

Métodos granulométricos en la caracterización del árido reciclado para su uso en hormigón estructural

Size grading methods to characterize construction and demolition waste for its use in structural concrete

M. Martín-Morales^(*), Z. Sánchez-Roldán^(*), M. Zamorano^(*), I. Valverde-Palacios^(*)

Recepción/Received: 11-XI-11
Aceptación/Accepted: 2-VII-12

RESUMEN

El árido reciclado producido en las plantas de residuos de construcción y demolición se usa frecuentemente como componente en la elaboración de hormigón estructural. No obstante, las propiedades químicas, físicas y mecánicas de este árido deben ser controladas para asegurar la calidad final del producto. Una de las propiedades más importantes es la granulometría, que depende en gran medida del proceso de fabricación del árido y afecta directamente a la consistencia, trabajabilidad, uniformidad y resistencia del hormigón, así como a su densidad, compactación, permeabilidad y resistencia al desgaste. Este trabajo analiza cuatro muestras de árido reciclado mediante la aplicación de diferentes métodos granulométricos, con la finalidad de determinar su uso potencial en la elaboración de hormigón. Los resultados han mostrado que existen algunas diferencias entre los distintos métodos utilizados; además se ha podido concluir que el proceso de fabricación debe ser modificado para que la distribución granulométrica del árido cumpla con las especificaciones de la Instrucción EHE-08.

Palabras clave: hormigón; residuos de construcción y demolición; métodos granulométricos; árido reciclado; Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.

SUMMARY

Recycled aggregate produced at construction and demolition waste plants is frequently used as an ingredient in structural concrete. Nevertheless, the physical, chemical and mechanical properties of this aggregate must be supervised in order to ensure the quality of the final product. Of these properties, one of the most important is particle size which depends to a great extent on the process used to manufacture the aggregate and it directly affects the consistency, workability, uniformity, and mechanical strength of concrete as well as its density, compactness, permeability and resistance to wear. This paper analyzes recycled aggregate samples with various size grading methods to determine their potential use in concrete. On the one hand, results have showed that some differences between different methods existed; on the other hand the manufacturing process should be modified so that the particle size of the recycled aggregate complied with the guidelines in the EHE-08 Code.

Keywords: concrete; construction and demolition waste; grading methods; recycled aggregate; Structural Concrete Code EHE-08.

^(*) Universidad de Granada (Granada, España).

Persona de contacto / Corresponding author: mariam@ugr.es

1. INTRODUCCIÓN

La gran cantidad de residuos generados por la industria de la construcción ha conducido a políticas ambientales encaminadas a la minimización, reutilización y reciclaje de los residuos de construcción y demolición (RCD). En la década de los 90 la Unión Europea promulgó distintas regulaciones en materia de RCD (1) que posteriormente fueron implantadas en España, tanto a nivel nacional como regional y local. En España se estima que la generación de residuos de la construcción oscila desde 120 kg/m² (nueva construcción) a 1.229 kg/m² (demolición), de los que el 28% procede de la construcción de estructuras de obra civil (2).

Cuando el residuo de construcción y demolición es procesado adecuadamente en plantas de tratamiento la calidad del árido reciclado es apta para la construcción de edificios y carreteras (3), por lo que puede resultar un producto altamente competitivo técnica y medioambientalmente sostenible. Así se pone de manifiesto en diferentes estudios, entre los que cabe citar la construcción de carreteras haciendo uso de residuos mixtos (4); en la fabricación de hormigón estructural, en los que se han utilizado residuos cerámicos y árido reciclado procedente de piezas prefabricadas de hormigón como árido grueso (5, 6); finalmente hay referencias en las que se recogen resultados de la fabricación de mortero de albañilería, exclusivamente con la fracción fina del árido reciclado (7). No obstante estos estudios han puesto también de manifiesto que las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los áridos reciclados pueden variar considerablemente, ya que dependen de los siguientes factores: i) la procedencia del material, (ii) la agresividad del medioambiente al cual el árido ha estado expuesto durante su vida útil, (iii) el proceso de producción.

La granulometría del árido es uno de los factores que más influyen en el comportamiento del hormigón estructural (8). En el caso del hormigón fresco afecta significativamente a la consistencia, trabajabilidad y uniformidad (9, 10); en el hormigón endurecido tiene efectos sobre la densidad, compacidad, permeabilidad y resistencia al desgaste (11-13).

En este trabajo, y con la finalidad de establecer la idoneidad de la granulometría del árido reciclado en el hormigón estructural, se estudiaron cuatro muestras producidas en una planta de tratamiento de residuos en la provincia de Granada (España). Las características granulométricas de las muestras fueron comparadas mediante los métodos convencionales que se aplican al árido natural; se tuvieron también en cuenta los requisitos establecidos en la EHE-08 (14), tanto para árido natural (Artículo 28) como árido reciclado (Anejo 15).

1. INTRODUCTION

The large quantities of waste generated by the construction industry have led to environmental policies aimed at the minimization, reuse and recycling of construction and demolition waste (C&D waste). Regulations regarding C&D waste were enacted in the 1990s by the European Union (1), and subsequently implemented in Spain at the national, regional and local levels. In Spain, it is estimated that the generation of construction waste ranges from 120 kg/m² (new construction) to 1229 kg/m² (demolition). The source of 28% of C&D waste is the construction of civil engineering structures (2).

When construction and demolition waste is treated in suitable industrial installations, the quality of the recycled aggregate is apt for building and road construction (3), resulting in a product both economically and environmentally viable. Some references have shown the use of recycled aggregates for road construction using mixed C&D waste (4), the production of structural concrete applying ceramic C&D waste and coarse recycled aggregates from concrete precast (5, 6), or the use of fine fraction to produce mortars (7). Nevertheless, the physical, chemical and mechanical properties of recycled aggregate can vary considerably since they depend on the following: (i) the source materials of the aggregate; (ii) the aggressiveness of the environment to which the aggregate has been exposed during its useful life; (iii) the production process.

Aggregate particle size is one of the most influential factors in the performance of structural concrete (8). In the case of fresh concrete, aggregate particle size significantly affects consistency, workability and uniformity (9, 10). In hardened concrete, particle size affects density, compactness, permeability and resistance to wear (11-13).

In order to determine the suitability of the particle size of recycled aggregate for structural concrete, a study was made of four samples that had been produced at a waste treatment plant in the province of Granada (Spain). The samples were analyzed with various grading methods that are conventionally applied to natural aggregate. Also taken into consideration were the requirements in the EHE-08 (14) for both natural aggregate (Article 28) and recycled aggregate (Annex 15).

En la actualidad, los fabricantes de áridos reciclados producen diferentes fracciones basándose más en criterios de productividad que en la exigencia de un hormigón estructural de calidad por parte del sector constructivo. El objetivo de este estudio ha sido que los fabricantes de áridos reciclados sean conscientes de la necesidad del cumplimiento de las directrices relativas a tamaño de partículas y distribución granulométrica, permitiendo mejorar su calidad y convertirlos así en productos más competitivos y rentables.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Programa de muestreo

Para desarrollar este estudio se tomaron cuatro fracciones de la planta de tratamiento de RCD: (i) la fracción 001, que se corresponde con una fracción sin seleccionar resultado de la trituración por impacto antes del proceso de cribado; (ii) la 002 es la fracción gruesa (10/50 mm); (iii) la 003 es la fracción de tamaño medio (6/10 mm); (iv) finalmente la 004 se corresponde con la fracción fina (0/6 mm).

La toma de muestras se realizó conforme a las normas UNE-EN 932-1 (15) y UNE-EN 932-2 (16).

2.2. Requisitos granulométricos del árido

Para asegurar la calidad de los áridos, el estudio presentado en este artículo está basado en los requisitos granulométricos del árido utilizado para confeccionar hormigón, que se recogen en la EHE-08 (14), así como en otros métodos granulométricos continuos.

2.2.1. Requisitos granulométricos del artículo 28 de la EHE-08

La EHE-08 (14) establece los requisitos del árido utilizado para fabricar hormigón, resultando viables para este uso las gravas y arenas, tanto trituradas como rodadas. De hecho, cualquier tipo de árido que en la práctica haya mostrado un buen comportamiento puede ser utilizado.

La EHE-08 ofrece el criterio general para la designación de árido de acuerdo con el siguiente esquema:

GR-d/D-IL-N

Donde GR hace referencia al grupo de árido, concretamente: árido grueso (AG), árido fino (AF), y finos (FN); d es el tamaño mínimo del árido (mm); D es el tamaño máximo del árido (mm); IL identifica la forma del árido: rodado (R), triturado (T), y mezcla (M); finalmente N hace referencia a su naturaleza: calizo (C), silíceo (S),

Currently, manufacturers of recycled aggregate produce different fractions based more on productivity criteria than on the need of the construction sector for high-quality structural concrete. The purpose of this study was to make manufacturers aware that recycled aggregate should comply with official guidelines pertaining to particle size and distribution. This will enhance its quality and make it a more competitive and cost-effective product.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Sampling program

Four fractions were taken from the C&D waste treatment plant for this study: (i) fraction 001 was the unselected fraction resulting of simple impact crushing before the vibrating screen process; (ii) 002 was a coarse fraction (10/50 mm); (iii) 003 was a medium-size fraction (6/10 mm); and (iv) 004 was a fine fraction (0/6 mm).

The samples were collected according to the standards UNE-EN 932-1 (15) and UNE-EN 932-2 (16)

2.2. Particle size requirements of aggregate

The study presented in this paper is based on the EHE-08 (14) particle size requirements for aggregate used to make concrete, as well as on other continuous grading methods to ensure the quality of aggregate.

2.2.1. Particle size requirements in article 28 of the EHE-08

The EHE-08 (14) specifies the requirements for aggregate used to make concrete. Both crushed and round coarse aggregate and sand are viable for this purpose. In fact, any kind of aggregate which in practice has shown good performance can be used.

The EHE-08 provides general criteria for the characterization of aggregate in accordance with the following scheme:

Where GR refers to the aggregate group, namely, coarse aggregate (AG), fine aggregate (AF), and fines (FN); d is the minimum aggregate size (mm); D is the maximum aggregate size (mm); IL refers to the shape of the aggregate, i.e. round (R), crushed (T), and mixed (M); N refers to its intrinsic nature, i.e. limestone (C), siliceous

dolomítico (D), artificial (A) y reciclado (R). Este ha sido el formato utilizado para designar las muestras del árido en el presente estudio (ver Tabla 1)

(S), dolomite (D), artificial (A), and recycled (R). These criteria were used to characterize the aggregate samples in our study (see Table 1).

Tabla 1 / Table 1
Designación y relación D/d de las fracciones de los áridos reciclados (14).
Designation and ratio D/d of recycled aggregate fractions (14).

Muestra / Sample	Designación / Designation
001	AG-1/63-T-R
002	AG-16/125-T-R
003	AG-4/16-T-R
004	AG-0.25/8-T-R1
	AF-0.25/8-T-R2

¹ Según requisitos EHE-08 / According to EHE-08 requirements.

² Según requisitos EHE de 1998 / According to EHE of 1998 requirements (23).

La UNE-EN 933-2 (17) define el tamaño máximo (D) y mínimo (d) del árido grueso o fino en términos del tamiz de apertura. En la Tabla 2 se muestran los requisitos generales relativos al tamaño del árido (14).

The UNE-EN 933-2 (17) defines the maximum (D) and minimum (d) size of coarse or fine aggregate in terms of the sieve opening. Table 2 shows the general requirements in relation to aggregate size (14).

Tabla 2 / Table 2
Requisitos generales para el tamaño máximo (D) y mínimo (d) del árido (14).
General requirements for maximum (D) and minimum (d) aggregate size (14).

		Porcentaje que pasa a través del tamiz (en masa) / Percentage that passes through the sieve (in mass)				
		2D	1.4D	D	d	d/2
Árido grueso / Coarse aggregate	$D > 11.2 \text{ o } / \text{ or } D/d > 2$	100	98-100	90-99	0-15	0-5
	$D \leq 11.2 \text{ o } / \text{ or } D/d \leq 2$	100	98-100	85-99	0-20	0-5
Árido fino / Fine aggregate	$D \leq 4 \text{ y } / \text{ and } d = 0$	100	95-100	85-99	-	-

De acuerdo con la UNE-EN 933-1 (18), la distribución granulométrica del árido debe cumplir los requisitos para d / D. Esta distribución no debería variar durante la ejecución de los trabajos debido a su incidencia en la cantidad de cemento y agua en el hormigón. La EHE-08 (14) recomienda el uso de la UNE-EN 933-2 (17) para determinar la distribución granulométrica del árido, no imponiendo restricción alguna en el caso de los áridos todo-uno y grueso; sin embargo, sí incorpora limitaciones sobre la arena, para la que establece una granulometría comprendida dentro de los husos definidos en la Figura 1.

According to the UNE-EN 933-1 (18), the particle-size distribution of the aggregate must comply with the requirements for d/D. This distribution should not vary during the execution of the work because of its impact on the amount of cement and water in the concrete. The EHE-08 (14) recommends the use of the UNE-EN 933-2 (17) to determine the particle-size distribution of aggregate and places no restrictions on the particle-size distribution of all-in aggregate and coarse aggregate. However, it does include restrictions regarding sand, and specifies a grading based on established grain sizes (see Figure 1).

En cuanto a la cantidad de finos en el árido (ver Tabla 3), el porcentaje de finos debe ser inferior al 1,5% para el árido grueso, y estar comprendido entre 6-16% en el árido fino. En lo que respecta a la composición de la fracción fina, está estipulado que áridos finos con un índice de equivalente de arena inferior a 70 no deben ser utilizados en obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa o IIb, sin ninguna clase específica de exposición; en el resto de los casos, este índice no debe ser inferior a 75.

Accordingly to the quantity of the fines in aggregate (see Table 3), the percentage of fines should be less than 1.5% in the case of coarse aggregate, and between 6-16% in fine aggregate. In regards to the composition of the fine fraction, it is stipulates that fine aggregate with a sand equivalent index lower than 70 should not be used in constructions subjected to class of exposure type I, IIa or IIb as well as to no specific type of exposure. In all other cases, the index should not be lower than 75.

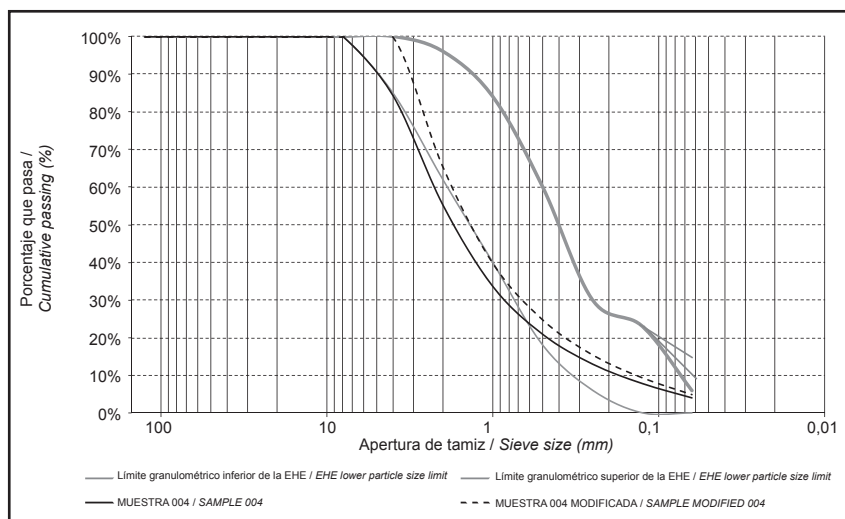


Figura 1. Husos granulométricos de la arena en la EHE-08 (14). Distribución granulométrica de la muestra 004 y de la muestra 004 modificada.

Figure 1. EHE-08 particle size domains for sand (14). Particle size distribution of sample 004 and modified sample 004.

2.2.2. Anejo 15 la EHE-08

El uso de árido reciclado es viable si cumple lo dispuesto en el Anejo 15 de la EHE-08 (14), según el cual se puede fabricar hormigón reciclado con árido grueso procedente del machaqueo de residuos de hormigón, con la limitación del 20% del total del árido utilizado. Con ello se pretende mantener la calidad del hormigón reciclado y garantizar unas propiedades similares a las del hormigón convencional. El porcentaje de árido reciclado sólo podría ser aumentado si previamente se realizasen estudios específicos. El hecho de que la arena reciclada no puede ser utilizada en el hormigón estructural se debe a su gran responsabilidad en las propiedades del hormigón; por ello el árido reciclado debe tener un contenido de los finos menor o igual a 10% y menos del 5% del árido debería pasar a través del tamiz 4 mm (ver Tabla 3).

2.2.2. Annex 15 of the EHE-08

The use of recycled aggregate is even feasible if it complies with the provisions in Annex 15 (14). According to Annex 15, recycled concrete can be produced from coarse aggregate derived from crushed concrete waste. However, this type of recycled concrete aggregate should not exceed 20% of the total aggregate used. This is to maintain the quality of the recycled concrete and ensure that it has the same properties as conventional concrete. The percentage of recycled aggregate can only be increased if specific studies have first been performed. The fact that recycled sand cannot be used in structural concrete is due to its greater responsibility in the properties of concrete. The recycled aggregate should possess a content of fines less than or equal to 10% and less than 5% of the aggregate should pass through the 4 mm sieve (see Table 3).

Tabla 3 / Table 3
 Requisitos EHE-08 para la arena y los finos (14).
EHE-08 requirements for sand and fines (14).

Muestra / Sample	Contenido en finos / Fines content	Límite / Limit Art. 28	Límite Anejo 15 / Limit Annex 15	Partículas menores de / Particles smaller than 4mm	Límite Anejo 15 / Limit Annex15	Índice equivalente arena / Sand equivalent index	Límite / Limit Art. 28
001	1.17%±0.69%	1.5%	10%	35.48%±7.88%	5%	69.33	70-75
002	0.10%±0.03%	1.5%	10%	0.82%±0.61%	5%	-	-
003	0.17%±0.06%	1.5%	10%	1.18%±0.20%	5%	-	-
004	4.10%±1.77%	1.5% ²	10%	84.36%±2.54%	5%	69.33	70-75

¹Ensayo realizado en la fracción 0/4mm / Test performed on fractions with 0/4mm grains.

²Para la arena el límite se incrementa a 6-16% dependiendo del tipo de partículas (rodada o triturada) y la exposición ambiental / For sand the limit increases to 6-16% depending on particle type (round or crushed) and environmental exposure.

Por último, el Anejo 15 también establece que las instalaciones que fabrican árido reciclado deben producir una

Annex 15 also states that the installations that produce recycled aggregate should obtain a coarse fraction with

fracción gruesa con un coeficiente de forma, índice de lajas y distribución granulométrica que cumplan con los husos recomendables para hormigón estructural.

2.2 3. Requisitos granulométricos del árido según otros autores

La curva granulométrica refleja la distribución ponderada de los áridos elementales que componen un árido determinado d/D. Si se asume que la densidad de los granos del árido permanece constante, a pesar del tamaño de las partículas, la distribución volumétrica es igual a la distribución ponderada. En todo caso, las curvas granulométricas de las fracciones pueden ser ajustadas a las curvas teóricas de referencia de otros autores. Así, las proporciones de árido para cada tamiz no necesitan exactamente coincidir con estas curvas; sería suficiente con que las áreas existentes entre la curva estudiada y la teórica de referencia coincidan, lo que indicaría que ambas tienen el mismo módulo granulométrico. En este estudio se utilizaron los métodos granulométricos continuos que se describen a continuación.

2.2.3.1. El método de Fuller

De acuerdo con Fuller (19), una granulometría continua se podría obtener con áridos redondeados con un tamaño máximo de 50 ± 20 mm y un contenido de cemento superior a 300 kg/m³; en el caso de áridos de machaqueo, la cantidad de finos se deberá aumentar. Fuller sugirió que la curva de distribución granulométrica del árido (Figura 2) debe ajustarse a la siguiente ecuación, donde p es el porcentaje que pasa por cada tamiz, d es el tamaño de cada tamiz; y D es el tamaño máximo del árido [1].

a shape coefficient, slab index and particle size distribution that comply with the particle sizes recommended for structural concrete.

2.2 3. Aggregate particle-size requirements by other authors

The grading curve reflects the weighted distribution of basic aggregates that make up a particular aggregate d/D. If the particle density of the aggregate is assumed to be constant, despite the size of the particles, the volume distribution is then equal to the weighted distribution. In any case, the grading curves of the fractions can be regarded as fit to the theoretical reference curves of other authors. Thus, the proportions of the aggregate for each sieve need not exactly match these curves. It is sufficient for the areas between the curve studied and the theoretical reference curve to concur. This indicates that both have the same particle size modulus. This study used continuous grading methods.

2.2.3.1. The Fuller method

According to Fuller (19), continuous grading could be obtained with rounded aggregates with a maximum size of 50 ± 20 mm and a cement content greater than 300 kg/m³. In the case of crushed aggregate, the quantity of fines should be increased. Fuller suggested that the particle distribution curve of the aggregate (Figure 2) should fit the following equation, where p is the percentage that passes through each sieve; d is the opening of each sieve; and D is the maximum size of the aggregate [1].

$$p = \sqrt{\frac{d}{D}} \quad [1]$$

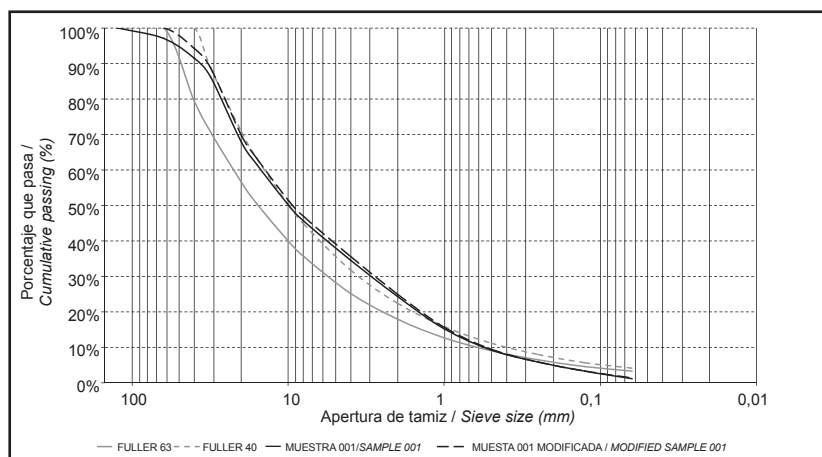


Figura 2. Distribución granulométrica de Fuller para los tamaños máximos 40 y 63 mm (19). Distribución granulométrica de la muestra 001 y de la muestra 001 modificada.

Figure 2. Fuller particle size distribution for maximum sizes 40 and 63 mm (19). Particle size distribution of sample 001 and modified sample 001.

2.2.3.2. El método Bolomey

El método Bolomey (19) propone una curva granulométrica de referencia (véanse las figuras 3 y 4) basada en la siguiente expresión donde p es el porcentaje más fino que el cedazo; d es la apertura de cada tamiz; D es el tamaño máximo del árido; y A es la consistencia del hormigón (seco, plástico, blando y fluido) y del árido (que va de 10 a 14)[2]:

$$p = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad [2]$$

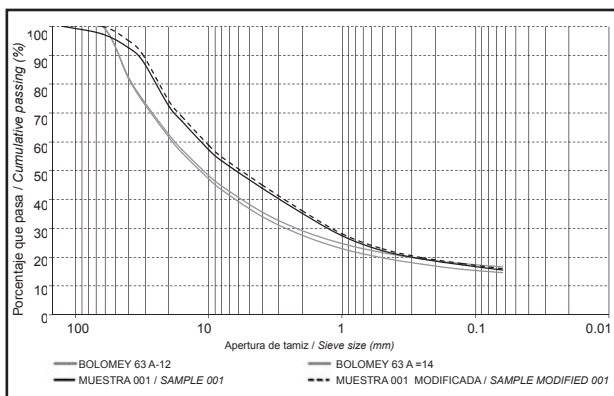


Figura 3. Distribución granulométrica de Bolomey para el tamaño máximo 63 mm (19). Distribución granulométrica de la muestra 001 y de la muestra 001 modificada.

Figure 3. Bolomey particle size distribution for maximum size 63 mm (19). Particle size distribution of sample 001 and modified sample 001.

La curva Bolomey tiene en cuenta el tipo de árido y la consistencia del hormigón. También incluye el contenido de cemento en el hormigón (aproximadamente 300 kg/m³), por lo que, para el mismo tamaño máximo, las curvas Bolomey quedan siempre por encima de la curva Fuller.

2.2.3.3. Modulo de finura de Abrams

El módulo granulométrico o de finura se obtiene sumando el porcentaje retenido y acumulado del árido en los tamices 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 31,5, 63 y 125, dividido por 100. Este módulo da una idea del tamaño medio del árido utilizado. Fuller adoptó el módulo de finura como una forma de ajustar la granulometría con la que él consideró como óptima (19).

De acuerdo con Abrams y otros autores, no es necesario ceñirse a una curva granulométrica teórica; basta con que el módulo granulométrico del árido sea el mismo que el de la curva teórica adoptada, que deberían tener la misma consistencia ya que todas las mezclas con

2.2.3.2. The Bolomey method

The Bolomey method (19) involves a reference grading curve (see Figures 3 and 4) based on the following expression where p is the percentage that passes through each sieve; d is the opening of each sieve; D is the maximum size of the aggregate; and A that varies with the consistency of the concrete (dry, plastic, soft and fluid) and of the aggregate (ranging from 10 to 14) [2]:

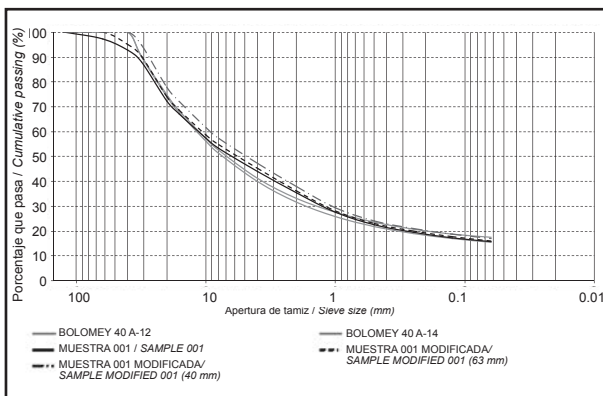


Figura 4. Distribución granulométrica de Bolomey para tamaño máximo 40 mm (19). Distribución granulométrica de la muestra 001 y muestra 001 modificada (eliminación de partículas mayores que 63 mm y 40 mm).

Figure 4. Bolomey particle size distribution for maximum size 40 mm (19). Particle size distribution of sample 001 and modified sample 001 (removal of particles larger than 63 and 40 mm).

The Bolomey curve takes into account the type of aggregate and the consistency of the concrete. It also includes the cement content in the concrete (approximately 300 kg/m³). Therefore, for the same maximum size, Bolomey curves are always above Fuller curve.

2.2.3.3. Abrams' fineness modulus

The fineness modulus is obtained by calculating the cumulative percentages of aggregate retained on sieves 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63 and 125, divided by 100. This modulus gives an idea of the average size of the aggregate used. Fuller adopted the fineness modulus as a way of fitting particle size distribution to what he considered to be the optimal (19).

According to Abrams and other authors, it is not necessary to follow a theoretical grading curve. It is sufficient for the fineness modulus of the aggregate to be the same as the theoretical curve. It should have equal consistency since all mixtures with the same modulus require the same

el mismo módulo demandan la misma cantidad de agua para producir hormigón de la misma docilidad y resistencia, siempre y cuando se utilice la misma cantidad de cemento. La Tabla 4 muestra el módulo de finura óptimo del árido determinado según Abrams, que depende del tamaño máximo del árido. Con este método, es posible obtener el módulo de granulométrico de una mezcla de dos o más fracciones de árido mediante un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas.

amount of water to produce concrete of the same docility and strength, provided that the same amount of cement is used. Table 4 shows the optimal fineness modulus of the aggregate as determined by Abrams, depending on the maximum size of the aggregate. With this method, it is possible to obtain the fineness modulus from a mixture of two or more aggregate fractions by using a system of two equations with two unknowns.

Tabla 4 / Table 4
Módulo granulométrico (MG) de las muestras según el tamaño máximo (19).
Particle size modulus (PSM) of samples for maximum particle size (19).

Muestra / Sample	D	MG / PSM	MG Abrams / Abrams PSM
001	63	6.17	6.68
	40		5.82
002	125	8.38	7.61
003	16	6.65	4.80
004	8	3.84	3.89

2.2.3.4. Husos granulométricos de la DIN 1045-1

La norma DIN 1045-1 (20) establece los husos granulométricos definidos por cuatro curvas granulométricas basadas en el tamaño máximo de la partícula. Estos husos están también incluidos en el Código Modelo DEB-FIP (21). Las curvas granulométricas continuas A, B y C definen los siguientes dominios (ver Figuras 5 y 6): A-B se refiere a granulometrías favorables que producen masas dóciles, trabajables y hormigones de alta resistencia; B-C, se refiere a granulometrías aún utilizables que producen hormigones con baja resistencia y retracción; la zona localizada sobre la curva C conduce a granulometrías no convenientes que demandan demasiada agua de amasado; la zona localizada debajo de U conduce a granulometrías no utilizables que producen masas de difícil puesta en obra.

2.2.3.4. Particle size domains in the DIN 1045-1

The DIN 1045-1 standard (20) establishes particle size domains defined by four grading curves based on maximum particle size. These domains are also included in the DEB-FIP Model Code (21). Continuous grading curves A, B and C define the following domains (see Figures 5 and 6): A-B refers to favourable particle sizes that produce docile, workable masses and high-strength concrete; B-C, refers to still usable particle sizes that produce concrete with low-strength and retraction; above C leads to unsuitable particle sizes that demand too much mixing water; Below U leads to unsuitable particle sizes that produce a mixture that is difficult to place.

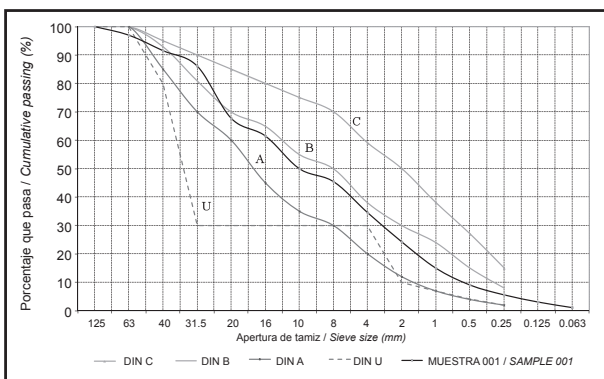


Figura 5. Husos granulométricos DIN 1045-1 para el tamaño máximo 63 mm (20). Distribución granulométrica de la muestra 001.

Figure 5. DIN 1045-1 particle size domains for maximum size 63 mm (20). Particle size distribution of sample 001.

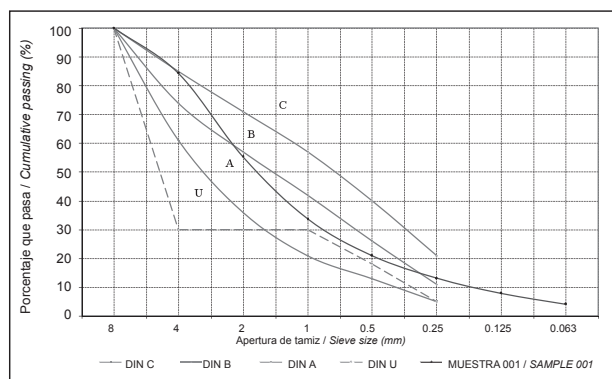


Figura 6. Husos granulométricos DIN 1045-1 para el tamaño máximo 8 mm (20). Distribución granulométrica de la muestra 004.

Figure 6. DIN 1045-1 particle size domains for maximum size 8 mm (20). Particle size distribution of sample 004.

En el caso de granulometrías continuas, las curvas que definen la distribución granulométrica utilizable son las localizadas entre U y C. Cuanto más hacia arriba se encuentre la curva en el gráfico más cantidad de agua demandará.

2.2.3.5. Método Dreux

El método de Dreux (19) es uno de los más populares en el diseño de mezclas de hormigón en Francia y está basado en el módulo granulométrico de la arena. Se muestra en la Figura 7, en la cual la zona A representa un módulo granulométrico entre 2,20 y 2,80, conocida como arena preferente, que conduce a hormigones de buena docilidad y resistencia con un riesgo bajo de segregación; la zona B representa un módulo granulométrico de 1,80 a 2,20, lo que se identifica como arena fina, la cual produce una cierta pérdida de resistencia en el hormigón; la zona C representa un módulo granulométrico entre 2,80 y 3,20, a la que se denomina arena gruesa, que conduce a hormigones de mayor resistencia pero con menos trabajabilidad y mayor riesgo de segregación.

2.2.3.6. Granulometría de la arena según la ASTM C33-08

La norma americana ASTM C33-08 (22) limita el dominio de la arena dentro de dos curvas (Figura 8); la superior corresponde a una arena fina y la inferior a una arena gruesa.

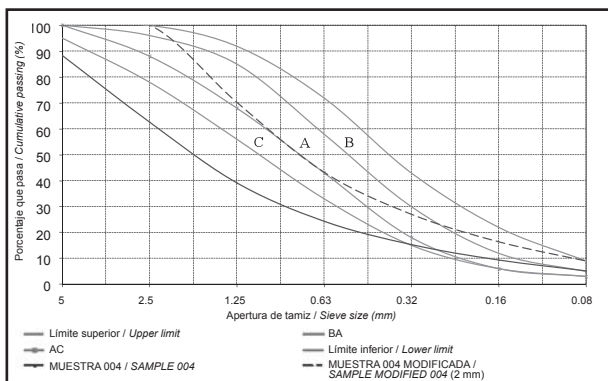


Figura 7. Distribución granulométrica para la arena según Dreux (19). Distribución granulométrica de la muestra 004 y muestra 004 modificada (eliminación de partículas mayores que 2 mm)

Figure 7. Dreux particle size distributions for sand (19). Particle size distribution of sample 004 and modified sample 004 (removal of particles larger than 2 mm)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Clasificación del árido reciclado

De acuerdo con la EHE-08 (14), las cuatro muestras estudiadas entran en la categoría de árido grueso ya que su tamaño máximo es superior a 4 mm. Esta sección presenta

For continuous grading, curves defining suitable particle sizes are located between U and C. The higher the curve is on the graph, the more water is required.

2.2.3.5. Dreux method

The Dreux method (19) is one of the most popular French concrete mix design methods. It is based on the particle size modulus of sand. This is showed in Figure 7, where: Zone A represents a particle size modulus of 2.20–2.80. This is known as preferential sand. It produces concrete of good workability and strength, and with a low risk of segregation; Zone B represents a particle size modulus of 1.80–2.20. This is known as fine sand, which produces concrete of somewhat less strength; Zone C represents a particle size modulus of 2.80–3.20. This is known as coarse sand. Its produces concrete of higher strength, but with lower workability and a higher risk of segregation.

2.2.3.6. Sand particle sizes in the ASTM C33-08

The American Standard ASTM C33-08 (22) limits the domain of sand into two curves (Figure 8). The upper curve corresponds to fine sand, and the lower curve corresponds to coarse sand.

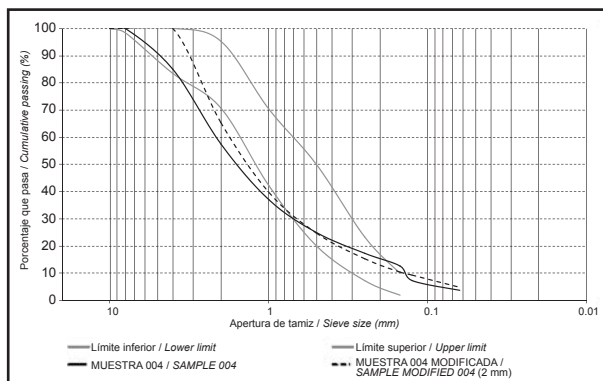


Figura 8. Husos de la arena conforme a la ASTM C 33-08 (22). Distribución granulométrica de la muestra 004 y de la muestra 004 modificada

Figure 8. Spindles of the sand according to ASTM C 33-08 (22). Particle size distribution of sample 004 and modified sample 004

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Classification of recycled aggregate

According to the EHE-08 (14), the four samples in our study fell into the category of coarse aggregate because their maximum particle size was greater than 4mm. This

los resultados que determinan si las muestras cumplen los requisitos granulométricos de la EHE-08, así como los establecidos por otros métodos convencionales basados en el tamaño máximo de cada muestra.

Respecto a la granulometría, la EHE de 1998 (23) difiere de la actual EHE-08 (14) en la definición de tamaño máximo de árido como la mínima apertura de tamiz que permite que pase más del 90% de las partículas cuando el total de la masa pasa a través del tamiz de apertura doble. A este respecto, la muestra 004 se consideró como arena ya que sólo un porcentaje muy pequeño de ella eran partículas gruesas o partículas mayores de 4 mm. Por lo tanto, en este estudio, a la muestra 004 se le aplicaron los métodos utilizados para la arena en lugar de los métodos que generalmente utilizan para las partículas gruesas.

Dado que el tamaño máximo del árido determina su uso potencial en hormigón estructural, se ha estudiado la distribución granulométrica de las cuatro muestras con la finalidad de conocer su aptitud para este uso. La Tabla 5 resume los diferentes métodos aplicados a las fracciones estudiadas.

section presents the results that determined whether our samples fit the particle-size requirements in the EHE-08, as well as those established by other conventional methods based on the maximum size of each sample.

Regarding particle size, the EHE of 1998 (23) differs from the current EHE-08 (14) in defining the maximum size of aggregate as the smallest sieve opening that allows more than 90% of the particles to pass when the total of the mass is sifted through a sieve of double opening. In this respect, sample 004 was regarded as sand because only a very small percentage of it was composed of coarse particles or particles larger than 4mm. Therefore, in this study, methods used for sand were applied to sample 004 instead of methods generally used for coarse particles.

Given the fact that the maximum size of the aggregate determines its potential use in structural concrete, the particle size of the four samples was studied in order to determine their aptness for this purpose. Table 5 summarizes the different methods applied to the fractions studied.

Tabla 5 / Table 5
Métodos aplicados en este estudio.
Methods applied in the study.

Muestra / Sample	Método / Method						
	Fuller	Bolomey	Abrams	DIN	EHE	Dreux	ASTM
001	X	X	X	X			
0021			X				
0031			X				
004			X	X	X	X	X

¹ La distribución granulométrica de las muestras 002 y 003 no se ajusta a ninguna curva de referencia porque son una fracción del árido conjunto / *The particle size distributions of samples 002 and 003 did not fit any reference curve because they are a portion of the whole aggregate.*

3.2. Muestra 001

Tal y como se observa en la Tabla 3, la cantidad de finos de la muestra 001 resultó menor que la especificada en la EHE-08 (14), en función del tipo de árido y del ambiente de exposición, ya que presentó un contenido de finos menor de 10%. No obstante esta muestra no cumplió con las especificaciones del Anejo 15 correspondiente al contenido de las partículas menores de 4 mm (Tabla 3).

Respecto a la calidad de los finos en el árido grueso, el índice de equivalente de arena para la porción 0/4mm de la fracción 001 se encontró entre 64 y 79, con un valor medio (69,33) que se aproximó a los límites de la EHE-08 para las clases generales de exposición I, IIa y IIb, no sometidas a ninguna clase específica; no obstante, dos de las tres muestras estudiadas obtuvieron un valor menor que el límite. Si estos resultados se comparan con los valores establecidos por otros autores (24) para la arena

3.2. Sample 001

The quantity of fines in sample 001 (Table 3) was lower than the limit specified in the EHE-08 (14), depending on aggregate type and environmental exposure. Although the sample had a fines content of less than 10%, it did not comply with the specifications in Annex 15 pertaining to the content of particles smaller than 4mm (Table 3).

Regarding the quality of fines in coarse aggregate, the sand equivalent index for the 0/4 mm portion of fraction 001 was between 64 and 79. The mean value (69.33) approximated the EHE-08 limits for general class of exposure I, IIa and IIb, as well as for no specific exposure class. However, two of the three samples studied obtained a value that was lower than these limit values. When these results were compared with the values established by other authors (24) for natural aggregate, the nature and

natural, la naturaleza y la calidad media de las muestras estudiadas (índice de equivalente de arena de aproximadamente 69), se observa que se encuentran dentro del rango de valores localizados entre 60 y 70. Este valor correspondería, por tanto, a un árido cuya arena tiene poca arcilla y un nivel aceptable de limpieza que produce un hormigón de calidad normal sin riesgo de retracción.

Cuando la fracción 001 se comparó con las curvas granulométricas de Fuller, Bolomey y DIN 1045-1 (19, 20), se pudo observar lo siguiente:

- La fracción 001 presentó una granulometría continua más cerca de la curva Fuller para el tamaño máximo 40 que para el tamaño máximo 63 (Figura 2). Es más, la eliminación de partículas mayores de 63 mm dio a la fracción 001 un mejor ajuste a la curva de Fuller definida por ese tamaño máximo debido a que las áreas localizadas sobre y debajo de la curva Fuller quedaron compensadas.
- Cuando la curva granulométrica del árido se comparó con la curva de referencia de Bolomey para un tamaño máximo de 63 mm, se observó una falta de prácticamente todos los granos, excepto para los finos (Figura 3). Por tanto el tamaño máximo que pudo ajustarse a la distribución granulométrica del árido reciclado fue de 40 mm (Figura 4), al menos para los tamaños inferiores a 8 mm. Esto evidenció una cantidad excesiva de partículas mayores de 40 mm, cuya eliminación dio a la fracción 001 un mejor ajuste a la curva de Bolomey, definida por este tamaño máximo.
- La comparación de la fracción 001 con los dominios granulométricos definidos en la DIN 1045-1 para el tamaño máximo 63, mostró que prácticamente todos los tamaños de partículas se situaban entre las curvas de referencia B y A. Esto significó que la muestra presentaba una adecuada distribución granulométrica que podría dar lugar a un hormigón dócil, trabajable y resistente. La única excepción fueron las partículas entre 20 y 40 mm que, aunque seguían siendo utilizables, producirían hormigones de menor resistencia y mayor retracción. Los tamaños de partículas mayores que de 63 mm no resultaron utilizables y proporcionarían discontinuidad y dificultad de puesta en obra. Esta fracción se ajustó a la granulometría recomendada después de la eliminación de las partículas superiores a 63 mm (Figura 5).

El módulo granulométrico de la fracción 001 se comparó con el módulo de finura de Abrams (19), encontrándose en un 92% similar al módulo de Abrams para el tamaño máximo 63 mm y un 6% mayor que para el tamaño máximo 40 mm (Tabla 4). Puesto que el módulo granulométrico indica el tamaño del conjunto del árido, la fracción 001 se podría considerar adecuada para fabricar hormigón (25).

average quality of our samples (equivalent sand index of approximately 69) was within the range of values between 60 and 70. This value corresponds to aggregate whose sand has little clay and an acceptable level of cleanliness. It produces a normal-quality concrete without risk of retraction.

When fraction 001 was compared with the grading curves of Fuller, Bolomey and the DIN 1045-1 (19, 20), the following was observed:

- *Fraction 001 was found to have a continuous grading closer to Fuller's curve for maximum size 40 than for maximum size 63 (Figure 2). Moreover, the removal of particles larger than 63 mm gave fraction 001 a better fit to Fuller's curve defined by this maximum size. This was because the areas above and below Fuller's curve compensated each other.*
- *Whenever the grading curve of the aggregate was compared with Bolomey's reference curve for a maximum size of 63 mm, there was a flaw in virtually all particle sizes except for fines (Figure 3). Therefore the maximum size that could be fit to the particle size distribution of the recycled aggregate was 40mm (Figure 4), at least for sizes below 8mm. This evidenced an excessive quantity of particles larger than 40 mm, the removal of which gave fraction 001 a better fit to the Bolomey curve, defined by this maximum size.*
- *If fraction 001 was compared with the particle size domains defined in the DIN 1045-1 for a maximum size of 63, it was found that virtually all particle sizes were located between reference curves B and A. This meant that the sample had a suitable particle size distribution that would result in a docile, workable and strong concrete. The only exception was particle sizes of 20–40 mm, which, though still usable, produced concrete of lower strength and greater shrinkage. Particle sizes larger than 63mm were not suitable, and had discontinuities that made them difficult to use for this purpose. This fraction fit the recommended particle sizes after the removal of particles larger than 63mm (Figure 5).*

Even if the particle size modulus of fraction 001 was compared with Abrams' fineness modulus (19), it was found to be 92% similar in regards to the Abrams' modulus for a maximum size of 63 mm and 6% higher for a maximum size of 40 mm (Table 4). Since the particle size modulus indicates the size of the whole aggregate, fraction 001 was found to be adequate to shape concrete (25).

En consecuencia, la fracción 001 no podría ser utilizada para fabricar hormigón debido a que no cumplió los requisitos de la EHE-08 (14) en cuanto a partículas inferiores a 4 mm y el índice del equivalente de arena; sin embargo, presentó una distribución granulométrica continua que se ajustaba a los diversos métodos granulométricos estudiados. Por lo tanto podría ser utilizado para confeccionar hormigón, siempre y cuando los tamaños de partícula grandes fuesen eliminados. Los métodos Fuller, Bolomey y Abrams (19) se encontraron más en consonancia con el concepto de tamaño máximo en la EHE de 1998 (23), mientras que el DIN 1045-1 (20) estaría más cercano con el de la actual EHE-08 (14), en la que el tamaño máximo es incluso mayor que el que realmente presenta la distribución granulométrica.

3.3. Muestras 002 y 003

A diferencia de la fracción 001, el contenido en finos y partículas menores de 4 mm en las fracciones 002 y 003 cumplió con todos los requisitos granulométricos del artículo 28 y el Anejo 15 de la EHE-08 (14) (ver Tabla 3). Cuando las fracciones se compararon con otros métodos granulométricos, su distribución granulométrica no se ajustó a ninguna curva de referencia debido a que eran parte del árido conjunto.

Los módulos granulométricos de las muestras de 002 y 003 (Tabla 4) no se aproximaron a los módulos de finura de Abrams (19), con valores de un 10% y unos 39% mayores, respectivamente. Esto significa que resultaron demasiados gruesos para ser utilizados en la elaboración de hormigón estructural debido a que no disponían de suficientes partículas mayores de 10-50 mm y menores de 10-6 mm respectivamente. El problema observado fue que carecían de la fracción fina necesaria para hacer un hormigón con la suficiente docilidad, trabajabilidad y compactación, aunque podría solucionarse si, para elaborar hormigón, ambas muestras se mezclaran con una arena que cumplieran con los requisitos en relación a distribución granulométrica, calidad y contenido en finos.

3.4. Muestra 004

Basado en la distribución granulométrica de la EHE-08 (Tabla 3) y en el criterio de la EHE de 1998 (23), la muestra 004 se clasificó como arena gruesa, por lo que el porcentaje admisible de los finos sería de 6-16%. De acuerdo con el Anejo 15, el mayor problema que presentó esta fracción fue su alto porcentaje de partículas inferiores a 4 mm (84,36%), mayor que el 5% limitado.

En cuanto a los finos presentes en el árido fino, el índice de equivalente de arena de la porción 0/4 mm, de la fracción 004 es el mismo que para la fracción 001 (69,33), y se encuentra por debajo del mínimo de 70, aunque dos

Accordingly, fraction 001 could not be used to make concrete because it did not fulfil EHE-08 (14), requirements for particles smaller than 4 mm and for the equivalent sand index. However, it had a continuous particle size distribution that conformed to the various grading methods studied. It could thus be used to make concrete when larger particle sizes were eliminated. The Fuller, Bolomey and Abrams methods (19) were found to be more in consonance with the concept of maximum size in the EHE of 1998 (23), whereas the DIN 1045-1(20) was more in consonance with the current EHE-08 (14) in which the maximum size is actually greater than that of the real particle size distribution.

3.3. Samples 002 and 003

In contrast to fraction 001, the content of fines and particles smaller than 4mm in fractions 002 and 003 satisfied all the particle-size requirements in Article 28 and Annex 15 of the EHE-08 (14) (see Table 3). When the fractions were analyzed with other grading methods, their particle size distribution did not fit any reference curve because they are a portion of the whole aggregate.

The particle-size moduli of samples 002 and 003 (Table 4) were not close to Abrams' fineness moduli (19). Sample 002 was 10% higher and Sample 003 was 39% higher. This meant that they were too coarse to be used to make structural concrete by themselves since they did not have sufficient particles larger than 10-50 mm and smaller than 10-6 mm, respectively. The problem was that they lacked a fine fraction that was necessary to make concrete of sufficient docility, workability and compactness. This could be remedied if both samples were mixed with sand that met the requirements regarding particle-size distribution, quality and content in fines for making concrete.

3.4. Sample 004

Based on the EHE-08 particle size distributions (Table 3) and EHE 1998 criteria (23), sample 004 was classified as coarse sand. Therefore the allowable percentage of fines was 6–16%. According to Annex 15, the greatest problem with this fraction was its high percentage of particles smaller than 4mm, which was 84.36%, greater than the 5% limited.

In respect to the fines in fine aggregate, the sand equivalent index of portion 0/4mm of fraction 004 was the same as for fraction 001 (69.33). This was below the minimum of 70, although two of the three samples studied were

de las tres muestras estudiadas cumplieron el requisito. Cuando la muestra se analizó con otros métodos (p.e. EHE-08 (14), Dreux (19), DIN 1045-1 (20), y ASTM C33-08 (22)), se observó lo siguiente:

- La arena reciclada presentaba una escasez de partículas con tamaños comprendidos entre 0,5 y 4 mm, en comparación con la curva granulométrica de la arena de la EHE-08. Este problema podría ser corregido si los tamaños mayores de 4 mm se eliminaran, lo que permitiría que la curva de la arena tendiese hacia arriba (Figura 1).
- Esta fracción presentó una granulometría continua dentro de los husos DIN 1045-1 para el tamaño máximo 8 mm (Figura 6). Las partículas menores de 2 mm resultaron favorables para su uso ya que podrían proporcionar hormigones con la adecuada docilidad trabajabilidad y resistencia; por el contrario, las partículas mayores de 2 mm, localizadas entre las curvas B y C, y que corresponden a tamaños aún utilizables, producirían hormigones de menor resistencia y mayor retracción.
- Según el método Dreux la fracción 004 presentó un módulo granulométrico excesivamente grande (Figura 7), que produciría hormigón fresco de menor trabajabilidad y con un mayor riesgo de segregación. No obstante, cuando el hormigón endureciese, tendrá una mayor resistencia mecánica. Su contenido en arena fina resultó adecuado para la distribución granulométrica. Sin embargo, su contenido de arena mediana y gruesa mostró un mayor porcentaje de partículas que presentó un módulo granulométrico mayor de lo deseado. La eliminación de partículas mayores que 2 mm haría que la curva de la arena reciclada encajase mejor dentro los husos, aunque el contenido en arena gruesa y fina fuese todavía algo alto.
- En relación con la ASTM C33-08, la distribución granulométrica de la fracción 004 tenía un exceso de partículas finas y una falta de partículas de tamaños 0,5-4 mm. Después de la eliminación de partículas mayores de 4 mm presentó una falta de partículas de tamaños 0,5-2 mm. Esto podría ser mejorado mediante un incremento de la cantidad de partículas de estos tamaños (Figura 8).

Al comparar el módulo granulométrico de la fracción 004 con el módulo de finura de Abrams (19) se mostró que la fracción 004 tenía un módulo granulométrico en un 99% similar a éste (ver Tabla 4). Es posible concluir por tanto que las arenas recicladas no se deben emplear en el hormigón estructural, tal como estipula el Anejo 15. Dentro del contexto de la estricta calidad granulométrica, la arena reciclada resulta adecuada para confeccionar hormigón cuando los tamaños de partícula grandes sean eliminados. El método Dreux (19) fue el método más restrictivo para la arena reciclada, y el menos restrictivo, como en el caso

found to fulfil the requirement. When the sample was analyzed with other methods (i.e. the EHE-08 (14), Dreux (19), DIN 1045-1 (20), and ASTM C33-08 (22)), the following was observed:

- *Recycled sand lacked particles between sizes 0.5 and 4 mm in comparison to EHE-08 sand particle sizes. This could be remedied if sizes larger than 4 mm were eliminated so that the sand curve tended upwards (Figure 1).*
- *This fraction provided a continuous grading according to the DIN 1045-1 particle-size domains for a maximum size of 8 mm (Figure 6). It was found that particles smaller than 2 mm were preferable since they provided concrete with suitable docility, workability and strength. In contrast, particle sizes larger than 2 mm were located between lines B and C. Although these sizes were still usable, they produced concrete of less strength and greater shrinkage.*
- *According to the Dreux method fraction 004 had an excessively large particle size modulus (Figure 7), which produced fresh concrete that was less workable and with a greater risk of segregation. Nevertheless, when the concrete hardened, it had greater mechanical strength. Its fine sand content was found to be appropriate for the particle size distribution. However, its medium and coarse sand content had a higher percentage of particles that made its particle size modulus higher than desired. The removal of particle sizes larger than 2 mm made the curve of the recycled sand fit the domains better though the content in coarse and fine sand was still slightly high.*
- *In relation to the ASTM C33-08, the particle size distribution of fraction 004 had an excess of fine particles and a lack of particles of sizes 0.5–4 mm. After the removal of particles larger than 4mm, there was a lack of particles of sizes 0.5–2 mm. This could be improved by increasing the quantity of particles of these sizes (Figure 8).*

A comparison of the particle size modulus of fraction 004 with the Abrams' fineness modulus (19) showed that fraction 004 had a particle size modulus that was 99% similar to it (see Table 4). It was thus possible to conclude that the recycled sands should not be used in structural concrete, as stipulated in Annex 15. Within the context of strict quality grading, recycled sand was found to be suitable for making concrete when larger particle sizes were eliminated. The Dreux method (19) was the most restrictive method for recycled sand, and the least restrictive, as in the case of coarse recycled aggregate, was the

de árido grueso reciclado, fue el método DIN 1045-1 (20). Este estudio mostró que los métodos granulométricos más adecuados para la arena reciclada, incluso con ajustes, eran los recomendados por la EHE-08 (14) y ASTM C33-08 (22).

4. CONCLUSIONES

Basándose únicamente en su distribución granulométrica, el árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición puede ser utilizado para la elaboración de hormigón estructural. Sin embargo, es necesario que la fracción de arena reciclada sea sustituida por arena natural, que le proporcionará la trabajabilidad, en estado fresco, y contribuirá a su resistencia y durabilidad cuando haya endurecido.

La comparativa de los resultados obtenidos en el análisis granulométrico del árido reciclado producido en una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición en la provincia de Granada (España), aplicando para ello diferentes métodos granulométricos con la finalidad de establecer su aptitud para ser usado en hormigón, ha mostrado diferencias entre ellos. Así, por ejemplo, el método granulométrico DIN 1045-1 requirió un tamaño máximo de árido tan alto como la EHE-08; por el contrario, los métodos Fuller y Bolomey, requirieron tamaños máximos de árido menores, como el definido en la EHE de 1998. En el caso del árido fino, el método granulométrico DIN 1045-1 también proporcionó un tamaño de árido igual al de la EHE-08, mientras el tamaño de árido de la norma ASTM ha estado más cerca del definido en la EHE de 1998. Por otro lado, el método Dreux era el que requería el menor tamaño máximo y, así mismo, se ha observado que el enfoque dado por la EHE-08 respecto al tamaño máximo de las partículas es demasiado restrictivo para las distribuciones granulométricas analizadas, pudiendo concluir que el criterio de la EHE de 1998 ha sido el más adecuado.

Finalmente, los resultados de este estudio han mostrado que los productores de árido reciclado deben modificar el proceso de fabricación, con la finalidad de producir un árido que tenga la granulometría que demanda el sector de la construcción para hormigón de alta calidad. Esto permitiría obtener un producto final viable económica y medioambientalmente, capaz de competir con los áridos naturales.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación no hubiera sido posible sin la asistencia del personal que trabaja en el centro de tratamiento de RCD en Vélez de Benaudalla (Granada, España), FCC, SL y RESUR (Consortio Provincial de Residuos Urbanos de Granada). La financiación para este estudio también se recibió

DIN 1045-1 method (20). This study found that the most effective grading methods for recycled sand, even with adjustments, were those recommended by the EHE-08 (14) and ASTM C33-08 (22).

4. CONCLUSIONS

Based solely on their particle size distribution, recycled aggregate from construction and demolition waste can be used to make structural concrete. Nevertheless, it is necessary for the fraction of recycled sand to be replaced by natural sand; it supplies workability, in fresh state, and strength and durability when it is hardened.

The particle size of recycled aggregate produced at a construction and demolition waste treatment plant in the province of Granada (Spain) was analyzed with different grading methods to find out whether it was apt to be used in concrete, showing differences between them. For example, the DIN 1045-1 grading method led to a maximum size aggregate that was as large as the EHE-08. In contrast, the Fuller and Bolomey methods required maximum aggregate sizes that were as small, as the one defined in the EHE of 1998. In the case of fine aggregate, the DIN 1045-1 grading method also provided particle sizes that were similar to those in the EHE-08, whereas the particle sizes of the ASTM were closer to those defined in the EHE of 1998. The Dreux method was the one that required the smallest maximum size. Likewise, it was observed that the approach adopted by the EHE-08 regarding maximum particle size is too restrictive for the particle size distributions studied; in consequence, the criteria in the EHE of 1998 were more suitable.

Finally, the results of this study reflected the fact that producers of recycled aggregate should modify the manufacturing process. The aggregate produced should have the particle sizes demanded by the construction sector for high-quality concrete. This would make the final product both economically and environmentally viable, and able to compete with natural aggregate.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This research would not have been possible without the assistance of staff working at the C&D waste treatment center in Vélez de Benaudalla (Granada, Spain), FCC S.L, and RESUR (Consortio Provincial de Residuos Urbanos de Granada). Funding for this study was also received from

del grupo de investigación, Razonamiento Aproximado e Inteligencia Artificial (ARAI-TIC 111), el Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada y la División de Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía (proyecto de investigación TIC-02913).

the research group, Approximate Reasoning and Artificial Intelligence (ARAI-TIC 111), the Department of Building Construction at the University of Granada and the Innovation and Science Division of the Andalusian Regional Government (research project TIC-02913).

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Vegas, I.; Iañez, J.A.; San José, J.T.; Urzelai, A.: "Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction", *Waste Management*, vol. 28 (2008), pp. 565-574. doi:10.1016/j.wasman.2007.01.016.
- (2) Ministry of the Environment and Rural and Marine Affairs: "Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015" (Integrated National Plan of Waste 2008-2015), *Spanish Official Gazette* 49 (2009), pp. 19893-20016.
- (3) Sagoe-Crentsil, K.K.; Brown, T.; Taylor, A.H.: "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate", *Cem. Concr. Res.*, vol. 31(2001), pp 707-712. doi: 10.1016/S0008-8846(00)00476-2.
- (4) Jiménez, J.R.; Agrela, F.; Ayuso, J.; López, M.: "A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base", *Mater. Construcc*, vol. 61 302 (2011), pp 289-302. doi: 10.3989/mc.2010.54009.
- (5) Medina, C.; Juan, A.; Frías, M. Sánchez de Rojas, M.I.; Morán, J.M.; Guerra, M.I.: "Characterization of concrete made with recycled aggregate from ceramic sanitary ware", *Mater. Construcc*, vol. 61 304 (2011), pp 533-546. doi: 10.3989/mc.2011.59710.
- (6) Pérez-Benedicto, J.A.; del Río-Merino, M.; Peralta-Canudo, J.L.; de la Rosa-Mata, M.: "Mechanical characteristics of concrete with recycled aggregates coming from prefabricated discarded units", *Mater. Construcc*, vol. 62 305 (2012), pp 25-37. doi: 10.3989/mc.2011.62110.
- (7) Vegas, I.; Azkarate, I.; Juarrero, A.; Frias, M.: "Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates", *Mater. Construcc*, vol. 59 295 (2009), pp 5-18. doi: 10.3989/mc.2009.44207.
- (8) Limbachiya, M.C.; Marrocchino, E.; Koulouris, A.: "Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate", *Waste Management*, vol. 27 (2007), pp. 201-208. doi:10.1016/j.wasman.2006.01.005.
- (9) Etxeberria, M.; Vázquez, E.; Marí, A.; Barra, M.: "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", *Cem. Concr. Res.*, vol. 37 (2007), pp. 735-742. doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
- (10) Domingo-Cabo, A.; Lázaro, C.; López-Gayarre, F.; Serrano-López, M.A.; Serna, P.; Castaño-Tabares, J.O.: "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23 (2009), pp. 2545-2553. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018.
- (11) Meddah, M.S.; Zitouni, S.; Belaabes, S.: "Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 24 (2010), pp. 505-512. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.009.
- (12) Jamkar, S.S.; Rao, C.B.K.: "Index of Aggregate Particle Shape and Texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning", *Cem. Concr. Res.*, vol. 34 (2004), pp. 2021-2027. doi:10.1016/j.cemconres.2004.03.010.
- (13) Berndt, M.L.: "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23 (2009), pp. 2606-2613. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011.
- (14) Spanish Ministry of Public Works: "Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (Spanish Structural Concrete Code)", Madrid (2008).
- (15) UNE-EN 932-1. Test for general properties of aggregates. Part 1: methods for sampling, AENOR, Madrid (1997).
- (16) UNE-EN 932-2. Test for general properties of aggregates. Part 2: methods for reducing laboratory samples, AENOR, Madrid (1999).
- (17) UNE-EN 933-2. Test for geometrical properties of aggregates. Part 2: determination of particle size distribution. Test sieves, nominal size of aggregates, AENOR, Madrid (1996).
- (18) UNE-EN 933-1/A1. Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: determination of particle size distribution. Sieving methods, AENOR, Madrid (2006).
- (19) Jiménez Montoya, P.; García Meseguer, A.; Morán Cabré, F.: "Hormigón Armado", GG, Barcelona (2000).
- (20) DIN 1045-1. Concrete, reinforced concrete and prestressed concrete structures. Part 1. Design and construction. Beuth Verliãag GmbH, Berlin (2008).
- (21) GEHO-CEB Grupo Español del Hormigón.: "Código modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural" (DEB-FIP Model Code for Structural Concrete), Madrid (1995).
- (22) ASTM C 33 – 08. Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, USA (2008).
- (23) Spanish Ministry of Public Works.: "Instrucción de Hormigón Estructural EHE" (Spanish Structural Concrete Code), Madrid (1998).
- (24) Poon, C.S.; Chan, D.: "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base", *Constr. Build. Mater.*, vol. 20 (2006), pp. 578-585. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045.
- (25) Gómez Soberón, J.M.; Vázquez Ramonich, E.; Agulló Fité, L.: "Hormigón con áridos reciclados. Una guía de diseño para el material" (In Spanish), Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona (2001).