

Caracterización del material obtenido por reciclado de residuos cerámicos de construcción

Ricardo Huete Fuertes / Begoña Blandón González

Dpto. Construcciones Arquitectónicas I. Universidad de Sevilla (España)

Resumen

Hoy en día, en el ámbito de la construcción, se puede contribuir a mejorar y proteger el medio ambiente, así como a preservar la naturaleza y el paisaje, mediante el control de los residuos generados y la minimización de las cantidades que se desechan, contribuyendo a su posible reciclado. Falta de datos concretos y fiables sobre las características técnicas de los materiales reciclados y su aplicación en la construcción limitan la utilización de estos materiales reciclados de residuos de construcción y demolición.

En esta dirección se orienta nuestra investigación, a partir de la demanda actual sobre la protección del medio ambiente frente a las agresiones a las que de manera continua e irreflexiva se le somete y que limitan los recursos naturales de los que las generaciones futuras necesitarán disponer.

Abstract

Today in the construction world, it is possible to improve and protect the environment, also to preserve nature and landscapes. This can be done by controlling the remains as we decrease the amount of discarded material and have it for a potential recycling. The lack of reliable data upon the technical characteristics of recycled material and its usefulness for construction puts a limit to the usage of these remains from construction and demolition. Our research goes into that direction, given the current demands of environmental protection as the continuous and thoughtless aggressions to nature jeopardize the resources that future generations may require.

Problemática actual

La agresividad que la construcción supone para el medio ambiente, ya sea por los materiales y energías utilizadas como por los residuos generados exige un cambio en la actitud del profesional responsable y su esfuerzo en el uso de nuevas tecnologías y sistemas constructivos que permitan conseguir una construcción sostenible.

Teniendo en cuenta que en España más de 70% de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) generados son depositados en vertederos, se puede considerar la actividad de la construcción como una de las causas de contaminación ambiental que se presenta con mayor intensidad en el entorno de nuestras ciudades debido bien a la falta de legislación, a la escasez de lugares adecuados para ello o, lo que es nuestro interés, al desconocimiento que existe sobre las características del material allí depositado.

Durante los últimos años y, a partir de la aparición de los primeros vertederos considerados como legales o controlados en España, se han podido realizar estudios certeros acerca de:

1. El volumen de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) generados en obra.
2. La calidad y cantidad de los RCD depositados en vertedero.
3. Las posibilidades de aprovechamiento de estos residuos de construcción y demolición.

Sin embargo, la posibilidad de aprovechamiento y su aplicación futura están limitadas por factores tanto económicos como técnicos (principalmente por falta de conocimiento acerca del comportamiento de este nuevo material) y es en este campo en el que se inserta el trabajo desarrollado para caracterizar el material granular que se obtiene de reciclado de los residuos cerámicos de construcción.

Descriptores:

Reciclaje de residuos cerámicos;
Residuos de construcción y demolición

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN. Vol. 20-I, 2004, pp. 09-22.
Recibido el 09/12/03 - Aceptado el 29/12/04

Foto 1
Residuos cerámicos procedentes de obras de construcción y demolición



Sobre el volumen de RCD generados y su depósito en vertedero

En la ciudad de Sevilla y su área metropolitana (España), durante el año 2001 se ha cuantificado la cantidad de residuos procedentes de obras de construcción y demolición depositados en el Vertedero de La Jarilla (único vertedero de inertes de la provincia) y su composición.

¿Por qué centrarse en RCD cerámicos?

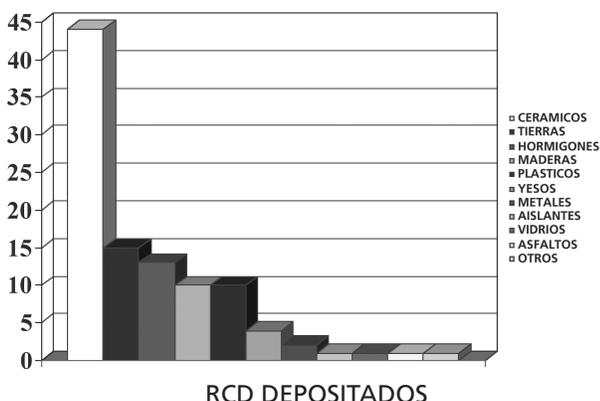
La cantidad de residuos depositados mensualmente en este vertedero asciende a 50.000 m³/mes, de los cuales 23.500 m³ son cerámicos, es decir, 44% de los RCD son de naturaleza cerámica, sin interés aparente y, por lo tanto, vertidos sin opción de tratamiento alguno y sin posibilidad actual de reutilización o reciclado (ver gráfico 1 y cuadro 1).

Estos datos se pudieron contrastar con resultados procedentes de otros trabajos previos realizados, deduciendo que del total de residuos generados en las obras de construcción y demolición¹, los cerámicos (inicialmente mezclados con otros de los que deben aislarse) constituyen el porcentaje mayor (ver cuantificación unitaria por m² construido en cuadro 2).

Sobre el reciclado de los residuos de construcción y demolición cerámicos

Aun estando conscientes de que la mejor manera de gestionar los sobrantes de una obra es que éstos no se produzcan, se debe contemplar la posibilidad de que la misma obra reduzca al máximo la cantidad de productos sobrantes mediante las siguientes actuaciones:

Gráfico 1
Volumen de RCD depositados en el vertedero de La Jarilla (año 2001)



Fuente: B. Blandón, 2003.

Cuadro 1
Volumen de RCD depositados en el vertedero de La Jarilla (en %, año 2001)

Cerámicos	43,5
Tierras	15,0
Hormigones	13,0
Maderas	10,0
Plásticos	07,0
Yesos	03,5
Metales y aleaciones	05,0
Aislantes	00,5
Vidrios	01,0
Asfaltos y alquitranes	00,5
Otros (fibras, cartones, orgánicos, etc)	01,0
<i>Total</i>	<i>100</i>

Cuadro 2
Volumen de residuos de construcción y demolición generados por m² construido

Origen	RCDs	RCDs Cerámicos
Por Demolición	1.2859 m ³ / m ²	0.528 m ³ / m ²
Por Construcción	0.4702 m ³ / m ²	0.0547 m ³ / m ²
Por rehabilitación (50%)	0.8781 m ³ / m ²	0.2887 m ³ / m ²

Fuente: Grupo de Investigación dirigido por: Ricardo Huete Fuertes (Universidad de Sevilla)

- La reutilización de los residuos cerámicos obtenidos por la demolición total o parcial de una unidad constructiva. En la actualidad tienden a ser reutilizados aquellos cuyo interés patrimonial se considere de interés (azulejos vidriados, ladrillos antiguos, restos de pavimentos, mosaicos, etc.) y siempre dependiendo de la cantidad, calidad de la pieza y del cuidado seguido en los trabajos de desmontaje y manipulación.
- El reciclado de aquellos productos o materiales cerámicos generados en la obra los cuales, tras un adecuado tratamiento, se incluyen de nuevo como materia prima en otro proceso constructivo. Hasta hace muy pocos años era difícil considerar esta opción, quizás por falta de legislación y de lugares apropiados para ello.
- El uso de materiales, tecnologías y sistemas constructivos que faciliten el proceso de reutilización o reciclado posterior pero para ello es preciso conocer las características que definen este material, su origen, naturaleza, composición y cantidad de residuos necesarios para programar un sistema de recogida, separación en origen, recuperación local o posibilidad de exportación, todo ello sobre la base de un estudio de mercado que lo justifique.

Objetivos de la investigación

Partiendo de la hipótesis de que los RCD objeto del estudio son generados a lo largo de toda la vida del edificio —como consecuencia de decisiones y actuaciones contenidas en el propio proyecto (materiales y procedimientos), en la ejecución de las respectivas unidades de obra² y en su demolición, cuando la construcción existente es inservible o debe ser sustituida o eliminada— se puede establecer, de manera general, las características físicas, químicas y mecánicas del material granular obtenido a partir de los RCD cerámicos generados en una obra de construcción convencional.

Si asumimos como meta global el principio de conservar la calidad del medio ambiente en el que vivimos, el objetivo principal de esta investigación consiste en «caracterizar y evaluar el comportamiento de un material granular (MG) obtenido a partir del reciclado de los residuos cerámicos generados por la construcción y demolición de edificios»³.

Con este trabajo se pretende avanzar en el conocimiento de un nuevo material de construcción presentando las distintas características geométricas, físicas, químicas y mecánicas resultantes en el material granular obtenido

tras la selección y el triturado de los Residuos Cerámicos de Construcción y Demolición.

Para ello y, ante la ausencia de normativa de obligado cumplimiento que regule el número y tipo de ensayos a realizar sobre el material granular (MG) obtenido de RCD cerámicos, se toman como referencia todas aquellas que contengan información acerca de las características requeridas para áridos que formen parte de hormigones, bases y sub-bases de carreteras, rellenos granulares, áridos para pavimentos, etc., tratando de obtener una serie de ensayos que determinen unas características técnicas suficientes que definan las propiedades del material estudiado⁴.

Metodología de trabajo seguida

Todo este proceso exige el conocimiento exhaustivo de las propiedades del residuo por lo que la toma de muestras debe ser representativa de lo que se estudia para así reflejar la verdadera naturaleza y condición de los materiales y circunstancias de las que se obtienen. El método seguido en este trabajo plantea dos etapas claramente diferenciadas:

1ª Etapa

Trabajos en el vertedero, lugar elegido como origen de la materia prima.

Durante esta fase se analiza la procedencia, composición, calidad y cantidad de los RCD depositados. Una vez seleccionados y separados los residuos cerámicos de interés para el estudio, se recogen para ser triturados. El material granular (MG) obtenido se prepara para posteriormente analizarlo en el laboratorio.

Cuadro 3
Proporción de RCD cerámicos en el vertedero de La Jarilla, Sevilla

Material	Porcentaje (%)
Ladrillo rojo	27,4
Ladrillo amarillo	03,9
Ladrillo de tejar	03,9
Azulejo	03,9
Pavimento	01,9
Teja roja	01,0
Otros residuos cerámicos	02,0
<i>Total RCD cerámicos</i>	<i>44,0</i>
Otros RCD	56,0
<i>Total</i>	<i>100</i>

Fuente: B. Blandón, 2003.

Para que los resultados y las conclusiones sean extrapolables a la situación del entorno urbano de Sevilla, y que en la toma de residuos se mantenga la proporción de los diferentes orígenes o tipos de productos cerámicos (ladrillos, tejas, baldosas, etc.) se procede a elaborar matrices de MG compuestas por aquellos tipos de residuos cerámicos en la proporción en la que estos realmente se encuentran en el vertedero (cuadro 3).

2ª Etapa

Trabajos en el laboratorio sobre la matriz elaborada con los porcentajes definidos.

Es la etapa previa a cualquier tipo de conclusión que pudiera emitirse acerca de las posibilidades o no de aprovechamiento del material obtenido. Conocidas las características del MG se podrá decidir acerca de futuras aplicaciones y/o la necesidad de limpieza, procedimiento alternativo de triturado, tratamientos finales en un planta de reciclado, etc., todo ello siguiendo las pautas de dirección marcadas en las normas UNE correspondientes y especificadas para cada ensayo en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), Pliego de Prescripciones Técnicas General para Obras de Carreteras y Puentes (PG-4) y Normas Tecnológicas sobre revestimientos y acondicionamiento del terreno del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (NTE-RSC.86, NTE-ADE.77).

Resultado de los ensayos

Ensayos de caracterización geométrica

Se incluyen en este grupo, todas aquellas pruebas y análisis determinantes de las propiedades geométricas de los áridos que —analizando el material granular (MG)

sin llegar a su destrucción— nos permiten conocer el tipo de grano y tamaños que componen la muestra, el reparto de fracciones y la forma y aspecto exterior de los mismos (cuadro 4).

Con estos primeros datos se comprueba la eficacia del sistema de triturado seguido y la uniformidad en el reparto de tamaños de material granular.

Comentarios

Granulometría de la Muestra

El análisis granulométrico tiene como objetivo la distribución por tamaño de las partículas que componen ese material granular, pudiendo así expresar qué porcentaje de la muestra es retenida en cada tamiz de una serie normalizada.

Una vez obtenidas las correspondientes tablas de resultados acerca de las distintas fracciones y conocido el Tamaño Máximo del Árido (TMA), se compara el granulado procedente de la planta de vertido y triturado seleccionada con la Curva Granulométrica de Fuller. La curva granulométrica del granulado reciclado muestra su paralelismo con la Curva de Fuller, reflejo de un material granular con «buena curva granulométrica», lo que implica un buen reparto de los distintos tamaños de áridos que lo componen.

Según se indica en el Pliego General de Carreteras (PG.4), si el árido se utilizara como relleno de material filtrante, el cernido ponderal acumulado por el tamiz 0.063 debe ser <5% siendo el TMA menor de 80 mm. Si es utilizado como árido para sub-bases granulares, éste deberá ser menor de 2/3 de la fracción cernida por el tamiz 0.5 UNE, en peso. De esta forma, los resultados obtenidos del material granular deberán estar dentro de los límites marcados. Si los resultados no cumplen las condiciones exigi-

Cuadro 4

Resumen de resultados obtenidos de la matriz mixta estudiada

Tipo de ensayo	Resultados obtenidos	
Granulometría	Fracción Fina	FF = 38,74 %
	Finos en Arenas	Fa = 2,5 %
	Fracción Gruesa	FG = 61,26 %
	Tamaño máximo	TMA = 31,5 mm
Equivalente de Arena	EA = 67,85 %	
Forma y Superficie	Coeficiente de forma	$\alpha_{-4} = 0,147$
		$\alpha_{-10} = 0,182$
		$\alpha_{-20} = 0,112$
	Índice de Lajas	IL = 30,3 %
Caras de Fractura	Índice de Agujas	IA = 55,02 %
	2 o más caras de f.	P = 66,4 %
	Totalmente redondos	R = 5,12 %

Fuente: B. Blandón, 2003.

das para ser utilizado como árido para sub-bases de carreteras, habría que repetir el proceso separando una fracción determinada o como alternativa de cambio eficaz en el proceso seguido y en la búsqueda de utilizar el material granular como macadán habría que utilizar otro sistema de triturado más preciso que cumpla con lo establecido.

Si es utilizado como árido de zahorras, la fracción cernida por el tamiz 0.063 UNE será menor de 1/2 de la fracción cernida por el tamiz 0.5 UNE, en peso. En su uso como árido de zahorra y en suelos grava-cemento para carreteras, la curva granulométrica obtenida deberá estar comprendida entre los límites descritos para capas de bases, sub-bases y arcenes de carreteras, para tráfico ligero o pesado, etc.

Por otra parte, el Tamaño Máximo requerido para el árido utilizado en carreteras según el PG-4 se limita por su uso y situación. Aquellos áridos que formen parte de sub-bases granulares y zahorra, tendrán un tamaño máximo menor de la mitad del espesor de la tongada compactada.

El TMA requerido dependerá del uso futuro que se considere, así, la posibilidad del tamizado mecánico del propio material granular obtenido tras el triturado permite la separación y selección de las distintas fracciones de forma automática e inmediata.

Los empedrados se ejecutan con áridos de diámetro máximo de 50 a 100 mm y los engravillados se ejecutan con un tamaño de grano grueso de 25 mm máximo y un diámetro máximo de arenas de 2,5 mm según se indica en la NTE-RSC:86 la cual, aunque no de obligado cumplimiento, ayuda con su referencia.

Para la elaboración de hormigones, la Instrucción de Hormigón Estructural EHE establece los límites del árido fino que debe contener el material granular utilizado para la fabricación de hormigones, de manera que la fracción de AF que pasa por el tamiz 0.063 debe ser: AF < 6%, para hormigones en obras sometidas a las clases generales de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien alguna clase específica de exposición, y AF < 10 %, para hormigones en obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa, IIb y, no sometida a ninguna clase específica de exposición

Por otra parte, y según se indica, el contenido de finos del árido grueso debe ser < 1% del peso total de la muestra.

Si el material granular retenido y acumulado en las fracciones correspondientes no se encuentra comprendido entre los límites establecidos debería estudiarse la posibilidad de realizar nuevas «dosificaciones» del granulado con las distintas fracciones obtenidas con el tamizado.

En cualquier caso, el TMA depende del uso y la situación que vaya a caracterizar el hormigón del que forme parte. En general, para un tamaño máximo del árido de 16mm, la EHE confirma su utilidad como árido para la fabricación de hormigones y 50mm en la fabricación de pavimentos de hormigón, siempre, menos de la mitad del espesor de la capa que se vaya a emplear.

Para ampliar las posibilidades de uso el material granular obtenido como árido para la fabricación de hormigones puede reducirse de forma global modificando, durante el proceso de triturado, el dispositivo marcado en la máquina y, por otra parte, puede obtenerse el árido con tamaño deseado a partir de la separación de las distintas fracciones granulométricas según interés.

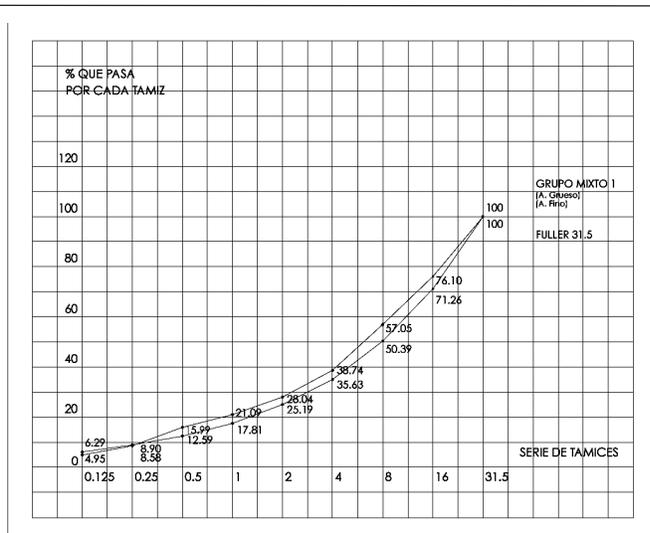


Gráfico 2
Curva Granulométrica del material granular estudiado
Fuente: B. Blandón, 2003.

Forma y superficie de los áridos

Para cualquiera de los usos o destinos posteriores que se puedan dar al material granular obtenido una vez tratado debidamente es relevante conocer las propiedades geométricas de los áridos que lo componen, ya sean naturales o artificiales, así como la existencia o no de aquellos laminares o aciculares y la proporción en la que se encuentran.

El Coeficiente de Forma, el Índice de Lajas y el Índice de Agujas reflejaría la existencia de áridos cuyas características pudieran condicionar cualquiera de sus usos posteriores, la compacidad de un suelo, el acabado de una superficie e incluso la resistencia de un hormigón.

Los resultados obtenidos confirman la existencia de partículas con formas inadecuadas para algunos de los usos descritos. La proporción en la que estos se encuentran aumenta según piezas de mayor tamaño. Este resultado es esperado si se recuerda la procedencia del material granular que aquí se trata, su composición, proceso de fabricación de las piezas cerámicas originales, su forma geométrica y, por tanto, sus consecuencias formales con el triturado.

Para evitar la presencia de áridos aciculares y laminares en una proporción excesiva se debe limitar inferiormente el coeficiente de forma de la grava.

Para su uso como áridos en la fabricación de hormigón, según muestra la Instrucción de Hormigón Estructural EHE, es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

Coeficiente de forma $\alpha \geq 0,15$

Índice de Lajas $IL < 35\%$ en peso de los áridos considerados

El árido estudiado presenta formas inadecuadas para ser empleado en la fabricación de hormigones. El uso de este material granular produciría una mala «trabajabilidad» del hormigón, lo que implicaría aumentar la cantidad de agua en su composición y esto conduciría a menores resistencias que exigirían dosis excesivas de cemento. Por otra parte, el exceso de cemento en la dosificación es causante de fisuras que reducirían la durabilidad del hormigón.

A pesar de este parámetro resultante, el empleo del material granular reciclado en la fabricación de hormigones debe condicionarse a la realización de los ensayos correspondientes sobre probetas de hormigón que comprueben si es o no admisible la dosis de cemento empleada para que el hormigón alcance las propiedades de resistencia exigidas.

Foto 2

Trabajos de dimensionado del árido con pie de rey

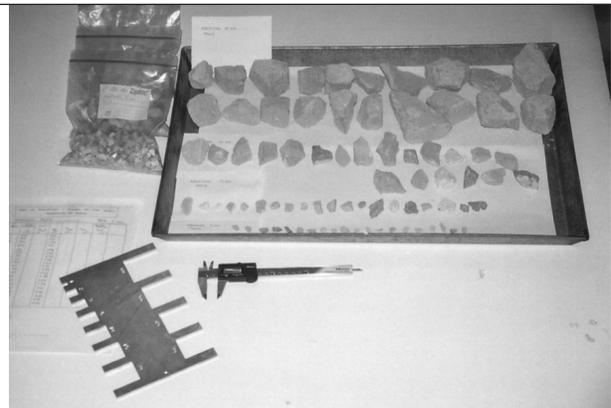
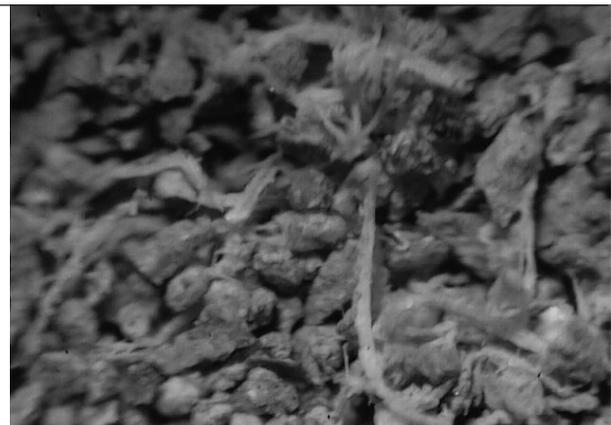


Foto 3

Aspecto del árido. Lajas y agujas en el material granular. Imagen: x50



Ensayos de caracterización física y mecánica

Se incluyen en este grupo todos aquellos ensayos determinantes de las propiedades físicas y mecánicas de los áridos necesarios para conocer la estructura y el comportamiento del material granular frente a las acciones mecánicas a las que pueda estar sometido, propiedad determinante en su aplicación como árido para la construcción.

En general, los áridos empleados en construcción no deben reblandecerse con el agua ni descomponerse; los ensayos de tipo mecánico informan de las pérdidas de durabilidad y resistencia sufridas por el material al estar sometido a ciertas acciones.

Comentarios

Absorción de agua

La relación entre el aumento de masa de la muestra de árido debido a una inmersión total en agua y la masa seca de la muestra de árido se exige para conocer el comportamiento del material granular frente al agua obteniéndose datos acerca de la compactación del material.

Según la Instrucción de Hormigón Estructural EHE, la absorción de agua de los áridos finos y gruesos para hormigones debe ser $A \leq 5\%$, condición que deberá cumplir el material granular estudiado. La utilización de un tipo de árido con mayor absorción implica resistencias más bajas, menor compactación y durabilidad.

Los áridos ligeros artificiales, utilizados para la fabricación de hormigones ligeros armados, debido a su estructura porosa, tienen una mayor capacidad de absorción que los áridos normales. Esta característica debe tenerse en cuenta al verter el agua de amasado, volumen de agua que influye en la relación agua eficaz/cemento, en la docilidad, resistencia y densidad del hormigón.

La absorción de agua admitida para estos áridos es variable dependiendo del tipo y del proceso de fabricación seguido encontrando porcentajes en volumen que van desde 4% (1/2 h) a 11% - 29% (1h).

El uso de este material granular en pavimentos y ciertos revestimientos queda supeditado a los resultados que se obtengan del estudio de la absorción de la pieza en cuestión, parámetro definido según el tipo de pavimento, calidad, espesor, etc.

Cuadro 5

Resumen de resultados obtenidos de la matriz mixta estudiada

Tipo de Ensayo	Resultados Obtenidos	
Densidad	Densidad real	$Dr = 2,2 \text{ gr/cm}^3$
	Densidad aparente	$Dap = 1,57 \text{ gr/cm}^3$
	Dap. del mat. Granular	$Dap \text{ MG} = 0,9 \text{ gr/cm}^3$
Porosidad		$P = 28 \%$
Absorción de Agua		$A = 12 \%$
Partículas Blandas	Contenido en P.B.	$PB = 2,48 \%$
Friabilidad de la Arena		$FA = 24,14 \%$
Aplonado Proctor	Densidad máxima	$D_{max} = 1,64 \text{ gr/cm}^3$
	Humedad óptima	$H_{opt} = 12,8 \%$
Índice CBR	Proctor 100 %	$CBR = 58,1$
	Proctor 95 %	$CBR = 31,4$

Fuente: B. Blandón, 2003.

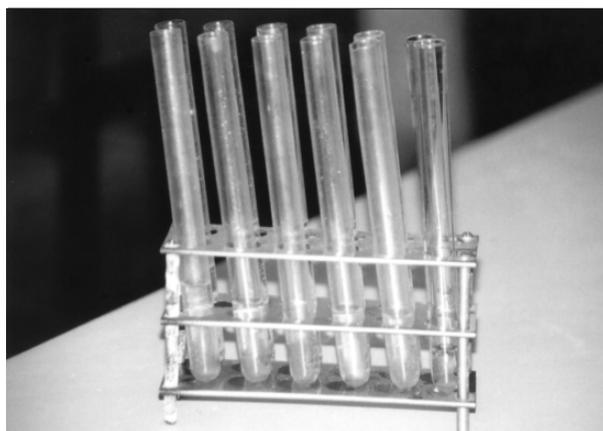


Foto 4
Trabajos de saturación del MG

Contenido en partículas blandas

Se deben identificar las partículas blandas contenidas en el material granular que se estudia y, de igual forma, la escasa dureza que pudieran tener los recubrimientos superficiales que constituyen el árido. El procedimiento del ensayo consiste en la resistencia al rayado de las distintas partículas mediante el empleo del esclerómetro para dureza Rockwell⁵.

El caso de partículas consideradas como blandas se presenta en algunas areniscas, constituidas por partículas duras pero débilmente aglomeradas, las cuales al ser sometidas a la prueba de rayado desprenden porciones de material debido a su falta de cohesión, mientras que en el surco formado se observa depósito de metal debido a la dureza de las partículas que constituyen la piedra.

Según indica la Instrucción de Hormigón Estructural EHE y el Pliego General de Carreteras PG-4, la fracción de árido grueso utilizada para la fabricación de hormigones en carreteras debe contener $\leq 5\%$ del peso total de la muestra en partículas blandas, aspecto que cumple el material granular estudiado.

Las partículas blandas tienen menos resistencia que las del resto de áridos que componen el material granular estudiados. El riesgo que hubiera supuesto un contenido excesivo de partículas blandas sería la bajada de las resistencias en hormigones fabricados con ese árido.

El contenido en partículas blandas del árido empleado para la construcción de empedrados y engravillados debe ser 5% , condición que tras el estudio realizado cumple el material granular que se recicla.

Friabilidad de la arena

Este ensayo determina la resistencia a la fragmentación de aquella fracción que contiene el material granular, la cual podría llegar a formar parte de la fabricación de hormigones y morteros. El proceso seguido consiste en medir la evolución granulométrica de las arenas al ser sometidas al continuo golpeo por una carga de bolas que facilitan las condiciones para su fragmentación.

Según la Instrucción de Hormigón Estructural EHE, para los áridos utilizados en la fabricación de hormigones el resultado del ensayo (E. Micro-Deval) por el que se determina la friabilidad de la arena debe ser $FA \leq 40$.

Ensayo de desgaste

Lo que se conoce también como Ensayo de los Ángeles es exigido en la normativa específica para cada uso y se considera determinante para futuras aplicaciones en construcción, sin embargo, no consta en los resultados de este estudio y no pueden establecerse conclusiones finales ya que actualmente continúa siendo objeto de investigación.

Cuadro 6

Resumen de resultados obtenidos de la matriz mixta estudiada

Tipo de ensayo	Resultados obtenidos	
Terrones de arcilla	Contenido en FF	L = 8,59 %
	Contenido en FG	L = 1,30 %
Materia orgánica	Contenido Inapreciable	
Partículas ligeras	Contenido Inapreciable	
Estabilidad a sulfatos	Sulfato Sódico en FF	Pérdidas > 40 %
	Sulfato Sódico en FG	Pérdidas < 20 %
	Sulfato Magnésico FF	Pérdidas > 20 %
	Sulfato Magnésico FG	Pérdidas < 10 %
Heladicidad	H < 4 %	
Cloruros	Contenido en Cl-	Cl- = 0,035 %
Sulfatos	Contenido en SO ₃	SO ₃ = 0,83 %
Sílice	Contenido en SiO ₂	SiO ₂ = 64,8 %
Óxidos	Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃ = 2,2 %
	Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃ = 4,1 %
	Óxido de calcio	CaO = 17,2 %
	Óxido de magnesio	MgO = 0,7 %
Calcinación	Pérdidas	Pc = 10 %
Compuestos de azufre	Solubles en agua	SO ₄ = 0,55 %
	Solubles en ácido	SO ₄ = 0,26 %
	Sulfuros oxidables	HNO ₃ = 0,0 %
Reactividad álcalis	Sílice y silicatos	No reactivo
	Carbonato	Potencialmente reactivo

Fuente: B. Blandón, 2003.

Para poder realizar este ensayo se apartan las muestras necesarias y, conocido su peso, pasan a una centrifugadora de bolas de acero. La centrifugadora desgasta el material en función de su dureza o resistencia; una vez desgastadas y lavadas, las muestras se vuelven a pesar y la diferencia de peso inicial y final refleja la cantidad de muestra perdida, es decir, el desgaste sufrido por el material.

Tratándose de un material procedente de RCD cerámicos triturados y contaminados por otros con los que se encontraba en contacto o adherido y, conociendo las características físicas y mecánicas de éste, el resultado que se obtendría —al tratarse de un material de dureza limitada— es muy por debajo de lo deseado. Así, la resolución de este ensayo descrito se considera innecesaria hasta añadir al MG otros que aumenten la dureza y resistencia del conjunto, mejorando los resultados que pudieran obtenerse de este ensayo y, por tanto, su futura aplicación como áridos para hormigones, rellenos de material filtrante, sub-bases de carreteras, macadam y zahorras

Ensayos de caracterización química

Con la realización de estos ensayos determinantes de las propiedades químicas se estudia el comportamiento del material granular frente a las agresiones atmosféricas y químicas a las que pudiera estar sometido y su composición, contenido en partículas o sustancias cuyo exceso de concentración puede alterar sus propiedades e incluso limitar su uso como material granular en futuras aplicaciones en el campo de la construcción.

En general, los áridos empleados en construcción no deben formar combinaciones desfavorables con los elementos del cemento, ni deben influir negativamente sobre la hidratación o amenazar la protección contra la corrosión de las armaduras con las que pudieran estar en contacto.

Según la cantidad y distribución pueden ser nocivos aquellos polvos capaces de entrar en suspensión, materias de origen orgánico, determinados compuestos de azufre, elementos con tendencia al reblandecimiento, hinchazón, enmohecimiento, combustibles, y aquellos que puedan favorecer la corrosión, como por ejemplo los cloruros.

Comentarios

Contenido en terrones de arcilla

Determinados mediante el tacto y la vista, los resultados obtenidos sobre el porcentaje de arcillas en el material triturado van a depender en gran parte de la procedencia del material granular que se ensaya. Los RCD, entre sus componentes, contienen restos pétreos o arenosos de morteros y hormigones, restos de yesos, etc.

que, incluso sin ser arcillas, pudieran desmenuzarse en este proceso.

El contenido en terrones de arcilla en el árido grueso utilizado para la construcción de carreteras en los compuestos de grava-cemento según el PG.4, debe ser $L < 2\%$ en peso.

En general, el Pliego General de Carreteras indica cómo los áridos utilizados en la construcción de firmes, naturales o artificiales, procedentes del machaqueo grava natural, deberán encontrarse exentos de arcilla.

Sin embargo, ya sea para la utilización del árido grueso en los empedrados y engravillados como en la fabricación de hormigones para carreteras, según indica el Pliego General de Carreteras, el contenido en terrones de arcilla debe ser $L < 0,25\%$ del peso total, resultado que supera los obtenidos y que, en este aspecto, descartaría para este uso el MG reciclado.

De igual forma, el contenido de terrones de arcilla en el árido fino utilizado para la fabricación de hormigones según indica la Instrucción de Hormigón Estructural debe ser $L < 1\%$ del peso total de la muestra. Para el árido grueso, $L \leq 0,25$.

Frente a este inconveniente, en la utilización de los RCD debe contemplarse como alternativa la posibilidad de lavado previo para reducir ese porcentaje de arcillas.

Contenido en materia orgánica

En la determinación de la materia orgánica que puedan contener las arenas utilizadas para morteros y hormigones, las impurezas que pueda contener el material granular que se estudia disminuyen la adherencia de los compuestos de los que pudieran formar parte en futuras aplicaciones.

Si el color resultante de la disolución ensayada, tras el vertido de la arena procedente del material granular reciclado, es más débil que el preparado tipo, esto indica un resultado óptimo y, por tanto, la ausencia de materia orgánica.

Este ensayo no se realiza para gravas, ya que si las partículas de materia orgánica que existen son grandes se podrían quitar con la mano y, si son más pequeñas, pasarán al árido fino donde son menos apreciables a simple vista.

Cumpliendo con las directrices marcadas en la NTE-RSC:86, los áridos que forman parte de engravillados y de baldosas de terrazo no deben contener materia orgánica, característica que permite al material granular estudiado ser utilizado con ese fin.

El contenido en materia orgánica de los compuestos grava-cemento en la construcción de carreteras según indica el PG-4, expresado en ácido tánico, debe ser $MO < 0,05\%$.

Los áridos utilizados para la fabricación de hormigones, según describe la Instrucción de Hormigón Estructural y el Pliego General de Carreteras, tendrán un contenido mínimo en materia orgánica, el cual se define por aquella proporción que produzca un color más oscuro que el de la sustancia patrón.

El humus y otros ingredientes orgánicos pueden dañar el fraguado del cemento y, cuando aparecen en forma granular, originan coloraciones e incluso desconchados del hormigón por hinchazón. Por otra parte, debido a la falta de adherencia, el contenido de materia orgánica es perjudicial para el fraguado y endurecimiento del hormigón, con las correspondientes consecuencias de baja resistencia y durabilidad.

Contenido en partículas de bajo peso específico

Para decidir sobre su aplicación futura como árido en la construcción deberán conocerse, de un modo aproximado, las partículas de carbón, lignito, pequeños trozos de madera, materias vegetales, etc., impurezas que puede contener el árido utilizado en la fabricación de morteros y hormigones.

Son partículas de bajo peso específico que contaminan el material granular. Para su determinación se ensaya la cantidad de árido fino que pasa por el tamiz 0.063 UNE y que flota en un líquido, ya preparado, de $\rho = 2$ y de acuerdo con las direcciones de la norma correspondiente.

Según se indica en la Instrucción de Hormigón EHE y el Pliego General de Carreteras PG-4, para los áridos utilizados en hormigones el porcentaje retenido por el tamiz 0.063 y, que flota en un líquido de peso específico 2 debe ser, para la fracción de árido grueso $\leq 1\%$ y, para la fracción de árido fino, $\leq 0,5\%$ (Foto 5).

Foto 5

Elementos ligeros contaminantes del material granular. Imagen x50



Estabilidad de los áridos frente a disoluciones de sulfato sódico y magnésico

Con la realización de estos ensayos se busca determinar la resistencia a la desintegración de los áridos utilizados en la fabricación de morteros y hormigones. Así, se trata de comprobar el efecto que sobre la muestra produce un efecto ambiental agresivo al que pueda estar sometido durante la próxima vida útil del producto.

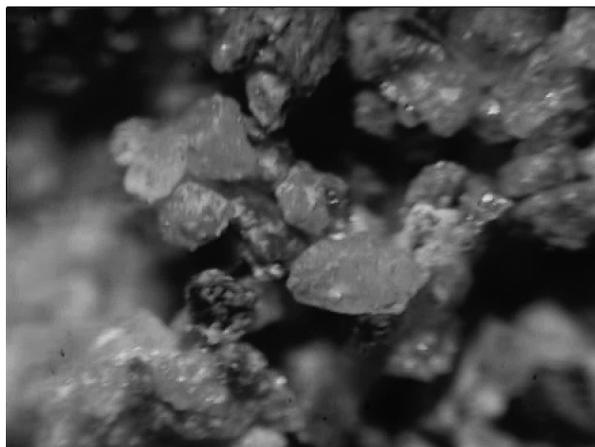
La carencia de datos sobre el posible comportamiento de este material granular frente a la intemperie puede sustituirse o complementarse al someterlo a ciclos alternativos de inmersión en disoluciones saturadas de sulfato sódico o sulfato magnésico y de secado a 105°C - 110°C , según se indica en la normativa correspondiente.

Las experiencias de alteración acelerada pueden definirse como una acción violenta y concentrada en el tiempo de los factores de alteración. No suelen ser posibles comparaciones cuantitativas con los resultados de exposición con tiempo real y no existen garantías de que se produzcan los mismos mecanismos de alteración. La razón puede ser que se ha recurrido a ensayos demasiado simplificados, que implican la suposición de que no existen efectos entre las diversas variables. Estas experiencias no se pueden considerar como autosuficientes pero ayudan a juzgar, entre otros ensayos, el comportamiento del material.

El principal objetivo de este ensayo es conocer la resistencia del árido utilizado frente a las heladas. Según la EHE y PG-4, el comportamiento del árido tanto frente al sulfato magnésico como al sulfato sódico es admitida para poder ser utilizado para la fabricación de hormigones y su uso en carreteras cuando existen pérdidas de peso $\leq 15\%$ en el árido fino y $\leq 18\%$ en el árido grueso y, tras cinco ciclos de tratamiento (Foto 6).

Foto 6

Ataque de disolución de sulfato sodico. Imagen (x50)



Heladicidad

El objetivo de estos ensayos es comprobar el desgaste que pueda sufrir el producto frente a los posibles cambios climatológicos durante su próxima vida útil, todo ello mediante experiencias de alteración aceleradas. La evaluación de los daños que el hielo puede originar en los materiales se puede hacer mediante la experiencia directa que supone la alteración del material y consiste en inducir ciclos de hielo-deshielo mediante las experiencias de heladicidad que se consideran después. El objetivo es reproducir el clima al que puede estar sometido el material, tratado o sin tratar, o crear condiciones más severas para obtener resultados en un menor intervalo de tiempo⁶.

Los áridos utilizados para la fabricación de hormigones pueden estar expuestos a cambios de congelación y descongelación, incluso cuando todavía están húmedos por lo que deben poseer una resistencia a la congelación suficiente.

Los áridos ligeros utilizados para la fabricación de hormigones ligeros armados no deberán poseer una cantidad de pérdidas mayor a 4% en masa. El aumento de hasta 10% en volumen que sufre el agua contenida en los poros al congelarse es una de las causas que pueden ocasionar daños a los áridos ligeros.

De todas formas, la norma DIN 2446 tiene en cuenta las consideraciones descritas con respecto a la realidad que rodea este ensayo hasta el punto de que incluso áridos que no pasan con éxito las pruebas de resistencia a la congelación son posteriormente admitidos, cuando mediante pruebas de congelación-descongelación realizadas con el hormigón se ha comprobado que son idóneos.

Los áridos que formen parte de pavimentos y revestimientos exteriores deberán someterse a las pruebas correspondientes para demostrar que el conjunto con ellos formado es resistente a las heladas, aspecto que se comprueba mediante la resistencia del árido a los sulfuros sódico y magnésico y el comportamiento de la pieza a la intemperie. Según se indica en la norma NTE, siguiendo la norma UNE 7033, las baldosas no presentarán en su cara exterior (huella) señales de rotura o deterioro.

Análisis químicos

Para determinar el contenido en cloruros, sulfatos, sílice, óxidos de calcio, hierro, magnesio o aluminio, la muestra se somete a procesos de inmersión en distintas disoluciones que permiten extraer cada uno de estos compuestos.

Contenido en cloruros

Este ensayo es adecuado para los áridos cuyo contenido en cloruros proceda del contacto directo con aguas

salinas o por haber estado sumergido en dichas aguas, como es el caso de aquellos áridos extraídos del mar. Para los áridos procedentes de zonas desérticas, el análisis de la disolución en ácido nítrico, puede proporcionar niveles de iones cloruro significativamente superiores a los obtenidos por este método.

Según indica la Instrucción de Hormigón Estructural EHE, el contenido de cloruros solubles en agua queda limitado:

$C \leq 0,05 \%$ para hormigones armados

$Cl \leq 0,03 \%$ para hormigones pretensados.

Contenido en sulfatos

Sulfatos solubles en agua que contienen los áridos, los cuales, en presencia del cemento, pueden reaccionar e influir negativamente reduciendo la resistencia del hormigón. Para el cálculo, de la muestra de árido se extraen, con agua, los iones sulfatos, siguiendo las pautas indicadas en la norma correspondiente.

Según se indica en la Instrucción de Hormigón Estructural, el contenido en sulfatos de la fracción del árido fino o grueso utilizado para la fabricación de hormigones debe ser $< 0,8\%$ del peso total de la muestra.

Con los sulfuros existe el peligro de que, debido a la presencia de aire y humedad en el hormigón, se oxiden, pasando a sulfatos. Los sulfatos solubles en agua se combinan con las sales de aluminio del cemento y originan perturbaciones que pueden destruir totalmente el hormigón.

El contenido en sulfatos solubles en ácidos (SO_3) y referidos al árido seco de los compuestos grava-cemento en la ejecución de carreteras, según indica el Pliego General PG-4, expresado en SO_3 , debe ser $< 0,5\%$ en peso.

Contenido en sílice

Tras llevar la muestra a una disolución completa, se consigue determinar uno de los elementos mayoritarios contenidos en el material granular, el sílice.

El exceso de sales en el material granular puede originar la posterior corrosión de las armaduras con las que se encuentre en contacto, por ejemplo nitratos y halogenuros (a excepción de fluoruros).

Los áridos destinados al hormigón ligero no deben contener cantidades perjudiciales de sales que puedan originar la corrosión de las armaduras.

Compuestos totales de azufre

Debe determinarse cualitativa y cuantitativamente, si fuera necesario, la existencia en los áridos de compuestos de azufre que se encuentran solubles en agua, en ácido clorhídrico y en los sulfuros oxidables durante su hidratación.

El resultado acerca del contenido total en compuestos de azufre se obtiene mediante la diferencia entre los sulfatos extraíbles por una disolución alcalina oxidante y los sulfatos extraíbles sólo por disgregación alcalina no oxidante.

Cuando el contenido en compuestos de azufre es excesivo, los hormigones y morteros fabricados con este árido pueden sufrir alteraciones en el fraguado y endurecimiento, pérdidas de resistencias y una importante disminución de la durabilidad debido a que la presencia de azufre pone de manifiesto la inestabilidad potencial del árido.

Según la Instrucción de Hormigón Estructural EHE en los áridos, el contenido en los compuestos totales de azufre (SO₃) y referidos al árido seco será < 1%, para árido fino y grueso, y el contenido de sulfatos solubles en ácidos será 0,8%.

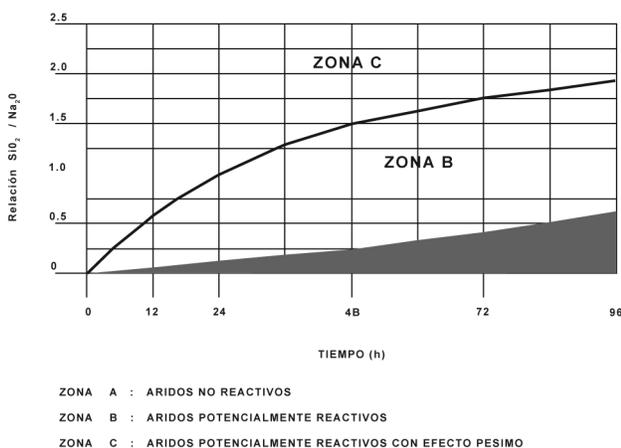
El contenido en compuestos de azufre del material granular empleado en la construcción de empedrados y engravillado, según se indica en NTE-RSC:86, debe ser 1,2%.

Reactividad frente a los álcalis del cemento

Ensayo que determina, por vía química y de forma rápida, la posible reactividad de tipo álcali-sílice y silicato de los áridos que forman parte del material granular que se estudia frente a los álcalis que normalmente contiene el cemento.

Los resultados sobre la determinación de sílice SiO₂ y óxidos de sodio para las distintas edades (24, 48, 72 y 96 horas) se llevan a una gráfica que refleja la variación de la relación entre ambos en relación al tiempo; así, se obtiene una clasificación del árido en función de la disposición de su curva representativa.

Gráfico 3
Reactividad álcali-sílice y álcali-silicato. Gráfica obtenida según valores de referencia para la representación



Los valores de SiO₂/Na₂O correspondientes a los puntos de separación de esas tres zonas gráficas se muestran en el gráfico 3.

Por otra parte, conocidos el contenido de CaO, MgO y Al₂O₃, se puede evaluar la reactividad potencial del árido a los carbonatos según la norma UNE 146507-2:99 ex (gráfico 4).

Según se indica en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE, el árido utilizado como parte de los hormigones, debe considerarse como no reactivo. Definiendo como árido potencialmente reactivo aquel donde siendo:

$$R \geq 70, \text{ la concentración de } SiO_2 > R.$$

$$R < 70, \text{ la concentración de } SiO_2 > 35 + 0.5 R$$

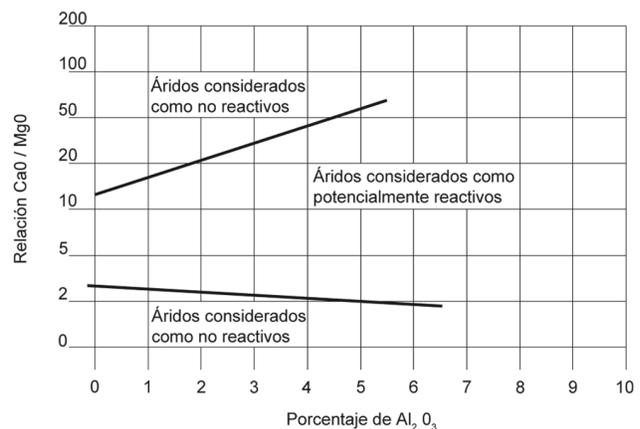
Conclusiones

Como objeto de este estudio se han establecido, con carácter general, las características físicas, químicas y mecánicas que posee el MG obtenido de RCD cerámicos generados en el área metropolitana de Sevilla.

Si se comparan datos originales acerca de los materiales cerámicos que componen la matriz considerada y los procedentes de los RCD cerámicos apartados, se comprueba que la alteración que pueden producir sobre el conjunto del material granular los posibles «contaminantes adosados» es en algunos caso la mejora de sus aptitudes y, por tanto, no siempre afectan de forma negativa las características del grupo.

Los resultados negativos obtenidos en los ensayos de Granulometría, Equivalente de Arena, Terrones de arcilla, dificultan inicialmente la aceptación del material gra-

Gráfico 4
Reactividad álcali-carbonatos. Gráfica obtenida según valores de referencia para la representación



nular estudiado para aplicación en la construcción de sub-bases de carreteras, macadam, empedrados, engravillados y hormigones como se ha ido contemplando en cada ensayo, sin embargo, estos resultados se modifican y mejoran mediante la adopción de medidas previas sobre el material granular estudiado: limpieza previa del material, mayor trituración, nuevas dosificaciones, adición de material pétreo procedente de hormigones o árido natural, etc.

El resto de condiciones y recomendaciones acerca del uso de este material granular como árido para hormigones, terrazos, revestimientos de fachadas, baldosas de hormigón, etc., debe establecerse sobre probetas y muestras de la propia pieza resultante.

Los resultados obtenidos respecto de una futura proyección de este nuevo material granular como aplicación en la construcción, se resumen en el siguiente esquema:

Aplicación del MG como árido para rellenos de material filtrante

Los resultados obtenidos cumplen las especificaciones marcadas en el Pliego de Condiciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-4. El valor mínimo exigido sobre el Coeficiente de Desgaste se alcanza añadiendo a la matriz estudiada un porcentaje de árido natural o MG procedente de restos de hormigones a reciclar.

El material granular estudiado se puede considerar, por tanto, apto para la ejecución de rellenos filtrantes en drenajes de muros y calzadas.

Aplicación del MG como árido para sub-bases de carreteras

Los resultados obtenidos referentes al Equivalente de Arena (EA), Índice CBR y Contenido en Terrones de Arcilla, cumplen las especificaciones marcadas en el Pliego de Condiciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-4. El valor mínimo exigido sobre el Coeficiente de Desgaste se alcanza añadiendo a la matriz estudiada un porcentaje de árido natural o MG procedente de restos de hormigones a reciclar.

Rectificando las dosificaciones exigidas de forma adecuada se puede considerar que el material granular estudiado es apto para la ejecución de sub-bases de firmes o calzadas.

Aplicación del MG como árido para macadam de carreteras

Los resultados obtenidos en relación con la forma y superficie de los áridos, Caras de fractura y Contenido en Terrones de Arcilla cumplen las especificaciones marcadas en el Pliego de Condiciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-4. El valor mínimo exigido

sobre el Coeficiente de Desgaste se alcanza añadiendo a la matriz estudiada un porcentaje de árido natural o MG procedente de restos de hormigones a reciclar.

Rectificando de forma adecuada las dosificaciones exigidas y mejorando la calidad y precisión del proceso de triturado se deben continuar los estudios referentes a esta aplicación hasta conseguir un MG procedente de RCD cerámicos que resulte adecuado para este uso.

Aplicación del MG como árido para ahorras de carreteras

Los resultados obtenidos cumplen las especificaciones marcadas en el Pliego de Condiciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-4. El valor mínimo exigido sobre el Coeficiente de Desgaste se alcanza añadiendo a la matriz estudiada un porcentaje de árido natural o MG procedente de restos de hormigones a reciclar. El material granular estudiado se puede considerar, por tanto, apto para la ejecución de ahorras de carreteras.

Aplicación del MG como árido para firmes grava-cemento

Los resultados obtenidos cumplen las especificaciones marcadas en el Pliego de Condiciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-4. El material granular estudiado se puede considerar, por tanto, apto para la ejecución de firmes de este tipo.

Aplicación del MG como árido para empedrados y engravillados

Los resultados obtenidos referentes al Tamaño Máximo del árido TMA, Caras de Fractura, contenido en Partículas Ligeras, Partículas Blandas, Materia Orgánica, Compuestos de Azufre, cumplen con las recomendaciones indicadas en la Norma Tecnológica NTE-RSC.

Rectificando de manera adecuada las dosificaciones marcadas y sometiendo el MG a un adecuado proceso de lavado y limpieza previo a su colocación, se puede considerar que el material granular estudiado es apto para la ejecución de pavimentos continuos sobre mortero (tipo engravillados o empedrados).

Aplicación del MG como áridos ligeros artificiales

Los resultados obtenidos cumplen los valores establecidos en normativa y las recomendaciones de los fabricantes a este respecto considerando un MG con una Densidad Aparente de 1,57 gr/cm³ que lo hace adecuado para la ejecución de rellenos de este tipo.

En el caso de utilizar el MG como áridos ligeros para hormigones pretensados, el contenido en Cloruros solubles en agua debe ser controlado a fin de evitar el posible ataque a las armaduras con las que pudiera estar en contacto.

Aplicación del MG como árido para la fabricación de hormigones

Los resultados obtenidos acerca del Contenido en Finos de las arenas, Índice de Lajas (IL), Absorción (A), Contenido en Partículas Ligeras, Partículas Blandas, Materia Orgánica, Cloruros, Sulfatos, Friabilidad de la Arena, Estabilidad frente a Sulfatos, Heladicidad, Reactividad frente a los Álcalis del Cemento, cumplen las especificaciones marcadas en la Instrucción Técnica del Hormigón EHE. El valor mínimo exigido sobre el Coeficiente de Desgaste y coeficiente de forma se alcanzan añadiendo a la matriz estudiada un porcentaje de árido natural o MG procedente de restos de hormigones a reciclar.

Sometiendo el MG a un adecuado proceso de lavado y limpieza previo a su utilización se reduce 7% en peso el valor del Equivalente de Arena (EA) mínimo exigido y el Contenido en Arcillas, pudiendo considerar que el material granular estudiado es apto para su utilización en la fabricación de hormigones.

El sector de la construcción está en el momento de tomar conciencia ecológica. Han de divulgarse conocimientos y aplicaciones actuales para ir hacia una construcción sostenible en la cual las cantidades de materias primas consumidas sean menores a las que la naturaleza es capaz de soportar.

Reducir el impacto ambiental seleccionando materiales y métodos de trabajo apropiados, diseñar edificios con eficiencia energética y durabilidad y prever la futura eliminación o el reciclaje de los distintos componentes son buenas alternativas que siguen las líneas de trabajo marcadas por la Unión Europea.

Como resultado de este trabajo y tras obtener, caracterizar y definir técnicamente el nuevo material a partir de la transformación de residuos de construcción y demolición, se posibilita la idea de introducir en el mercado un material elaborado a partir de los escombros que hasta ahora tenían como destino final el vertedero, aumentando con ello su ciclo de vida útil y aportando condiciones de mejora en la actividad del sector de construcción y en el medio ambiente por los beneficios directos que tendrá su desarrollo en la minimización de los residuos que se depositan en los vertederos⁷.

Notas

1. Distinguiendo de escombros de construcción y demolición aquella porción de residuo generado por la manipulación de los productos y materiales utilizados en obra con exclusión de las tierras sobrantes. Según el Plan Nacional de RCD (2001-2006), se consideran escombros aquellos RCD procedentes de derribos de edificios o de rechazo de los materiales de construcción de las obras de otros de nueva planta y de pequeñas obras de reformas en viviendas o urbanismo (Ley 10/98).
2. RCD generados por manipulación, rotura de materiales, pérdidas o sobrantes de materia prima, envases no retornables, elementos y materiales auxiliares inutilizables.
3. Cf. Blandón González, Begoña. Tesis Doctoral. Sevilla 2003.
4. Propiedades del MG que va a ser estudiado para su posible aprovechamiento según la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), Pliego de Prescripciones Técnicas General para Obras de Carreteras y Puentes (PG-4), Normas Tecnológicas sobre revestimientos y acondicionamiento del terreno del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (NTE-RSC.86, NTE-ADE.77) y aquellas recomendaciones de interés procedentes de fabricantes de materiales de construcción.
5. Aparato de ensayo que consta de una varilla guiada verticalmente y que está terminada, en su parte interior, por un pequeño cilindro de Cuzin cuyo diámetro es de 1,5 mm \pm 0,02 mm. La dureza Rockwell del Cuzin está comprendida entre B65 y B67.
6. Esta experiencia no simula adecuadamente las condiciones reales en las que existe un gradiente de temperatura entre las caras externa e interna del material.
7. Es otra forma de contribuir a la construcción de un "edificio limpio": reducción en el consumo de materias primas naturales, reducción en el impacto ambiental por el vertido de escombros e incorporación de un nuevo producto, con unas propiedades definidas en el sector productivo.

Referencias bibliográficas

- Barrios Sevilla, J. y Valverde Espinosa, I. (2001) *Hormigón. Materiales de construcción*. Granada, España.
- Laffarga Osteret, J. y Olivares Santiago, M. (1995) *Materiales de construcción*. Sevilla, España.
- Lund, Herbert F. (1996) *Manual McGraw-Hill de reciclaje*. McGraw-Hill, Madrid.
- Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006.
- John Wiley & Sons, Inc. *Green building material*.
- Zaragoza Bernal, A. (2000) *Reutilización de los residuos generados en la obra para la obtención de hormigones*. Alicante, España.