

Estudio experimental en empresa de prefabricación de elementos lineales armado con hormigones autocompactantes incorporando áridos reciclados *

Experimental study in prefabrication company of linear elements armed with self-compacting concrete incorporating recycled aggregates

**Francisco Fiol Oliván^{1*},^a, Carlos Thomas Garcia^b, Juan Manuel Manso Villalain^c,
Vanesa Ortega ^b, Marta Skaf^a, Carmelo Muñoz Ruipérez^a, Victor Revilla**

^a Prof. Dr Departamento Construcciones Arquitectónicas .Escuela Politécnica Superior de Burgos. UBU

^b Prof. Dr Departamento Ingeniería Civil .Escuela Politécnica Superior de Burgos. UBU

RESUMEN

Las empresas de prefabricados fabrican grandes volúmenes de hormigón aplicado a piezas de grandes prestaciones y calidad, pero también se producen rechazos de piezas, restos de amasadas cuya reutilización mediante trituración permite obtener un árido de muy buena calidad que puede ser incorporado a los hormigones que conforman la piezas prefabricadas.

Se caracteriza el RAC y se parte de las dosificaciones que utiliza la empresa de prefabricados (hormigón de control HR45 0%) un nuevo hormigón con árido reciclado de resistencia HR-45-100% sustituyendo el árido natural por un 100% de RAC.

En el laboratorio se realizan ensayos de determinación de sus propiedades mecánicas, para posteriormente, en una siguiente fase, ensayar sus propiedades frente a la durabilidad.

El análisis se completa con la comprobación a nivel industrial, en la propia factoría, de los aspectos antes descritos. Se elaboran elementos lineales de sección 15x25 y longitud 1.50 m. elaboradas con los hormigones objeto del presente estudio y comprobando su comportamiento a flexión, cortante y deformación diferida. Los resultados del nuevo hormigón con RAC son satisfactorios comparados con el hormigón de control, lo cual supone un ejemplo de sostenibilidad extensible para el sector de prefabricación.

ABSTRACT

Prefabricated companies manufacture large volumes of concrete applied to pieces of high performance and quality, but there are also rejections of pieces, remnants of kneaded whose reuse by crushing allows obtaining a very good quality aggregate that can be incorporated into the concretes that make up the prefabricated parts.

The RAC is characterized and part of the dosages used by the prefabricated company (control concrete HR45 0%) a new concrete with recycled aggregate of resistance HR-45-100% replacing the natural aggregate with a 100% RAC.

In the laboratory tests are carried out to determine its mechanical properties, and then, in a next phase, test its properties against durability.

The analysis is completed with the verification at the industrial level, in the factory itself, of the aspects described above. Linear elements of section 15x25 and length 1.50 m are made. made with the concrete object of the present study and checking its behavior to bending, cutting and deferred

deformation. The results of the new concrete with RAC are satisfactory compared to the control concrete, which is an example of extensible sustainability for the prefabrication sector.

PALABRAS CLAVE: hormigón reciclado, prefabricación, árido reciclado, autocompactante, vigas, flexión, cortante, sostenibilidad

KEYWORDS: recycled concrete, prefabrication, recycled aggregate, self compacting, beams, bending, shear, sustainability

1. Introducción

En España se generan cada año más de 40 millones de toneladas de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Se estima que la producción de RCD en España ha ido creciendo en los últimos años a un ritmo medio del 8,7% anual. Esta tendencia se ha roto pasando a tasas negativas como resultado del descenso en la actividad constructora que se está experimentando actualmente, más acusado en obras de edificación residencial. Según GEAR [1] se han tratado en torno a un 40% de los residuos procedentes de la construcción y aprovechándose un 15 % de los mismos.

El aprovechamiento de residuos diferentes procedencias han constituido estudios varios [2] [3] [4]. Además de la propiedades mecánicas estáticas también es de interés para su aplicación de prefabricados en obra pública como su comportamiento a fatiga [5], así como frente a la durabilidad [6]. La industria de los prefabricados genera residuos de hormigón con altos grados de pureza que hacen que se traten de potencial materia prima para la fabricación de nuevos hormigones con árido reciclado de alta calidad. Existen experiencias de empleo de incorporación de árido reciclado en elementos prefabricados [7] [8] [9], pero son pocas, por lo que el presente estudio es de interés.

En el presente estudio se analizan los materiales que se van a ser incorporados a los nuevos hormigones procedentes de piezas prefabricadas no aprovechables, por obras no ejecutadas, no conformidades, error en la geometría o procedentes de restos sobrantes del hormigonado diario, Figura 1. El estudio ha sido aplicado al proceso de recuperación de dichas

piezas procedentes de la factoría de prefabricados “ARTEPREP” perteneciente al grupo de empresa “Gerardo de la Calle” en Aranda de Duero (Burgos). El volumen de residuos que la empresa genera, supone entre un 1-3% del volumen de hormigón producido. Lo que supone una tasa de regeneración de aproximadamente entre 100-250 t/año, dependiendo de la producción.



Figura 1 almacena de piezas desechadas

2. Materiales

2.1 Árido reciclado

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se especifica el porcentaje de elementos prefabricados existentes en el almacén de productos rechazados.

El proceso se sintetiza en los siguientes pasos. Primero se emplea pinza hidráulica para eliminar armaduras y extraer los residuos de tamaño aproximadamente de hasta 150 mm para su posterior proceso de trituración. A continuación se realiza una primera trituración mediante machacadora de mandíbulas con un tamaño máximo resultante de 0/80 mm. Posteriormente se procesa en un molino de impacto y se obtiene un tamaño de 0/25 mm, Figura 2

Tabla 1 Elementos prefabricados según su desecho total %

Elementos prefabricados ¹	Desecho total %
Vigas “L” y “doble T” pretensadas HPAC-45 y vigas tipo “delta” HPAC-50	20
Correas Dallas pretensadas HPAC-40	15
Pilares prefabricados armados HAC-40	20
Paneles prefabricados armados HAC-30	40
Otros	5

En esta investigación solo se utilizará la fracción gruesa hasta 12,5 mm (fracción 4/12,5). El aprovechamiento del tamaño 4/12,5 que se obtiene es de un 65%.

2.2 Áridos naturales

Los áridos utilizados presentan unos tamaños de 0/2 y 2/12,5 mm, poseen un certificado de control de producción en fábrica en cumplimiento de la directiva 89/106/CEE marcado CE N° de registro Appplus ER-0370-CPD-1393 atendiendo a las Normas EN 12620:2002+A1:2008; EN13043:2002; EN13043:2002/AC:2004 EN 13139:2002 y EN 13139:2002/AC:2004.

2.3 Cemento

El cemento utilizado es un cemento tipo I-52.5 R conforme a la Norma UNE-EN 197-1:2000 suministrado por Cementos Alfa, factoría ubicada en Mataporquera, del grupo cementero Portland Valderribas S.A. que posee certificado CE N° ER-0879/1997 Aenor N=015/00198/03

2.4 Filler calizo

Procede de Zaragoza con marcado CE y declaración de conformidad UNE-EN 12620, UNE-EN 13139 y UNE-EN 13043, con la siguiente descripción: Carbonato cálcico natural, fabricado a partir de roca caliza seleccionada con elevada blancura y alto grado de pureza química y ausencia de metales pesados. Árido no reactivo al álcali-carbonato ni al álcali sílice y exento de materia orgánica.

2.5 aditivos

Los aditivos utilizados son primeramente Sika ViscoCrete®-20 HE, especialmente adecuado para la confección de hormigones de altas resistencias iniciales, hormigones con gran necesidad de reducción de agua y de excelente fluidez. Las proporciones recomendadas se encuentra entre el 0,5-1% en peso del cemento



Figura 2 Métodos de trituración empleados.

¹ HPAC-40, HPAC-45, HPAC-50 Hormigón autocompactante pretensado de resistencia característica 40-45-50 Mpa respectivamente y HAC-

40, HAC-30 Hormigón autocompactante armado de resistencia característica 40 y 30 Mpa respectivamente.

2.6 Dosificaciones

La dosificación empleada de partida corresponde a las que habitualmente son utilizadas en fábrica (ARTEPREF). Además, para fabricar los hormigones reciclados se han empleado los mismos componentes que para los hormigones de control sustituyendo el porcentaje en peso de árido grueso natural por un 0%, 20%, 50%, 100%. Con estos porcentajes se han realizado la caracterización mecánica. La codificación adoptada, justificada en la actual Normativa EHE-08, en esta investigación incluirá el grado de sustitución correspondiente, con la siguiente designación:

HR-45/AC/12,5/A

HR: Designación de hormigón reciclado.

Valor 45 corresponden a la resistencia característica a los 28 días (f_{ck}).

AC: Correspondiente a un hormigón autocompactante.

Valor 12,5: Valor de Tamaño máximo de árido empleado.

A: Tipo de Ambiente².

3. Metodología

3.1 Determinación de las propiedades del hormigón fresco

Para la determinación de las propiedades de hormigón fresco se aplica la UNE-12350-2 [10] y UNE-12350-8[11] este último relativo a hormigón autocompactante.

3.2 Determinación de propiedades mecánicas

Se han realizado las roturas en prensa hidráulica de marca Proeti, con una carga máxima de 300 kN. El incremento de carga se llevó a cabo a razón de 5 KN/s para las roturas de compresión y 8 KN/s para los ensayos de tracción. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** queda reflejada la normativa utilizada, y edad de las mismas

Tabla 2 Ensayos y normativa empleada

Ensayo	Norma	Edad
Ensayo compresion	EN-12390-3	24h-7-28-90
Ensayo traccion	EN-12390-6	28-90
Modulo elasticidad	EN-12390-3	28-90

3.3 Elaboración de prueba industrial

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se especifican las vigas ensayadas, armándolas con los mínimos exigidos por normativa Figura 3.

Tabla 3 Programación ensayos prueba industrial

Ensayo	Edad	Dimensiones (cm)
Vigas a flexion	28	Seccion 15x24 Luz 175
Vigas a cortante	28	Seccion 24x24 Luz 140

Las vigas se sometieron a carga continua constante obteniendo directamente, mediante software (Flex-text V2.1) de la prensa, los gráficos de carga. Durante el ensayo se toma lectura del momento de fisuración en su cara exterior para los tres escalones de carga correspondientes a:

- Momento de fisuración.
- Momento de servicio.

suponen diferentes afecciones que posteriormente serán tratadas en apartados específicos

² Tabla 8.1 Correspondiente a los ambientes generales a los que va a estar expuesto un elemento de hormigón EHE-08. Los ambientes reflejados en dicha tabla

- Momento último.
- Momento de rotura.

Para el cálculo de los momentos de fisuración, servicio y último, además del cortante último se ha recurrido a prontuario informático de hormigón EHE-08 [12]. Conocida la sección y armadura podemos plantear las ecuaciones de equilibrio de la sección y así obtener la capacidad de la viga, para un nivel de control normal $\gamma_c=1,5$ y $\gamma_s=1,10$, atendiendo al estado límite de solicitaciones normales (*artículo 42º* EHE-08). Para el estado límite de agotamiento a cortante, aplicaremos el *artículo 44º* de la EHE-08. En la En todos los casos se ha tenido en cuenta el peso propio de la viga.

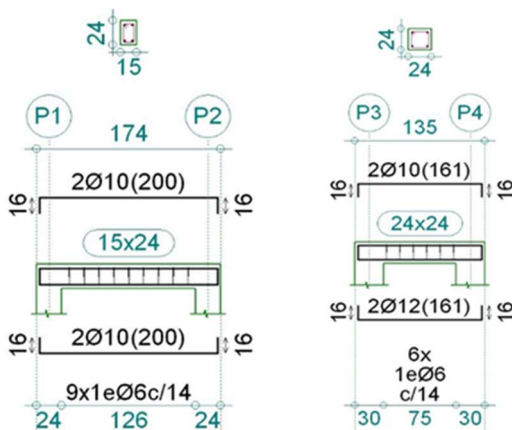


Figura 3 Esquema armado vigas

La prensa dispone de una unidad hidráulica de capacidad 100 toneladas dispuesta con una unidad de medida electrónica de 5 canales, con la posibilidad de incorporar los datos generados por el software en una hoja de cálculo. El ensayo de flexión y cortante se introduce según el siguiente esquema Figura 4

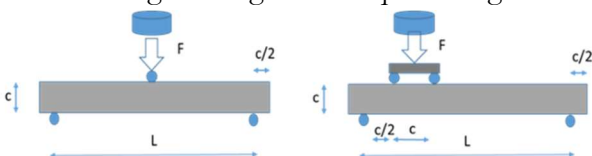


Figura 4 Esquema aplicación de cargas

F= Fuerza aplicada con el transductor.
C=Canto viga.
L=Longitud viga.

3.4 Proceso de hormigonado

El proceso de amasado del hormigón se realizó con la central de hormigonado de la fábrica. La central está controlada mediante un software que coordina los pesos de cada componente introduciendo las distintas fórmulas y rectificando la cantidad de agua según las lecturas de las sondas de humedad incorporadas en la arena Figura 5 . Así mismo la cantidad de arena queda también corregida en función de la humedad siempre sin sobrepasar la relación w/c correspondiente.



Figura 5 Central hormigonado y automática.

Para el árido grueso, que permanece con anterioridad en las tolvas normalmente, se ajusta su humedad de manera automática mediante sensores de humedad. Los áridos reciclados se introducen con anterioridad en las tolvas para simular el mismo estado. El árido reciclado se introduce sin lavar con el fin de situarnos en la condición más desfavorable posible.

La capacidad de la amasadora planetaria es de 3 metros cúbicos incorporando los componentes mediante los skips según la secuencia marcada por el automático. En la Figura 6 se aprecia la magnitud de la amasadora y la distribución de la mezcla del hormigón en el interior mediante palas movidas hidráulicamente.

Las vigas se encofraron en una bancada universal de 150 m de longitud correspondiente a los paneles de cerramiento. A la vez que se ejecuta el hormigonado de las piezas

prefabricadas, también se procede al relleno de los moldes de las probetas que completan la presente prueba industrial.

El vertido del hormigón sobre los moldes queda reflejado en la Figura 6. El accionamiento de la boca es hidráulica y es manejado por un operario mediante un automatismo de precisión permite la abertura y cierre controlada de dicha boca



Figura 6 Amasado del lote. Hormigonado de las piezas con RCA

4. Resultados y análisis

4.1 Caracterización del árido reciclado

El árido reciclado obtenido se ha sometido a los ensayos preceptivos normativos de la EHE-08, resultando favorables todas sus propiedades.

Tabla 4 Caracterización árido reciclado obtenido

Propiedades	Ensayo	Resultados
Contenido finos	EN-933-2	0.41
Índice lajas (% Wt)	EN-933-3	7.90
Densidad aparente (g/cm ³)	EN-933-4	2.41
Los Angeles (%Wt)	EN-1097-6	37
Absorción (%Wt)	EN-1097-6	4.15
Partículas ligeras	EN7134-58	21

4.2 Resultados ensayos probetas

4.2.1 Resultados hormigón fresco

Los resultados de la fluidez del hormigón manifestado en el diámetro de la torta realizados resultaron mayores de 60 cm en todos los casos y el tiempo T_{50} menor de 5 segundos. En

referencia a la resistencia a la segregación se observó la distribución uniforme del árido grueso ni de exudación en el perímetro de la torta. El hormigón resultante envolvió perfectamente a las armaduras y se adaptó perfectamente a la geometría del molde cumpliendo holgadamente con los requisitos básicos de un HAC.

4.2.2 Resultados ensayos mecánicos

Los resultados del hormigón reciclado se exponen en Tabla 5 Resultados ensayos

En la Figura 7 Resultados autocontrol se muestra los ensayos de autocontrol y de las probetas realizadas en el día de la prueba industrial.

Tabla 5 Resultados ensayos mecánicos

Resultados ensayos de compresión (MPa)	Curado normalizado				
	Tipo	24 h	7 días	28 días	90 días
HR-45-0% (Control)		34	56	63	64
HR-45-100%		36	55	65	66

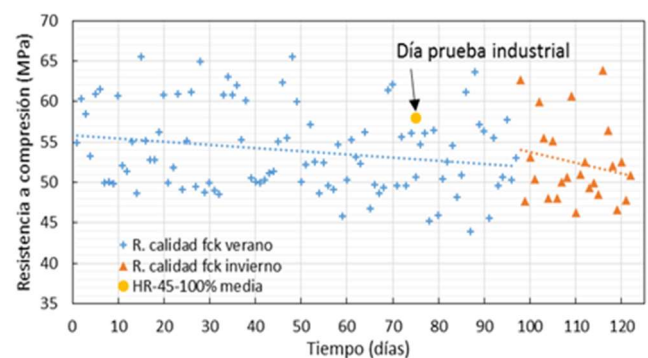


Figura 7 Resultados autocontrol

Los resultados de los ensayo tracción indirecta y módulo de elasticidad se muestran en la Tabla 6 y Tabla 7

Tabla 6 ensayo tracción indirecta (MPa)

Tipo	28D	90D
------	-----	-----

HR-45-0%	5.75	5.90
HR-45-100%	5.56	5.60

Tabla 7 Modulo elasticidad

Tipo	28D	90D
HR-45-0%	40.83	41.10
HR-45-100%	37.80	38.90

4.3 Resultados ensayos prueba industrial: Ensayos de vigas armadas.

4.3.1 Ensayo de flexión

La Figura 8 representa los resultados obtenido bajo carga continua de la viga elaborada con sustitución de un 100% de árido reciclado, del momento de fisuración, momento, momento de servicio, momento último, estos últimos teóricos obtenidos de un prontuario y el momento de rotura real de la viga manifestado por el cambio de inclinación de la gráfica. La relación entre el momento último y el de rotura suponen la reserva de seguridad. La figura 9 describe la evolución de la fisuración con el incremento de carga.

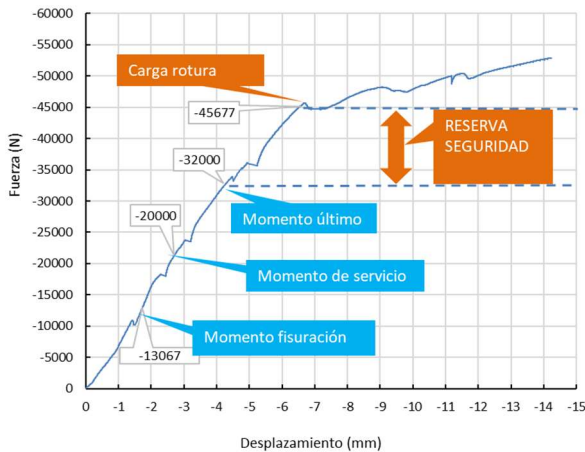


Figura 8 Grafica fuerza-deformación mostrando los momentos e fisuración, servicio, último y rotura.

Consideramos reserva de seguridad al margen de fuerza entre el momento último de la sección y el momento de rotura real obtenido en el ensayo.

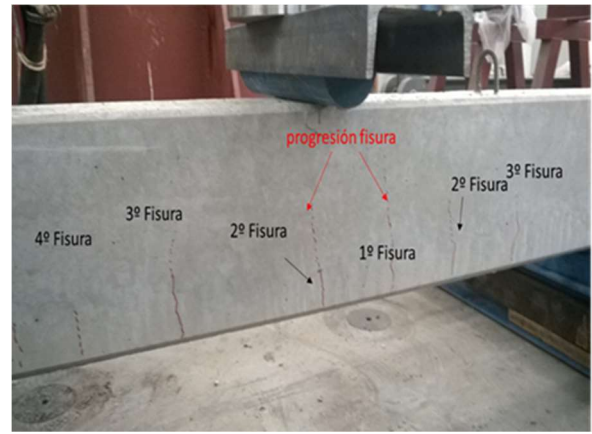


Figura 9 Descripción de las fisuración durante el ensayo

4.3.2 Ensayo de cortante

La viga objeto del experimento tiene una luz/canto de $100/24=4,16 > 2$, por tanto no cumple la condición de viga corta que es $l/h < 2$. En consecuencia el ensayo no se ajustará a flexión pura, presentando un comportamiento mixto flexión-cortante.

La Figura 10 representa los resultados obtenido bajo carga continua de la viga elaborada con sustitución de un 100% de árido reciclado, y los teóricos obtenidos del prontuario referenciado, estos son, contribución del hormigón, contribución de la armadura y cortante último. El cortante de rotura real de la viga manifestado por el cambio de inclinación de la gráfica. La relación entre el cortante último teórico y el de rotura suponen la reserva de seguridad. La figura 9 describe la evolución de la fisuración con el incremento de carga.

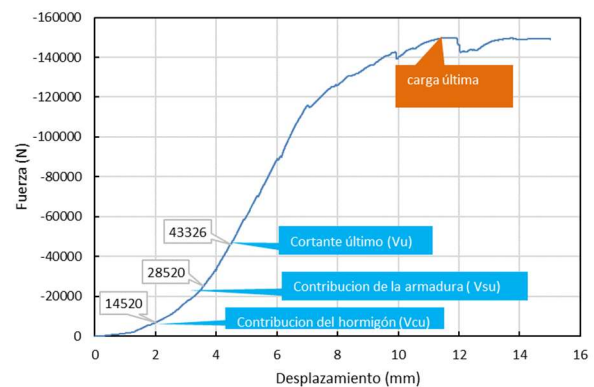


Figura 10 Grafica Fuerza-deformación mostrando los valores representativos de momentos y cortantes.

La Figura 11 representa la fisuración manifestada cerca del apoyo por efecto del cortante

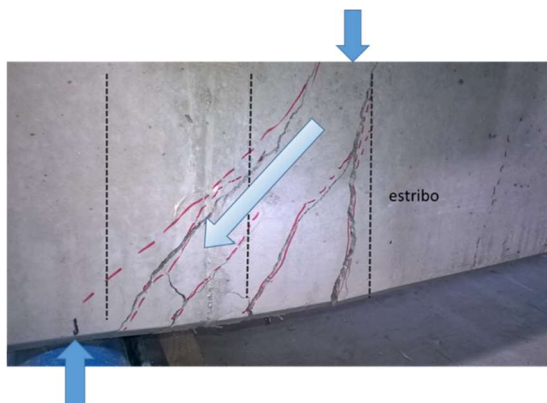


Figura 11 Proceso de fisuración por mecanismo de bielas de compresión cortante

4.3.3 Comparativo ensayo a flexión entre viga control HR-45-0% y viga con RAC HR-45-100%

Los resultados de superposición de la gráfica de rotura de la viga HR-45-0% y HR-45-100% se muestra en Figura 12.

Para el estado de flexo-compresión las deformaciones instantáneas resultantes se muestran en la gráfica carga-deformación para los dos hormigones ejecutados con árido natural y reciclado y son prácticamente paralelas. La respuesta de la gráfica con árido reciclado está por debajo de la del árido natural, lo que responde a una posible fisuración previa que afecta a la sección, además de dar respuesta a un menor módulo de elasticidad (E).

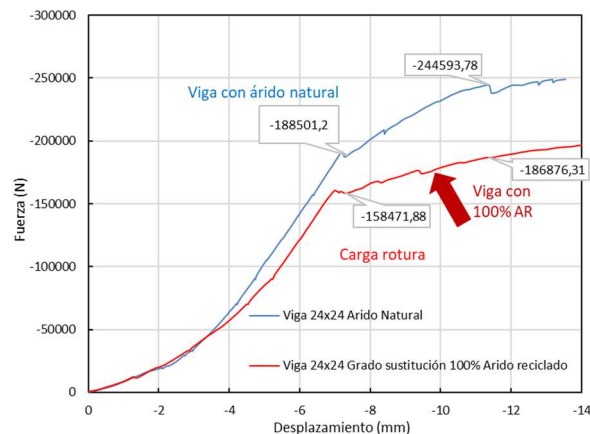


Figura 12 Grafico comparativo viga con HR-45-0% y viga con HR-45-100%

Comparativos de las vigas de sección 12x24, se exponen en el gráfico anterior. Se observa un mejor comportamiento elástico en la viga con árido natural a partir de que la sección está agotada. De forma distinta se comporta la viga con árido reciclado que a partir de la carga de agotamiento presenta un estado plástico que se manifiesta en la gráfica por una mayor inclinación.

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos se pueden obtener las siguientes conclusiones.

- El objetivo del presente trabajo reside en el aprovechamiento de los rechazos de los elementos prefabricado de una empresa perteneciente al sector de la construcción e incorporarlos de nuevo al proceso de fabricación.
- El empleo de áridos reciclados procedentes de productos prefabricados son de excelente calidad y repercute favorablemente y con gran rendimiento en las propiedades del nuevo hormigón.
- La resistencia mecánica suponen incluso una mejora de sus prestaciones incluso con un 100% de sustitución.

La prueba industrial realizada demuestra el excelente comportamiento de las piezas ensayadas con árido reciclado manifestado en los

amplios valores de reserva de seguridad obtenidos.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de la empresa de prefabricados Artepref SA dentro del grupo de empresas Gerardo de la Calle sita en Aranda de Duero provincia de Burgos (España) por su colaboración, por la información aportada y por las piezas que han formado parte del estudio experimental, adscritos del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería civil de la Universidad de Burgos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1. GEAR, *Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición*. Asociación Española de Gestores de Residuos de la Construcción., 2010.
2. Medina, C., et al., *Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships*. Construction and Building Materials, 2016. **105**: p. 480-486.
3. Thomas, C., et al., *Waste With sulfur from tested concrete specimens as aggregate for structural recycled concrete in:Wastes Solutions treatements and opportunities 1st international conference Composites Part B-Engineering*, 2011. **45**(1): p. 474-485
4. Medina, C., M. Frías, and M.I. Sánchez De Rojas, *Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate*. Construction and Building Materials, 2012. **31**: p. 112-118.
5. Thomas, C., et al., *Evaluation of the fatigue behavior of recycled aggregate concrete*. Journal of Cleaner Production, 2014. **65**: p. 397-405.
6. Thomas, C., et al., *Durability of recycled aggregate concrete*. Construcción and Building Material, 2013. **40**: p. 1054-65.
7. Setién, J. and C. Thomas, *Reutilización de residuos de Hormigón de una planta de prefabricados: Norten PH*. 2010, Universidad de Cantabria: Cantabria.
8. Pérez Benedicto, J.A., *Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad.*, in *Departamento de construcciones* 2011, Universidad Politécnica de Madrid: Madrid.
9. Thomas, C., J. Setién, and J.A. Polanco, *Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes*. Construction and Building Materials, 2016. **114**: p. 536-546.
10. UNE-EN-12350-2, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*. 2006.
11. UNE-EN-12350-8, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 8:Hormigón autocompactante. Ensayo de escurrimiento*. 2011.
12. Corres, H. and e. all, *Prontuario informatico hormigón estructural 3.1 EHE-08*. 2008, Universidad Politecnica de Madrid. ETS ICCP.