

UTILIZACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS E INDUSTRIALES EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES NO CONVENCIONALES

Línea Temática III: Investigación y compromiso social

*Javier García Martí¹, María Victoria Borrachero Rosado², Jorge Juan Payá Bernabeu³,
Daniel Alveiro Bedoya Ruiz⁴, José María Monzó Balbuena⁵*

(1) Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universidad Politécnica de Valencia (España).
Correo electrónico: jagarma1@iccp.upv.es

(2) Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universidad Politécnica de Valencia (España).
Correo electrónico: vborrachero@cst.upv.es

(3) Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universidad Politécnica de Valencia (España).
Correo electrónico: jjpaya@cst.upv.es

(4) Grupo de Ingeniería Sísmica y Sismología. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales (Colombia).
Correo electrónico: dabedoyar@unal.edu.co

(5) Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universidad Politécnica de Valencia (España).
Correo electrónico: jmmonzo@cst.upv.es

RESUMEN

La producción de cemento Portland implica un alto consumo energético y grandes volúmenes de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en un material caro y contaminante; a pesar de ello, su producción mundial crece de forma espectacular. En muchos casos este material se usa inadecuadamente; especialmente en aplicaciones que requieren bajas resistencias mecánicas, como en cimentaciones, morteros de recubrimiento y estabilización de suelos. Se estima que tan sólo el 20% de los usos del cemento Portland son técnicamente adecuados. En algunos casos se podría sustituir el cemento portland por mezclas de cal y puzolanas. En el presente trabajo se han ensayado la ceniza de cascarilla de arroz (RHA) y el catalizador de craqueo catalítico gastado (FC3R), ambos materiales residuales de carácter puzolánico. Se han preparado hormigones con relaciones Agua/Conglomerante = 0.8, RHA/Cal = 3, FC3R/Cal = 1 y Grava/Arena = 1.5, variando la relación Árido/Conglomerante entre 3.33 y 6.66 y el tiempo de curado entre 7 y 90 días. Posteriormente han sido ensayadas para obtener sus resistencias mecánicas, seleccionado las mezclas óptimas, y aplicado a la elaboración de bloques prefabricados con bloqueras autónomas, muy utilizadas en contextos de subdesarrollo.

Palabras clave: hormigón, puzolana, ceniza de cascarilla de arroz, catalizador de craqueo catalítico, reutilización de residuos.

1.- INTRODUCCIÓN

La obtención de cemento Portland para fabricar hormigón implica un alto consumo energético y grandes volúmenes de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en un material caro y contaminante. La industria del cemento, a escala mundial, tiene el 2% del consumo global de energía y el 5% del consumo global de energía industrial (Hendriks, 1998), generando aproximadamente una tonelada de CO₂ por cada tonelada de clínker dependiendo de la eficiencia de la planta. A pesar de ello, la producción mundial de cemento Portland crece de forma espectacular: los países en vías de desarrollo están en proceso de construir sus infraestructuras, y para esto necesitan inmensas cantidades de cemento Portland, aunque en muchos casos este material no sea idóneo y se use inadecuadamente (Vanderley, 2002). Especialmente en aplicaciones que

requieren bajas resistencias mecánicas, como en cimentaciones, morteros de recubrimiento y estabilización de suelos. Se estima que tan sólo el 20% de los usos del cemento Portland son técnicamente adecuados.

En algunos casos se podría sustituir el cemento portland por mezclas de cal y puzolana, como ya se hacía en la antigüedad con muy buenos resultados (*Day, 1992; Visvesvaraya, 1986*). Actualmente se está investigando la reutilización de residuos agrícolas e industriales de carácter puzolánico en hormigones, como el catalizador de craqueo catalítico gastado, la ceniza de cascarilla de arroz, la ceniza de bagazo de caña, el ladrillo molido o las más conocidas escoria de alto horno, cenizas volantes y humo de sílice (*Méndez, 2010*).

El empleo de estos conglomerantes no convencionales en vez de cemento Portland disminuye de forma significativa el coste medioambiental de la construcción, al reducir parte de la generación de CO₂ y explotación minera necesarias para la producción de cemento Portland, además de mejorar la gestión de los residuos reutilizados evitando su deposición en vertedero o abandono. Esto también supondrá una reducción en el coste económico del hormigón, haciéndolo muy recomendable para aplicaciones en las que la resistencia y trabajabilidad de las mezclas sean suficientes (*Martirena, 2004*). En los países en vías de desarrollo, el coste de los materiales de construcción en las viviendas de los sectores de menores recursos constituye la partida más importante del monto total de una vivienda (*Salas, 2002*); es por ello que el menor coste de estos materiales supone una ventaja muy significativa sobre los materiales de construcción convencionales.

Por otro lado, hay zonas de países en vías de desarrollo en las que se encuentra el problema de no disponer de una planta de fabricación de cemento Portland cercana, ni vías de comunicación adecuadas para su transporte asequible. En estos casos, cobra importancia la alternativa de instalar una planta (temporal o permanente) de producción de conglomerante: mientras que la fabricación de cemento Portland requiere de una gran planta y temperaturas en torno a 1.450°C, la fabricación de cal es posible a partir de una planta de producción pequeña y temperaturas de 800°C. Asimismo, en muchas de estas zonas podemos encontrar residuos agrícolas de carácter puzolánico, que mediante una incineración controlada constituyen materiales excelentes para mezclas conglomerantes (*Monzó, 2009*).

En el presente trabajo se han estudiado dos puzolanas diferentes, el catalizador de craqueo catalítico gastado y la ceniza de cascarilla de arroz, ambos materiales residuales. La ceniza de cascarilla de arroz posee un contenido de sílice de más del 90% (*Ordóñez, 2007*), la cual se combina con la cal apagada para formar silicatos de calcio hidratados, compuestos conglomerantes que dan resistencia a la mezcla. Por su parte, el catalizador de craqueo catalítico gastado posee contenido en sílice y alúmina superiores al 45% cada una (*Payá, 2003*), las cuales se combinan con la cal apagada para formar silicatos, aluminatos y aluminosilicatos de calcio hidratados, todos ellos de carácter conglomerante.

La ceniza de cascarilla de arroz es un residuo agrícola obtenido del proceso de combustión de la cascarilla de arroz, que tiene propiedades puzolánicas cuando se obtiene en unas condiciones de combustión controladas. Cada tonelada de arroz produce aproximadamente 200 kg de cascarilla de arroz, de los cuales quedan aproximadamente 40 kg de ceniza tras su combustión (*Mehta, 1978*). Ello supone un 4% de la producción de arroz, cifra nada despreciable puesto que su cultivo está ampliamente extendido en varios países en vías de desarrollo.

El catalizador de craqueo catalítico es un residuo industrial de carácter zeolítico, obtenido en el proceso de craqueo catalítico en las refinerías de petróleo. Muchos países poseen sus propias refinerías petrolíferas, con lo cual cobra relevancia la reutilización de este (hasta la fecha) desaprovechado residuo.

Dichas mezclas conglomerantes se aplicarán a la elaboración de bloques prefabricados con bloqueras autónomas, aptas para su uso en áreas sin electricidad y con posibilidades para autoconstrucción y/o creación de microempresas familiares. Con todo ello, se pretende hacer una pequeña aportación al objetivo global de resolver el déficit de vivienda digna en el mundo, generado por la pobreza extrema y los desplazamientos forzados a causa de conflictos armados.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El objetivo del trabajo consiste en analizar los beneficios de la utilización de residuos agrícolas e industriales de carácter puzolánico -ceniza de cascarilla de arroz y catalizador de craqueo catalítico gastado- en la elaboración de hormigones no convencionales, para su aplicación a elementos constructivos de bajo coste económico y medioambiental.

El alcance del proyecto comprenderá la dosificación, fabricación y ensayo de hormigones, así como el posterior análisis de su comportamiento y viabilidad para la fabricación de bloques no estructurales.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterización de los residuos locales proporcionados.
- Estudio de las propiedades mecánicas de mezclas cal-puzolana en función de la relación árido/conglomerante y el tiempo de curado.
- Utilización de las mezclas óptimas para la elaboración de bloques prefabricados con bloqueras autónomas, aptas para su uso en zonas sin electricidad. Estudio de sus propiedades mecánicas.

3. METODOLOGÍA

3.1. Materiales

Los hormigones ensayados están compuestos por mezclas binarias cal-puzolana -siendo las puzolanas ensayadas residuos de ceniza de cascarilla de arroz y catalizador de craqueo catalítico-, agua, grava y arena.

Se ha empleado una cal apagada comercial tipo CL90, suministrada por CALCASA S.A., con un 85% de contenido de hidróxido cálcico y un diámetro medio de 48 μm .

La ceniza de cascarilla de arroz (en adelante RHA, por sus siglas en inglés de Rice Husk Ash) ha sido proporcionada por la empresa DACSA S.A., procedente de un proceso de cogeneración. Posee un 92% de contenido en sílice y un valor de pérdida al fuego de 8.5%, y ha sido molida hasta alcanzar un diámetro medio de partícula de 12.7 μm .

El catalizador de craqueo catalítico usado (en adelante FC3R, por sus siglas en inglés de Fluid Catalytic Cracking Catalyst Residue) ha sido suministrado por la empresa OMYA CLARIANA S.L. Posee un contenido de 46% en sílice y un 47.5% en alúmina, una pérdida al fuego del 0.5% y un diámetro medio de partícula de 17 μm .

Por último, se han empleado en las mezclas grava 4-7 mm, arena y agua corriente.

3.2. Equipos

Para la molienda de RHA se empleó un molino industrial de la empresa BALALVA S.L.

Para la fabricación de las probetas, se empleó una amasadora de 40 litros de capacidad, moldes de acero de cuatro cubos de 100 mm de lado cada uno y una mesa vibradora para la compactación.

Las probetas se conservaron en cámara húmeda para su apropiado curado, y se empleó una prensa hidráulica para el ensayo de resistencia a compresión simple.

Para la fabricación de los bloques se emplearon dos bloqueras autónomas, cuya descripción se detalla a continuación. El ensayo de resistencia a compresión simple se realizó en una prensa hidráulica, con la ayuda de dos placas de acero de deformación despreciable para adaptar las caras.

La primera bloquera empleada no requiere ninguna fuente de alimentación externa (ver figura 1), siendo exclusivamente manual todo el proceso de fabricación de los bloques. Esta se coloca bien lubricada y con la cara abierta hacia arriba, por la que se introduce la mezcla en varias tandas entre las cuales se compacta con una varilla de acero y un mazo de goma. Una vez completado el bloque hasta la parte superior, se enrasa con una llana, se da la vuelta y se levanta con fuerza ayudándose de las asas.

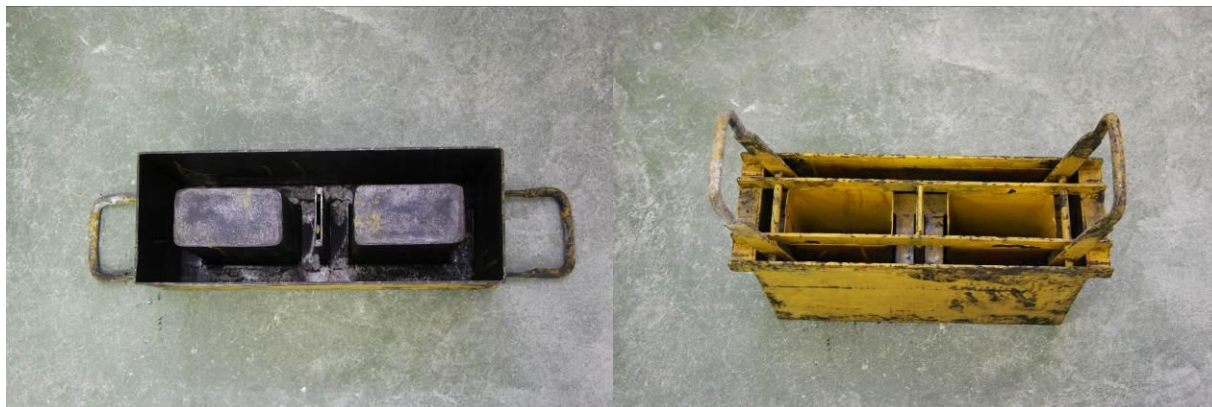


Figura 1.- Bloquera manual

La segunda bloquera, más sofisticada, posee un vibrador portátil, que se acopla en el lateral, con alimentación por medio de una batería (ver figura 2). De forma análoga a la anterior, se coloca bien lubricada y con la cara abierta hacia arriba, por la que se introduce la mezcla en varias tandas entre las cuales se compacta poniendo en marcha el vibrador. Una vez completado el bloque hasta la parte superior, se enrasa con una llana, se retira el vibrador, se da la vuelta y se levanta con fuerza ayudándose de las asas.



Figura 2.- Bloquera de vibrado portátil con alimentación mediante batería

3.3. Métodos

Todos los procedimientos han sido realizados en los laboratorios del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politécnica de Valencia.

La fabricación de las probetas, que incluye amasado, vaciado, vibrado, desmoldeo y curado, así como el ensayo de resistencia a compresión simple, han sido realizados siguiendo las normas UNE-EN 12350-1:2009, UNE-EN 12390-1:2001, UNE-EN 12390-2:2009 y UNE-EN 12390-3:2009/AC:2011 para probetas cúbicas de 100 mm de lado. Se ha estudiado un total de ocho series; cuatro mezclas cal-RHA y otras cuatro mezclas cal-FC3R. Las variables de análisis escogidas han sido la relación Árido/Conglomerante (variando desde 3.33, una

mezcla muy rica en conglomerante, hasta los 6.66, una mezcla con mucho árido, pasando por las intermedias 4.44 y 5.55) y el tiempo de curado (de 7, 28, 60 y 90 días). Se busca maximizar la relación Árido/Conglomerante, siempre y cuando la mezcla posea suficiente resistencia y trabajabilidad, reduciendo de este modo el coste económico de la mezcla. El resto de parámetros ya habían sido optimizados en trabajos previos del grupo de investigación: relaciones Agua/Conglomerante = 0.8 (compromiso entre la trabajabilidad de la mezcla y su resistencia), RHA/Cal = 3 (al tratarse de una puzolana reactiva a tiempos medios y largos), FC3R/Cal = 1 (al ser una puzolana muy reactiva a tiempos cortos) y Grava/Arena = 1.5 (compromiso entre la demanda de agua, resistencia y trabajabilidad).

Para la fabricación de bloques con la bloquera manual y la bloquera de vibrado portátil con alimentación mediante batería, se siguieron las instrucciones aportadas junto a los aparatos y descritas en el apartado de equipos. Los ensayos de resistencia a compresión simple se realizaron siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN 772-1:2011, incluyendo el refrentado de las caras con mortero de cemento. Se han realizado un total de cuatro series, con dos dosificaciones optimizadas (RHA y FC3R con Árido/Conglomerante = 5.55) y las dos bloqueras (manual y de vibrado portátil mediante batería).

4. RESULTADOS

Se muestran a continuación los resultados de los distintos ensayos:

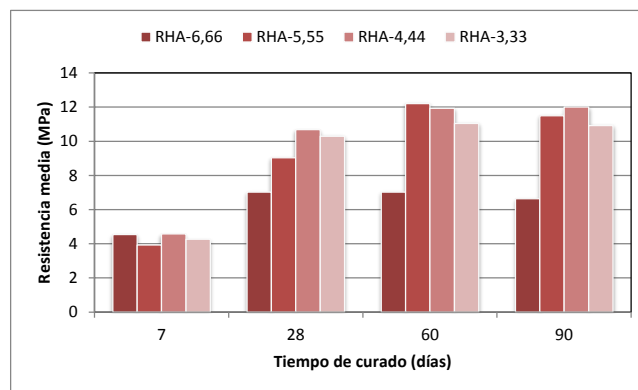


Figura 3.- Resistencia de las mezclas cal-RHA

En la figura 3 se representa la resistencia media a compresión simple (en MPa) de cada serie con RHA frente a su tiempo de curado (en días), observándose en general un aumento de la resistencia conforme aumenta el tiempo de curado. A 7 días puede observarse como todas las mezclas presentan resistencias similares, en torno a 4 MPa, ello es debido a que apenas ha comenzado la reacción puzolánica. A 28 días se aprecia un incremento de la resistencia notable debido al mayor desarrollo de la reacción puzolánica, a la vez que una diferenciación entre las distintas relaciones Árido/Conglomerante, salvo para la 3.33 que no muestra diferencias significativas con la 4.44. El aumento observado de la resistencia conforme disminuye la relación Árido/Conglomerante puede explicarse debido a un mayor contenido de conglomerante en el hormigón. A 60 y 90 días de curado los hormigones con una relación 6.66 no incrementan su resistencia con respecto a los 28 días de curado, lo que pone de manifiesto que la reacción puzolánica se ha detenido probablemente al consumirse la cal presente. Los hormigones con relaciones 4.44 y 5.55, siguen aumentando su resistencia hasta los 60 días de curado, igualándose ambas para este tiempo de curado y manteniéndose constante para los 90 días de curado, obteniéndose una resistencia próxima a los 12 MPa. Los resultados ponen de manifiesto que la relación Árido/Conglomerante óptima sería de 5.55, teniendo en cuenta que no existen diferencias significativas con la relación 4.44, y por el contrario si supondría un menor coste económico y medioambiental al tener menor cantidad de conglomerante.

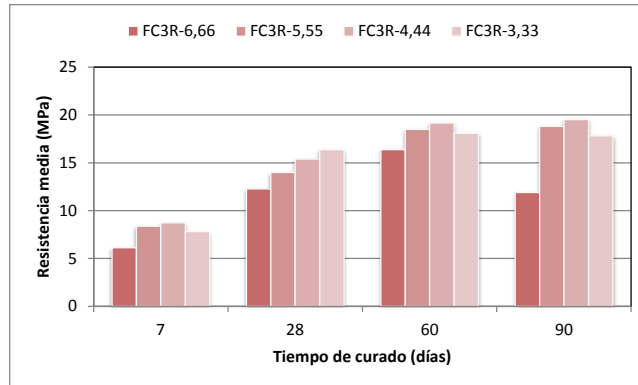


Figura 4.- Resistencia de las mezclas cal-FC3R

En la figura 4 se representa la resistencia media a compresión simple (en MPa) de cada serie con FC3R frente a su tiempo de curado, observándose en general, al igual que en los hormigones con RHA, una aumento de la resistencia conforme aumenta el tiempo de curado. Cuando se compara con los resultados obtenidos para la RHA, se constata que para todos los tiempos de curado, los hormigones con FC3R presentan resistencias superiores a los que contienen RHA, ello es debido a la mayor reactividad puzolánica del FC3R. Los resultados muestran que, si bien la relación Árido/Conglomerante 4.44 presenta las resistencias más elevadas para 90 días de curado, la diferencia con respecto a la relación 5.55 es muy pequeña, y esta última relación supondría un menor coste económico y medioambiental, al tener un menor contenido en conglomerante, por este motivo podríamos considerar la relación 5.55 como óptima. Por último, a 90 días puede apreciarse un estancamiento de las resistencias en todas las series, lo que pondría de manifiesto la detención de la reacción puzolánica, probablemente por el agotamiento de la cal presente, al igual que ocurriría con los hormigones con RHA. Los valores anómalos obtenidos para los hormigones con una relación Árido/Conglomerante de 6.66 a 90 días de curado son difícilmente explicables, consideramos que dada la baja trabajabilidad que presentan estas mezclas debió producirse una mala compactación de las mismas. En la figura 5 se muestra la tipología de probetas obtenidas, la blanca corresponde a la mezcla cal-FC3R y la negra a cal-RHA.



Figura 5.- Probetas ensayadas

En los estudios realizados con ambas puzolanas, se observó que las relaciones Árido/Conglomerante 6.66 producían hormigones con una trabajabilidad insuficiente que dificultaba la compactación de las probetas, por lo que se consideró descartar esta relación para las siguientes experiencias. A la vista de los resultados anteriores, se han escogido las mezclas cal-RHA y cal-FC3R con relación Árido/Conglomerante = 5.55, que son las mezclas con un menor coste económico y medioambiental, de entre las que cumplen los requisitos de resistencia mecánica y trabajabilidad. Con cada una de ellas se hará una serie de bloques con bloquera manual (RHA-man y FC3R-man) y otra con bloquera de vibrado portátil con alimentación mediante batería (RHA-bat y FC3R-bat);

cabe destacar que la mezcla cal-FC3R es la de mayor resistencia mecánica, mientras que la mezcla cal-RHA es la que mayor trabajabilidad posee. Posteriormente, se realizaron los ensayos de resistencia a compresión simple tras 21 días de curado al aire, con los bloques cubiertos por una lámina de plástico impermeable. En la tabla 1 se presentan a los resultados de dichos ensayos y en la figura 6 la tipología de bloques elaborados y el refrentado de los mismos.

Tabla 1.- Resistencia a compresión de los bloques prefabricados

Serie	Bloque1	Bloque2	Bloque3	Bloque4	Bloque5	Bloque6	Media	Coefficiente de variación
FC3R-bat	9.4	9.1	9.1	9.1	9.0	7.8	8.9	6.1%
RHA-bat	7.6	7.3	6.9	6.9	5.8	3.8	6.4	21.7%
FC3R-man	4.4	3.6	3.3	3.3	3.2	3.0	3.5	14.1%
RHA-man	4.9	4.7	4.0	3.6	3.3	2.9	3.9	20.0%



Figura 6.- Bloques ensayados

El análisis de los resultados muestra la presencia de un dato claramente anómalo, en el Bloque 6 de la serie RHA-bat, que se desvía en un 40% de la media, probablemente haya habido un fallo en el procedimiento de rotura a compresión simple. Eliminando este dato, se obtiene para la serie una media de 6.9 MPa y un coeficiente de variación del 9.8%, mucho más coherentes. Teniendo en cuenta esta consideración, se desprende que coeficiente de variación de los bloques manuales es mayor que el de los bloques vibrados (14.1 y 20.0% frente a 6.1 y 9.8%), lo cual podría explicarse dada la difícil homogeneización en el compactado manual por picado.

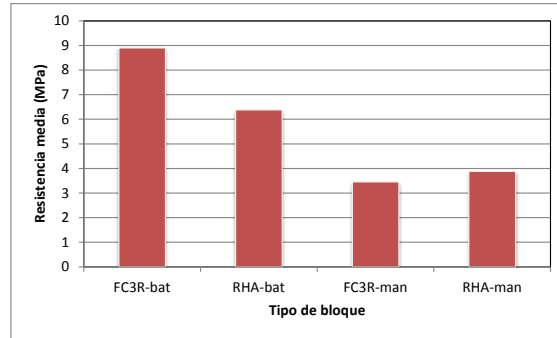


Figura 7.- Resistencia de los bloques prefabricados

En la figura 7 se representa la resistencia media a compresión simple (en MPa) de cada tipo de bloque (según la puzolana y bloquera empleadas). Se observa como en los bloques vibrados se ha conseguido una adecuada compactación, destacando la resistencia de la mezcla cal-FC3R con casi 9 MPa, mientras que en los bloques compactados manualmente, la compactación ha resultado insuficiente lo que se ha traducido en una baja resistencia mecánica para ambas familias de bloques con RHA y FC3R. Cabe destacar el hecho, de que si bien las resistencias mecánicas obtenidas para los hormigones con FC3R eran significativamente superiores (ver figura 4) a los hormigones con RHA (ver figura 3), en las resistencias obtenidas para los bloques se invirtió la tendencia, lo que pondría de manifiesto la gran influencia de la compactación de los bloques en la resistencia mecánica final. Cuando se produce una buena compactación, como es en el caso de la bloquera alimentada con batería, los valores de resistencia mecánica de hormigones y bloques siguen la misma tendencia, como cabría esperar (ver figura 8).



Figura 8.- Bloques vibrados de FC3R y detalle bloque manual de RHA

A la vista de los resultados, puede concluirse que los bloques ensayados cumplen las recomendaciones de una resistencia mínima para bloques no estructurales de aproximadamente 3 MPa (Day, 1992). Los bloques elaborados con la bloquera de vibrado portátil con alimentación mediante batería superan ampliamente dicha resistencia con tan solo 21 días de curado. Los bloques fabricados con la bloquera manual presentan una resistencia mucho más próxima a este valor, que podría mejorarse optimizando el procedimiento de compactación manual o aumentando el tiempo de curado, si bien han resultado ser igualmente aptos.

5. CONCLUSIONES

De las dos puzolanas estudiadas FC3R y RHA, el FC3R presentó una mayor reactividad puzolánica, lo que supuso mayores resistencias mecánicas para todos los tiempos de curado estudiados. En ambos casos se produjo una estabilización de la resistencia a partir de los 60 días de curado, lo que pondría de manifiesto la detención de la reacción puzolánica, por agotamiento de la cal. La relación óptima Árido/Conglomerante considerada para los hormigones preparados con las distintas puzolanas fue 5.55.

De forma general se puede concluir que los hormigones elaborados a partir de conglomerantes formados por mezclas cal-FC3R y cal-RHA, pueden ser utilizados en usos que no requieran elevadas resistencias a compresión, particularmente en la elaboración de bloques no estructurales, elaborados con bloquera de vibrado portátil con alimentación mediante batería o bien con bloquera manual.

La utilización de residuos agrícolas e industriales con carácter puzolánico como el FC3R y la RHA, se revela como una opción interesante, en especial en los países en vías de desarrollo, para reducir el coste económico y medioambiental de los materiales de construcción.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Cooperación al Desarrollo y Solidaridad de la Conselleria de Inmigración y Ciudadanía de la Generalitat Valenciana por la financiación de proyecto *Utilización de cenizas de cáscara de arroz en la elaboración de materiales de construcción no convencionales para viviendas de interés social en el Valle del Cauca (Colombia) (3018/2009)*.

A la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) que financia la Acción Preparatoria de la Convocatoria de Ayudas para Programas de Cooperación Interuniversitaria e Investigación Científica *Utilización de ceniza de cáscara de arroz (CCA) en la elaboración de materiales de construcción no convencionales para viviendas de bajo coste económico y ecológico: asesoramiento y capacitación a microempresarios (AP/35235/11)*.

Al Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universidad Politécnica de Valencia por la financiación del proyecto Adsideo-Cooperación 2010, *Diseño de sistemas de combustión a partir de residuos agrícolas para uso en países en vías desarrollo, optimizando la producción energética y las propiedades puzolánicas de la ceniza obtenida en la combustión para su uso en materiales de construcción no convencionales*.

A la empresa Maicerías Españolas S.A. (DACSA) por su participación en los proyectos mencionados, así como por el suministro periódico de muestras de RHA para el desarrollo de las investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Day, R. L. (1992): *Pozzolans for use in low-cost housing. A state of the art report*. Research Report CE92-1, University of Calgary, Alberta, Canadá, pp. 87-95.
- Hendriks, C. A. et al. (1998): *Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry*. Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Interlaken, August 30-September 2, 1998.
- Martirena, J. F. (2004): *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clinker de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa*. Tesis Doctoral, Universidad Central Marta Abreu de las Villas (UCLV).
- Mehta, P. K. (1978): *Siliceous ashes and hydraulic cements prepared there from*, U.S.Patent.

- Méndez, R. et al. (2010): *Optimización de mezclas cal-puzolana destinadas a la construcción de materiales prefabricados no convencionales*. II Simposio Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción, Valencia.
- Monzó, J. et al. (2009): *Materiales y tecnologías constructivas para el desarrollo humano: el uso de la ceniza de cascarilla de arroz*. Actas de las Jornadas sobre Tecnología para el Desarrollo Humano, Ayuda Humanitaria y Emergencias. Centro de Cooperación al Desarrollo. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- Ordóñez, L. (2007): *Reutilización de la Ceniza de Cáscara de Arroz como material de Construcción: Valoración y Optimización de sus Propiedades Puzolánicas*. Tesis Doctoral. Valencia: Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia.
- Payá, J. et al. (2003): *Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue (FCC). Thermogravimetric analysis studies on FCC-Portland cement pastes*. Cement Concrete Research 2003; 33:603–9.
- Salas, J. (2002): *Latinoamérica: Hambre de vivienda*, Boletín del Instituto de la Vivienda, vol.17, nº 045, pp. 58-69.
- Vanderley, M. J. (2002): *On the sustainability of the Concrete*. Extended version of the paper commissioned by UNEP Journal Industry and Environment.
- Visvesvaraya, H. C. (1986): *Recycling of agricultural wastes with special emphasis on rice husk ash. Use of vegetable plants & their fibers as building materials*. Joint Symposium, (pág. 85). Bagdad.