado está limitado por la cotización en el área de influencia del árido natural. Generalmente, el árido reciclado debe tener un precio de venta inferior al del árido natural, para paliar, en parte, las reticencias existentes sobre su utilización.



Figura 2. Planta de reciclaje.
Figure 2. Recycling plant.

Los separadores hidráulicos

En una planta de valorización o reciclaje de RCD, el residuo sufre una serie de procesos de tratamiento, conducentes finalmente a transformarlos en áridos reciclados. En la planta propiamente dicha, se deben poder tratar tanto los residuos denominados limpios u homogéneos, como los sucios o heterogéneos.

Las líneas de tratamiento pueden estar dispuestas en forma conjunta o en paralelo. Cada línea normalmente incluye una o varias etapas de trituración, cribado, triaje manual sobre banda, separación magnética de los componentes metálicos, y separación neumática de maderas, plásticos y papel.

En el extremo final de la planta se clasifican y acopian las granulometrías del árido reciclado, ya preparadas para su comercialización.

Actualmente, y con el fin de conseguir áridos reciclados de mejor calidad, se está introduciendo en las

plantas de reciclaje una etapa adicional de separación hidráulica que optimice la retirada de los contaminantes más ligeros, dejando el material pétreo más limpio.

Los separadores hidráulicos son equipos constituidos por una gran cuba de agua en la que se introducen los RCD de una granulometría determinada. Durante el trayecto de caída hasta el fondo de dicha cuba, los materiales ligeros (densidad inferior a 1 g/cm^3) flotan sobre la superficie y son evacuados por un sistema de cepillos, mientras que la fracción pétreo más pesada cae al fondo y posteriormente es extraída por medio de una cinta transportadora o un tornillo sinfín.

Actualmente en España solamente un 15% de las plantas existentes cuenta con estos equipos de separación hidráulica.

Tipos de separadores hidráulicos

En el mercado existen dos tipos de separadores hidráulicos comercializados: Separador de banda transportadora y de tornillo sinfín. En ambos, sus nombres hacen referencia al modo de extracción del material dencantado. En este apartado y en el siguiente se realiza una comparación y análisis de los datos reales extraídos de diferentes instalaciones españolas para determinar la operatividad de ambos modelos.

Los separadores hidráulicos de banda transportadora son los más frecuentes en las plantas de valorización de RCD en España. Dichos modelos cuentan con cubas con capacidad entre 4.500 y 7.000 litros de agua en función del fabricante y del modelo. La fracción pesada que queda en el fondo es evacuada por una banda transportadora de longitud variable, entre los 4 y los 4,5 metros, un ancho entre 1.000 y 1.200 mm, y una inclinación de 30° . Estos equipos se presentan en unidades muy compactas, con dimensiones entre 5,2 y 6,3 m de longitud.



Figura 3. Separador hidráulico de transportador de banda.
Figure 3. Belt conveyor hydraulic separator.

Los separadores hidráulicos de tornillo sinfín tienen un diseño basado en una adaptación de los famosos tornillos clasificadores Atkins, utilizados para el lavado de diversas granulometrías de los áridos producidos en canteras y graveras. La diferencia entre estos y los utilizados en minería es que aquí la cuba no tiene aporte continuo de agua, mientras que en los otros el aporte de agua es permanente y sale por rebose en el frente de la cuba. En los separadores hidráulicos de RCD el aporte de agua se hace de forma puntual al terminar o comenzar la jornada de trabajo, para compensar la pérdida por la absorción de agua de los distintos materiales.

Al igual que ocurría con los separadores de banda transportadora, estos equipos se presentan en unidades compactas, que en ningún caso sobrepasan los 6,5 metros de longitud, 2,5 metros de ancho y una altura de 2,4 metros. Su diseño es algo diferente a los de banda, pues aunque tienen también una cuba de agua (en este caso en forma de U), su longitud es algo mayor, para poder incorporar el tornillo sinfín, cuyo cometido es la evacuación de la fracción pétreo.

El material de alimentación se carga en la cuba de forma continua, y la separación se produce por la decantación del material pesado, que es evacuado por la acción del tornillo. Los materiales no pétreos que flotan se extraen por medio de un rodillo o cinta con cepillos, dispuesto transversalmente a la extensión longitudinal del equipo. El sinfín no es más que una hélice de paso simple o doble, con una inclinación variable entre 22° y 28° , la cual mediante el giro va elevando el material desde el fondo de la cuba hasta la parte superior, en cuyo extremo sale de la máquina y vierte la carga sobre una pila o acopio.



Figura 4. Separador hidráulico de tornillo sinfín.
Figure 4. Worm gear hydraulic separator.

La capacidad de tratamiento de estos equipos depende, al igual que en el tipo de banda, del tamaño de la cuba. Sin embargo, teniendo en cuenta que estas dimensiones son similares en ambos separadores hidráulicos, el diámetro del tornillo es el factor más determinante de la capacidad, así como la velocidad de giro del mismo.

Análisis comparativo de los dos tipos de separadores hidráulicos

Se ha realizado un análisis de varias unidades instaladas en determinadas plantas de reciclaje de RCD en España. Los resultados se muestran en la tabla 1, donde se presentan las capacidades operativas y rendimientos para ambos tipos de equipos.

Aunque ninguno de estos separadores satisface plenamente las necesidades que demanda el sector de los RCD, es posible extraer de su comparación las siguientes consideraciones:

- Los ejemplos analizados demuestran que los separadores hidráulicos de banda limpian menos los materiales pétreos que los de tornillo sinfín. Estos obtienen entre el 85 y 95% de limpieza, mientras que los de banda consiguen entre el 70-80%. Sin embargo, se observa que el producto final de los separadores de banda lleva menos finos (lodos) que en los de tornillo, ya que al evacuar la fracción pétreo la hélice de doble paso arrastra finos desde la parte inferior de la cuba.
- Por otro lado, la velocidad de trabajo de los separadores de banda transportadora es de solo 0,30 m/seg, mientras que en los separadores de tornillo se trabaja a 17 rev/min, produciendo la acción del tornillo una cierta disgregación del material que se traduce en una mayor presencia de finos, lo que no ocurre en los separadores de banda transportadora.
- En cuanto al mantenimiento y funcionamiento de estos equipos, los separadores de banda presentan

más inconvenientes que los de tornillo, ya que se producen mayores atascos por la presencia de finos (lodos) decantados en el fondo de la cuba. Con frecuencia deben realizarse operaciones de mantenimiento, cambio de agua de la cuba y desatascos del equipo. Esto no ocurre en los equipos con tornillo por su mayor facilidad de evacuación de estos finos.

- Respecto al funcionamiento mecánico, los separadores de banda transportadora requieren mayor atención del operador, teniendo en cuenta la situación de sus rodillos y cojinetes en el interior de la cuba de agua. Por el contrario, los separadores de tornillo solo tienen un rodamiento marino sumergido que permite trabajar 2.500 horas sin cambios. Por el contrario, respecto al sistema de evacuación, la cinta transportadora de los separadores de banda puede durar hasta 5.000 horas sin recambio, mientras que la hélice del tornillo sinfín debe ser reforzada cada 2.500 horas o una vez al año, como consecuencia del desgaste.
- El consumo energético de ambos separadores es relativamente bajo, aunque existe cierta diferencia entre ellos: de 6 a 9 kW en los primeros y de 9 a 11 kW en los de tornillo.
- Aunque los fabricantes de estos equipos quieren mostrar una diferencia granulométrica de alimentación para seleccionar un modelo u otro (granulometrías menores para el de tornillo sinfín y mayores para el de banda transportadora), el hecho es que en la práctica ambos modelos trabajan muy por debajo del rango de la granulometría de alimentación nominal que indican en los catálogos (nominal de 0 a 180 mm y real de 15 a 100 mm), y sin diferencia notable entre ellos.
- Por otro lado, se constata que las producciones de los separadores de tornillo son ligeramente superiores a las de los separadores de banda transportadora.
- La capacidad operativa real de estos clasificadores hidráulicos suele estar muy alejada de la capacidad

Plantas	1	2a	2b	3	4	5	6
Tipo de separador hidráulico	Banda	Banda	Banda	Tornillo	Tornillo	Tornillo	Tornillo
Tipo de material	Heter.	Heter.	Homog.	Homog.	Heterog.	Heterog.	Heterog.
Material de admisión nominal (mm)	0-150	0-150	0-150	10-150	6-180	6-180	6-180
Material de admisión real (mm)	20-60	25-50	50-80	40-100	20-100	20-80	15-40
Producción nominal (t/h)	100	100	100	70-100	150	150	150
Producción real (t/h)	30-40	30-40	30-40	50	55-60	70-75	40
Consumo de agua (m ³ /semana)	5	5	5	10	20	30	7,5
Grado de limpieza (%)	75-80	70-75	70-75	95	85	90	90-95

Tabla 1. Tabla comparativa entre las diferentes propiedades de cada tipo de separador hidráulico.

Table 1. Table comparing the different properties of each type of hydraulic separator.

nominal que dan los fabricantes debido a los diferentes orígenes del residuo, y por tanto, de sus características. En el caso de trabajar con materiales heterogéneos con una elevada presencia de madera y tamaños irregulares, la producción de los separadores hidráulicos se reduce considerablemente a la vez que aumenta el consumo de agua. Por lo tanto, no se puede predecir en el tratamiento de RCD la capacidad operativa de un equipo hasta que no se determinan los resultados con el material que recibe la planta.

- Normalmente, a mayor tamaño de admisión corresponde mayor capacidad de producción; de ahí se deducen las diferencias entre la capacidad operativa real y la nominal dada por el fabricante.
- Un factor en contra de los separadores hidráulicos de tornillo sinfín es su elevado consumo de agua. La justificación se debe al movimiento de la hélice, que hace que el material sea volteado hasta 11 veces antes de su descarga, y por ese motivo el material absorbe un 25% más de agua que en los separadores de banda transportadora con material idéntico.

Por otro lado, los materiales homogéneos o limpios, compuestos mayormente por una fracción pétreo, tienen distinta absorción de agua, dependiendo de su naturaleza, porosidad, de las caras de fractura y del tiempo bajo el agua. Si a estos factores se suman el gran poder de absorción que tienen la madera, los yesos, los plásticos y los cartones, es prácticamente imposible calcular el elevado consumo de agua en la operación de estos separadores hidráulicos.

Aunque los fabricantes especifiquen un consumo de agua del 25% de la capacidad de la cuba, la realidad se aleja bastante, pudiendo llegar con algunos materiales hasta del 600%. Mientras que el consumo de un separador hidráulico de banda transportadora es de 5 a 10 m³/semana, el de un separador de tornillo sinfín varía entre 7 y 30 m³/semana. Este valor varía en función de la producción y de la granulometría del material alimentado.

Conclusiones de la comparativa de los dos tipos de separadores hidráulicos

Una vez analizados los dos modelos de separadores hidráulicos que se comercializan en el sector de los RCD, y tras la observación de su funcionamiento en diversas plantas de valorización españolas de este tipo de residuos, es posible afirmar las siguientes conclusiones:

- La limpieza hidráulica de los RCD, independientemente de la granulometría de alimentación, nun-

ca superará el 90%. Esto hace que en la planta de valorización sea necesaria una limpieza previa con separadores neumáticos.

- Dos aspectos negativos caracterizan los modelos que se comercializan actualmente: El elevado consumo de agua de los separadores de tornillo sinfín y los continuos atascos generados en los separadores hidráulicos de banda transportadora. Pese a ello, la tendencia actual es a favor del separador de tornillo por producción, granulometría de alimentación, limpieza y menor mantenimiento.
- La limpieza del producto final, aspecto fundamental a la hora de comercializar el árido reciclado, no es óptima en ninguno de los dos equipos. Puede considerarse que resulta algo superior en los separadores de tornillo sinfín, si bien en estos el producto final puede aparecer más contaminado por la presencia de finos.
- Pese a que se trata de equipos de baja inversión (el más caro no supera los 60.000 euros), debe tenerse en cuenta el consumo de agua en los de tornillo y se necesitaría introducir ciertos cambios de diseño en los de banda transportadora para evitar los continuos atascos, que elevan los costes operacionales.
- Por último, se sugieren una serie de modificaciones operativas y de diseño, como son aumentar el tamaño de la cuba y evacuar el agua por rebose de forma continua, que permitirían mejorar considerablemente la producción y el rango de tamaños de admisión de estos equipos.

Innovaciones tecnológicas en el tratamiento de los RCD

A la vista de las conclusiones anteriores, se deduce que los separadores hidráulicos existentes hoy día en el mercado no son equipos que funcionen a pleno rendimiento en las plantas de tratamiento de los RCD, ni con la eficiencia demandada en el sector de los áridos reciclados.

Esta circunstancia ha motivado una línea de investigación en el sentido de optimizar la separación hidráulica, como medio más eficaz para la limpieza de estos productos reciclados y, de alguna forma, poder competir en calidad con los áridos naturales.

Con este motivo, la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid investiga la aplicación de nuevas técnicas y desarrollo de equipos que se adapten mejor a las demandas de este sector.

Como base de partida se han seleccionado muestras de materiales procedentes de plantas de tratamiento de RCD existentes en distintos puntos de la geografía nacional. Una vez caracterizadas dichas muestras, y para

la separación de los componentes de mayor valor, se procedió a la aplicación de diversos sistemas de concentración similares a los utilizados en el beneficio de los minerales y rocas industriales.

En principio fueron estudiados los sistemas de separación hidráulica en corriente laminar con aportación discontinua de agua, como son los clasificadores de banda y tornillo sinfín, ya descritos anteriormente, llegándose a la conclusión de que únicamente su eficiencia puede ser mejorada si el aporte de agua se realiza de forma continua.

Posteriormente se procedió a ensayar otros separadores hidráulicos, en este caso con corrientes de agua en régimen turbulento y acción diferencial. Según este principio y durante ciclos muy breves, se somete a las partículas sólidas, a unas corrientes ascendentes y descendentes, motivadas por unas pulsaciones alternas dadas al líquido, bien por un pistón o un diafragma, o por el movimiento alternativo de una criba en el fluido. De esta forma se consigue una separación por densidad, donde finalmente los más densos se colocan en las partes inferiores de la criba, mientras que los ligeros lo harán en la parte superior. Por otro lado, esta técnica es más adecuada para los tamaños intermedios de los RCD (entre 5-40 mm), para los que los separadores hidráulicos (banda y tornillo sinfín) funcionaban peor.

De esta forma, las muestras recibidas se sometieron a una fase de trituración, clasificación y cuarteo, con objeto de homogeneizar el tamaño de alimentación al equipo de laboratorio, y posteriormente se estudió su comportamiento en un sistema de separación hidráulica con pulsaciones. Para ello se utilizó el jig Harz cuyo principio de funcionamiento aparece mostrado en la siguiente Figura 5.

Los resultados han sido positivos en la mayoría de los casos, ya que además de generarse una separación clara entre la fracción pétrea y los impropios (maderas, plásticos, papel, etc.), se ha observado una cierta cla-

sificación entre las partículas de naturaleza cerámica y el hormigón, así como una buena eliminación de los yesos, el verdadero veneno de los áridos reciclados.

Posteriormente, se ha estudiado mejorar la calidad de los productos pétreos conseguidos tras la limpieza hidráulica en jig, que en el caso de tratarse de un RCD de tipo heterogéneo, está constituida fundamentalmente por una mezcla de materiales cerámicos y hormigón.

En este caso se aplicaron técnicas de separación basadas en el magnetismo.

Descripción de los ensayos de laboratorio

El estudio se realizó en el Laboratorio de Concentración de Menas de la ETSI Minas de Madrid, donde se ensayaron cinco diferentes muestras (homogéneas y heterogéneas) procedentes de tres plantas españolas de RCD: Cataluña, Madrid y Cádiz.

En la siguiente Tabla 2 pueden observarse las granulometrías iniciales de las muestras recibidas, así como su contenido en fracción no pétrea (% en volumen de impropios).

Las cinco muestras se cuartearon para realizar los análisis previstos, tomando entre los 800 y 1.200 gramos. Mediante machaqueo, cada muestra se redujo a una granulometría inferior a 10 mm, que posterior-

	Granulometría muestra (mm)	Volumen impropios (%)
Cataluña homogénea	0-40	12
Cataluña heterogénea	0-80	27
Madrid homogénea	0-50	6
Madrid heterogénea	0-40	31
Cádiz heterogénea	0-50	9

Tabla 2. Datos de las muestras recibida en el laboratorio para su estudio.

Table 2. Data of the samples received in the laboratory for study.

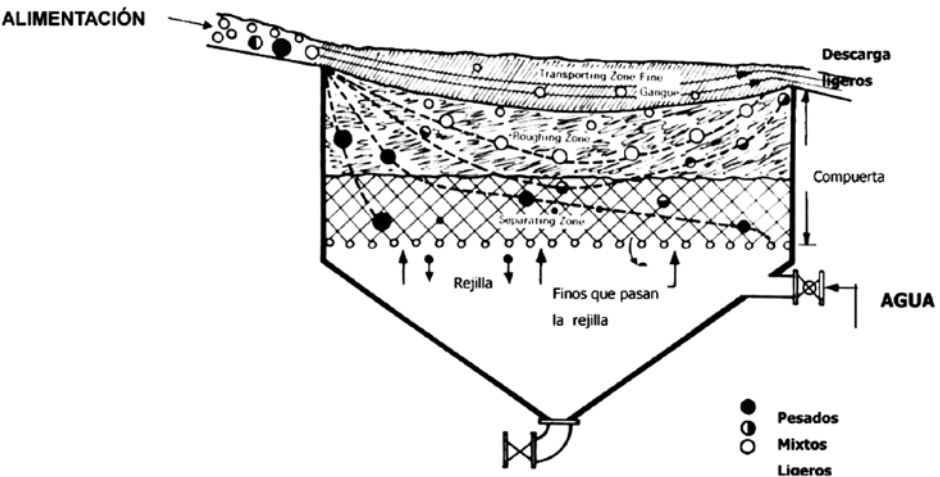


Figura 5. Diagrama explicativo de la forma de trabajo de un jig.

Figure 5. Explanatory diagram of how a jig works.

mente fue clasificada, dando una granulometría de alimentación efectiva al jig de 0,5-9,5 mm.

El equipo utilizado en el laboratorio para las pruebas fue el jig tipo Harz, con recipiente de criba hidráulica de 125 de largo x 100 de ancho x 130 milímetros de alto. El tiempo de residencia se estimó en 5 minutos. Se trata de un equipo que trabaja según el principio de aceleración diferencial.

Los resultados obtenidos en los ensayos permitieron detectar una importante diferenciación entre los materiales densos y los ligeros. Los de mayor peso, constituidos por la fracción pétrea, quedaron depositados en la parte inferior del recipiente, mientras que la fracción ligera (no pétrea) se desplazó hacia la zona superior. Además, también se ha producido cierta separación entre las diferentes naturalezas de las fracciones pétreas. El hormigón, más denso, ha quedado en la parte inferior, mientras que los cerámicos, con menor densidad, han quedado por encima. También

se ha percibido en los resultados obtenidos una clara distribución de las partículas por su tamaño. Así, las partículas de menor tamaño se encuentran en la zona superior y las de más peso en la inferior (Figura 7a y 7b).



Figura 6. Fotografía del jig Harz del laboratorio de la ETSIM.
Figure 6. Photograph of a Harz jig in the ETSIM laboratory.



Figura 7a y 7b. Material grueso heterogéneo antes de la trituration y después de la separación en jig (dentro de la cesta).
Figure 7a and 7b. Coarse heterogeneous material before crushing and after jig separation (in the basket).

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la distribución de pesos de las fracciones obtenidas en la separación en jig de las diferentes muestras, donde la fracción ligera está formada por la fracción no pétreas y yesos, la fracción media por cerámicos y la fracción pesada principalmente por hormigón.

	Fracción ligera (%)	Fracción media (%)	Fracción pesada (%)
Cataluña homogénea	3,92	30,46	65,63
Cataluña heterogénea	7,76	35,63	56,61
Madrid homogénea	1,35	25,32	73,33
Madrid heterogénea	7,88	56,82	35,30
Cádiz heterogénea	7,74	34,34	57,92

Tabla 3. Distribución de pesos de las diferentes fracciones una vez separadas por el jig.

Tabla 3. *Weights of the different fractions separated by the jig.*



Figura 8. Separación en bandejas de los tres productos. A la izquierda los impropios (no pétreos), en el centro la fracción cerámica, y a la derecha la fracción de hormigón.

Figure 8. *The three products in separate trays. On the left, the non-stone dirty product; in the centre the ceramic fraction; on the right the concrete fraction.*

Conclusiones de la separación en JIG

Las conclusiones obtenidas de los ensayos de separación de los áridos reciclados mediante equipos de clasificación hidráulica con acción diferencial (jig) indican que la separación de los áridos reciclados es posible con esta tecnología. A continuación se mencionan los aspectos más destacables:

- Es posible una limpieza de la fracción pétreas retirando los componentes ligeros (impropios), produciendo un árido reciclado de mayor calidad.
- El yeso, verdadero problema de los áridos reciclados, puede ser eliminado en las fracciones más ligeras del resto de fracciones pétreas.

- En esta clasificación hidráulica por jig, la distribución granulométrica influye en la calidad de la separación.
- Se comprueba que en las muestras homogéneas se consigue una importante fracción pesada de hormigón limpio, recuperando altos porcentajes, entre 65,62-73,3%, muy superior al caso de heterogéneas.
- Puesto que han aparecido partículas pétreas de menor tamaño en la parte superior, se estima conveniente alimentar el equipo con un rango granulométrico más estrecho, en el que el efecto del tamaño de partículas sea menor que el efecto de la densidad.

Ensayos de separación magnética

Con objeto de incrementar aún más la calidad de las fracciones pétreas (más densas) procedentes de la separación en el jig, a las que ya se les habían extraído los elementos no pétreos y yesos, se les sometió de nuevo a otro tipo de clasificación, en este caso según

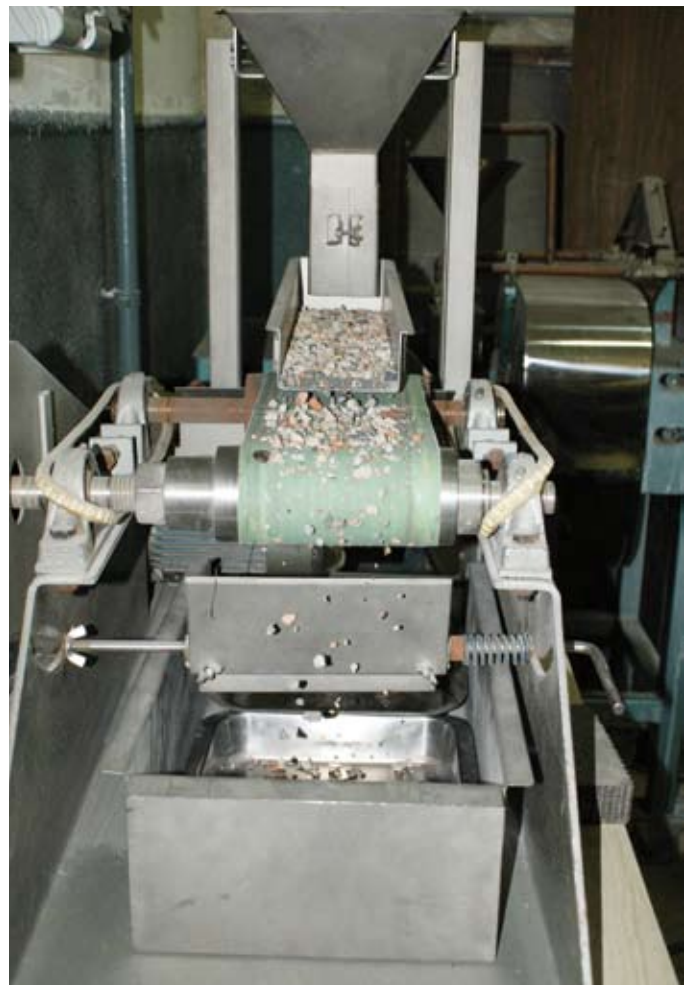


Figura 9. Separador magnético de banda de alta intensidad.

Figure 9. *High-intensity-band magnetic separator.*

su característica magnética. Para ello se utilizó un separador magnético de banda de alta intensidad con imanes permanentes Eriez con potencia de 13.000 Gauss a 2,5 Hz (Figura 9).

En la separación magnética se estudiaron las muestras homogéneas y heterogéneas de las plantas de Cataluña y Madrid. Dos muestras correspondientes a la fracción de hormigón (que es la que realmente tiene valor en el mercado) y una con mayor contenido en cerámicos.

Los resultados obtenidos fueron positivos. Se generó una importante separación entre la fracción de hormigón y la fracción cerámica.

La causa de esta depuración radica en la presencia de minerales férricos que entran en la composición de las arcillas de los cerámicos, y no están inhibidos tal y como ocurre con los que están presentes en el hormigón, de forma que al ser sometidos a la acción del campo magnético, se adhieren al rodillo y se recogen separados de la fracción de hormigón.



Figura 10a y 10b. Materiales magnéticos (izquierda) y no magnéticos (derecha) tras su separación.

Figure 10a and 10b. Magnetic materials (left) and non-magnetic ones (right) after their separation.

	Magnéticos (%)	No magnéticos (%)
Cataluña homogéneo (hormigón)	24,25	75,75
Cataluña heterogéneo (hormigón)	36,10	63,90
Madrid homogéneo (hormigón)	28,38	70,52
Madrid heterogéneo (cerámico)	40,32	59,68

Tabla 4. Porcentajes en peso de las fracciones resultantes de la separación magnética.

Table 4. Percentages by weight of the fractions deriving from magnetic separation.

Como conclusión a este último ensayo, se puede afirmar que la separación magnética puede resultar útil para eliminar los materiales pétreos de naturaleza cerámica de los de hormigón, valorizando así esta última fracción de mayor aceptación en el mercado de los áridos reciclados.

La causa de esta separación puede ser debida a la presencia de minerales férricos en la composición de las arcillas, base de los productos cerámicos. Por tanto, para conocer con mayor rigor la causa de este efecto sería recomendable realizar una caracterización posterior de estos materiales mediante análisis químicos y mineralógicos.

Conclusión final

En las plantas de tratamiento de RCD es posible aplicar otras técnicas complementarias a las tradicionales, con el objeto de obtener áridos reciclados de mayor calidad.

La posibilidad del empleo de equipos basados en la aceleración diferencial (jig), ha mostrado con el estudio realizado en la ETSI de Minas de Madrid, que puede ser una buena alternativa a los métodos de clasificación en separadores hidráulicos (banda o tornillo sinfín).

La aplicación posterior de una separación magnética de intensidad medio-alta permite concentrar la fracción de hormigón resultante a niveles más altos de calidad por la eliminación de los componentes cerámicos.

Tras esta experimentación a nivel de laboratorio, se hace preciso profundizar en esta investigación, extrapolando con RCD de naturaleza semejante a otras granulometrías de mayor rango, caracterizando al mismo tiempo los áridos obtenidos, y de esa forma

poder homologar con mayor precisión la calidad de los mismos.

Referencias

- Lund, H. 1996. *Manual McGraw-Hill de reciclaje*. McGraw-Hill Iberoamericana de España, S.A. Madrid, España.
- Rodríguez-Avello, A. 2003. Tecnologías del reciclaje de residuos de construcción y demolición (Pamplona, España). *I Congreso Nacional de Demolición y Reciclaje*. Barcelona, 127-154.
- Tertre Toran, I. 2003. Reciclado de materiales de construcción. En: Fueyo Editores, S.L. *Manual de Demoliciones, Reciclaje y Manipulación de Materiales*, Madrid, 331-365.
- De Benito, E. 2003. Normativa aplicable a la gestión de los RCD. En: Fueyo Editores, S.L. *Manual de Demoliciones, Reciclaje y Manipulación de Materiales*, Madrid, 367-405.
- Fargas, J. 2004. Comercialización del árido reciclado (Zaragoza, España). *II Congreso nacional de demolición y reciclaje*. Zaragoza, 67-74.
- García, A. 2006. Planificación y gestión de residuos en obras de demolición. Ejemplos prácticos (Zaragoza, España). *III Congreso nacional de demolición y reciclaje*. Zaragoza, 67-76.
- Bustillo, M. 2010. *Manual de RCD y áridos reciclados*. Fueyo Editores, S.L. Madrid. 797 pp.
- Fueyo, L. 2010. *Estudio comparativo de los separadores hidráulicos en el sector de los residuos de construcción y demolición*. Informe inédito. E.T.S.I. Minas de Madrid. Madrid. 67 pp.
- Fueyo, L. 2010. *RCD y áridos reciclados*. Informe inédito. Cátedra ANEFA de Tecnología de Áridos. E.T.S.I. Minas de Madrid. Madrid. 34 pp.
- Fueyo, L. 2010. Los áridos reciclados. *Tierra y Tecnología*, 38, 67-72.

Recibido: septiembre 2011

Revisado: diciembre 2011

Aceptado: enero 2012

Publicado: abril 2012