LIBRO DE COMUNICACIONES

II CONGRESO INTERNACIONAL DE RCD



Zaragoza, 13 y 14 de noviembre de 2024

ISBN- 978-84-121454-0-3

INDICE DE COMUNICACIONES:

1. EL PROYECTO REDOL Y SU CADENA DE VALOR RCD……..…3
2. TRATAMIENTO INDUSTRIAL DE RCD MIXTOS FINOS MEDIANTE TECNOLOGÍA DENSIMÉTRICA EN SECO PARA LA ELIMINACIÓN DE SULFATOS…… 10
3. DESARROLLO, FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA DE NUEVOS HORMIGONES CON INCORPORACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS Y ADICIONES CEMENTANTES PROCEDENTES DE FRACCIONES DE VIDRIO Y CERÁMICAS DE RCD VALORIZADAS……..17
4. REUTILIZACIÓN DE RCD COMO SUMIDERO DE CO2 PARA LA FABRICACIÓN DE CEMENTOS DE BAJA HUELLA DE CARBONO…… 25
5. ÁRIDO MULTI-RECICLADO DE HORMIGÓN PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA PREFABRICADORA: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES……32
6. AUTOMATED SOLUTIONS FOR SUSTAINABLE AND CIRCULAR CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE MANAGEMENT (RECONMATIC)…… 40
7. HACIA UN RESIDUO 0: VALORIZACIÓN DEL FLUJO MINERAL DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN POR ACTIVACIÓN ALCALINA EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN……..…41
8. RECICLAJE DE LA FRACCIÓN FINA DE RESIDUOS DE PREFABRICADOS DE HORMIGÓN PARA LA MEJORA DE SUELOS COHESIVOS EN OBRAS DE TIERRA……42
9. CÁTEDRA DE ARQUITECTURA CIRCULAR: OBJETIVO Y ALCANCE……..50
10. ÁRIDO MULTI-RECICLADO DE HORMIGÓN PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA PREFABRICADORA: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES……51
11. CHALLENGES AND CHARACTERIZATION OF FINE MIXED AGGREGATES FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE……52
12. MEJORA DE LA CALIDAD DE ÁRIDOS PROCEDENTES DE RCD MEDIANTE TECNOLOGÍA DE ABRASIÓN EN VÍA SECA. ESCALADO INDUSTRIAL……..60
13. POTENCIAL USO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES DE BASE CEMENTO A PARTIR DE SUS PROPIEDADES……..69
14. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO SUPERSULFATADO DE LA FRACCIÓN RECHAZO DE LA VALORIZACIÓN DE LOS RESTOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN……..75
15. EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE LA FRACCIÓN GRUESA Y FINA RECICLADA DE HORMIGÓN EN EL NIVEL PRESTACIONAL DE LOS HORMIGONES RECICLADOS……..82

1. El Proyecto REDOL y su cadena de valor RCD

Arroyo, Jorge (1); Barrio, Jorge (1); Casalé, María Pilar (2); Stefani, Christina (3); Kokkalis, Konstantinos (3); Gula, Nikita (4);

(1) CIRCE Centro Tecnológico. Parque Empresarial Dinamiza Avenida Ranillas, 3D Planta 1, 50018 Zaragoza, España. (2) CASALÉ. Avda. Ranillas, 3C, planta primera, oficina A 50018 Zaragoza. España. (3) Institute of Communication - Computer Systems (ICCS) 9, Iroon Politechniou Str. Zografou, Atenas. Grecia. (4) VDZ Technology gGmbH Toulouser Allee 71 40476, Duesseldorf, Alemania.

Palabras clave / Términos relevantes

Circularidad, Simbiosis Urbano Industrial

Tipo: Comunicación

Resumen de la comunicación

El Proyecto REDOL, financiado por la Comisión Europea dentro del programa Horizon Europe, tiene como objetivo desarrollar modelos de negocio innovadores utilizando residuos urbanos sólidos (RSU) como recursos alternativos para las industrias locales. Aragón, y particularmente su capital Zaragoza, se centran en alcanzar una economía circular innovadora para 2030 y ser una de las primeras 100 ciudades climáticamente neutras para ese año. REDOL aborda cinco de las siete cadenas de valor clave del Plan de Acción de Economía Circular de la Comisión Europea: aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), envases, plásticos, textiles, y residuos de construcción y demolición (RCD).

Gestión y Reciclaje de RCD

La gestión de RCD es un desafío debido a su volumen (375 millones de toneladas anuales) y su alto impacto ambiental. Estos residuos son una mezcla heterogénea que incluye metales, hormigón, ladrillos, madera y plásticos. La digitalización limitada del sector de la construcción impide la adopción de soluciones automatizadas que podrían facilitar la valorización de los RCD y la creación de cadenas de valor circulares.

Sistema Automatizado de Clasificación de RCD

REDOL desarrolla un sistema automatizado de clasificación de RCD, utilizando IA y robótica para separar plásticos y otros materiales, mejorando así el proceso de reciclaje. Este sistema tiene tres etapas:

1. Entrada de Residuos: Los residuos triturados se separan por tamaño utilizando cribas vibratorias y estacionarias.

2. Clasificación de Residuos: Un sistema multi-sensorial con cámaras RGB e hiperespectrales identifica y clasifica los materiales en la cinta transportadora. Los datos se procesan con modelos de IA para una caracterización precisa.

3. Separación de Residuos: Un brazo robótico recoge y clasifica los objetos según el tipo de material, guiado por algoritmos de planificación de ruta.

Materiales Alternativos para Cemento y Hormigón

REDOL también evalúa el uso de residuos industriales como materias primas alternativas para la industria del cemento y hormigón. Se realizan análisis de difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos X (XRF) y carbono orgánico total (TOC), entre otros, para determinar la viabilidad de los materiales. Las muestras se clasifican según su potencial de uso en la producción de clinker y como componentes del cemento.

Las muestras útiles se mezclan con cemento Portland en diferentes proporciones y se prueban para medir su resistencia a la compresión durante varios periodos. Los resultados preliminares ayudan a calcular el índice de actividad y a clasificar los materiales según las normas EN 450-1.

Conclusión

El proyecto REDOL impulsa la transición hacia una economía circular y digital mediante el desarrollo de tecnologías avanzadas para la gestión de RCD. Esto contribuye a reducir la huella de carbono y a mejorar la eficiencia de recursos en la industria de la construcción, alineándose con los objetivos de sostenibilidad de la Comisión Europea.

Introducción

REDOL es un proyecto financiado por la Comisión Europea dentro del programa Horizon Europe que tiene como objetivo demostrar la creación de nuevos modelos de negocio basados en los residuos urbanos sólidos (RSU) como recursos alternativos para las industrias locales. Aragón es una región europea NUTS 21 que ha establecido una ambiciosa iniciativa para alcanzar una economía circular innovadora para el año 2030, permitiendo la plena valorización de los residuos. Las principales actividades se están implementando en la capital, Zaragoza, que aspira a convertirse en una de las primeras 100 ciudades climáticamente neutras para 2030. Ya se han puesto en marcha proyectos como Circular Biocarbon, la primera biorefinería urbana que busca valorizar el 100% de los residuos orgánicos de la ciudad. REDOL complementará estos esfuerzos al abordar corrientes de RSU (residuos urbanos sólidos) que se relacionan con 5 de las 7 cadenas de valor clave definidas en el Plan de Acción de Economía Circular de la Comisión Europea: Aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), envases, plásticos, textiles, construcción y demolición

(RCD). Las cadenas de valor que sea abordan en el proyecto REDOL se representan en la Figura 1, haciendo mención especial en la de RCD.

La gestión adecuada y el reciclaje de los RCD representan un reto importante para la industria debido al volumen creciente de residuos producidos (aproximadamente 375 millones de toneladas al año) y su alto impacto ambiental (emisiones de CO_2). Los RCD son una mezcla altamente heterogénea de materiales que incluyen metales, hormigón, asfalto, morteros, ladrillos, yeso, madera, cartón, acero, hierro y plástico. Dado que el sector de la construcción aún es uno de los menos digitalizados, la valorización de los RCD está lejos de la adopción generalizada de soluciones automatizadas que podrían contribuir a la creación de nuevas cadenas de valor circulares. La implementación de sistemas avanzados de clasificación puede reducir la generación de residuos y los costos de gestión en todas las etapas de la cadena de valor de la construcción, contribuyendo a la transición hacia una economía digital y circular.

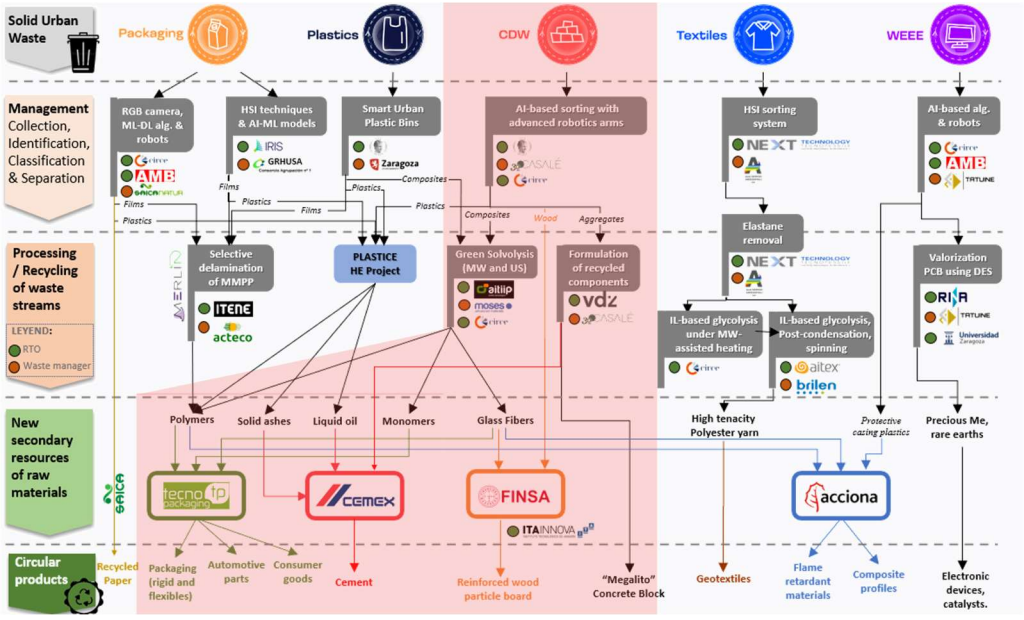


Figura 1: Metodología y actividades del proyecto REDOL

El proyecto REDOL se enfoca en desarrollar herramientas automatizadas novedosas, fortalecidas con robótica, separación y clasificación, para una mejor valorización de los RCD. Esto incluye un clasificador basado en sensores (ICCS) para mejorar las instalaciones de gestión de residuos de construcción (Casalé).

Además, varios de los materiales recogidos en las instalaciones de Casalé se evaluarán como materias primas alternativas para la industria del cemento/hormigón, formulando nuevos componentes y productos reduciendo significativamente la huella de carbono y aumentando la eficiencia de recursos.

Clasificación de RCD basada en IA y Robótica

En REDOL; se está desarrollando un sistema de clasificación automatizado para Residuos de Construcción y Demolición (RCD) que optimizará la separación de plásticos de los RCD para mejorar la valorización de la corriente.. Concretamente, el sistema de clasificación separará las piezas de plástico de los residuos, que luego serán reciclados, agregando valor al proceso de reciclaje de RCD. El sistema propuesto utiliza técnicas de visión artificial, brazos robóticos y una cinta transportadora con otras partes mecánicas para una clasificación eficiente de RCD en las plantas de gestión. El sistema se divide en tres etapas: entrada de residuos, clasificación de residuos y separación de residuos. Inicialmente, los residuos, que se trituran en piezas de hasta 150 mm, se transportan a través de una criba vibratoria que separa eficientemente y con precisión los materiales por tamaño. Una criba estacionaria elimina partículas más pequeñas con una malla de corte de aproximadamente 50 mm. La criba está montada cerca de la cinta transportadora del sistema de clasificación actuando en parte como un alimentador y regulando el flujo del material (entrada de residuos). Cada parte e los residuos de entrada se examina por separado mediante un sistema multi-sensorial no destructivo. Este sistema consta de una cámara en espectro visible (RGB) y una cámara hiperespectral. La cámara RGB se utiliza para identificar la posición y forma de cada objeto en la cinta transportadora. La clasificación del residuo de entrada se logra mediante la imagen hiperespectral captada por una cámara que captura longitudes de onda de hasta 2500 nm y se utiliza para recopilar y analizar información del espectro de bandas espectrales contiguas, lo que resulta en la identificación del tipo de material para cada objeto (clasificación de residuos). Los datos proporcionados por la imagen hiperespectral se utilizan como entrada para el modelo de IA que está integrado en el sistema de clasificación. Al emplear modelos de aprendizaje profundo, como Transformadores de Visión (ViT), modelos basados en redes neuronales, como AutoEncoders o modelos con conexiones de salto, se espera una precisión de caracterización superior al 98%, mediante el procesado de estas imágenes hiperespectrales. Al mismo tiempo, los modelos de segmentación

profunda identificarán la ubicación exacta de los residuos analizados a lo largo de la cinta transportadora, logrando una precisión de clasificación mayor al 99%. El análisis de datos por el modelo de IA conduce a una alimentación ininterrumpida y en tiempo real del modelo de estimación de pose y planificación basado en IA de un brazo robótico rápido (robot delta), que se coloca junto a la cinta transportadora. El brazo robótico, integrado con la cámara visible, identificará cada material en la cinta transportadora, y las coordenadas exactas y la posición de los objetos se introducirán en los algoritmos de planificación de ruta del robot. Finalmente, el robot recogerá el objeto de la manera más eficiente y colocará el objeto en el contenedor apropiado, según su tipo, contribuyendo al objetivo final de separar con éxito el plástico de los RCD. Un diseño detallado del sistema de clasificación automatizado se muestra en la Figura 2.

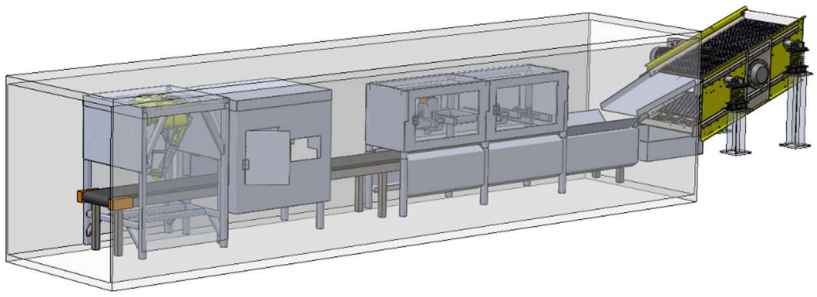


Figura 2. Diseño del sistema de clasificación automatizado para RCD

Materiales alternativos para la aplicación en la industria del cemento y el hormigón

En esta tarea Casalé y VDZ trabajan conjuntamente en la evaluación de nuevos tipos de residuos industriales de entre los disponibles en la planta de gestión de residuos de Casale de varias ramas de la industria como un flujo de material preclasificado. En un primer paso, las muestras fueron preparadas de diferentes maneras para los primeros análisis: tamizado, separación magnética y molienda y posteriormente se ha realizado un análisis dependiendo del material: Difracción de rayos X (XRD), Fluorescencia de rayos X (XRF), Carbono orgánico total (TOC), Prueba base/hidrógeno y Contenido de vidrio

La información sobre las muestras clasificadas, analizadas y caracterizadas se presenta en la Tabla 1

Muestra	Propósito	Procesado del material	Análisis
Muestra 1	Materia prima, componente principal o secundario	Tamizado (1 mm), separación magnética, molienda para XRF	XRD, XRF, TOC
Muestra 2	Aditivo a la materia prima	Tamizado (1 mm), separación magnética, molienda para XRF	XRD, XRF, TOC
Muestra 3	Aditivo a la materia prima	Tamizado (1 mm), separación magnética, molienda para XRF	XRD, XRF, TOC, contenido de vidrio
Muestra 4	Materia prima	Tamizado (1 mm), separación magnética, molienda para XRF	XRD, XRF, TOC, prueba base/hidrógeno
Muestra 5	Combustible	Secado, molienda para XRF	TOC
Muestra 6	Sin uso	Tamizado (1 mm), separación magnética, molienda para XRF	XRD, XRF, TOC
Muestra 7	Materia prima, componente principal o secundario	Tamizado (1 mm), separación magnética, molienda para XRF	XRD, XRF, TOC, prueba base/hidrógeno, contenido de vidrio

.

Tabla 1: Información sobre las muestras

Con base en los resultados de los análisis, se está analizando el posible propósito final de las muestras, lo cual también puede verse en la Tabla 1. Por ejemplo, la Muestra 6 no puede ser utilizada en los flujos de proceso en la industria del cemento y el hormigón debido a su composición química (alto contenido alcalino). Las muestras 1, 4 y 7 pueden posiblemente ser utilizadas como materia prima en el proceso de cocción de clinker y las muestras 1 y 7 como constituyente principal o secundario en la producción de cemento. Las muestras 2 y 3 son solo de interés secundario y pueden posiblemente ser utilizadas como adición a la materia prima. La muestra 5 puede tal vez ser utilizada como combustible. Cabe mencionar que estas investigaciones están en curso.

Las muestras potencialmente utilizables fueron molidas a una cierta finura para investigaciones como materia prima y como constituyente del cemento. Para los análisis de las muestras 1, 4 y 7 como materia prima, se calcularon 6 composiciones de crudo para la cocción de clinker. Los siguientes pasos son la producción de crudo en un molino de laboratorio y luego el análisis del crudo. Posteriormente se producirá clinker de laboratorio seguido de un análisis de la calidad del clinker.

Para los análisis de las muestras 1 (S1) y 7 (S7) como constituyente del cemento, los materiales se mezclaron con un cemento Portland CEM I 52.5 R en dos proporciones diferentes de 10 y 25%

en masa. Se produjeron especímenes de prueba y se compararon con una mezcla de referencia de 100% en masa de CEM I 52.5 R. Las resistencias a la compresión se medirán después de 2, 7, 28, 56 y 91 días. Los resultados después de 28 y 91 días pueden ser utilizados para calcular el índice de actividad y clasificarlos sobre la base del criterio según EN 450-1. Los resultados preliminares se muestran en la Figura 3.

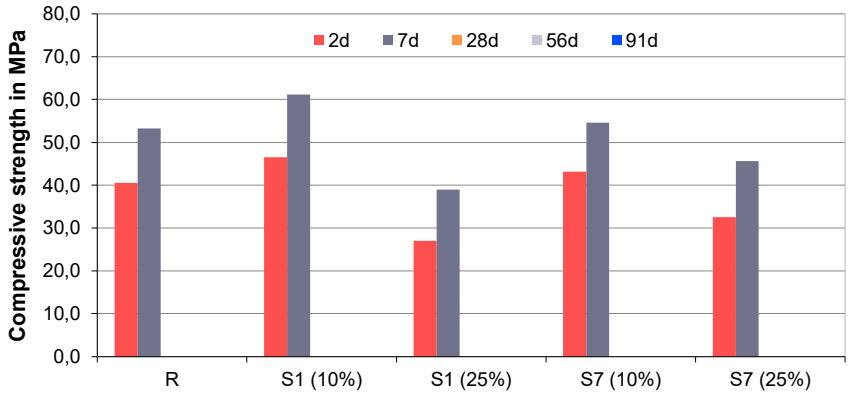


Figura 3: Resistencia a la compresión del mortero de las mezclas analizadas

2. Tratamiento industrial de RCD Mixtos Finos mediante tecnología densimétrica en seco para la eliminación de sulfatos.

Moreno Juez, Jaime (1); Frías, Moisés (2); Asensio, Eloy (2); Guerrero, Ana (2); Cebrián, J. José (3); Berjón, J. Diego (4);

(1) TECNALIA, BASQUE RESEARCH AND TECHNOLOGY ALLIANCE (BRTA) (2) INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA (IETCC-CSIC) (3) MOGENSEN, S.L.U. (4) SURGE AMBIENTAL, S.L.

Palabras clave / Términos relevantes

RCD Mixtos finos, Separación densimétrica en seco, Eliminación de Sulfatos

Tipo: Comunicación

Resumen de la comunicación

El estudio aborda la problemática de la presencia de sulfatos en residuos de construcción y demolición (RCD) mixtos, que limita su valorización como áridos reciclados. Se evalúa la efectividad de la tecnología de mesa densimétrica para eliminar impurezas de yeso y materiales ligeros en RCD mixtos finos e intermedios. Tras el tratamiento, se logran reducciones de sulfatos de hasta el 87% en ambas fracciones, especialmente en la fracción intermedia (4/12 mm). El proceso es viable a escala industrial, con un coste de tratamiento 〈 3,2 €/t de árido tratado. Sin embargo, sigue siendo profundizar en el proceso para minimizar pérdidas en la fracción fina y maximizar la calidad del árido obtenido.

Introducción

Uno de los grandes problemas de los RCD mixtos, especialmente en las fracciones finas, es la presencia de sulfatos procedentes de partículas de yeso y de fracciones no pétreas ligeras (plásticos, madera, papel, materiales orgánicos) que limitan fuertemente su potencial de valorización como áridos reciclados en la gran mayoría de aplicaciones constructivas [1].

Para reducir este problema y eliminar el yeso, se han estudiado diferentes procesos de valorización. Las partículas de hormigón y yeso más gruesas se pueden separar en función de diferencia de color [2] o densidad en agua [3], pero estas técnicas no son aplicables a las fracciones de tamaño más pequeño y en medio seco debido a las limitaciones técnicas y económicas que presentan estas tecnologías. Las tecnologías de mesa densimétrica en vía seca, se utilizan para la separación eficaz de diferentes materiales secos debido a la densidad y cuentan con un gran potencial para el tratamiento industrial y eficiente de los RCD mixto [4], incluida la fracción fina (<4 mm). Debido a la reducida diferencia de densidades entre las corrientes minerales que componen el RCD, estas tecnologías necesitan ser adaptadas y optimizadas para lograr separar de forma eficientes estos residuos. El presente estudio pretende, por lo tanto, profundizar en la eficacia de eliminación de impropios de yeso y ligeros de una corriente de RCD mixtos finos

(1/4mm) e intermedios (4/12mm) para la obtención de áridos reciclados de calidad y con costes de tratamientos 31 industriales viables (<4€/t).

2. Materiales y métodos

2.1. Tecnología de separación densimétrica

Los separadores densimétricos en seco, también llamados mesas de separación densimétrica, se utilizan para la separación eficaz de materiales debido a la densidad. La separación se logra mediante un movimiento de vibración en una superficie de un fondo de tratamiento inclinado. El aire ascendente fluye desde abajo a través de dicha superficie y provoca dos clases de efectos para el material que debe tratarse. Los productos con densidad menor se arrastran sin tocar el suelo y se deslizan en dirección a la corriente de aire al contrario de los productos con mayor densidad. La planta piloto de MOGENSEN opera en ciclo cerrado con una capacidad de tratamiento de 6t/h. Es totalmente parametrizable y puede adaptarse a los diferentes materiales que se vayan a tratar. Cuenta con tolvas y cintas de alimentación, una mesa densimétrica GSort y un ciclón de aspiración.

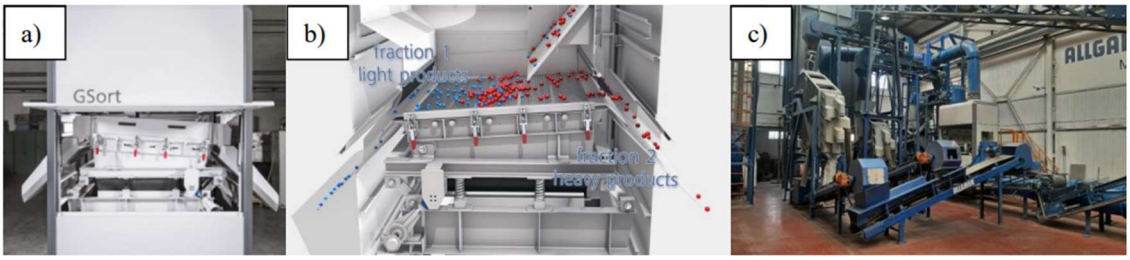


Fig. 1. a) Mesa densimétrica), b) principio de funcionamiento y c) planta piloto – Mogensen

2.2. Características de los RCD tratados

Los áridos reciclados mixtos tratados proceden de una fracción bruta de partida 0-80 mm muy mezclada obtenida en la planta de valorización de SURGE AMBIENTAL ubicada en Alcalá de Henares.

2.3. Metodología

Para las pruebas se preparó y suministró un total de 15 toneladas de árido reciclado mixto sucio (ARMS) por parte de SURGE con una granulometría de 0/80mm. Se realizó un tratamiento de reducción de tamaño en las instalaciones de MOGENSEN consistente en un machaqueo con un molino de impacto y una clasificación con el fin de reducir el tamaño, liberar el posible yeso adherido a otras partículas y generar dos fracciones granulométricas comerciales para su tratamiento de forma individual mediante las mesas densimétricas:

(ARMS 1/4 mm y ARMS 4/12 mm).



Fig. 2. a) Material sin tratar "ARMS". b) Material tratado "LIGERO": c) Material tratado "PESADO".

Posteriormente, cada una de estas fracciones se trató con la mesa densimétrica obteniendo dos muestras de-nominadas “PESADO” (o material de calidad recuperado) y “LIGERO” (rechazos que se descartan). Las propiedades del material de entrada y de los productos de salida se caracterizan para evaluar el proceso en términos de eficacia de separación (calidad del material obtenido) y eficiencia del proceso (productividad).

3. Resultados

3.1 Eficiencia de separación

a) Ensayo de clasificación de componentes de la fracción gruesa (4/12mm) El ensayo de clasificación de componentes se llevó a cabo únicamente en la fracción 4/12mm (UNE-EN 933-11). Después del paso del árido por la mesa densimétrica, el contenido de fracción pétrea y cerámica en la fracción de calidad recuperada (4/12P) aumenta y el contenido de impropios disminuye considerablemente respecto a la muestra sin tratar, pasando de 20,35% a 5,74%.

Por el contrario, los impropios se concentran en la fracción LIGERA (4/12L), alcanzando el 52,4%.

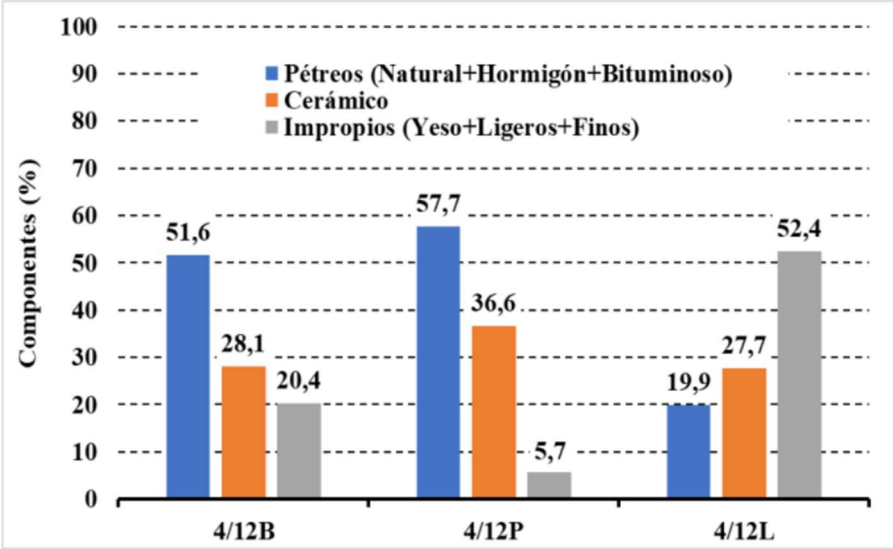


Fig. 3. Análisis de compontes de la fracción gruesa 4/12.

b) Densidad y absorción de agua

En las siguientes gráficas se muestra la densidad y la absorción de agua de ambas fracciones tratadas:

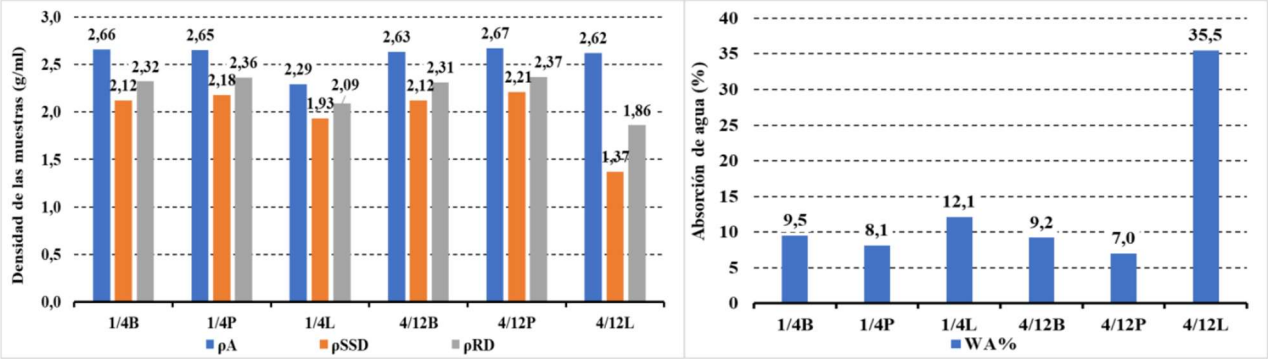


Fig. 4. Mesa densimétrica (izq.), principio de funcionamiento (centro) y planta piloto (dcha.) – Mogensen

La densidad de la fracción PESADA de los áridos con granulometría 1/4 mm y 4/12 mm aumenta después del tratamiento, lo que es significativo de la eliminación de impropios en las muestras (materiales con menor densidad que los áridos). Del mismo modo, la absorción de agua disminuye considerablemente en el árido de calidad (fracción PESADA) en comparación con la fracción bruta (antes de pasar por la mesa densimétrica) y 78 aumenta en la fracción rechazo (fracción LIGERA) debido a la mayor absorción de los impropios eliminados. 79 c) Pérdida por calcinación (PPC) y composición química por fluorescencia de rayos X (FRX) 80 En la siguiente tabla se recogen los resultados de PPC y FRX obtenidos. El contenido de sulfatos disminuye 81 considerablemente en las fracciones pesadas para ambas granulometrías, indicativo de que el tratamiento en 82 la mesa densimétrica permite mejorar la calidad de los áridos reduciendo la cantidad de yeso en las muestras. 83 Cabe destacar la reducción de sulfatos obtenida en la fracción 4/12 mm alcanzando valores inferiores al 0,9%, 84 partiendo de valores iniciales cercanos al 7%.

Tabla 1. Resultados de PPC y FRX.

	1/4B	1/4P	1/4L	4/12B	4/12P	4/12L
SiO_2 (%)	35,666	37,213	17,12	37,103	44,897	19,411
CaO (%)	25,751	27,264	29,533	24,295	25,448	24,431
SO_3 (%)	6,106	3,432	21,539	6,748	0,849	18,384
Al_2O_3 (%)	7,995	9,142	5,758	7,947	8,248	6,757
Fe_2O_3 (%)	3,009	3,367	2,971	2,65	3,467	3,571
K_2O (%)	1,918	2,284	1,522	1,78	1,838	1,681
MgO (%)	1,927	2,017	1,686	1,654	1,543	1,932
Otros (%)	1,519	1,447	1,202	1,373	1,375	1,146
PPC	16,1	13,86	18,66	16,46	12,26	22,69

f) Análisis químico (sulfatos y cloruros)

Las analíticas químicas se muestran en la Tabla 2. El tratamiento del árido mediante mesa densimétrica con- 89 sigue reducir significativamente el contenido en sulfatos en las muestras analizadas tanto en las finas como en 90 las gruesas, llegando a ser prácticamente nulo en las fracciones más gruesas.

Tabla 2. Resultados análisis químicos (sulfatos y cloruros).

	Contenido total de Azufre (%)	Sulfatos solubles en ácido (%)	Sulfatos solubles en agua (%)	Sulfato de magnesio (%)	Cloruros solubles en agua (%)
1/4B	0,89	2,55	0,23	29,20	0,01
1/4P	0,21	0,85	0,24	23,60	0,00
1/4L	3,93	9,77	0,36	61,10	0,01
4/12B	0,96	2,61	0,32	35,60	0,00
4/12P	0,18	0,27	0,04	15,80	0,00
4/12L	2,58	6,54	0,24	49,80	0,01

3.2 Balance de masas y productividad

En la prueba piloto realizada, se alcanzaron flujos de tratamiento de 6 t/h en los que se obtuvo el balance de masas de la Tabla 3. La eficiencia del proceso es superior en la fracción fina y genera más pérdidas en la gruesa.

A la hora de parametrizar y optimizar el proceso, es importante llegar a un compromiso entre la calidad del material valorizado y la cantidad de rechazo generado para que el proceso sea económicamente viable. La estimación de costes (CAPEX + OPEX) del escalado de la prueba realizada es de 3,2 €/t de árido obtenido, 99 siendo viable industrialmente.

Tabla 3. Balance de masas

Fracción	Pesados (%)	Ligeros (%)	Superligeros (%)
1-4mm	84	13	3
4-12mm	70	29	1

3. Conclusiones

Tras el tratamiento por mesa densimétrica de dos fracciones comerciales (1/4mm y 4/12mm) procedentes de un RCD Mixto Sucio se puede concluir que ambas fracciones mejoran en calidad tras el tratamiento y se alcanzan reducciones considerables de sulfatos, especialmente en la fracción 4/12 mm en las que se alcanzan valores inferiores al 0,9% (por análisis elemental), partiendo de valores cercanos al 7% en la muestra bruta de partida. La muestra fina 1/4mm, pese a alcanzar reducciones en el contenido de sulfatos significativas, se queda más alejada de los rendimientos de limpieza obtenidos para la muestra 4/12 mm, por lo que sería necesario profundizar más en la ruta y parámetros de tratamiento. En cuanto a la productividad, el balance de masas realizado indica que se alcanzan rechazos del 13% y 29 % para las fracciones 1/4 mm y 4/12 mm respectivamente. Para un escalado industrial es necesario optimizar el proceso para minimizar las pérdidas y maximizar la calidad del material. No obstante, con estos resultados se estima un coste de tratamiento inferior a 3,2 €/t de árido tratado, siendo un proceso viable a escala industrial.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Dirección General de Investigación e Innovación Tecnológica de la Comunidad de Madrid y a los Fondos Europeos FEDER, por la cofinanciación del proyecto VALREC.

Referencias

1. Agrela, F.; de Juan, M.S.; Ayuso, J.; Geraldes, V.; Jiménez, J. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. Constr. Build. Mater. 2011, 25, 3950–3955.

2. Asakura, H.; Watanabe, Y.; Ono, Y.; Yamada, M.; Inoue, Y.; Alfaro, A.M. Characteristics of fine processed construction and demolition waste in Japan and method to obtain fines having low gypsum component and wood contents.

3. Ambrós W., Sampaio C., Cazacliu B., Miltzarek G., Miranda L. Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste. Waste Manag. 2017; 60:75-83.

4. Kui Hu, Yujing Chen, Falak Naz, Changnv Zeng, Shihao Cao, Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste, Waste Management, Volume 85, 2019, Pages 396-404

3.Desarrollo, fabricación y puesta en obra de nuevos hormigones con incorporación de áridos reciclados y adiciones cementantes procedentes de fracciones de vidrio y cerámicas de RCD valorizadas.

Baraibar, José-Manuel (1); Moreno-Juez, Jaime (2); Roca, Gustavo (3); Arribas, Idoia (2);

(1) Viuda de Sainz, S.L. (2) Tecnalia, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Derio, España (3) Viuda de Sainz, S.L

Palabras clave / Términos relevantes

Hormigón reciclado; Adiciones cementantes micronizadas de vidrio y cerámico

Tipo: Comunicación

Resumen de la comunicación

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar y analizar la viabilidad de fabricación y puesta en obra de nuevos hormigones reciclados de baja huella de carbono con el propósito de acelerar su adopción en el mercado. La reducción de la huella de carbono se consigue gracias a la utilización de adiciones cementantes (sustitución del 5% de cemento) derivadas de la micronización de fracciones inorgánicas de residuos de construcción y demolición (RCD), como vidrio y cerámica, además del empleo de altos contenidos de áridos reciclados de hormigón (100% gruesos y 50% finos). Se analiza detalladamente el impacto de estas adiciones en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido de los hormigones, junto con la inclusión de áridos reciclados en distintas proporciones. Los resultados obtenidos indican que la sustitución parcial del cemento por adiciones micronizadas permite alcanzar características similares a las del hormigón convencional, aunque se observa una leve reducción en las resistencias mecánicas. Sin embargo, tanto la fabricación, la puesta en obra como el desempeño en servicio de estos hormigones reciclados no muestran divergencias en comparación con los convencionales. Este estudio pretende aportar significativamente a la transición hacia una economía más circular en el ámbito de la industria de la construcción, gracias al conocimiento generado y seguridad transmitida a los profesionales durante la fabricación y aplicación de hormigones.

Área temática: Fabricación y puesta en obra.

Palabras clave: Hormigón reciclado; Adiciones cementantes micronizadas de vidrio y cerámico.

Resumen: El objetivo del estudio es desarrollar y analizar la viabilidad de hormigones reciclados de baja huella de carbono. Se logra la reducción de la huella de carbono mediante la sustitución del 5% de cemento por adiciones derivadas de residuos de construcción y demolición. Los resultados muestran que estos hormigones reciclados tienen características similares a los convencionales, aunque con una leve reducción en resistencias mecánicas. La fabricación, puesta en obra y desempeño en servicio de estos hormigones no muestran divergencias con los convencionales.

1 Introducción

El hormigón, en tanto material que presenta un alto contenido de cemento, presenta una elevada huella ambiental a nivel global [1]. En este contexto, el hormigón reciclado se presenta como una alternativa interesante para favorecer la transición hacia una economía más circular [2]. El hormigón reciclado trata en primer lugar de sustituir al máximo los áridos naturales por áridos de origen reciclado. Además, propone emplear cementos con la menor huella disponible y además sustituir parcialmente este cemento por adiciones con propiedades conglomerantes y origen reciclado, en línea con una tendencia clara en la industria de la construcción para emplear fuentes alternativas de materiales [3]. En el presente trabajo se pretende desarrollar y demostrar la viabilidad de fabricación y puesta en obra en escenario real de nuevos hormigones en masa de baja huella de carbono para acelerar su puesta en mercado. Estos hormigones se han diseñado empleando diferentes contenidos de adiciones cementantes procedentes de la valorización mediante micronización de fracciones inorgánicas de RCD complejas (vidrio y cerámico), así como áridos reciclados de hormigón. Se evalúa el efecto de utilizar estas adiciones cementantes obtenidas a partir de vidrio y cerámico finamente molido en una combinación de sustitución y adición al cemento. Además, se pretende generar conocimiento avanzado sobre el potencial efecto de estas adiciones en las propiedades frescas y endurecidas de los hormigones,

en combinación con el uso de áridos reciclados finos y gruesos de hormigón en diferentes proporciones, de modo que puedan estudiarse las condiciones de puesta en obra y facilitar y acelerar su fabricación y empleo a escala industrial.

2. Materiales y métodos

2.1. Características de hormigón objetivo y materiales empleados

En la tabla siguiente se especifican las propiedades, requisitos y objetivos de circularidad que se solicitan al hormigón reciclado para pavimentos optimizado, así como las propiedades de los materiales empleados.

Propiedad	Valor	Comentarios
Aplicación	Hormigón para pavimentación	Alternativa a hormigones no estructurales para pavimentación.
Granulométría	0/20	Tamaño máximo de árido 20 mm.
Consistencia	Blanda	Valor de cono marcado por el fabricante entre 100 y 140 mm.
Resistencia	20 MPa a 28 días	Valor objetivo marcado por el fabricante.
Materiales reciclados empleados	Hasta 50% de AR fino de hormigón (0-4mm). 100% de AR grueso de hormigón (4-20mm).	El objetivo es emplear más del 50% en peso de materia prima secundaria, áridos reciclados de hormigón fino y grueso y adiciones valorizadas.
Conglomerante	Cemento + adiciones recicladas hasta en un 10 % de sustitución.	El objetivo es reducir el cemento y suplirlo por adiciones micronizadas procedentes de RCD (vidrio laminar y ARM).
Clase de exposición	X0	Para hormigón en masa: todas las exposiciones salvo donde haya ataque hielo/deshielo, abrasión o ataque químico.

ENSAYO	ÁRIDOS REC. DE HORMIGÓN	
	FRACCIÓN 0-4 mm	FRACCIÓN 4-20 mm
Absorción (%)	7,98	4,4
Densidad SSS (Mg/m3)	2,19	2,35
Densidad Seca (Mg/m3)	2,03	2,25
	ADICIONES MICRONIZADAS	
	AR Mixto	Vidrio Laminar
d(0.1) (µm)	2,9	5,9
d(0.5) (µm)	20,5	32,4
d(0.9) (µm)	113,1	75,7
Sup. específica (m2/g)	0,31	0,19

Tabla 1. Características objetivo de hormigón reciclado y propiedades de los materiales empleados.

2.2. Metodología

Se llevaron a cabo diferentes etapas de optimización hasta alcanzar la formulación ensayada en entorno real:

1) Estudio de la reactividad en morteros normalizados de 2 adiciones micronizadas procedentes de RCD Se empleó una dosificación de referencia con cemento CEM I 52.5 R y diferentes porcentajes de sustitución de cemento por las adiciones micronizadas: ARM: 5%; 10% y 20% y Vidrio Laminar: 5%. **2) Ensayo de diferentes dosificaciones de mezclas de hormigón en laboratorio**, estableciendo combinaciones de cada una de las fracciones minerales valorizadas estudiadas en el proyecto (25% y 50% de sustitución de árido fino y 50 y 75% de árido grueso y 10% de RCD micronizado). Se profundizó en las propiedades frescas y endurecidas de los

hormigones. **3) Selección de dos formulaciones para la validación en entorno real de un hormigón HRM-20/B/20/X0**.

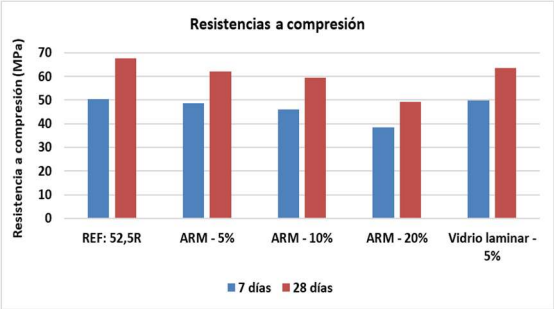
3. Resultados

3.1 Estudio del efecto de las adiciones micronizadas en morteros normalizados

Los resultados de docilidad en fresco y resistencias a compresión a 7 y 28 días para estos morteros se muestran en la siguiente figura. Tanto el micronizado de árido reciclado mixto como el micronizado de vidrio laminar procedente de RCD al 5% de sustitución permiten obtener prestaciones muy similares al cemento de referencia, especialmente en el caso de micronizado de vidrio laminar. Por otro lado, puede establecerse que las consistencias aumentan en todos los casos. El aumento de fluidez puede deberse a una combinación de menos superficie específica y menor porosidad en las adiciones de vidrio. Para la fabricación de hormigones en laboratorio, se prioriza el uso de ARM en hasta un 10% de sustitución de cemento en combinación de los áridos reciclados finos y gruesos. Se decide no continuar con el vidrio laminar debido a la falta de disponibilidad.

Fig. 1. Resistencias a compresión a 7 y 28 días y docilidad de morteros con diferentes porcentajes de adiciones.

MUESTRA		Docilidad Media (mm)
REF: 52,5R - Lemona		175,4
AR Mixto	5%	176,2
	10%	181,4
	20%	191,1
Vidrio laminar – 5%		190,0



3.3 Estudio del comportamiento del hormigón reciclado en laboratorio

Las resistencias a flexión y compresión a 7 y 28 días para los hormigones se muestran en la siguiente figura.

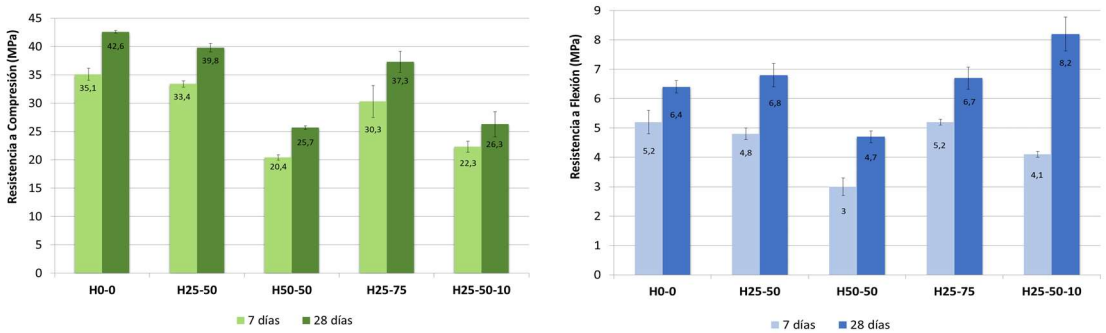


Fig. 2. Resistencias a compresión y flexión a 7 y 28 días de hormigones en laboratorio con diferentes combinaciones.

Las principales conclusiones que se obtienen a partir de los resultados de la optimización en laboratorio son:

1) El uso de AR fino penaliza considerablemente las prestaciones mecánicas a partir del 25% de sustitución por lo que se elige este valor para la fabricación en planta piloto. 2) La fracción gruesa de AR no parece afectar significativamente a las resistencias mecánicas. En laboratorio se ha llegado al 75% de sustitución, pero los resultados obtenidos permiten ir más allá en el demostrador y alcanzar el 100% de sustitución. 3) El uso de micronizado al 10% parece afectar de forma significativa a la resistencia a compresión por lo que se decide emplear un 5% de sustitución en la prueba piloto. Las dosificaciones elegidas para el demostrador son:

- HORMIGÓN 1: 100% de cemento; 25% de sustitución del árido fino y 100% del árido grueso
- HORMIGÓN 2: 95% de cemento; 5% adición de ARM; 25% de sust. de árido fino y 100% de árido grueso.

3.2. Estudio de fabricación y puesta en obra de hormigón reciclado en prueba industrial

En total se fabrican 9 m^3 de hormigón reciclado, 4.5 m^3 de cada tipo en la planta de hormigón OGERKO, situada en Santurtzi (Bizkaia). Una vez fabricado en la central, el hormigón se transporta y se coloca en una pavimentación de 36 m^2 de una zona peatonal situada en Bilbao. El hormigón formulado es un hormigón HRM-20/B/20/X0 y con cemento de tipo II, CEM II/A-L 42,5R. Las dosificaciones se incluyen en la Tabla 2.

Tabla 2. Dosificaciones de hormigón en prueba industrial

Componentes	HORMIGÓN 1 Con ARh H25-100	HORMIGÓN 2 Con ARh + micronizado H25-100-5
Cemento II (kg/m3)	241	229
Micronizado	-	12
ARH 0-4mm (kg/m3)	240	240
ARH 4-12mm (kg/m3)	289	289
ARH 12-20mm (kg/m3)	385	385
Árido Calizo 0-4mm (kg/m3)	1.007	1.007
a/c	0,70	0,70
Agua amasado (kg/m3)	170	170
Polyheed 769 (%) (MB)	2.400 ml	2.400 ml
Masterease 3850 (%) (MB)	3.000 ml	3.000 ml

Durante la fase de fabricación, se establecen los parámetros de carga y de procesado adaptados a las características de los eco-hormigones, es decir, se presta especial atención a la carga de los áridos, la incorporación de agua de amasado y aditivos y a los tiempos de amasado. En la Figura 3 se ilustra la zona de carga de la planta y la pantalla de control de la fabricación, así como el vertido y puesta en obra.

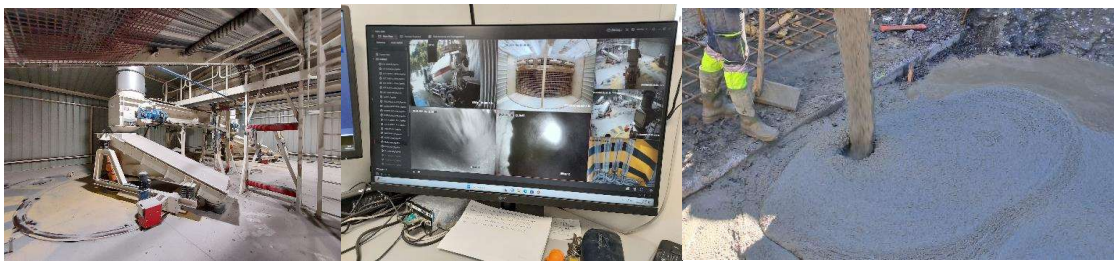
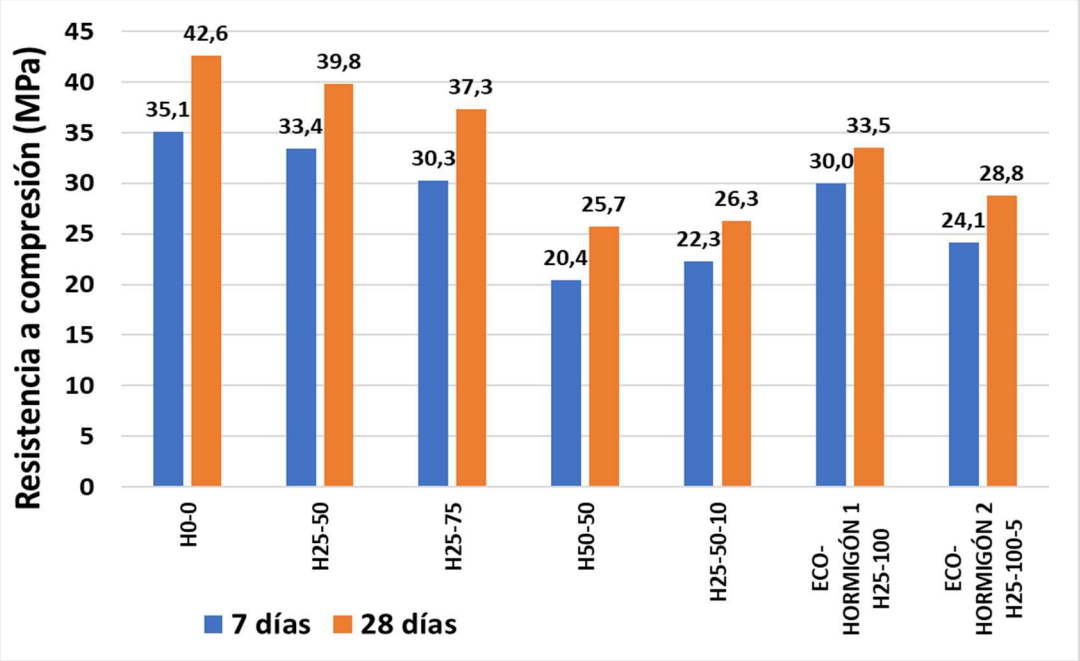


Fig.3. Dosificación de materiales; Control del proceso con software de planta; Vertido de hormigón.

Para el control de calidad de los hormigones se mide la docilidad, la densidad en fresco y las resistencias a 7 y 28 días que se muestran a continuación:

Eco-hormigón 1		Eco-hormigón 2	
Cono 0	210 mm	Cono 0	240 mm
Cono 30 min	N.D.	Cono 30 min	200 mm
Cono 1 hora	N.D.	Cono 1 hora	140 mm
Densidad fresco	2,37 t/m3	Densidad fresco	2,34 t/m3
Densidad 1 día	2,36 t/m3	Densidad 1 día	2,33 t/m3

Fig.3. Densidades, Docilidad y Resistencia a compresión de los hormigones en prueba industrial.



La densidad de los eco-hormigones entra dentro de los rangos obtenidos en hormigones convencionales. Se observa un ligero descenso de densidad en el eco-hormigón 2 posiblemente por el efecto del micronizado. Se observa cómo la docilidad a 0 minutos es superior al emplear micronizado, observación en línea con las obtenidas en las muestras de hormigón efectuadas en laboratorio. En cuanto a la resistencia a compresión, al igual que lo observado en laboratorio, se observa que una sustitución del árido grueso en hasta un 100% no influye significativamente en las resistencias siendo estas similares al aumentar de un 75% a un 100% de sustitución. Igualmente, el empleo de adiciones cementantes de forma sinérgica con los áridos reciclados penaliza las resistencias mecánicas aunque estas suelen presentar un efecto a largo plazo, en las resistencias obtenidas a los 56 días. Durante el vertido y puesta en obra de los eco-hormigones

no se detectaron diferencias con la puesta en obra de un hormigón tradicional en cuanto a segregación, trabajabilidad y aspecto (Figura 3).

3. Conclusiones

Tanto la fabricación como la puesta en obra de los eco-hormigones fabricados en el marco de este proyecto se llevaron a cabo sin apreciar diferencias significativas respecto a los hormigones convencionales fabricados con árido natural. Tanto a nivel de proceso, transporte y puesta en obra, los eco-hormigones tuvieron el mismo comportamiento que los hormigones convencionales. A nivel prestacional, no se han apreciado cambios en cuanto a la trabajabilidad. Sin embargo, se apreciaron ligeras mermas en las resistencias mecánicas, siempre dentro de los márgenes admisibles. Las resistencias obtenidas con sustituciones de 100% de árido grueso, 25% de árido fino y 5% de eco-adiciones hacen viable el uso industrial de estos hormigones al alcanzar las prestaciones y requisitos exigidos para el uso al que van destinados. La inspección visual tras la puesta en obra y el fraguado confirmó el buen comportamiento de los hormigones al no apreciarse fisuración o delaminaciones.

Agradecimientos:

Este Proyecto ha sido financiado parcialmente por IHOBE, la sociedad pública de gestión ambiental del Gobierno Vasco, en el marco de la convocatoria de ayudas en Ecoinnovación Circular 2021 (Líneas 1 y 2), con el acrónimo de Proyecto INCARAD.

Referencias

1. COMMUNICATION FROM THE COMMISION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS - The European Green Deal. 2019: European Commission, COM/2019/640 final.
2. Meyer, C. The greening of the concrete industry, Cement and Concrete Composites, 2009, Volume 31, Issue 8.
3. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review(2014) Construction and Building Materials, 68, pp. 501 - 516.

4.Reutilización de RCD como sumidero de CO2 para la fabricación de cementos de baja huella de carbono

Reutilización de RCD como sumidero de CO_2 para la fabricación de cementos de baja huella de carbono

M. Frías[a], A.M. Moreno-Reyes[a], M.V. Paredes[a], A. Guerrero[a], J. Moreno[b] y A. Oleaga[b]

[a]Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja IETcc-CSIC, Madrid, España
[b]Tecnalia, Alianza Vasca de Investigación y Tecnología (BRTA), Derio (Bilbao), España
Corresponding autors: e-mails: mfrias@ietcc.csic.es, ana.moreno@ietccc.sic.es

Keywords: Fracción fina de RCD, sumideros de CO_2.

1. Introducción.

El cemento Portland (OPC) es el material de construcción más consumido en todo el mundo. Actualmente, se consumen más de 4000 mt/a [1]. Sin embargo, su uso es responsable de la emisión de 5-8% de CO_2 al medio ambiente [2]. Por lo que, es necesario buscar alternativas para cumplir con las políticas Medioambientales, Economía Circular y Neutralidad Climática para 2050. Para ello, se están buscando alternativas viables para reducir el contenido del clinker de OPC mediante el uso de Supplementary Cementitious Materials (SCMs).

Una de estas alternativas, que mayor interés está tomando tanto en la comunidad científica como en el sector de la construcción, es la utilización de la fracción fina (<4mm) de los residuos de construcción y demolición (RCD) debido a que proporcionan una mejora de las resistencias mecánicas, penetración de cloruros, reducción de las emisiones de CO_2 [3]. A parte de esto, las nuevas tecnologías de carbonatación permiten utilizarlo previamente como como sumideros de CO_2 por su naturaleza alcalina, mineralizando los residuos y cuyos cambios mineralógicos producidos se transforman en residuos más estables y con propiedades mejorables [4-6].

El presente trabajo de investigación se basa en analizar el efecto de la carbonatación acelerada mediante reactor estático de la fracción fina de RCD en las propiedades físico-mecánicas de pastas de eco-cementos preparadas con un 7 y 20% de sustitución

2. Materiales y métodos.

2.1. Materiales.

En este trabajo se han empleado como materiales de partida para la preparación de eco-cementos: un cemento Portland comercial designado como CEM I 52.5R (OPC) y fracción fina de un CDW-C silíceo (< 4mm) procedente de la planta Surge Ambiental, Madrid (España).

2.2.Métodos.

2.2.1. Carbonatación del CDW.

El CDW-C se carbonató previamente por medio de un reactor spouted bed de 5L de capacidad. Las condiciones que se aplicaron fueron: a) 10% HR del sólido, b) 85-90%HR del CO_2, c) tamaño de partícula 80-200µm, d) CO_2 al 100% de concentración, e) 20ºC de temperatura de alimentación de CO_2 y f) 1bar de presión. El reactor se alimentó con un flujo al 100% de CO_2 comercial, precalentado mediante resistencias eléctricas, hasta los 20ºC y con una tasa continua de 18-20Nm^3/h durante 90min. Tanto CDW-C como CCDW fueron secados a 105ºC en una estufa de laboratorio durante 24h. Posteriormente, se molieron por <45µm para conseguir una finura óptima para su utilización como adición puzolánica.

2.2.2. Técnicas instrumentales.

La composición química se determinó por medio de un espectrómetro de fluorescencia de rayos X (FRX) de Bruker, por dispersión de longitudes de onda (WDXRF), S8 Tiger. La distribución del tamaño de partícula se obtuvo con un granulómetro laser Mastersizer 3000, equipado con una fuente de luz roja y azul (He-Ne y LED) en modo dispersión seca. La medida se realizó en el rango 0.01 a 3500µm. La identificación y cuantificación de las fases mineralógicas cristalinas se realizó mediante un difractómetro PANalytrical X'Pert PRO (Crystallography Open Database (COD)). Estas fases se cuantificaron mediante Match V.3 y usando el software Fullprof. Las resistencias mecánicas a flexotracción y compresión se determinaron por medio de una prensa Autotest de 15000Kn de Ibertest. El valor proporcionado se obtuvo de la media de 3 probetas ensayadas por cada pasta y edad, según la norma EN 196-2 [7]. La demanda de agua y el inicio de fraguado se determinaron por medio de la norma EN 196-3 [8].

2.2.3. Actividad puzolánica de los residuos.

El análisis y evolución de las fases mineralógicas con el tiempo de curado (7, 28 y 90d) se ha realizado en los residuos obtenidos después de emplear un método químico acelerado en el sistema puro puzolana/cal. Este método consiste en añadir 1g de puzolana en 75mL de disolución saturada de cal, mantenida a 40ºC. Una vez finalizados los tiempos de reacción se lleva a cabo el filtrado y el sólido así obtenido se lava con etanol y se seca en una estufa a 60ºC durante 24h para parar la reacción de hidratación.

2.2.4. Preparación de las pastas de cementos binarios.

Se prepararon 5 mezclas con sustituciones parciales de 0, 7 y 20% de OPC para cada una de las adiciones mineralógicas carbonatada y sin carbonatada. Se elaboraron probetas prismáticas de 1 x 1 x 6 cm, tomando de referencia la norma EN 197-1 [9]. Estas probetas se curaron bajo agua durante 2, 28 y 90d.

3. Resultados y discusión.

3.1. Caracterización de los materiales de partida.

3.1.1. Caracterización química.

Las composiciones químicas por FRX los materiales de partida se muestran en la Tabla 1. El residuo de partida presenta una naturaleza silico-cálcica, con alto contenido de LOI debido al proceso de carbonatación natural durante su vida de servicio y su posterior

acumulación en la planta de gestión. En el caso de CCDW su elevado LOI se debe al proceso de carbonatación acelerada.

Tabla 1. Composición química de los materiales de partida.

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	Others	LOI
OPC	20.06	4.96	3.28	62.19	2.12	3.14	0.37	0.66	0.25	0.28	0.59	2.11
CDW-C	43.81	6.32	1.80	27.13	1.17	0.97	0.47	2.23	0.23	0.09	0.15	15.63
CCDW	39.97	6.65	1.84	27.25	1.28	0.94	0.46	2.18	0.24	0.08	0.16	18.98

3.1.2. Granulometría láser.

El OPC y el CDW-C presentan un solo máximo a 25.68 y 13.56µm, respectivamente (Fig.1), mientras que el CCDW presenta dos máximos principales localizados a 7.16 y 25.68µm.

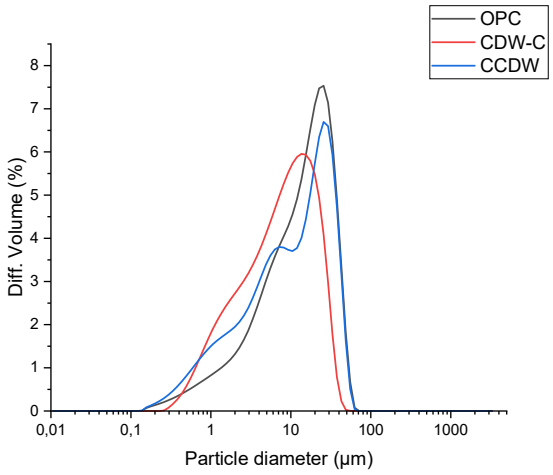


Figura 1. Curvas de densidad de distribución de los materiales de partida.

En la Tabla 2 se recogen los parámetros físicos de D_x (diámetro de partícula al que pasa el 10, 50 y 90% del volumen de las partículas). En esta Tabla se observa que el CDW-C presenta una mayor finura que el resto de materiales.

Tabla 2. Valores de D_x para los materiales de partida.

Material	Dv_{10} (µm)	Dv_{50} (µm)	Dv_{90} (µm)
OPC	2.11	14.10	34.40
CDW-C	1.31	7.72	22.80
CCDW	1.19	10.70	33.80

3.1.3. Análisis DRX-Rietveld.

En el análisis por DRX de los materiales de partida se identificaron las fases anhidras típicas del OPC (alita, belita, aluminato tricálcico, fase ferrítica y carbonato cálcico). Mientras que, en CDW-C y CCDW se identificaron cuarzo, mica, plagioclasa, feldespato y calcita. Además, en ambos residuos CDW se cuantificó una fase amorfa con un contenido mayor del 30%.

3.1.4. Método químico acelerado.

La Figura 2 muestra los valores de la cal fijada en ambos residuos hasta 180 días de reacción puzolánica. En esta Figura se observa que el CCDW presenta una mayor capacidad para reaccionar con la cal del medio a edades tempranas (≤28d). Esto indica una mayor mineralización del residuo por efecto de la carbonatación que produce fases con mayor grado de reactividad mejorando sus presentaciones mecánicas [6, 10].

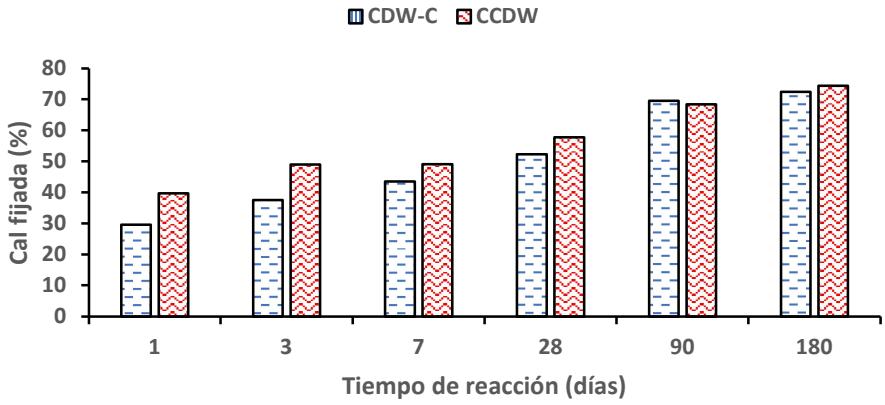


Figura 2. Evolución de la cal fijada con el tiempo de reacción.

3.2. Comportamiento físico-mecánico de los cementos binarios.

3.2.1. Propiedades físicas.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos físicos de agua de consistencia normal (NCW), tiempo de fraguado inicial (IST) y expansión (S) para los diferentes eco-cementos binarios en estado fresco. También se recogen las especificaciones de la normativa europea vigente.

Tabla 3. Valores de las propiedades físicas.

Material	NCW (± 1g)	IST (± 10min)	S (mm)
OPC	150	150	0.1
7% CDW-C	147	155	0.1
20% CDW-C	147	140	0.1
7% CCDW	149	165	0.0
20% CCDW	151	140	0.0
EN 197-1	-	≥ 45-75	≤ 10

Los resultados de la Tabla 3 muestra que la carbonatación previa, prácticamente no afecta a los valores NCW, aunque se observa una ligera disminución (1-2 g menos), sin influencia del porcentaje utilizado. Sin embargo, el caso de IST existen diferentes con 7% de sustitución, siendo ligeramente superior cuando se carbonata previamente, debido al efecto filler que ejercen los materiales mineralógicos y al efecto químico debido al alto contenido de carbonatos presentes en los residuos [11, 12]. Las pastas de eco-cementos binarios no sufren expansión y tienen un comportamiento similar a la pasta de referencia.

3.2.2. Propiedades mecánicas.

La Figura 3 muestra las resistencias mecánicas a compresión de las diferentes pastas de eco-cementos binarios a 2, 28 y 90 días de reacción.

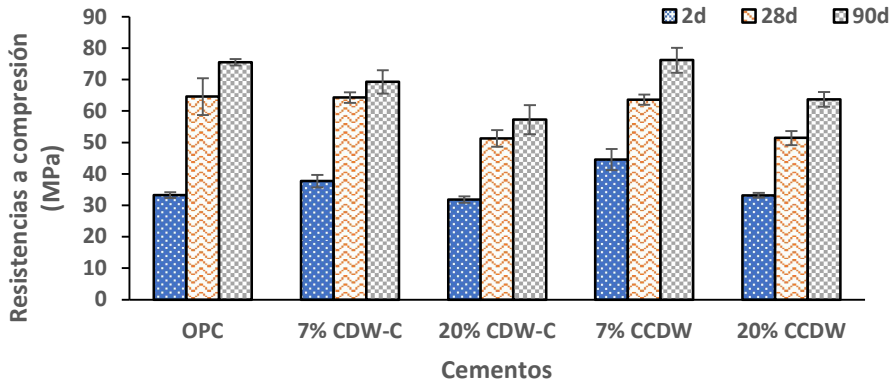


Figura 3. Resistencias mecánicas a compresión de las pastas de eco-cementos binarios.

Las eco-pastas (Figura 3) presentan resistencias mecánicas a compresión inferiores a la pasta OPC en ambos casos. Sin embargo, la carbonatación del residuo mejora las resistencias a compresión de las pastas incluso a 2 días de curado en la pasta 7%CCDW. Esto corroboraría lo ya observado en estudios anteriores sobre la mineralización de la muestra, transformándola en residuos más reactivos, densificando la matriz de cemento y mejoran el comportamiento mecánico [13, 14].

4. Conclusiones.

En este trabajo se ha estudiado el efecto de la carbonatación acelerada de la fracción fina del CDW sobre las propiedades físico-mecánicas de las pastas de eco-cementos binarios elaboradas con un 7 y 20% de sustitución.

El CCDW presenta mayores porcentajes de fijación de CaO que el CDW-C a edades inferiores a 28d, ya que la carbonatación del CDW produce fases mineralógicas más reactivas que mejoran las prestaciones.

La caracterización física de las pastas de eco-cementos demuestra que no hay diferencias en el agua de consistencia normal con respecto a la pasta de OPC. Mientras que, el CCDW presenta una ligera disminución. No hay dependencia con el porcentaje de sustitución.

Las adiciones carbonatadas y sin carbonatar no ejercen efecto sobre IST, siendo este idéntico (140min) para ambas adiciones cuando se añaden en un 20% al OPC y es inferior a la pasta de referencia.

Las resistencias a compresión son inferiores a la pasta de referencia. Sin embargo, la carbonatación inicial del residuo mejora el comportamiento mecánico debido a la mayor reactividad y contenido de productos carbonatados.

5. Agradecimientos.

Esta investigación forma parte de un proyecto nacional (PID2021-122390OB-C21/CIDECAR) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICIU), la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), (MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y, FEDER/UE) y también a la financiación del contrato predoctoral referenciado como PRE2022-105386

6. Referencias.

[1] US Geological Survey, Mineral commodity summaries 2020, *US Geological Survey*, p. 200, 2020. https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2022, (accessed 26 september 2024)

[2] R. Kajaste y M. Hurme, Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost, *J. Clean. Prod.* 112 (2016), 4041-4052. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055.

[3] D. O. de Lima, D. S. de Lira, M. F. Rojas y H. S. Junior, Assessment of the potential use of construction and demolition waste (CDW) fines as eco-pozzolan in binary and ternary cements, *Const. Build. Mater.* 411 (2024), 134320. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134320.

[4] A. Ebrahimi, M. Saffari, D. Milani, A. Montoya, M. Valix y A. Abbas, Sustainable transformation of fly ash industrial waste into a construction cement blend via CO_2 carbonation, *J. Clean. Prod.* 156 (2017), 660-669. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.037.

[5] A. Olega, I. Vegas, R. Vigil de la Villa, S. Martínez-Ramírez, R. García, A.M. Moreno-Reyes y M. Frías, High-efficiency contact technology on carbonation of ladle furnace slags and recycled concrete fines for novel low-carbon supplementary cementitious materials, *J. CO_2 util.* In revision.

[6] L. Zhang, X. Zha, J. Ning y W. Li, Research Status on the Application Technology of Early Age Carbon Dioxide Curing, *Buildings.* 13(4) (2023), 957. https://doi.org/10.3390/buildings13040957.

[7] AENOR, EN 196-2. Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos. 2014.

[8] AENOR, EN 196-3. Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen. 2017.

[9] AENOR, EN 197-1. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. 2018.

[10] B. Zhan, C. Poon y C. Shi, CO_2 curing for improving the properties of concrete blocks containing recycled aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 42 (2013), 1-8. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.013.

[11] E. Asensio, C. Medina, M. Frías y M. I. Sánchez de Rojas, Fired clay-based construction and demolition waste as pozzolanic addition in cements. Design of new eco-efficient cements, *J. Clean. Prod.* 265 (2020), 121610. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121610.

[12] H. F. W. Taylor, *Cement chemistry*, 2nd edition. London: Thomas Telford Publishing, (1997).

[13] M. Monasterio, L. Caneda-Martínez, I. Vegas y M. Frías, Progress in the influence of recycled construction and demolition mineral-based blends on the physical–mechanical behaviour of ternary cementitious matrices, *Const. Build. Mater.* 344 (2022), 128169. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128169.

[14] M. Zajac, J. Skocek, P. Durdzinski, F. Bullerjahn, J. Skibsted y M. Ben Haha, Effect of carbonated cement paste on composite cement hydration and performance, *Cem. Concr. Res.* 134 (2020), 106090. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106090.

5.ÁRIDO MULTI-RECICLADO DE HORMIGÓN PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA PREFABRICADORA: CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES

Salesa-Bordanaba, Ángel (1); Pérez-Benedicto, José Ángel (1); López-Julián, Pedro Luis (1); Pérez-Bella, José María (2); Acero-Oliete, Alejandro (1);

(1) GIHA-EUPLA-UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA (2) EINA-UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Palabras clave / Términos relevantes

multi-reciclado, árido reciclado

Resumen de la comunicación

La industria de la construcción debe cumplir con unos requisitos ambientales cada vez más exigentes, entre los requerimientos más urgentes están los de reducir la generación de residuos de construcción y demolición, y la disminución en el consumo de materias primas. Ante esos desafíos, el uso de árido reciclado de hormigón es parte de la solución. Pero, ¿podemos reciclar el hormigón ya fabricado con árido reciclado? Para responder a esa pregunta hay que estudiar las propiedades de los áridos obtenidos en diferentes ciclos de reciclado y, de este modo, determinar los posibles usos de estos áridos.

Esta investigación se centra en la industria prefabricadora, donde el reciclaje múltiple es una necesidad urgente, además la trazabilidad presente en esta industria permite determinar perfectamente las características del hormigón producido así como las de sus componentes. A partir de piezas de hormigón prefabricado de buena calidad, se produjeron y analizaron tres ciclos de áridos reciclados de hormigón. Los resultados finales son prometedores debido a la buena calidad de los áridos reciclados y multi-reciclados obtenidos. Como viene siendo habitual estos pueden utilizarse tanto en aplicaciones de bajo nivel (rellenos), como en otras más exigentes: zahorras, bases de carreteras tratadas con cemento y firmes de hormigón. Su uso en hormigón estructural es factible, aunque está condicionado por el nivel de absorción de agua y el porcentaje de sustitución de áridos naturales por reciclados. Esta investigación demuestra la viabilidad del uso de áridos de hormigón multi-reciclados con todos los beneficios ambientales que ello conlleva.

Introducción

El sector de la construcción es uno de los mayores contaminantes de la tierra ya que consume grandes cantidades de materias primas y agua (Bravo et al. 2020). Una de las materias más consumidas son los áridos, esenciales en multitud de tipologías de construcción (carreteras, ferrocarriles, terraplenados…) y productos (hormigón, ladrillos, mezclas bituminosas…). De acuerdo a la European Aggregates Association (2021) en el año 2019 se consumieron en la UE 2.826 millones de toneladas de áridos, de los que solo 273 (9.7%) fueron reciclados o reusados. La consecuencia de este porcentaje tan bajo de áridos reciclados es una gran cantidad de vertidos de RCD, suponiendo un tercio de toda la basura producida en la UE (Bilsen et al., 2018). Cada año billones de toneladas de RCD son depositadas en vertederos con la correspondiente afección social, económica y medioambiental, en España todavía un 21% de los RCD son depositados en vertederos (Villoria Sáez et al., 2019). Teniendo en cuenta que la mayoría de RCD son reutilizables y reciclables la pérdida para la economía circular es tremendamente alta.

Las razones que pueden explicar una gestión inadecuada de los RCD pueden ser: precios no competitivos, falta de confianza en la calidad de los subproductos, falta de información de características y los retrasos entre la publicación de la leyes y su implementación (European Environment Agency, 2020)

Marco regulatorio

En España el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) permite el uso de áridos reciclados (AR) provenientes de RCD en capas de sub-base – zahorras, suelocemento y gravacemento y hormigón magro vibrado y pavimentos de hormigón. También hay mención indirecta al uso de RCD en el artículo 330.3 Terraplenes, donde se señala que podrán ser usados siempre y cuando se cumplan las especificaciones de dicho artículo. Los requerimientos son los recogidos en la Tabla 1. A nivel internacional existen propuestas de clasificación de AR para su uso en secciones de carretera, la más famosa es la De Brito et al. (2019) en Tabla 2.

Tabla 4 Requerimientos PG-3 Art. 510, 513, 550 y 551

Ensayo	Zahorras (Artículo 510 PG-3)		Suelocemento y Gravacemento (Artículo 513 PG-3)		Pavimentos de hormigón y Hormigón magro vibrado (Artículo 550 & 551 PG-3)	
	Árido Grueso	Árido Fino	Árido Grueso	Árido Fino	Árido Grueso	Árido Fino
Distribución Granulométrica	X	X	X	X	X	X
Índice de Lajas	<35		<30-40		<35	
Equivalente de arena (SE4)		>40-30		>40-35		>70-75
Coef. de Los Angeles(LA)	<30-35		<30-40		<35	
Densidad						
Absorción de agua						
Sulfato de magnesio pérdida	<18%					
Azufre total (S%)	<0.5%-1%	<0.5%-1%	<1%	<1%		
Sulfatos solubles (SO3 s%)	<0.7%	<0.7%	<0.8%	<0.8%		

Tabla 5 Clasificación internacional de Árido reciclado para aplicaciones en obras de carretera (De Brito et al., 2019)

Tipo de AR	Composición				Mín. Densidad (SSD)	Abs. Agua (%)	Los Angeles (%)	Sulfatos solubles (%)	Aplicaciones
	Rc + Ru (%)	Rb (%)	Ra (%)	Others (%)					
RCA-I	>90	<10	<5	<1	2200	<6	<35	<0.7	pavimentos de hormigón, subbases granulares o con conglomerante
RCA-II	>85	<15	<10	<3	2100	<8	<37	<0.8	subbases granulares o con conglomerante
MRA-I	>70	<30	<10	<5	1900	<8	<40	<0.8	subbases granulares y coronación de explanadas
MRA-II	>60	<40	<20	<8	1800	<12	<45	<1.0	Coronación de explanadas y rellenos
MRA-III	>40	<60	<30	<15	1650	<15	<50	<1.2	Rellenos y Terraplenes
RAA	<50	<10	>50	<3	2000	<8	<40	<0.8	Subbases granulares y coronación de expalandas

Rc: áridos reciclados de hormigón; Ru: árido natural; Rb: árido reciclado con cerámica.; Ra: árido reciclado bituminoso; Otros: madera, plástico, yeso, aluminio…

En relación con el hormigón reciclado, el Código Estructural (CE-21) permite el uso de AR proveniente de residuos de hormigón, pero su uso está limitado al 20% de la fracción gruesa en las aplicaciones estructurales resistencia de hasta 40 MPa. En relación con el árido fino reciclado para su uso en hormigón reciclado Bravo et al. (2020) establecieron unas especificaciones mínimas.

Tabla 6 Requerimientos del árido para fabricación de hormigón en CE-21

Ensayo	Requerimientos generales		Requerimientos adicionales ARH
	Árido grueso	Árido fino	Árido grueso
Distribución granulométrica	X	X	
Finos < 0.063 mm (%)	≤1.5%	≤6-16%	
Índice de Lajas	<35		
Equivalente de arena		>70 (X0,XC); >75 (otros)	
Los Angeles	≤40		≤40
Densidad			
Absorción de agua	≤5%	≤5%	≤7% (≤4.5% AN+ARH)
Sulfato magnésico test	≤18%		
Ion cloruro (Cl%)	≤0.03-0.05%	≤0.03-0.05%	
Azufre total (S%)	≤1%	≤1%	

Sulfatos solubles (SO3 s%)	≤0.8%	≤0.8%

Tabla 7 Requerimientos de árido fino reciclado para su uso en hormigón (Bravo et al. 2020)

Propiedades	Límites
Densidad (kg/m³)	≥ 2000
Absorción de agua (%)	≤ 14
Sulfatos solubles en agua (%)	≤ 0.2
Sulfatos solubles en ácido (%)	≤ 0.8
Azufre total (%)	≤ 1.0

Materiales y Métodos

A partir de piezas prefabricadas desechadas de hormigón se produjo árido reciclado, este se usó de nuevo (100% de fracción gruesa) para fabricar piezas prefabricadas, que volvieron a ser trituradas, generando árido doblemente reciclado.



Figura 1 Proceso de generación del árido reciclado y multireciclado

Con los AR de primera y segunda generación, y con árido natural (control) se fabricaron dos tipos de hormigón (armado HA-25 y autocompactante HAC-45) con porcentajes de sustitución de fracción gruesa del 100%. De cada tipo de hormigón y de cada ciclo de reciclado se obtuvieron tres fracciones: grava, gravilla y arena.

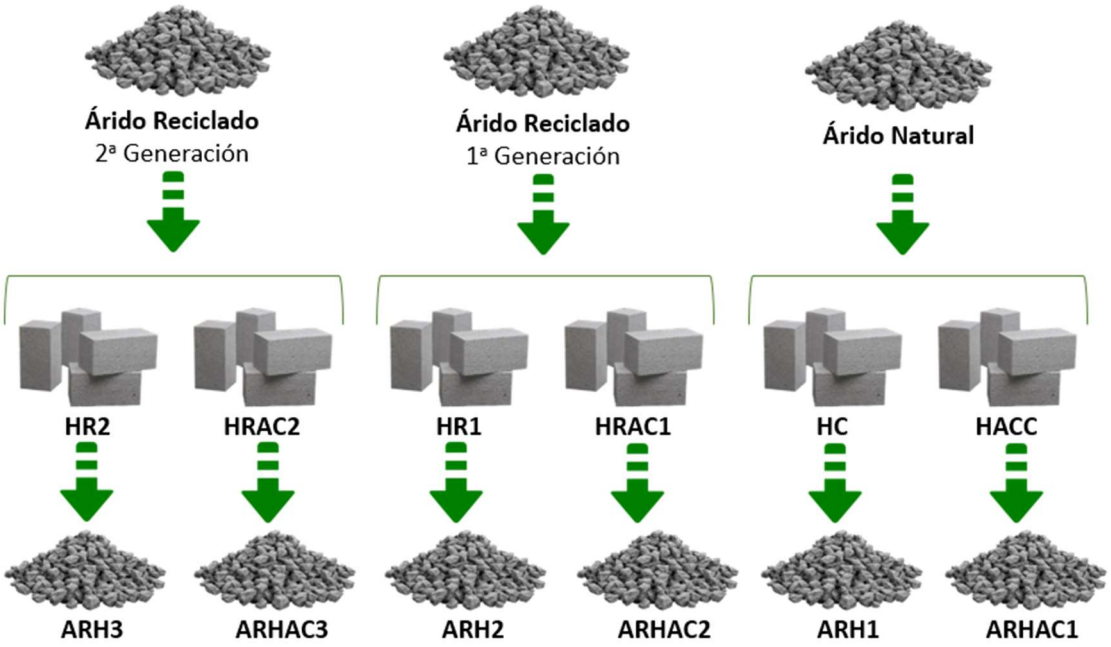


Figura 2 Tipologías y origen de los áridos reciclado y multirreciclados producidos

Se realizaron diferentes ensayos sobre cada muestra: granulometrías, % partículas menores de 0.063 mm, índice de lajas, equivalente de arena, Los Angeles, densidad, absorción, sulfato de magnesio, cloruros solubles en agua, azufre total, sulfatos solubles en acido.

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 8 Resumen de resultados de los ensayos realizados a los áridos reciclados

	Tipo	Tamaño	Resultados de Ensayos									
			<0.063%	FI%	SE4	LA%	g/cm³	Ab%	MS%	Cl%	S%	SO3s%
PRIMERA FASE PIEZAS PREFABRICADAS	Árido Reciclado 1ª Gen.	Grava	1.5±0.4	<4	-	24±1	2.33	5.2±0.4	<2	<0.006	<0.2	<0.5
		Gravilla	1.3±0.3	<4	-	21±1	2.38	4.4±0.4	<2	<0.006	<0.2	<0.5
		Arena	2.7±0.5	-	93±5	-	2.18	6.2±0.1	-	<0.006	<0.2	<0.5
	Árido Reciclado 2ª Gen	Grava	2.0±0.4	<3	-	28±1	2.18	6.6±0.4	<2	<0.002	0.3±0.1	<0.7
		Gravilla	1.8±0.4	4±2	-	24±1	2.25	6.0±0.4	<2	<0.001	0.2±0.1	<0.6
		Arena	3.4±0.5	-	79±4	-	2.23	7.0±0.1	-	<0.002	0.1±0.1	<0.6
SEGUNDA FASE	AN Árido Natural	Grava	0.6±0.2	<8	-	32±1	2.60	1.1±0.4	4±1	<0.006	NA	NA
		Gravilla	2.8±0.5	12±2	-	31±1	2.54	2.2±0.1	4±1	<0.006	<0.1	<0.2
		Arena	10.8±0.9	-	73±4	-	2.44	2.5±0.1	-	<0.006	<0.1	<0.2
	ARH1	Grava	0.8±0.3	<8	-	35±1	2.34	4.6±0.4	NA	NA	NA	NA
		Gravilla	0.6±.2	<8	-	33±1	2.35	4.7±0.4	NA	NA	NA	NA
		Arena	3.5±0.6	-	75±4	-	2.36	5.0±0.1	-	<0.006	<0.2	<0.8
	ARH2	Grava	1.5±0.4	<8	-	30±1	2.28	5.7±0.4	<0.4	NA	NA	NA
		Gravilla	<0.5	<8	-	27±1	2.31	5.4±0.4	NA	NA	NA	NA

	Arena	3.1±0.5	-	76±4	-	2.23	7.3±0.1	-	<0.006	<0.2	<0.8
	Grava	1.8±0.4	<8	-	32±1	2.21	6.4±0.4	<0.4	NA	NA	NA
ARH3	**Gravilla**	1.6±0.4	<8	-	28±1	2.25	6.0±0.4	NA	NA	NA	NA
	Arena	1.7±0.4	-	90±5	-	2.19	7.0±0.1	-	NA	0.2±0.1	<0.8
	Grava	2.1±0.4	<8	-	36±1	2.23	6.4±0.4	<0.4	NA	NA	NA
ARHAC1	**Gravilla**	1.7±0.4	<8	-	33±1	2.25	6.3±0.4	NA	NA	NA	NA
	Arena	1.9±0.4	-	94±1	-	2.29	6.5±0.1	-	0.007	<0.2	<0.8
	Grava	2.6±0.5	<8	-	32±1	2.23	6.9±0.4	<0.4	NA	NA	NA
ARHAC2	**Gravilla**	2.1±0.4	<8	-	27±1	2.28	6.2±0.4	NA	NA	NA	NA
	Arena	1.6±0.4	-	95±5	-	2.28	6.5±0.1	-	<0.006	0.2±0.1	<0.8
	Grava	2.9±0.5	<8	-	34±1	2.18	7.7±0.4	<0.4	NA	NA	NA
ARHAC3	**Gravilla**	2.4±0.5	<8	-	29±1	2.22	6.9±0.4	NA	NA	NA	NA
	Arena	2.5±0.5	-	98±5	-	2.17	6.8±0.1	-	<0.006	<0.2	<0.8

Granulometrías. La mayor parte de las fracciones gruesas analizadas presentan granulometrías continuas con ratios d/D mayores a 1.4. No hay diferencias significativas entre las fracciones gruesas en los distintos ciclos de reciclado. En los áridos finos se observa como con cada ciclo de reciclado el tamaño máximo aumenta, debido a la dureza de los hormigones origen. Las fracciones gruesas tienen un número de partículas finas (0.063) mayor del 1.5% (límite del CE-21), por lo tanto estos áridos deberían ser lavados antes de su uso en fabricación de hormigones.

Equivalente de arena e Índice de Lajas. El equivalente de arena que muestran las fracciones finas recicladas es en todos los casos superiores a 75. El índice aumenta con cada ciclo de reciclado y podemos afirmar que los áridos reciclados tienen una buena calidad en relación a la presencia de limos y arcillas. Respecto a la angulosidad, los áridos reciclados presentan en todos los casos valores de Índice de Lajas menores a 8, lo cual es muy positivo.

Densidad y Absorción de agua. La densidad de los áridos reciclados depende de la densidad del hormigón origen. En los áridos reciclados las mayores densidades se obtienen en la arena y gravilla y las menores en las grava, tendencia contraria a las que se obtiene en el árido natural de control. Las densidades decrecen con cada ciclo de reciclado debido a la cada vez mayor presencia de pasta de mortero. Las absorciones son altas, prácticamente todos los áridos

reciclados presentan absorciones mayores del 5%, límite del CE-21. La absorción aumenta con cada ciclo de reciclado, debido al aumento de pasta de mortero.

Resistencia a la fragmentación. Las gravillas muestran unos mejores LA% que las gravas, respecto a su evolución con cada ciclo de reciclado no hay una tendencia clara de mejora o empeoramiento. En todos los casos estamos por encima del límite de 40 (CE-21) pero no de los límites que impone el PG-3 para las aplicaciones más exigentes.

Propiedades térmicas y químicas. Todos los áridos reciclados presentaron valores de pérdida del ensayo de sulfato magnésico menores del 2-4%, muy alejados del 18% (CE-21 y PG-3). Respecto a la presencia de cloruros solubles, todos los áridos presentan valores Cl% menores de 0.006, muy por debajo del 0.03 límite del CE-21. No se aprecian diferencias entre los distintos ciclos de reciclado. En relación con el contenido total de sulfatos (S%) y de sulfatos solubles (SO3%) se cumplen con los límites establecidos en el PG-3 y CE-21.

Conclusiones

Como conclusiones del estudio se puede determinar que:

- Los áridos reciclados y multirreciclados de hormigón pueden ser usados en la construcción de carreteras (terraplenes, zahorras, pavimentos de hormigón, suelocemento y gravacemento). Cumplen con los requerimientos establecidos en el PG-3, y por Bravo et al. y De Brito et al. en sus propuestas de regulación internacional.
- Los áridos reciclados y multirreciclados pueden ser usados para la fabricación de hormigón estructural, en todo caso hay que prestar atención a la absorción de los áridos reciclados, pudiéndose aplicar pretratamientos o presaturaciones que solventarían el problema.
- Hormigones de buena calidad, como los presentes en la industria prefabricadora, producen áridos de excelentes propiedades que pueden ser usados tanto en aplicaciones de bajo nivel como de alta exigencia, al igual que los áridos naturales.

- El multirreciclado de áridos de hormigón es una opción viable técnicamente que contribuirá a la reducción en el consumo de materias primas y disminuirá la huella ecológica del sector de la construcción.
- Esto pone de relieve la viabilidad y los beneficios medioambientales del reciclaje de hormigón para su uso en múltiples aplicaciones dentro de la construcción.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte técnico y material de Áridos y Construcciones Pinseque S.L., CEMEX España, EUP La Almunia – Universidad de Zaragoza.

Bibliografía

Bravo, M.; Duarte, A.P.C.; de Brito, J.; Evangelista, L.; Pedro, D. On the Development of a Technical Specification for the Use of Fine Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Concrete Production. Materials 2020, 13, 4228.

European Aggregates Association UEPG Annual Review 2020–2021. 2021. Available online: https://uepg.eu/mediatheque/ index/1.html (accessed on 12 July 2022).

Bilsen, V.; Kretz, D.; Padilla, P.; Acoelyen, M.V.; van Ostaeyen, J.; Izdebska, O.; Hansen, M.E.; Bergmans, J.; Szuppinger, P. Development and Implementation of Initiatives Fostering Investment and Innovation in Construction and Demolition Waste Recycling Infrastructure; European Commission: Brussels, Belgium, February 2018; p. 206.

Villoria Sáez, P.; Osmani, M. A Diagnosis of Construction and Demolition Waste Generation and Recovery Practice in the European Union. J. Clean. Prod. 2019, 241, 118400.

European Environment Agency. Construction and Demolition Waste: Challenges and Opportunities in a Circular Economy; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 2020.

Ministerio de Fomento. Pliego de Prestricpones Técnicas Generales para obras de carreteras y Puente (PG-3). España.

de Brito, J.; Agrela, F.; Silva, R.V. Legal Regulations of Recycled Aggregate Concrete in Buildings and Roads. In New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete; de Brito, J., Agrela, F., Eds.; Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2019; pp. 509–526. ISBN 978-0-08-102480-5.

MInisterio de Fomento y Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. Código Estructural (CE-21). España, 2021.

Bravo, M.; Duarte, A.P.C.; de Brito, J.; Evangelista, L.; Pedro, D. On the Development of a Technical Specification for the Use of Fine Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Concrete Production. Materials 2020, 13, 4228.

6.Automated solutions for sustainable and circular construction and demolition waste management (RECONMATIC)

Vicent Cabedo, Mónica (1);

(1) INSTITUTO DE TECNOLOGÍA CERÁMICA (ITC-AICE)

Palabras clave / Términos relevantes

CDW, Sustainable and circular construction

Resumen de la comunicación

The main aim of RECONMATIC project is to embed life-cycle C-D waste management as an integral part of processes related to planning/design, construction, operation, repurposing and deconstruction of structures, providing new automation and digitalisation tools or solutions that will improve communication and information sharing between the different actors, enabling them to proactively prevent waste generation or help guide and improve decision-making in the reuse or recycling of materials. We believe that identification, structuring and use of right information addressing particular actors of the build structure life-cycle will be the key to reach high valorization in reuse and recycling and in reaching the overall target for the construction sector to be a zero-waste industry by 2050.

7.Hacia un residuo 0: Valorización del flujo mineral de residuos de construcción y demolición por activación alcalina en la producción de materiales de construcción

Vicent Cabedo, Mónica (1); García Ten, Francisco Javier (1); Miguel Hervás, Eva (1); Bretas Alvim, Clara (2); Martín Pino , Juan José (2); Vea Folch, Francisco José (2);

(1) Instituto de Tecnología Cerámica (ITC-AICE) (2) Cantera La Torreta, S.A. - Origen - Grupo Simetría

Palabras clave / Términos relevantes

Valorización de la fracción mineral de RCD, Activación alcalina

Resumen de la comunicación

Los residuos de construcción y demolición (RCD) nacen de actividades como la construcción, la rehabilitación y la demolición total o parcial de edificios e infraestructuras civiles, así como de la planificación y el mantenimiento de carreteras. Los RCD son el tipo de residuo que se generan en una mayor proporción en la Unión Europea.

La activación alcalina es un proceso de obtención de materiales, relativamente nuevo, que se realiza a temperatura ambiente o a temperatura baja (T 〈 150 ºC). En dicho proceso un material silicoaluminoso se mezcla con un activador alcalino y tras una etapa de curado da lugar a un producto con elevados valores de resistencia mecánica.

En el presente trabajo se han preparado materiales activados alcalinamente utilizando la fracción mineral de los RCD, como fuente de sílice y alúmina. Inicialmente se han realizado ensayos de activación alcalina empleando la fracción cerámica, que a priori se trata de la fracción más activable. Posteriormente se han activado mezclas de la fracción cerámica a la que se han adicionado diferentes contenidos de las otras fracciones presentes en la fracción mineral de los RCD y que industrialmente es complejo separar, como hormigón, piedra y yeso.

Los materiales activados alcalinamente se han caracterizado completamente y los resultados confirman que la fracción mineral de los residuos de RCD es susceptible de reutilizarse para la producción de materiales de construcción obtenidos por activación alcalina.

Los resultados son parte del proyecto CPP2021-008798, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea-NextGeneration EU/PRTR.

8.Reciclaje de la fracción fina de residuos de prefabricados de hormigón para la mejora de suelos cohesivos en obras de tierra

López Julián, Pedro Luis (1); Salesa Bordanaba, Angel (1); Pérez Bella, José María (2); Pérez Benedicto, José Angel (1); Acero Oliete, Alejandro (1);

(1) GIHA - EUPLA - UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA (2) EINA .- UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Palabras clave / Términos relevantes

Fracción fina, mejora

Tipo: Comunicación

Resumen de la comunicación

Las industrias de prefabricados de hormigón y el reciclaje de los residuos de construcción y demolición (RCD) generan una importante cantidad de residuos de hormigón que, en su fracción fina, no encuentran actualmente una fácil reutilización debido a sus propiedades intrínsecas, fundamentalmente a su granulometría y a su elevada capacidad de absorción de agua. En este trabajo se ha añadido fracción fina de residuos de hormigón a suelos cohesivos de tipo arcilla, en diferentes proporciones, para evaluar si las mezclas obtenidas implican mejoras geotécnicas que permiten su utilización en obras de tierra. Los resultados obtenidos en laboratorio indican que dichas mezclas permiten alcanzar densidades adecuadas para su puesta en obra y humedades óptimas más bajas respecto del material natural. El resto de los ensayos realizados sobre las mezclas (granulometría, consistencia, resistencia a la compresión simple, deformabilidad) permiten afirmar que la adición de la fracción fina de RCD de hormigón proporciona una mejora granulométrica de los suelos cohesivos, que permite una puesta en obra más fácil y económica, así como poder reutilizar este tipo de suelos sin necesidad de maquinaria específica para su colocación para la ejecución de obras de tierra, todo ello con un indudable beneficio ambiental al poder reciclar un material residual.

Área Temática: Investigación

Palabras clave: Fracción fina, mejora

1. INTRODUCCIÓN

Una parte importante de los residuos de construcción y demolición (RCD) procede de elementos de hormigón que han sido demolidos pero, también, de los generados como rechazo en plantas de prefabricados. Los volúmenes de hormigón que llegan a la planta de tratamiento son triturados, dando lugar a una mezcla de partículas de fracción gruesa o grava (con diámetro mayor o igual a 4 mm) y de partículas de diámetro menor, en rangos de tamaño arena y finos. En condiciones óptimas, el árido grueso puede alcanzar el 90% de la masa del hormigón original, aunque lo habitual es que se sitúe en el 60-70%, dando lugar a una importante masa de árido reciclado fino, que en los últimos años ha alcanzado unas 100.000 toneladas anuales (según datos de FEDERACIONRCDs).

En las plantas de tratamiento se obtiene de este modo una importante cantidad de árido reciclado de hormigón, con una composición relativamente homogénea y una gradación en tamaños de partículas. La fracción gruesa presenta unas propiedades que permiten su reutilización como árido para hormigones reciclados, existiendo una abundante literatura científica y técnica sobre sus características y su comportamiento estructural (por ejemplo, Le y Bui, 2020). Por otra parte, la fracción del RCD inferior a 4 mm presenta un menor campo de aplicación, y su contenido en partículas finas (diámetro inferior a 0,08 mm) y el grado de absorción de agua (GERD, 2012) lo hacen inviable para la elaboración de hormigones sin un tratamiento adicional (cribado, lavado y/o soplado) que incrementa su coste de reutilización y dificulta su reciclado en el ámbito constructivo, más allá del uso como relleno en obra civil o en la elaboración de morteros de baja resistencia. En el presente trabajo se evalúa el uso de la fracción fina de RCD de hormigón para obras de tierra, mezclándola en proporciones variables con materiales tipo suelo cohesivo cuyas propiedades geotécnicas originales dificultan y encarecen su reutilización directa en obra civil

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales empleados corresponden, por una parte, a un material natural geotécnicamente tipo suelo cohesivo y, por otra, a un material de tipo RCD de hormigón en su fracción fina, procediéndose además a elaborar mezclas de ambos materiales en distintas proporciones. Sobre ellas se han realizado ensayos de caracterización geotécnica, y la preparación y los análisis se ha llevado a cabo en el laboratorio de Materiales de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia y en el laboratorio Control 7 S.A.

El suelo natural seleccionado para el presente estudio corresponde a lutitas de color rojizo del Cenozoico que cubren amplias superficies de la zona central de la Cuenca del Ebro, y fueron recogidas en las proximidades de Muel (Zaragoza), área donde la construcción de la Autovía A-23 permitió conocer el comportamiento geotécnico de estos materiales y su dificultosa puesta en obra.

El RCD empleado procede de la molienda de elementos rechazados en la planta de prefabricados de hormigón de la empresa Prainsa (Zuera, Zaragoza). La fracción fina del RCD no tiene fácil valorización en el ámbito de la industria del hormigón, y constituye un material destinado inicialmente a vertedero. Se recogió un volumen inicial de 1 m^3 de residuo fino, del cual se tomaron 5 submuestras de 10 kg cada una para los análisis y las mezclas. Se diseñó un protocolo de mezcla de ambos materiales en una mezcladora giratoria y en proporciones fácilmente reproducibles en obra: 1:1, 2:1 y 3:1 (proporción en peso de suelo cohesivo: fracción fina de RCD).

3.- RESULTADOS

Los análisis de las muestras de lutitas y RCD han permitido clasificarlos geotécnicamente como arcillas de baja plasticidad y como arenas limpias mal graduadas, respectivamente. La Figura 1 representa la

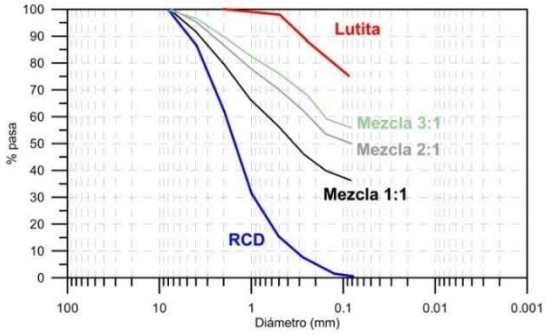


Figura 1 - Curvas granulométricas de los materiales analizados

	Límite Plástico	Límite Líquido	Clasificación SUCS
Lutita	15,6	22,8	CL
RCD	n.p.	n.p.	SP
Mezcla 1:1	16,5	20,8	SC-SM
Mezcla 2:1	16,6	23,8	SC
Mezcla 3:1	16,9	22,9	SC-SM / CL-ML

Tabla I – Resultados de los análisis de la caracterización geotécnica descriptiva

distribución granulométrica de ambos materiales y de las mezclas en distintas proporciones, y la Tabla I recoge sus límites de consistencia y su clasificación geotécnica. Se analizaron además la densidad de las partículas constituyentes de la lutita (2,68 g/cm^3) y del RCD (2,17 g/cm^3)**,** la capacidad de absorción de agua del RCD **(**a 3 horas**)** arrojó un resultado del 5,71%, y la expansividad de la lutita en el ensayo Lambe indicó un resultado “no crítico”.

El suelo cohesivo ha resultado no expansivo y está constituido por partículas finas (inferiores a 0,08 mm), que suponen aproximadamente el 75% en peso respecto del total. Por su parte, el residuo de RCD está formado principalmente por partículas de tamaño arena (en torno al 90% en peso). Aplicando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Lambe y Whitman, 1969), partiendo de una arcilla de baja plasticidad CL (lutita) se obtienen mezclas clasificadas como suelos de partículas gruesas (1:1 y 2:1) o suelos de partículas gruesas y finas al 50% (3:1). La consistencia de las mezclas elaboradas no se ha visto apenas modificada respecto de la correspondiente a la lutita (ver Tabla I).

	Ensayo Proctor Normal		Compresión simple		
	Densidad seca máxima (t/m^3)	Humedad óptima (%)	Resistencia a la compresión simple (kg/cm^2)	Límite elástico (kg/cm^2)	Módulo de Young (kg/cm^2)
Lutita	1,97	12,4	14,70	9,56	814,61
Mezcla 1:1	2,01	13,0	13,75	11,23	621,28
Mezcla 2:1	2,02	12,5	13,95	10,73	909,20
Mezcla 3:1	2,04	12,0	10,85	8,74	944,64

Tabla II - Resultados adicionales de los análisis de caracterización geotécnica

Según los resultados de la Tabla II, las mezclas con RCD permiten obtener en el ensayo Proctor normal un material más denso que la lutita original y, además, en el caso de la mezcla 3:1 se alcanza con una humedad óptima más baja. En cuanto a los resultados de compresión simple, las mezclas presentan una menora resistencia especto del suelo cohesivo inicial, aunque por el contrario exhiben un incremento en los valores del límite elástico (mezclas 1:1 y 2:1) y del módulo de Young (mezclas 2:1 y 3:1). La mezcla 3:1 se sometió a ensayos de compactación Proctor modificado y de deformabilidad C.B.R., obteniéndose los resultados recogidos en la Tabla III.

	Ensayo Proctor modificado		Ensayo C.B.R.	
	Densidad seca máxima (t/m^3)	Humedad óptima (%)	Índice CBR (100 % Proctor modificado)	Hinchamiento (%)
Mezcla 3:1	2,14	10,0	5,3	0,3

Tabla III Resultados de los análisis adicionales de caracterización geotécnica de la mezcla 3:1

4.- DISCUSIÓN

La reutilización de suelos en obra civil viene regulada en España por el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), que en su artículo 330 clasifica los materiales suelos en función de su utilidad para la construcción de terrraplenes (Dirección General de Carreteras, 2014). Los suelos cohesivos clasificados como “tolerables”, como las lutitas aquí analizadas, son fácilmente excavables, pero para su reutilización en obra es necesario emplear maquinaria de compactación específica (“pata de cabra”, por ejemplo), pues al humectarlos al valor óptimo se acercan a su límite plástico, por lo que su compactación es más bien un amasado para el cual no sirven las compactadoras convencionales lisas. Los suelos

cohesivos suponen habitualmente una complicación para la ejecución de las obras de tierra, tanto por la maquinaria específica como por su rendimiento, sobre todo en las zonas donde no existe una alternativa geotécnica disponible y económicamente viable.

Los residuos empleados en este trabajo no pueden utilizarse en obra civil como sustitución de los suelos, ya que en el trabajo previo realizado se comprobó que el residuo fino de RCD de hormigón no puede compactarse de manera adecuada, debido a su elevada capacidad de absorción de agua (López Julián *et al.*, 2017), propiedad que también los inhabilita para ser empleados en la elaboración de hormigones o morteros estructurales. Pero esta misma propiedad, en las mezclas elaboradas, se convierte en una ventaja en su comportamiento frente a la compactación. En las Tablas II y III se muestra cómo, a pesar de la baja densidad de las partículas sólidas del RCD, las mezclas alcanzan densidades secas asumibles para obras de tierra en el ámbito de la construcción civil (en todos los casos por encima de 2 t/m^3), y ello porque la presencia de las partículas de mayor tamaño del árido permiten un mejor aprovechamiento del espacio al proceder a la compactación dinámica de la mezcla.

Se consideró óptima la mezcla 3:1 (suelo:RCD), y en el ensayo de compactación Proctor modificado la densidad seca máxima se alcanzaba para una humedad óptima más alejada del límite plástico, lo que supone una clara ventaja para su puesta en obra. El módulo de elasticidad de la mezcla 3:1 es el mayor de todos (un 15% superior al de la lutita compactada), y los valores obtenidos tanto para el índice CBR como para el porcentaje de hinchamiento permiten su utilización en las zonas de cimiento y de núcleo de terraplén tanto para las obras de carretera (PG-3, Dirección General de Carreteras, 2014) como ferroviarias (IF-3, Ministerio de Fomento, 2015).

Todos estos resultados indican que la adición de la fracción fina de RCD de hormigón a suelos cohesivos da lugar a una mejora granulométrica de este último material, que se traduce tanto

en la obtención de una mayor densidad seca máxima con una humedad óptima menor, como en la manejabilidad de su puesta en obra, siendo suficiente la maquinaria convencional de compactación y con unas condiciones de control de humedad mucho menos exigentes que para los suelos cohesivos.

5.- CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo han permitido comprobar que la fracción fina de RCD de hormigón puede ser utilizada como mejora granulométrica de los suelos cohesivos para la ejecución de obras de tierra. Los valores obtenidos en los ensayos de compactación, resistencia y deformabilidad indican que la adición de los residuos de RCD a los suelos cohesivos facilitan su puesta en obra, al incrementar la densidad seca máxima reduciendo además la humedad óptima, permitiendo además su colocación con maquinaria convencional en lugar de necesitar equipos compactadores específicos para suelos cohesivos y para zonas de cimiento y núcleo de terraplén, tanto en obras de carretera como ferroviarias.

La aplicación de este tratamiento a las obras de tierra permitiría valorizar un residuo que actualmente tiene pocas expectativas de reutilización pero que se está generando en cantidad importante, y además facilitaría los procedimientos de ejecución de obras de tierra en zonas geográficas donde los suelos cohesivos son el principal material natural disponible.

REFERENCIAS

Le, H.-B. & Bui, Q.-B. (2020): "Recycled aggregate concretes – A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance". *Construction and Building Materials*, 257, 119456. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119522

GERD (2012): "Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)". Proyecto GEAR. Recuperado de: https://www.btbab.com/wp-content/uploads/documentos/legislacion/Guia_Gerd_2012.pdf

López Julián, P.L.; Salesa Bordanaba, A.; Pérez Benedicto, J.Á. y Pueyo Anchuela, Ó. (2017): "Mejora en la compactabilidad de un suelo limoso mediante la elaboración de mezclas con residuos de construcción y demolición". *Geogaceta*, 61, 179-182.

Lambe, T.W. & Whitman, R.V. (1969): “Soil Mechanics”. John Wiley & Sons Inc., New York, 533 p.
Dirección General de Carreteras (2014): “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes (PG-3)”. Min. de Fomento. Recuperado de https://apps.fomento.gob.es/CVP/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=ICW020
Ministerio de Fomento (2015): “Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal”. Orden FOM/1631/2015. BOE, núm. 185, 68651, 4-agosto-2015.

9.CÁTEDRA DE ARQUITECTURA CIRCULAR: OBJETIVO Y ALCANCE

Roca Fernández, M Ángeles (1); Pitarch Roig, Ángel Miguel (2); Ruá Aguilar, Maria José (3); Reig Cerdá, Lucía (2); Sáez Riquelme, Beatríz (4);

(1) Cátedra de Arquitectura Circular / UJI (2) Cátedra de Arquitectura Circular / Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción / Aula Cerámica / UJI (3) Cátedra de Arquitectura Circular / Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción / UJI (4) Cátedra de Arquitectura Circular / Departamento de Ingeniería Sistemas Industriales y Diseño / UJI

Palabras clave / Términos relevantes

Arquitectura Circular, Valorización de residuos

Resumen de la comunicación

La economía circular se presenta como un modelo de producción y consumo, alternativo y más sostenible, orientado a la transición hacia el uso de energías y materiales renovables, en respuesta al cambio climático y la degradación ambiental. Según el Pacto Verde Europeo, su aplicación en todos los sectores es clave para lograr una Europa descarbonizada. El sector de la edificación es crucial dado que consume grandes cantidades de recursos naturales y energía, y es responsable de más del 45% de los residuos generados. La arquitectura circular conlleva una reestructuración completa de cómo diseñamos, construimos, habitamos y deconstruimos nuestros edificios y ciudades. Su aplicación implica cambios en modelos existentes, así como la creación de nuevas sinergias entre los actores implicados. En 2020, la Universitat Jaume I firmó un convenio con La Vicepresidencia Segunda del Consell y Conselleria de Servicios Sociales, Igualdad y Vivienda para crear una Cátedra de Arquitectura Circular. Su objetivo principal es promover un modelo circular de Arquitectura llevando a cabo actividades de investigación, difusión y formación, y con ello generar estrategias de cambio.

En esta ponencia se sintetizan los aspectos fundamentales de la Arquitectura Circular, se identifican los distintos grados de circularidad y su alcance en los procesos implicados en el nuevo modelo de arquitectura. Además se muestran las actividades de la cátedra y se presentan conclusiones sobre la adaptación y mejora de la formación de los futuros profesionales alineadas con este enfoque, identificando las competencias necesarias para los técnicos redactores del proyecto, y para los responsables de la ejecución.

10.Árido multi-reciclado de hormigón proveniente de la industria prefabricadora: características y aplicaciones

Salesa-Bordanaba, Angel (1); Pérez-Benedicto, José Ángel (1); López-Julián, Pedro Luis (1); Pérez-Bella, José María (2); Acero-Oliete, Alejandro (1);

(1) GIHA-EUPLA-UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA (2) EINA-UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Palabras clave / Términos relevantes

multi-reciclado, árido reciclado

Resumen de la comunicación

La industria de la construcción debe cumplir con unos requisitos ambientales cada vez más exigentes, entre los requerimientos más urgentes están los de reducir la generación de residuos de construcción y demolición, y la disminución en el consumo de materias primas. Ante esos desafíos, el uso de árido reciclado de hormigón es parte de la solución. Pero, ¿podemos reciclar el hormigón ya fabricado con árido reciclado? Para responder a esa pregunta hay que estudiar las propiedades de los áridos obtenidos en diferentes ciclos de reciclado y, de este modo, determinar los posibles usos de estos áridos.

Esta investigación se centra en la industria prefabricadora, donde el reciclaje múltiple es una necesidad urgente, además la trazabilidad presente en esta industria permite determinar perfectamente las características del hormigón producido así como las de sus componentes. A partir de piezas de hormigón prefabricado de buena calidad, se produjeron y analizaron tres ciclos de áridos reciclados de hormigón. Los resultados finales son prometedores debido a la buena calidad de los áridos reciclados y multi-reciclados obtenidos. Como viene siendo habitual estos pueden utilizarse tanto en aplicaciones de bajo nivel (rellenos), como en otras más exigentes: zahorras, bases de carreteras tratadas con cemento y firmes de hormigón. Su uso en hormigón estructural es factible, aunque está condicionado por el nivel de absorción de agua y el porcentaje de sustitución de áridos naturales por reciclados. Esta investigación demuestra la viabilidad del uso de áridos de hormigón multi-reciclados con todos los beneficios ambientales que ello conlleva.

11.CHALLENGES AND CHARACTERIZATION OF FINE MIXED AGGREGATES FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE

Tijero Martín, María (1); Ruiz García, Ana Isabel (1); Cuevas Fernández, Jaime (1); Regadío García, Mercedes (1);

(1) UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

Palabras clave / Términos relevantes

recycled aggregates, materials characterization

Tipo: Comunicación

Resumen de la comunicación

Current regulations in Europe and Spain require the treatment of Construction and Demolition Waste (CDW) in specialized facilities to maximize recycling and reuse, but high treatment costs and the heterogeneity of CDW materials limit its reintegration into the production cycle. This study focuses on fine aggregates from mixed CDW, a difficult fraction to recycle due to its variable composition and high levels of contaminants, like organic matter and gypsum. Two materials (Z060 and 02) were characterized through granulometric tests, specific surface area (SSA), and cation exchange capacity (CEC). Results show that Z060 material, from trenching operations, has a higher SSA and CEC compared to the more heterogeneous 02 material, derived from mixed CDW. These properties are relevant for understanding some of the potential recovery pathways and recycling applications for fine CDW materials, advancing circular economy efforts by minimizing landfill disposal.

Department of Geology and Geochemistry, Autonomous University of Madrid, 28049, Madrid (Spain)

* corresponding author: maria.tijero@estudiante.uam.es

Key words: recycled aggregates, materials characterization

Topic area: research

Award category: Students and Universities

ABSTRACT

Current regulations in Europe and Spain require the treatment of Construction and Demolition Waste (CDW) in specialized facilities to maximize recycling and reuse, but high treatment costs and the heterogeneity of CDW materials limit its reintegration into the production cycle. This study focuses on fine aggregates from mixed CDW, a difficult fraction to recycle due to its variable composition and high levels of impurities, like organic matter and gypsum. Two materials, Z060 (from trenching operations), and 02 (derived from the crushing of mixed CDW prior to further processing) were characterized through granulometric tests, specific surface area (SSA), and cation exchange capacity (CEC). Results show that Z060 material, has a higher SSA and CEC compared to the more heterogeneous 02 material. These properties are relevant for understanding some of the potential recovery pathways and recycling applications for fine CDW materials, advancing circular economy efforts by minimizing their disposal in landfills.

INTRODUCTION

Considering the current challenges faced by the waste management sector, there is an urgent need to adopt a circular economy approach. In Europe, the Circular Economy Action Plan (CEAP), under the motto ‘Less waste, more value’ (European Commission, 2020), has been transposed into the Spain's Circular Strategy 2030 and its first Action Plan 2021-2023 (MITECO, 2021-2023). Construction and demolition waste (CDW) is the largest waste stream worldwide, accounting for 37.5% of all waste generated in Europe (Eurostat, 2020). The CDW must be managed in treatment plants specialized in sorting, processing, and separating CDW to maximize the recovery and reuse of recyclables, thereby minimizing their disposal in landfills. However, the vast volume and heterogeneity of CDW materials pose significant challenges in achieving the 70% reuse and recycling target set by European and Spanish regulations for non-hazardous CDW, excluding natural materials (with the European Waste Catalogue code 17 05 04) (Gobierno

de España, 2022). Moreover, the high treatment costs and limited commercial viability of certain treatment waste hinder to reintegrate them into the production cycle.

This study focuses on fine aggregates from mixed CDW, a highly heterogeneous and variable waste stream depending on its source. This fraction (< 4 mm) is the most difficult to recycle because the heterogeneity of its materials (CEDEX, 2014) and because it provides less stability and higher leaching hazard when used as recycled aggregates replacing natural aggregates or coarser aggregates from CDW. The aim of this study is to characterize two types of CDW that come from different origins to determine their properties with granulometric tests, specific surface area (SSA) and cation exchange capacity (CEC). Complementary, X-ray diffraction measurements have been carried out. Understanding these properties will help identify potential recovery pathways, reducing landfill disposal and advancing circular economy models.

MATERIALS AND METHODS

In a CDW treatment plant, two types of materials were separated in situ according to their origin and visual characteristics. The first material, referred to as Z060 (Figure 1.a), is sourced from trenching operations. Upon arrival at the plant, it is processed through an automatic screen with a mesh size of 60 mm. The second material, called as 02 (Figure 1.b), originates from mixed CDW that was not segregated in origin and exhibits greater heterogeneity, featuring visually very different fractions. Following the initial crushing phase common to all mixed CDW, the 02 material is separated by a star screen with a 2 mm mesh size, through which in reality larger sizes pass due to wear and tear.

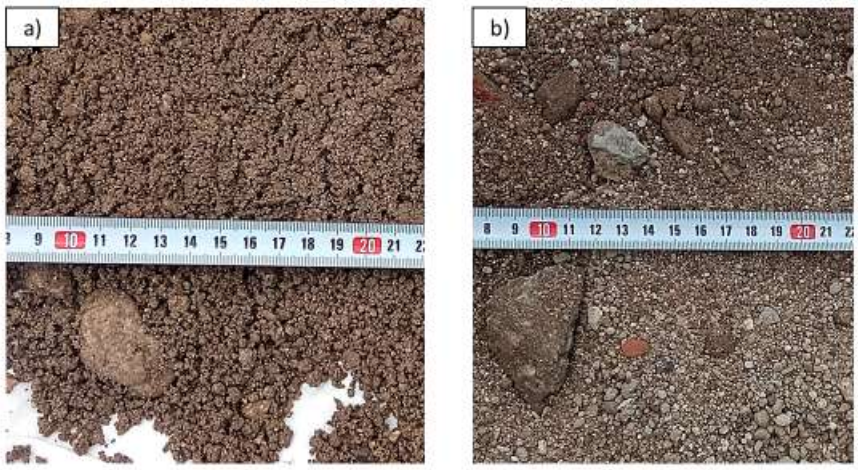


Figure 1. a) Z060 material, b) 02 material.

Particle size analysis was performed using an electromagnetic sieve shaker (ETI-AR051) and 10 sieves with mesh sizes of 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 5, 8 and 16 mm. The shaker was operated for 5 minutes, with an intensity of 60 oscillations and 2-second intermittent pauses. The CEC was determined using a 0.01 M solution of Cu(II)-triethylenetetramine in a UV-Vis GENESYS spectrophotometer, at a wavelength of 584 nm (Stanjek & Künkel, 2016). The SSA was assessed by N_2 adsorption calculated by the BET equation in a Micromeritics® GEMINI V equipment (Dogan et al., 2007). These last two parameters were measured on the fractions between <0.063 and 2 mm. X-ray diffraction was measured on powder samples from two selected fractions (<0.063 and 2-4 mm) of both materials, in a Bruker D8 Discover diffractometer.

RESULTS AND DISCUSSION

Material 02 contains a higher proportion of smaller particles by weight compared to material Z060 (Figure 2), which is consistent with the smaller mesh size used for 02 in the plant. The percentage of gravel (particles >2 mm) is 41.4% and 24.5% in Z060 and 02, respectively. The majority of the material by weight is concentrated in the 0.250 to 2 mm fraction, accounting for 47% of 02 and 40% of Z060.

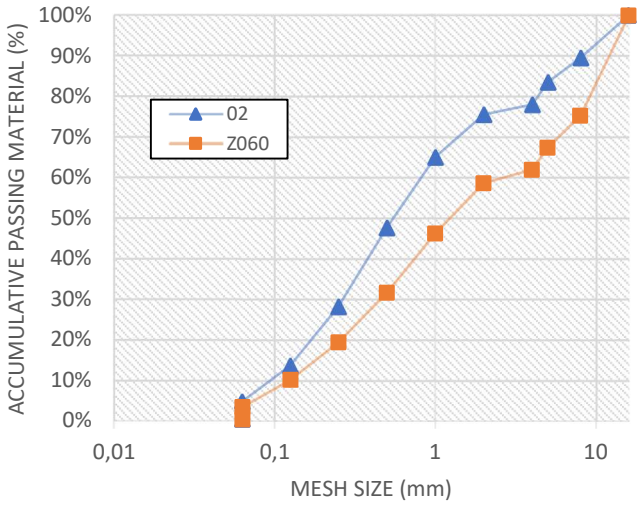


Figure 2. Mass percentage of accumulative passing material on the sieves by mesh size. Average values of nine replicates, with a relative standard deviation of ±26% (Z060 material) and ±18% (02 material).

The CEC decreases as the particle size of the mixed fine aggregate increases (Figure 3.a). The Z060 material presents a higher CEC than 02 material at almost all particle sizes, reaching a maximum of 20 ± 2 cmol+/kg for particles <0.063 mm. Similarly, SSA values decrease with increasing particle size (Figure 3.b). For particle sizes between 0.5 and 2 mm, 02 material shows similar values than Z060. However, for particle sizes below 0.5 mm, the SSA was higher for the material Z060 than for the 02 material, reaching a maximum of 19 ± 3 m^2/g. The CEC and SSA is higher in Z060 despite having a lower percentage of fine particles, but this is influenced by factors such as mineralogical composition, possible presence of organic matter and other factors that will be studied further below. Both parameters provide insight into their surface and ionic sorption properties, which are crucial for materials to build barriers that attenuate cationic pollutants. The values measured in the fraction <0.063 mm (0.3% mass for samples Z060 and 02) are similar to those measured in a natural clayey substratum that attenuated the landfill pollution front in 0.8-2.4 m distance after a 14-year landfill leachate exposure (CEC:10-20

cmol+/kg; SSA: 7-19 m^2/g) (Regadío et al., 2015). In applications for the attenuation of ammonia from animal manure storage, the unmodified vermiculites used in Wang et al. (2024) had a SSA significantly lower (4 m^2/g) than the particles of Z060 between <0.063-2 mm (51% mass). The use of natural sands combined with expandable clay for the construction of landfill barriers has been studied previously (Eid et al., 2009). Thus, the aggregates with a particle size of less than 2 mm from this study could potentially be used as a substitute for natural sand in future applications. Regarding mineralogy, gypsum was not detected in the Z060 material but detected in 02. This is important because gypsum is slightly soluble and sulphates have leaching limits that must be met to assess potential risks, and therefore determine whether such materials can be used in new applications.

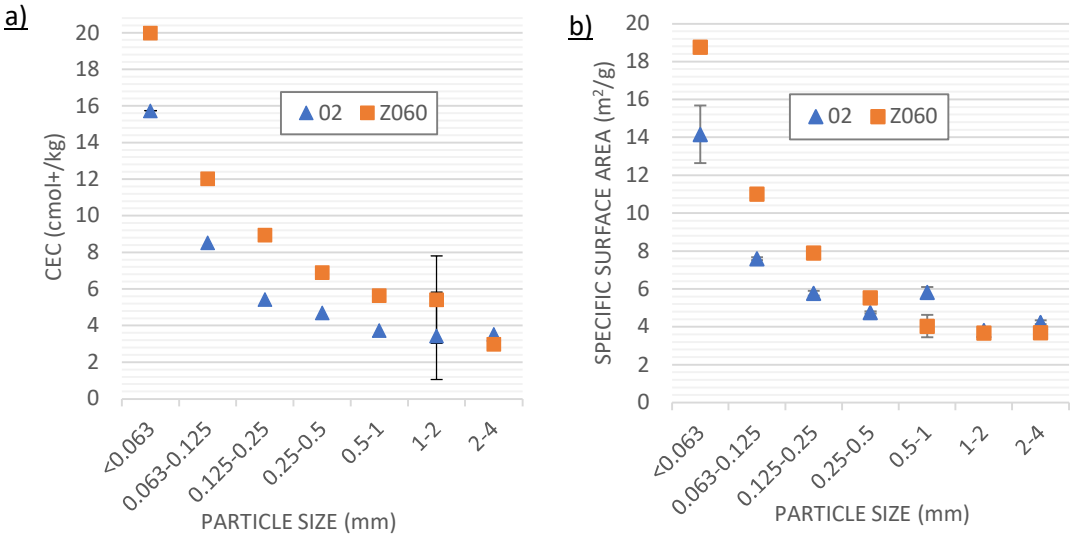


Figure 3. a) Cation exchange capacity by particle size, b) Specific surface area by particle size.

CONCLUSIONS

Therefore, Z060 material, originating from trenching operations, demonstrated higher specific surface area (SSA) and cation exchange capacity (CEC) values compared to 02 material, which was derived from more heterogeneous mixed CDW. These results suggest that the source of the

waste influences its applications in the sorption of cationic pollutants. Additionally, a comparison with materials such as natural sand, which is often combined with expandable clays to construct landfill barriers, indicates that these CDW materials, particularly Z060 <2 mm, could be beneficial for reuse in such applications. In the case of the 02 material, the presence of gypsum could pose challenges for leaching compliance.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has received funding from the Comunidad de Madrid's Industrial Doctorates 2023 programme and PreZero under grant reference IND2023/AMB-27477.

REFERENCES

CEDEX. (2014). *Catálogo de residuos utilizables en construcción: Ficha Técnica (4.1.)* (54 pp.).

Dogan, M., Dogan, A. U., Yesilyurt, F. I., Alaygut, D., Buckner, I., & Wurster, D. E. (2007). Baseline studies of the clay minerals society special clays: Specific surface area by the Brunauer Emmett Teller (BET) method. *Clays and Clay Minerals, 55*(5), p. 534–541. https://doi.org/10.1346/CCMN.2007.0550508

Eid, M. M., Abdelrahman, M. T., & Abdel-Aal, F. M. B. (2009). Sand bentonite mixture as a secondary liners in landfills. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volumes 1, 2, 3 and 4)* (pp. 225–228). IOS Press. https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-225

European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.* COM(2020) 98 final (23 pp.). https://doi.org/10.1149/1.3498295

Eurostat. (2020). Waste statistics. Eurostat Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics (accessed on [Fecha de acceso])

Gobierno de España. (2022). *Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular*. Article 26, section 1.b). *Boletín Oficial del Estado* (BOE), núm. 85, 37873-37974.

MITECO. (2021). *I Plan de Acción de Economía Circular 2021-2023: Estrategia española de economía circular* (75 pp.).

Regadío, M., Ruiz, A. I., Rodríguez-Rastrero, M., & Cuevas, J. (2015). Containment and attenuating layers: An affordable strategy that preserves soil and water from landfill pollution. *Waste Management, 46,* 408–419. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.014

Reinholdt, M. X., Hubert, F., Faurel, M., Tertre, E., Razafitianamaharavo, A., Francius, G., Prêt, D., Petit, S., Béré, E., Pelletier, M., & Ferrage, E. (2013). Morphological properties of vermiculite particles in size-selected fractions obtained by sonication. *Applied Clay Science, 77–78,* 18–32. https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.03.013

Stanjek, H., & Künkel, D. (2016). CEC determination with Cu-triethylenetetramine: Recommendations for improving reproducibility and accuracy. *Clay Minerals, 51*(1), 1–17. https://doi.org/10.1180/claymin.2016.051.1.01

Wang, Y., Wang, S., Ni, J.-Q., Shi, S., Su, X., Zhang, J., Zhu, Z., & Dong, H. (2024). The influence of using different types of modified vermiculite cover on ammonia mitigation from animal slurry storage: The role of sulfuric acid. *Waste Management, 178,* 311–320. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.046

12.Mejora de la calidad de áridos procedentes de RCD mediante tecnología de abrasión en vía seca. Escalado industrial

Asensio de Lucas, Eloy (1); Moreno-Juez, Jaime (2); Frías, Moisés (3); Guerrero, Ana (3); Cabello, Zoe (3); González, José (4);

(1) INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA (IETCC-CSIC), MADRID, ESPAÑA (2) TECNALIA, BASQUE RESEARCH AND TECHNOLOGY ALLIANCE (BRTA), DERIO, ESPAÑA (3) INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA (IETCC-CSIC), MADRID, ESPAÑA. (4) SODIRA IBÉRICA, S.L., MADRID, ESPAÑA

Palabras clave / Términos relevantes

Abrasión mecánica, escalado industrial

Tipo: Comunicación

Resumen de la comunicación

El presente trabajo aborda uno de las problemáticas que presentan los áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como es el mortero adherido a la superficie de los áridos naturales. Es por ello que se plantea una tecnología de abrasión que permita mejorar la calidad de los áridos para evitar los efectos que pueda tener en futuras aplicaciones. Se estudian propiedades físicas como la densidad y absorción de agua debido a que se encuentran directamente relacionadas con la calidad de los áridos. Los resultados muestran que el tratamiento de abrasión mejora la calidad de los áridos aumentando la densidad y disminuyendo la absorción de agua de éstos. Además, la tecnología estudiada a nivel de laboratorio es perfectamente escalable a nivel industrial.

Agradecimientos:

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigación e Innovación Tecnológica de la Comunidad de Madrid y a los Fondos Europeos FEDER, por la cofinanciación del proyecto VALREC.

1. Introducción

Uno de los grandes problemas de los áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) es la presencia de mortero adherido a la superficie de los áridos naturales

reciclados. Esta matriz de cemento afecta directamente a la densidad, coeficiente de Los Ángeles, absorción de agua, etc, las cuales tiene un efecto directo en la calidad de los eco-hormigones elaborados con árido reciclado de RCDs, pudiendo limitar su puesta en obra en aplicaciones constructivas [1]. El objetivo del presente trabajo es el empleo de tecnologías de abrasión para la mejora de la calidad de los áridos procedentes de RCD, evaluada a través del estudio de propiedades físicas como ~~son~~ la densidad y la absorción de agua.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Árido reciclado limpio de hormigón, con un tamaño inferior a 40 mm (Figura 1a). El acondicionamiento previo del material reciclado se realizó de la siguiente manera: Primeramente, se realizó manualmente la limpieza del material de naturaleza no pétrea (restos de asfalto, madera, plástico, metales…). En la Figura 1b se muestra el aspecto de material de rechazo, representando un 3.70% del total. A continuación, se procede al secado del árido en estufa, a una temperatura de 105 ºC hasta masa constante con la finalidad de eliminar toda humedad que pueda contener la muestra.

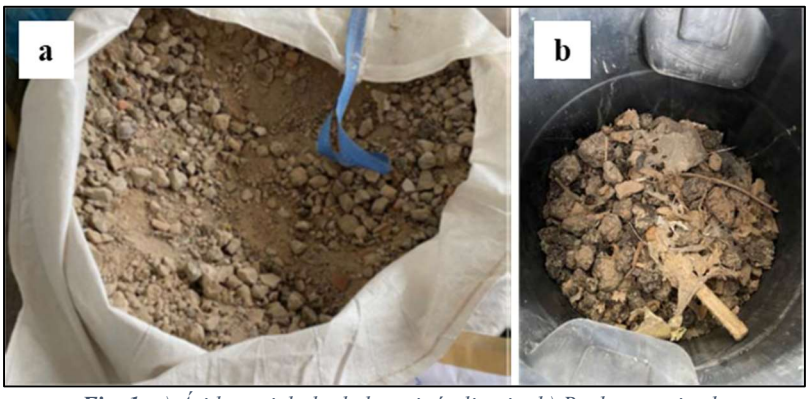


Fig. 1. *a) Árido reciclado de hormigón limpio. b) Rechazo retirado*

La composición química del árido determinada mediante fluorescencia de rayos X se muestra en la Tabla 1.

A la vista de los resultados se puede decir que el RCD tiene una naturaleza silico-cálcica cuya suma de ambos óxidos alcanza el valor de 72.0% y en menor medida, óxidos de aluminio, de hierro y de potasio (Al_2O_3, Fe_2O_3 y K_2O). A su vez, cabe destacar que el contenido en sulfatos (expresados como SO_3) es 1.3%; mientras que el contenido de cloruros es igual o inferior a 0.03%.

Tabla 1. *Composición química (% en peso) del árido estudiado*

SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	K_2O	MgO	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	Cl	MnO	ZnO	Rb_2O	SrO	ZrO_2	Cr_2O_3	PF*
45.10	26.98	4.40	2.22	0.92	1.61	0.78	0.37	0.19	0.06	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	17.20

* *PF: Pérdida al fuego*

2.2. Metodología de abrasión

Para el ensayo de abrasión los estudios se centraron en 3 fracciones diferentes: 0.5/40 mm, 4/20 mm, 0.5/4 mm. Las fracciones se prepararon a partir de 0.5 mm para evaluar el rendimiento de la abrasión en función de la cantidad de fracción inferior a 0.5 mm generada después del proceso. La abrasión se llevó a cabo en hormigonera horizontal tradicional (Figura 2) con o sin la incorporación de bolas de acero que puedan favorecer dicha abrasión del material. En la Tabla 2 se recogen las condiciones de ensayo.



abla 2. Condiciones de ensayo en abrasión en hormigonera

	Abrasión sin bolas	Abrasión con bolas*
Velocidad de giro (rpm)	26	
Carga de árido (kg)	30	10
Tiempos de estudio (min)	15, 30, 45, 60	15
Fracciones (mm)	0.5/40; 4/20; 0.5/4	
Carga de bolas**	-	11
Diámetro (mm)	-	$45 < \phi < 49$
Masa (g)	-	$400 < m < 445$

*La abrasión con bolas se realizó para el tiempo de estudio considerado como óptimo

**Las bolas empleadas son las empleadas en el ensayo de Los Ángeles (EN 1097-2) [2]

Fig. 2. Hormigonera empleada

2.3. Cálculo del rendimiento de la abrasión

Para el cálculo del rendimiento del proceso de abrasión se procede al tamizado del material mediante el empleo de un tamiz con una apertura de malla de 0.5 mm.

El rendimiento de la abrasión se calcula mediante la ecuación 1:

$$Rendimiento\ (\%) = \frac{masa\ árido < 0.5\ mm}{masa\ árido\ total} . 100$$

2.4. *Caracterización física de los áridos*

La absorción de agua y la densidad aparente de los áridos reciclados antes y después del ~~los~~ tratamiento~~s~~ de abrasión se llevó a cabo mediante los ensayos recogidos en la normativa europea EN 1097-6 [3].

2.5. *Escalado industrial*

El escalado para la prueba industrial se llevó a cabo en la cantera de la empresa SODIRA S.L. en Aranjuez. La planta cuenta con una línea de abrasión en húmedo para el redondeo de áridos naturales ornamentales y está compuesta por una tolva de alimentación, una cinta transportadora para la alimentación de la cuba de abrasón de 12 m^3 y dos cribas multipiso para clasificar por granulometrías los áridos tratatos. Dicha línea de abrasión se aprovecho para llevar a cabo el tratamiento en seco. Las granulometrías que se obtuvieron después del tratamiento son: árido 0/3 mm, árido 3/6 mm, árido 6/10 mm, árido 10/20 mm y árido 20/40 mm.



Fig. 3. *Instalación de SODIRA*

3. Resultados

3.1 Ensayos en laboratorio

a) Abrasión en hormigonera sin bolas

El ensayo de abrasión en hormigonera se llevó a cabo en las fracciones y condiciones mostradas en la Tabla 2. El rendimiento de la abrasión para cada una de las fracciones calculado mediante la ecuación 1 se muestra en la Figura 4. A la vista de los resultados obtenidos es posible observar como a medida que aumenta el tiempo de abrasión aumenta el rendimiento del proceso.

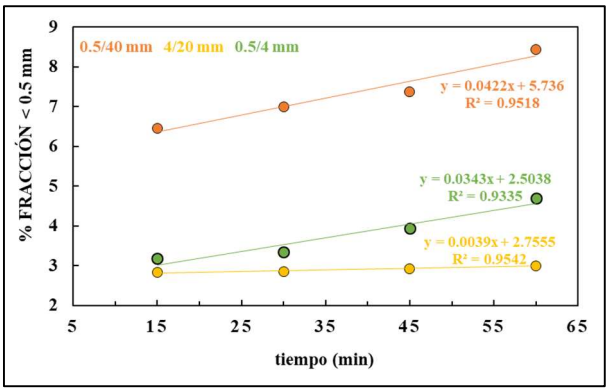


Fig. 4. *Rendimiento de la abrasión en función del tiempo*

b) Densidad y absorción de agua del árido

En la Figura 5 se muestra los valores correspondientes a densidad (Fig. 5a) y absorción de agua (Fig. 5b) tanto de los áridos reciclados después de los tiempos de abrasión como de los áridos sin tratamiento (0 min).

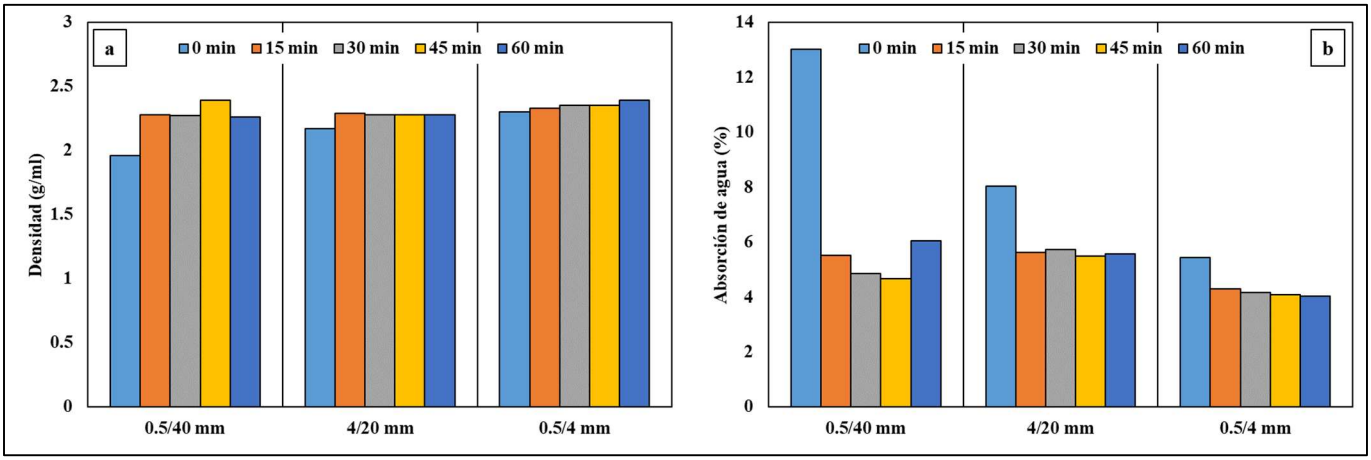


Fig. 5. Valores de densidad *(a) y absorción de agua (b) de los áridos en función del tiempo de ensayo*

El proceso de abrasión favorece la disminución de la absorción de agua por parte de los áridos reciclados. Con 15 minutos de abrasión se disminuye la absorción de agua un 57.57%, 29.89% y 20.81% en las fracciones de 0.5/40 mm, 4/20 mm y 0.5/4 mm respectivamente. A partir de ese tiempo de ensayo, los valores de absorción de agua, permanecen prácticamente constantes. En cuanto a la densidad, se observa que con 15 minutos de tratamiento aumenta la densidad, tiempo a partir del cual, esta propiedad no experimenta apenas variación. Por este motivo, para los estudios posteriores llevados a cabo con la incorporación de bolas para favorecer el proceso, se llevó a cabo únicamente con 15 min de tratamiento. Los resultados obtenidos para la densidad y la absorción de agua, se pueden asociar con la eliminación de pasta de cemento adherida en los áridos, así como la reducción de tamaño que pueden sufrir los componentes más ligeros presentes en los RCD (yeso, por ejemplo) que provocan menores densidades y mayores absorciones de agua.

En la Figura 6 se muestra, a modo de ejemplo, la diferencia de rendimiento observado en la abrasión de la fracción 0.5/40 mm con y sin bolas durante 15 minutos de abrasión. A la vista de la figura, se muestra claramente que la incorporación de bolas durante la abrasión mejora el proceso, consiguiendo un aumento del rendimiento en un 43.98%.

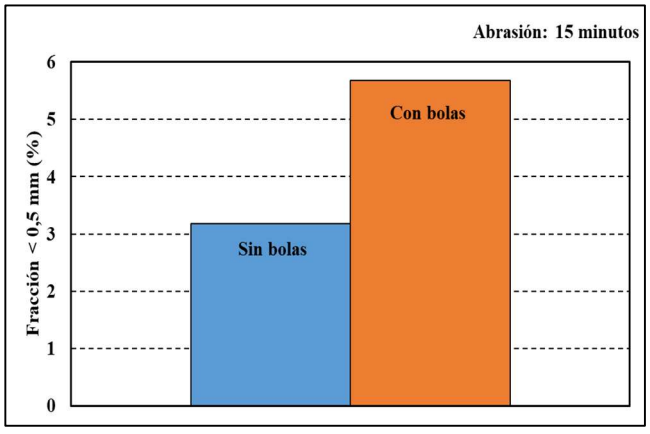


Fig. 6. *Rendimiento de la abrasión en función del tiempo de ensayo.*

3.2 Escalado industrial

En la Figura 7 se muestran los resultados de densidad (Fig. 7a) y absorción de agua (Fig. 7b) para las fracciones obtenidas después del proceso de abrasión llevado a cabo en las instalaciones de

SODIRA S.L. y comparadas con las fracciones sin tratar. Se observa un incremento de los valores de densidad para las fracciones 0/3 mm y 10/20 mm; mientras que para el resto, la densidad permanece prácticamente constante. Para todas las fracciones se observan disminuciones de los valores de absorción de agua en los áridos bajo tratamiento que han sufrido el tratamiento de abrasión. En general, los resultados muestran que la abrasión en hormigonera es un procedimiento escalable a nivel industrial consiguiendo mejorar la calidad de los áridos procedentes de RCD mediante abrasión.

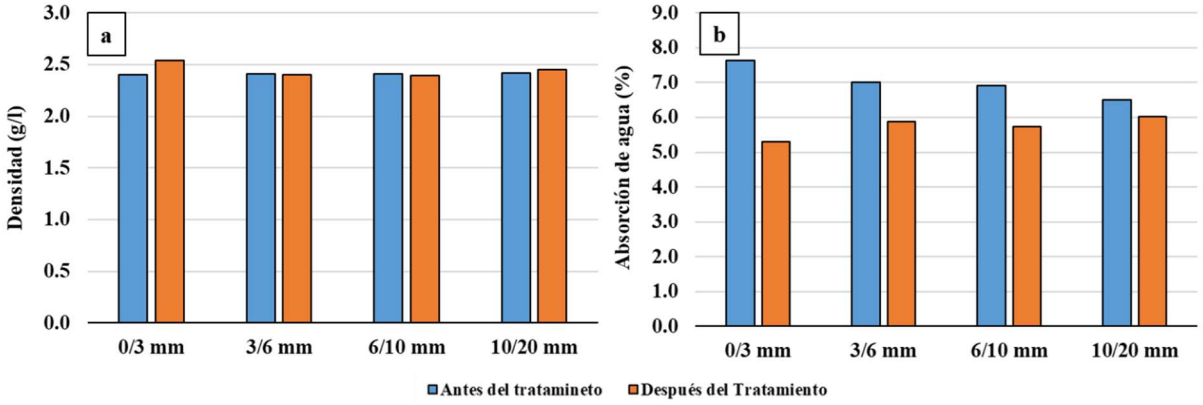


Fig. 7. *Densidad (a) y absorción de agua (b) de los áridos después de las pruebas realizadas en SODIRA S.L.*

4. Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer del presente trabajo son las siguientes:

- La abrasión en hormigonera es efectiva para la mejora de la calidad de los áridos en términos de absorción de agua y densidad, obteniéndose áridos más densos y con menores absorciones de agua.
- El tiempo de abrasión establecido como óptimo son 15 minutos.
- La incorporación de bolas durante la abrasión aumenta el rendimiento.
- El procedimiento de abrasión en hormigonera es perfectamente escalable a nivel industrial para conseguir áridos reciclados procedentes de RCD de mejor calidad y prestacional.

Agradecimientos:

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigación e Innovación Tecnológica de la Comunidad de Madrid y a los Fondos Europeos FEDER, por la co-financiación del proyecto VALREC.

Referencias

[1] F. Agrela, M. Sánchez de Juan, J. Ayuso, V.L. Geraldes, J.R. Jiménez, Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete, Construction and Building Materials 25 (2011) 3950–3955. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.027.

[2] CEN-CENELEC, EN 1097-2. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation, (2021).

[3] CEN-CENELEC, EN 1097-6. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption, (2014).

13.POTENCIAL USO DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES DE BASE CEMENTO A PARTIR DE SUS PROPIEDADES

Villarreal-Centurión, L.E.1; Sáez del Bosque, I.F. 1; Sánchez de Rojas, M.I.2,3; Frías, M.2,3; Jiménez, M.1; Matías, A. 1; Medina, C. 1,3

1.Escuela Politécnica de Cáceres, Universidad de Extremadura, Avda. de la Universidad, s/n, 10003,

Cáceres (España)

2.Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), Consejo Superior de

Investigaciones Científicas (CSIC), c/ Serrano Galvache, 4, 28033, Madrid (España)

3. SOSMAT, Universidad de Extremadura, Unidad Asociada al CSIC

Resumen

La valorización de los residuos mixtos de la construcción y demolición representa uno de los principales retos de las sociedades modernas en aras de alcanzar la descarbonización y sostenibilidad de la industria de los materiales de la construcción. El presente trabajo de investigación caracteriza las propiedades físicas, químicas y mecánicas de áridos reciclados mixtos de plantas de gestión de RCD de Extremadura generando un mayor conocimiento en su potencial valorización en la industria de los materiales de base cemento. Los resultados obtenidos permiten concluir a priori que esta tipología de áridos reciclados podría ser utilizados como nueva materia prima secundaria que constituya el esqueleto granular de nuevos morteros (revestimiento, proyectados, revocos…) y hormigones con fines estructurales y no estructurales.

Área temática: InvestigaciónPalabras clave: residuos construcción y demolición, propiedades

1. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento demográfico experimentado en las últimas décadas ha incrementado la demanda de vivienda, el desarrollo de ambientes urbanos e infraestructuras, y por ende la demanda de materiales de la construcción cuya cuota global de mercado se sitúa en 1 trillón de dólares y se estimada que alcanzará una cifra de 1,5 trillones de dólares en 2027[1]. Este actividad, junto con la rehabilitación y reparación del parque de infraestructuras existentes (edificios, carreteras, puentes…) se caracteriza por ser: i) gran demandante de energía (30% del total) [2]; ii) responsable de un 37% de las emisiones de CO2 [2]; iii) gran demandante de

recursos naturales (25% de los recursos naturales consumidos) [3], situándose el consumo de áridos naturales en 3 billones de toneladas en 2021 [4]; y iv) responsable de generar grandes cantidades de residuos de construcción y demolición (RCD) [5].

Los residuos de construcción y demolición representan entre un 30-40% de los residuos sólidos generados anualmente en el mundo [6]. A nivel mundial y europeo, se generan anualmente por encima de los 10 billones y 850 millones de toneladas de RCD [7, 8], respectivamente. Esta tipología de residuos se caracteriza por presentar una composición heterogénea (hormigón, mortero, árido desligado, material cerámico, material bituminoso…) lo que dificulta su reincorporación a la cadena de valor de la industria de los materiales de construcción.

Esta valorización permitirá:

i) implementar los principios de economía circular en la

industria de los materiales de construcción a través del uso de los RCD como nuevos

materiales secundarios; y ii) contribuir a la descarbonización de los materiales de construcción (ej. cemento y hormigón) asociado a una reducción de las emisiones durante el proceso de fabricación de los mismos [9]. Han sido numerosas las investigaciones que han abordado la viabilidad de incorporar los RCD procedentes de hormigón en la industria de hormigón, bien como árido u adición, lo que ha permitido que se encuentre recogido mayoritariamente su uso en las normas de hormigón como árido en hormigón estructural/ no estructural (ej. Código Estructural [10] en España) [11] y recientemente la norma EN 197-6 [12]recoge la viabilidad del uso de los finos de hormigón como nuevo componente en la fabricación de cementos. Sin embargo, los áridos reciclados mixtos (67% del volumen de residuos) debido a su variabilidad composicional han sido objeto de un menor número de investigaciones [13-15], representando en la actualidad una prioridad para la comunidad científico – técnica la generación de un mayor conocimiento de su potencial uso como nueva materia prima secundario.

En este contexto, el presente trabajo de investigación trata de caracterizar (propiedades físicas, químicas y mecánicas) los áridos reciclados mixtos procedentes de las plantas de gestión de RCD de Extremadura, estableciendo recomendaciones de su aplicación dentro de la industria cementera, de morteros y de hormigón.

2. METODOLOGÍA

Se han recogido 24 muestras representativas de árido reciclado mixto (16 muestras gruesas - > 4 mm y 8 muestras finas - < 4 mm) procedentes de las plantas de tratamiento de RCD de la Comunidad Autónoma de Extremadura. Posteriormente, una vez recibidas en laboratorio se llevó a cabo un preacondicionamiento mediante secado en estufa a 50ºC, durante aproximadamente 72 h, hasta alcanzar masa constante.

Estas muestras fueron caracterizadas determinando las siguientes propiedades:

i) composición química determinada mediante fluorescencia de rayos X (XRF);
ii) clasificación composicional – EN 933-11;
iii) geométricas (distribución granulométrica –EN 933-1, equivalente de arena – EN 933-8 y contenido de finos – EN 933-1);
iv) físicas(densidad – EN 1097-6, absorción de agua – EN 1097-6 e índice de lajas – EN 933-3); y
v) mecánicas (coeficiente de los Ángeles – EN 1097-2), teniendo en cuenta las prescripciones descritas para los áridos en el artículo 30 “Áridos” del Código Estructural (CodE) y la norma EN 13139 “Áridos para morteros”.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Clasificación composicional y composición química

La figura 1 muestra la composición de las 16 muestras de árido reciclado grueso (tamaño partícula > 4 mm), observándose que los componentes que se encuentran en un mayor porcentaje son: hormigón y mortero (Rc), árido desligado (Ru) (58,8≤Rc+Ru ≤91,8% en peso), material cerámico (0,9%≤Rb ≤ 40,1% en peso) y material bituminoso (Ra≤ 7,3% en peso). Asimismo, se encuentran en una menor proporción otros componentes tales como: yeso (0,01%≤Y ≤3,8%), partículas flotantes, vidrio y otros (partículas ligeras, acero...). Por lo tanto, todo los áridos pueden ser clasificados como áridos reciclados mixtos, al presentar un contenido de Rc+Ru≤ 95% en peso.

Respecto a la composición química, las muestras se caracterizan por presentar como óxidos mayoritarios SiO_2 (51,3%-86,1% en peso), Al_2O_3 (6,8%-12,9% en peso), CaO (0,49%-13,9%) y Fe_2O_3 (1,6%-4,2%) y una pérdida al fuego que se encuentra entre 0,8%-12,6% en peso. Asimismo, como elementos minoritarios se encuentra el K_2O (1,6%-3,6% en peso), Na_2O (0,9%-2,1% en peso), SO_3 (≤2,8% en peso), Cl (≤0,05% en peso), principalmente.

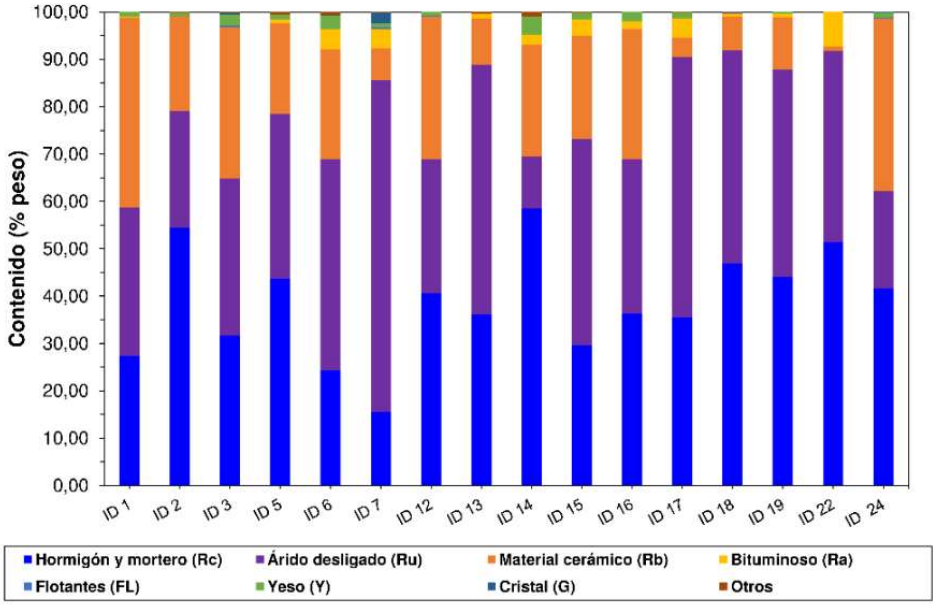


Figura 1. Clasificación composicional de los áridos reciclados

3.2. Propiedades físicas y mecánicas

La tabla 1 recoge las propiedades físicas y mecánicas de los áridos reciclados estudiados, observándose que las dos propiedades que ponen en compromiso el uso de esta nueva tipología de áridos reciclados mixtos es la absorción de agua, especialmente en la fracción gruesa y el coeficiente de los Ángeles, aunque esta última propiedad no cumple los requisitos exigidos por el Código Estructural para solamente 4 muestras (25% del total).

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de los áridos reciclados mixtos

Muestra	FR	Dssd (kg/dm³)	CA (% peso)	FI (% peso)	LA (%peso)	SE	D_{max} (mm)	F (% peso)
ID 1	G	2,18	10,12	26	45	-	63	0,69
ID 2	G	2,32	3,21	14	63	-	50	2,05
ID 3	G	2,52	2,80	16	51	-	32	1,63
ID 4	G	2,31	6,93	21	36	-	63	0,22
ID 5	G	2,31	7,87	26	47	-	40	0,92
ID 6	G	2,41	6,13	10	45	-	20	2,7
ID 7	G	2,22	12,17	18	43	-	50	1,12
ID 8	G	2,40	7,02	17	38	-	25	2,26
ID 9	G	2,15	14,48	15	64	-	25	1,75
ID 10	G	2,34	8,17	19	32	-	40	0,60
ID 11	G	2,35	8,57	21	51	-	40	1,56
ID 12	G	2,39	7,28	10	33	-	63	2,12
ID 13	G	2,45	5,27	10	36	-	22	0.52
ID 14	G	2,42	6,28	10	32	-	13	2.41
ID 15	G	2,50	3,59	9	34	-	40	2,21
ID 16	G	2,11	9,44	27	47	-	25	2,93
CodE	G	-	≤5/ ≤7*	<35	≤40/ ≤50❁		-	<6
ID 17	F	2,27	5,58			72,43	4	8,77
ID 18	F	2,39	0,48	-	-	80,7	4	6,18
ID 19	F	2,61	0,30	-	-	87,6	4	1,33
ID 20	F	2,86	0,35	-	-	72,00	4	6,06
ID 21	F	2,74	0,76	-	-	78,00	4	3,39
ID 22	F	2,48	5,39	-	-	65,50	6,00	8,06
ID 23	F	2,54	6,83	-	-	76,06	4,00	6,71
ID 24	F	2,25	8,03	-	-	81,00	4	4,95
CodE	F	-	≤5	-	-	>70◔ / >75▼	-	-
EN 13139	F	-	-	-	-	-	-	*f (tipo mortero)* ◊

Nota. *- **FR**: fracción reciclada (**G**: gruesa; **F**: fina); **Dssd**: densidad saturada superficie seca; **CA**: coeficiente absorción de agua; **FI**: índice de lajas; **LA**: coeficiente de los Ángeles; **SE**: equivalente de arena; D_{max}: tamaño máximo; **F**: finos (<0,063 mm)*

*7%: Absorción de agua para árido reciclado grueso de hormigón

❁50%: Hormigón en masa o armado de resistencia característica ≤ 30 MPa

◔70: Obras sometidas a clase de exposición X0 o XC

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en el presente trabajo de investigación son:

- Los áridos reciclados mixtos están constituidos principalmente por fracción pétrea (áridos desligados, mortero, hormigón y material cerámico).

- Los áridos reciclados tienen una composición química óptima para ser utilizados como materia prima secundaria en la industria de los materiales de base cemento.

- Los áridos reciclados mixtos presentan como mayor limitación en su uso para la fabricación de hormigones estructurales el incumplimiento del coeficiente de absorción (~54% del total) y coeficiente de Los Ángeles (~25% del total), para la fracción gruesa.

- Los áridos reciclados podrían se utilizados para la fabricación de hormigones no estructurales.

- Los áridos finos reciclados podrían ser utilizados para la fabricación de morteros. En función del contenido de finos serán empleados en la formulación de una tipología de mortero u otra.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue llevada a cabo en el marco del proyecto PID2022-136244OB-I00 financiado por MICIU/AEI/10.13 039/501100011033 y por FEDER, UE. Asimismo, Lady Elizabeth Villareal Centurion beneficiaria de la ayuda PID2022-136244OB-I00 financiada por MICIU/AEI /10.13039/501100011033 y por el FSE+.

6. REFERENCIAS

1. Bhavsar, V., et al., https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200198.

2. Curado, M., et al., https://doi.org/10.1080/15487733.2024.2364954

3. Papamichael, I., et al., https://doi.org/10.1177/0734242X231190804

4. European Aggregates Association, Anual review 2020-2021: A sustainable industry for a sustainable Europe. 2022: https://uepg.eu/mediatheque/index/1.html [Fecha de acceso: 26/10/2024].

5. Lee, S., et al., https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105855

6. Moein, M., et al., https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110778

7. Saradara, S., et al., https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100531

8. ul Haq, M., et al., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136362

9. Provis, J., et al., https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.09.014

10. Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, Código Estructural. Volumen I. Real Decreto y Articulado. 2021, Secretaría General Técnica. p. 552.

11. Plaza, P., et al., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122926

12. Asociación Española de Normalización, UNE-EN 197-6. Cemento. Parte 6: Cemento con materiales de construcción reciclados. 2023.

13. Zhang, L.W., et al., https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.075

14. Velardo, P., et al., https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102211

15. Sáez del Bosque, I.F., et al., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.11977

14.Estabilización con cemento supersulfatado de la fracción rechazo de la valorización de los restos de construcción y demolición

Área temática: Investigación

Palabras clave: Cemento supersulfatado, fracción rechazo

Romà Martí, Jesús María del Castillo, Miguel Ángel Martín, Eduardo Prieto y Andrés Seco

1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de valorización de los Restos de Construcción y Demolición (RCD) para la fabricación de áridos reciclados se ha demostrado su validez técnica, económica y medioambiental. La valorización conlleva una serie de operaciones que incluyen: machaqueo, cribado, eliminación de impropios. (metales, plástico, madera, etc.). Tras estas operaciones de valorización se obtienen áridos reciclados con las granulometrías necesarias para su uso en el sector de la construcción, así como una fracción fina de rechazo (que supone del orden del 30% del material de partida). Esta fracción carece de vías de valorización debido a su granulometría fina, la presencia de impropios mencionados anteriormente y sobre todo las altas concentraciones de sulfatos provenientes de enlucidos de tabiquería, escayolas, y en menor medida de los cementos. Los sulfatos pueden generar problemas de durabilidad en aplicaciones tradicionales de estabilización de suelos y materiales, ya que su presencia promueve la expansión y degradación de las matrices del cemento convencional por la formación de etringita. Además, la naturaleza heterogénea de esta fracción dificulta su tratamiento uniforme, lo que incrementa la complejidad de su reutilización.

En este contexto, el Cemento Supersulfatado (SSC) se presenta como una alternativa sostenible para la estabilización de la fracción rechazo. El SSC, con su bajo contenido en clínker y alta proporción de escoria granulada de alto horno, y su contenido en yeso (en torno al 15%) es altamente resistente a entornos agresivos, incluidos aquellos con elevadas concentraciones de sulfatos. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica del uso de SSC para estabilizar la fracción rechazo de los RCDs. En el estudio se comparará el comportamiento del

SSC y del cemento tipo II 32,5N (CEM II) para distintas edades y concentraciones. Se analizará su comportamiento mecánico, su susceptibilidad al agua y su microestructura por SEM.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La fracción fina de RCD se ha obtenido de una empresa ubicada en Navarra dedicada al reciclaje y valorización de residuos de construcción y demolición. Los cementos considerados para este ensayo experimental son un CEM-II 32,5N, y un cemento supersulfatado compuesto por un 5% de CEM I-52,5N, un 85% de escoria de alto horno (GGBS) y un 10% de yeso en forma de sulfato de calcio dihidratado. En la **Figura 5** se muestra la curva granulométrica de la fracción rechazo.



Figura 4 Material a estabilizar

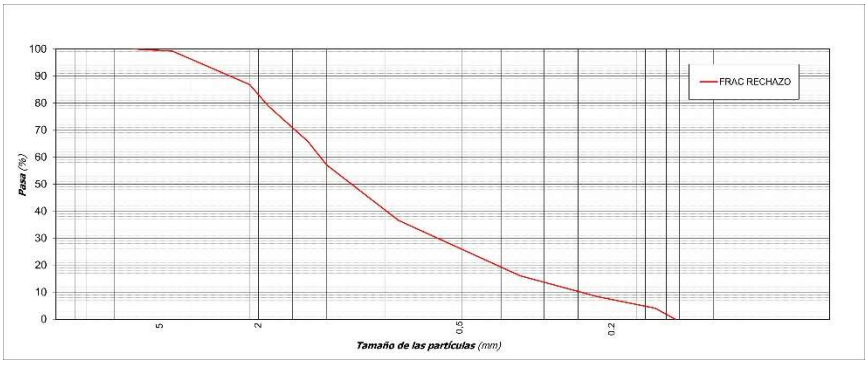


Figura 5 Curva granulométrica de la fracción rechazo de RCD

Se ha elaborado una campaña de estabilización de suelos mediante los dos cementantes mencionados anteriormente en concentraciones de 2,5%, 5% y 7,5%. Se ha realizado la mezcla del árido con el cementante en seco y posteriormente se ha añadido el agua. El método de compactación y la humedad óptima para cada caso han sido los correspondientes en el ensayo Próctor Normal (Figura 6). Se fabricaron probetas de todas las combinaciones para su ensayo a las edades de 7, 14, 28 y 50 días. Las probetas se curaron a temperatura ambiente con varias capas de film transparente para evitar la pérdida de humedad. A las edades de curación citadas, se realizaron ensayos de resistencia a compresión simple (CS). Adicionalmente, a las edades de 28 y 50 días se realizaron ensayos de resistencia a compresión simple tras 24 horas de inmersión en agua (Soaked CS) y se analizó a la edad de 28 días la microestructura de las distintas combinaciones mediante SEM-EDX a 5kV, x600 aumentos y en alto vacío.



Figura 6 Probeta utilizado para el ensayo a CS

3. RESULTADOS

La **figura 4** muestra los resultados de los ensayos a compresión simple de las combinaciones consideradas.

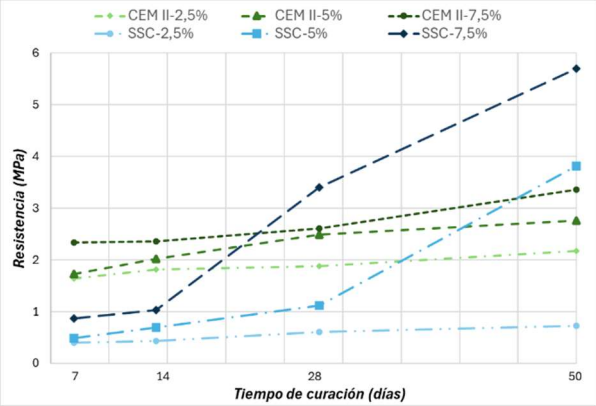


Figura 7 Resultados de los ensayos a compresión simple

En el caso de las combinaciones con CEM II (CEM II-2,5%, CEM II-5% y CEM II-7,5%), la resistencia aumenta gradualmente con el tiempo y con el incremento de la proporción de cemento. La combinación de mayor contenido de cemento (CEM II-7,5%) muestra una resistencia final de 3,36 MPa a los 50 días.

El cemento supersulfatado por su parte a las edades más tempranas muestra unos valores de resistencia mecánica muy inferiores a los del CEM II. Para las combinaciones SSC-2,5%, SSC-5% y SSC-7,5% las resistencias a 7 días son de 0,40 MPa; 0,48 MPa y 0,87 MPa respectivamente. La combinación SSC 2,5% muestra un suave incremento de resistencia a lo largo del tiempo de curado. Sin embargo, las combinaciones de 5% y 7,5% muestran unos fuertes cambios en la tendencia del aumento de la resistencia mecánica a 28 días y 14 días respectivamente, sobrepasando los valores del CEM-II a las mismas dosificaciones, con resistencias finales de 3,82 MPa y 5,70 MPa respectivamente.

En la **figura 5** se muestran las probetas sumergidas en agua las 24 horas previas al ensayo y también mostraron un incremento de resistencia a lo largo de las edades de curado. Todas las combinaciones muestran una mejoría a 50 días, excepto la combinación CEM II-2,5%, que a 28 días la resistencia es de 1,44 MPa, a 50 disminuye hasta los 1,01 MPa.

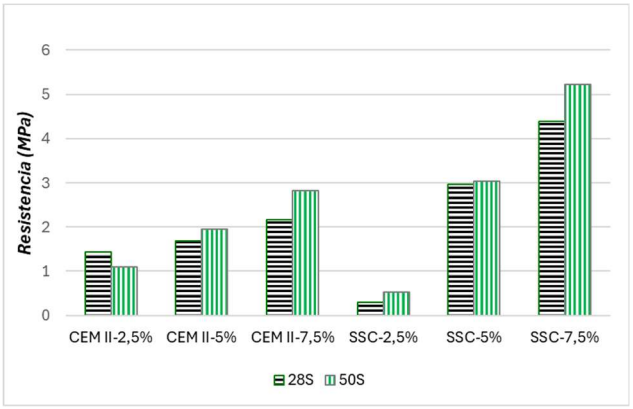


Figura 8 Resistencias a CS Soaked

En las **figuras 6 y 7** se muestran los resultados de los ensayos de CS y CS soaked a 28 y a 50 días respectivamente. Si se comparan los resultados de los ensayos realizados a 28 días con y sin inmersión, se observa que las probetas tratadas con CEM II disminuyen la resistencia un 23%, 32% y 17% respectivamente tras la inmersión en agua. Sin embargo, las probetas tratadas con SSC muestran unos incrementos de resistencia del 164% y 29%para las combinaciones de SSC-5% y SSC-7,5% respectivamente.

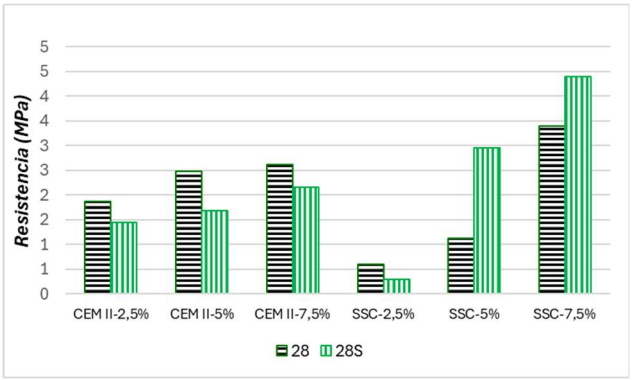


Figura 9. Ensayos CS y CS soaked a 28 días.

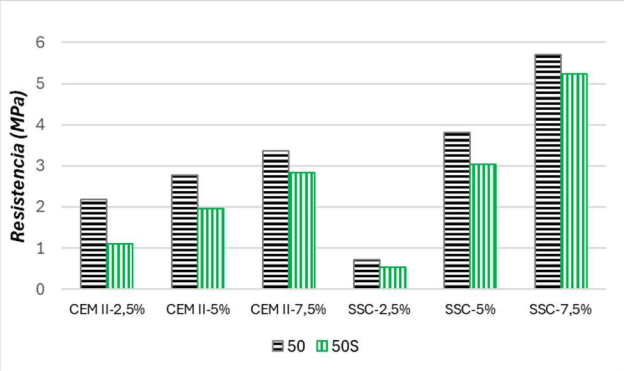
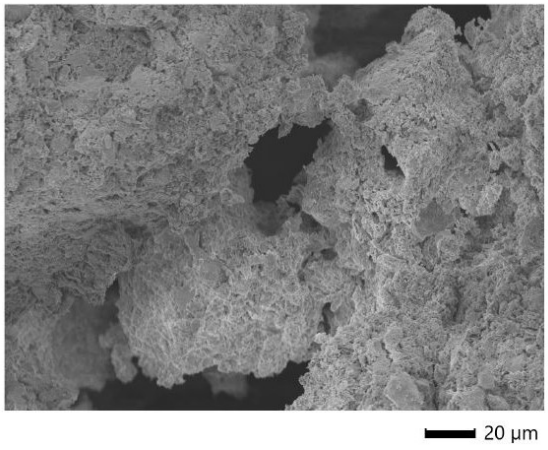
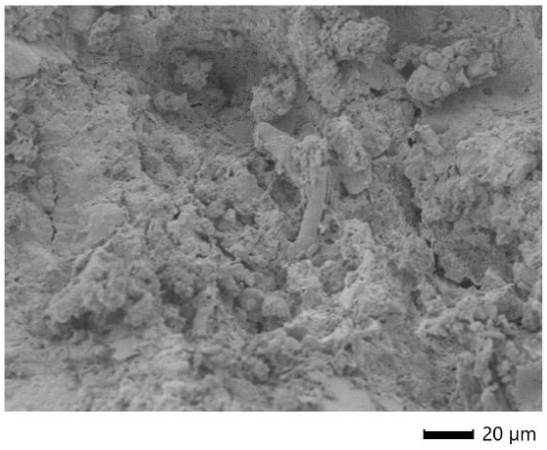


Figura 10 Ensayos CS y CS soaked a 50 días

En la **figura 8** se muestran las imágenes SEM-EDX de todas las combinaciones tratadas a la edad de 28 días. El análisis de las mismas no permitió observar diferencias de microestructura entre las diferentes combinaciones. Tampoco se observó en ninguna de las combinaciones la presencia de etringita.



a)



b)

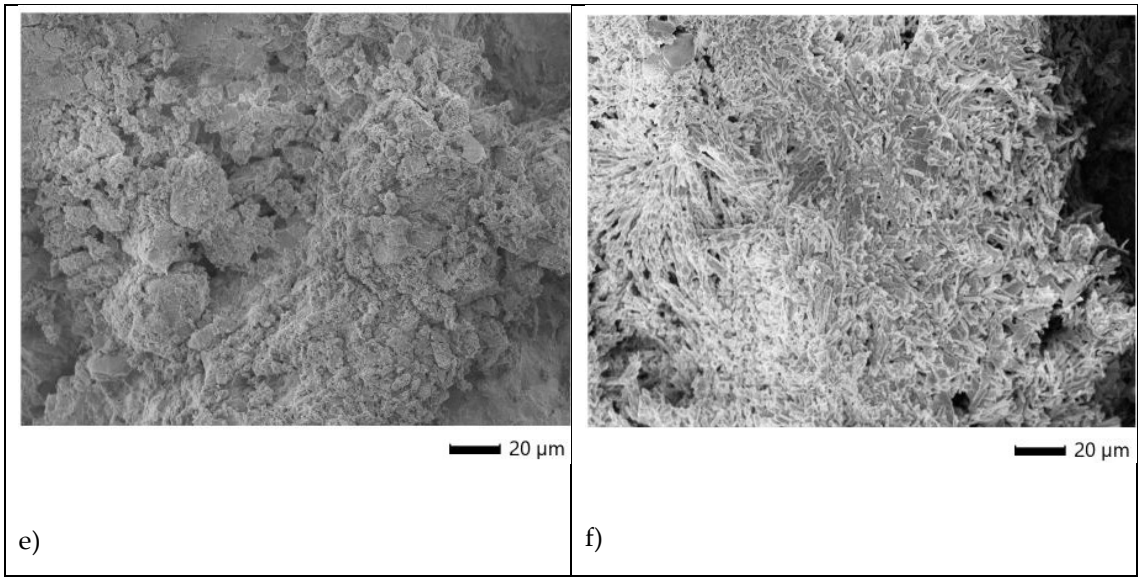


Figura 11 Imágenes SEM-EDX. a) CEM II-1,5% b) SSC-2,5% c) CEM II-5% d) SSC-5% e) CEM II-7,5% f) SSC-7,5%

4. CONCLUSIONES

- Tanto el CEM II como el SSC permitieron la estabilización de la fracción rechazo.
- A largo plazo, el SSC presenta unos valores de resistencia mayores que el CEM II.
- Para las combinaciones SSC 5% y SSC 7,5% la inmersión en agua ha aumentado la resistencia a compresión del material.
- No se ha observado etringita ni fenómenos adversos con el CEM II.

5. AGRADECIMIENTOS

Beca TED2021-131965B-I00 financiada por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR

15.EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE LA FRACCIÓN GRUESA Y FINA RECICLADA DE HORMIGÓN EN EL NIVEL PRESTACIONAL DE LOS HORMIGONES RECICLADOS.

Medina, C.1; Matías, A.;1; Sendín, R.2; Ferrero, F.J. 2, Iglesias, F.2

1.Escuela Politécnica de Cáceres, Universidad de Extremadura, Avda. de la Universidad, s/n, 10003, Cáceres (España)

2.SENDIN Pavimentos y Abastecimiento, S.A., Cáceres, España.

Resumen

La valorización integral de los residuos construcción y demolición procedentes de hormigón, constituye un gran interés en el actual contexto de descarbonización del sector de la construcción. El presente trabajo de investigación trata de evaluar el efecto que tiene la incorporación simultánea de fracción gruesa y fina reciclada de hormigón en el comportamiento mecánico (resistencia a compresión y tracción) y durable (penetración de agua bajo presión y permeabilidad al oxígeno) del nuevo hormigón reciclado formulado con una menor huella de carbono. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la inclusión conjunta de estas fracciones recicladas como esqueleto granular permite obtener hormigones con un nivel prestacional igual al de los hormigones convencionales.

Área temática: Investigación

Palabras clave: fracción gruesa y fina reciclada, hormigón

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales de base cemento (ej. morteros, hormigón fabricado en central, prefabricados de hormigón…), son los materiales más extensamente utilizados [1] en el sector de la construcción. Más concretamente, el hormigón es un material indispensable en la construcción de las infraestructuras (edificios, carreteras, puentes, presas…) demandadas por las sociedades modernas, siendo en la actualidad el material de construcción más consumido en el mundo (30 billones de toneladas anualmente) [2]. Su fabricación conlleva la extracción, procesado y utilización de recursos naturales (25% de los recursos naturales consumidos) [3], así como la generación de residuos tanto en la fase de producción como en las posteriores operaciones de mantenimiento y deconstrucción de las estructuras al final de su vida de servicio. Todo ello,

junto el actual contexto socio-político, invita a que los entes intervinientes (fabricantes, contratistas, proyectistas…) establezcan estrategias (reutilización de subproductos industriales, reducción contenido de cemento…) enfocadas a reducir de forma drástica las emisiones de CO2 (descarbonización) y la búsqueda de materias primas secundarias, tanto en el proceso de producción [1, 4] como en el resto de etapas de un proyecto constructivo (diseño, puesta en obra, explotación, conservación y deconstrucción). Estas líneas de actuación, se encuentran alineadas con los principios de economía circular que contribuyen a la minimización de residuos de construcción y demolición (RCD) generados (a nivel mundial y europeo, se generan anualmente por encima de los 10 billones y 850 millones de toneladas de RCD [5, 6], respectivamente), reducción de consumo de recursos naturales (ej. grava y arena) y promover la sostenibilidad y descarbonización de la industria de la construcción y demolición [7]. En este escenario, los áridos reciclados de hormigón procedentes de los RCD debido a sus características intrínsecas, así como a su disponibilidad y a que se encuentran recogidos en las normativas de hormigón internacionales [8] tiene un gran oportunidadpara afianzarse como una materia prima secundaria, mejorando los indicadores de sostenibilidad [9]. En España, el Código Estructural (CodE) [10] especifica el uso exclusivo de la fracción gruesa (> 4 mm) de hormigón hasta un 20% en peso en los hormigones con fines estructurales, no recogiendo el uso de la fracción fina de hormigónque representa aproximadamente un 40% de los áridos reciclados procesados [11]. En este contexto, el presente trabajo de investigación trata de avanzar en el conocimiento de la viabilidad de utilizar simultáneamente fracción gruesa y fina reciclada de hormigónen el diseño de hormigones reciclados con una menor huella de carbono. Para ello, se analizará el efecto de la inclusión de las nuevas materias primas secundarias (árido reciclado) en las propiedades en estado fresco (consistencia) y endurecido (resistencia a compresión, tracción, penetración agua bajo presión y permeabilidad al oxígeno) de los hormigones formulados.

2. MATERIALES Y MEZCLAS

La tabla 1 muestra las propiedades físicas y mecánicas de los áridos utilizados en la presente investigación.

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de los áridos naturales y reciclados

Propiedad	AN	GN	AR	GR	Límite CodE
Dssd (kg/dm^3)	2,76	2,74	2,60	2,50	-
CA (% peso)	1,18	0,88	4,42	5,40	≤5[a] o ≤7[b]
FI (% peso)	-	16	-	16,1	< 35
LA (% peso	-	21	-	27	≤ 40
d/D	0/6	6/12	0/6	6/12	-

Nota. *- **Dssd**: densidad saturada superficie seca; **CA**: coeficiente absorción de agua; **FI**: índice de lajas; **LA**: coeficiente de los Ángeles; **d**: tamaño mínimo; **D**: tamaño máximo; **AN**: arena natural; **GN**: gravilla natural; **AR**: arena reciclada; **GR**: gravilla reciclada; [a]absorción de agua para árido natural; [b]absorción de agua para el árido reciclado de hormigón; **CodE**: Código Estructural*

La tabla 2 muestra las proporciones de las mezclas resultantes del proceso de dosificación. En la misma, se observa que todas las mezclas diseñadas cumplen con los requisitos de contenido mínimo de cemento y máxima relación (a/c)efectiva, establecidos por el CodE [10] para las clases de exposición X0 y XC.

Tabla 2. Dosificación de las mezclas de hormigón formuladas

Componente (kg/m^3)	HR *(hormigón con 100% árido natural)*	HR20+10 *(hormigón reciclado con un 20% de gravilla reciclada + 10% de arena reciclada de hormigón)*
Arena	588,09	533,04
Arena reciclada	0,00	62,03
Gravilla	488,41	287,63
Gravilla reciclada	0,00	186,59
Grava	525,56	529,29
Cemento	325,00	325,00
Agua	146,25	149,89
Superplastificante	2,76	2,76

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 3 recoge los resultados obtenidos de consistencia, prestaciones mecánicas y permeabilidad al oxígeno de los hormigones ensayados. Respecto a la consistencia, se observa que la incorporación de árido reciclado no provoca una pérdida de trabajabilidad del HR20+10. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango 50-90 mm correspondiente a una consistencia blanda (B), según el CodE [10].

Tabla 3. Propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones formulados

Mezcla	S (mm)	f_{cm} (MPa)			f_{cmt} (MPa)	K (10^{-18} m^2)
		7 días	28 días	365 días	28 días	28 días
HR	80	48,81	53.13	62,69	4,36	7,82
HR20+10	80	50,10	54,71	64,01	4,37	8,48

Nota. *– **S**: consistencia; f_{cm}: resistencia media a compresión; f_{cmt}: resistencia media a tracción; **K**: coeficiente permeabilidad al oxígeno*

En cuanto a la resistencia media a compresión de los hormigones, se observa que los valores de resistencia a los 28 días son superiores a la resistencia característica de diseño(fck) de 30 MPa. Por lo tanto, el HR20+10 podría ser utilizado desde un punto de vista mecánico para el diseño de hormigones que requieran una resistencia ≥ 30 MPa. Asimismo, se observa que la incorporación simultánea de finos y gruesos reciclados de hormigón (HR20+10) provoca, independientemente de la edad de ensayo, un incremento de la resistencia compresión respecto al HR, situándose éste en ~2,6%, ~3,0% y ~2,5% respecto al HR a 7, 28 y 365 días respectivamente. Este mejor comportamiento estaría asociado principalmente a la rehidratación de los componentes anhidros de cemento presentes en los áridos reciclados de hormigón, especialmente en la fracción fina [12].

La tabla 3, pone también de relieve que el hormigón HR20+10 tiene una resistencia a tracción igual a la del hormigón de referencia (HR), así como un coeficiente de permeabilidad al oxígeno ligeramente superior al HR debido a la mayor porosidad de los áridos reciclados [13]. Los valores resultantes están dentro del rango de valores (10-17–10-18 m2) [14, 15] observado para hormigones convencionales e inferior (1,0x10-17–8,0x10-17 m2) al registrado para hormigones reciclados.

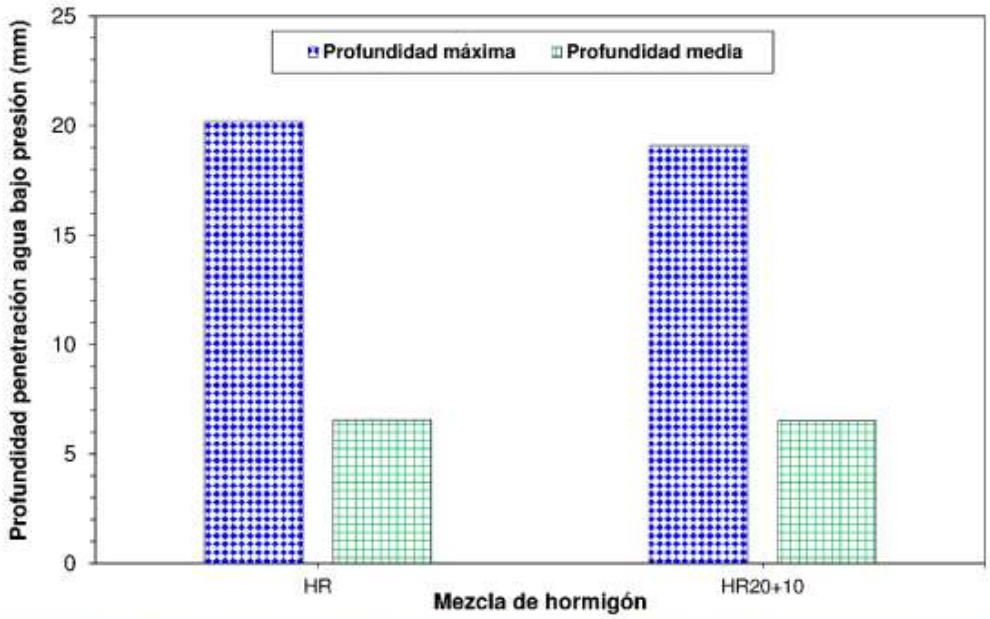


Figura 1. Penetración de agua bajo presión de los hormigones formulados a 28 días

Finalmente, la figura 1 muestra los valores de profundidad máxima (Pmax) y profundidad media (Pm) de penetración del agua a presión de los hormigones a los 28 días, observándose que el hormigón reciclado HR20+10 cumple, al igual que el HR, con las prescripciones establecidas por el CodE (Pmax≤ 50 mm y Pm≤ 30 mm; o Pmax ≤ 30 mm y Pm ≤ 20 mm, función clase exposición ambiental). Este resultado permite concluir que el hormigón reciclado HR20+10, al igual que el HR, tiene una estructura porosa suficientemente impermeable al agua.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en el presente trabajo de investigación son:

- La sustitución parcial de árido reciclado de hormigón (fracción gruesa y fina) por árido natural no afecta a la trabajabilidad de los hormigones en estado fresco.

- La resistencia a compresión del hormigón reciclado HR20+10 experimenta un pequeño incremento de esta propiedad mecánica respecto al HR.

- La incorporación de árido reciclado no influye negativamente en la impermeabilidad al agua del hormigón reciclado, cumpliendo los requisitos establecidos por el CodE

- El hormigón reciclado con menor huella de carbono (HR20+10) podría ser utilizado para el diseño y ejecución de elementos de hormigón con una fck ≤ 30 MPa.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue llevada a cabo en el marco del contrato para el proyecto de investigación "Comportamiento durable de los hormigones reciclados frente a los agentes agresivos. Efecto del porcentaje de áridos reciclados en su vida útil" establecido entre la empresa SENDIN Pavimentos y Abastecimiento, S.A. y la Universidad de Extremadura.

6. REFERENCIAS

1. Lu, D., et al., https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110904

2. Caracol, C., et al., https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110841

3. Papamichael, I., et al., https://doi.org/10.1177/0734242X231190804

4. Provis, J., et al., https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.09.014

5. Saradara, S., et al., https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100531

6. ul Haq, M., et al., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136362

7. Oyejobi, D., et al., https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102846

8. Plaza, P., et al., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122926

9. Villagrán-Zaccardi, Y., et al., https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105955

10. Ministerio de la Presidencia, Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural (CodE). 2021: BOE, nº 190, 10/08/2021. p. 1789.

11. Chen, Y., et al., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136744

12. Plaza, P., et al., https://doi.org/10.3390/app14103995

13. Berredjem, L., et al., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118421

14. Medina, C., et al., https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.023

15. Cantero, B., et al., https://doi.org/10.3390/app1109385