

Utilización de residuos en hormigones geopoliméricos para uso en bloques de bajo coste económico y medioambiental.

Use of wastes in geopolymer concrete for use in low economic and environmental cost blocks.

Javier Lizán,

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de Valencia
jaliji@cam.upv.es

Noelia Bouzón

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de Valencia
noelia_bouzon@hotmail.com

Jordi Payá

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de Valencia
jjpaya@cst.upv.es

M^a Victoria Borrachero

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de Valencia
vborrachero@cst.upv.es

Mercedes Bonilla

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de Valencia
mbonilla@cst.upv.es

José María Monzó

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de Valencia
jmmonzo@cst.upv.es

Resumen

La activación alcalina es una reacción química de polimerización inorgánica donde un material sólido de origen silicoaluminoso (precursor), mezclado con una solución de elevada alcalinidad (activador), forma un material cementante llamado geopolímero, cuya producción implica una menor emisión de gases de efecto invernadero respecto al cemento Portland. Los geopolímeros pueden considerarse conglomerantes de bajo coste cuando se utilizan residuos como precursores y activadores, y tendrían interés en contextos de subdesarrollo donde se produjesen estos residuos. El objetivo del trabajo es la preparación de hormigones geopoliméricos para elaborar bloques de bajo coste económico y medioambiental, a partir de catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) como precursor, y mezclas de ceniza de cáscara de arroz (CCA) e hidróxido sódico como activador alcalino.

Palabras clave: Geopolímeros, activación alcalina, materiales no convencionales, CCA, FCC

Abstract

The alkali activation is a chemical reaction where a solid inorganic polymerization silicoaluminous source material (precursor), mixed with a solution of high alkalinity (activator) forms a cementitious material called geopolymer, whose production involves a lower emission of greenhouse gases compared to Portland cement. The geopolymer binders can be considered low cost when wastes are used as precursors and activators, and would be interested in developing contexts where such waste is produced. The objective of this work is the preparation of geopolymers concrete blocks to develop low economic and environmental cost, from used catalytic cracking catalyst (FCC) as precursor, and mixtures of rice husk ash (RHA) and sodium hydroxide as alkaline activator.

Key words: Geopolymers, alkali activation, non-conventional materials, RHA, FCC

1. Introducción

Según las Naciones Unidas, más de 200 millones de personas carecen de vivienda y 1.500 millones residen en infraviviendas. Dicho déficit puede explicarse mediante dos causas: el crecimiento de la tasa de urbanización y el predominio del sector informal. Si nos centramos en el caso de Latinoamérica, el primero fue entre los años 1960 y 2000 del 50% al 73,4%, mientras que el sector informal, basado en la autoconstrucción, ha crecido en los últimos 30 años y representa entre el 30% y el 80% de la actividad constructiva, dependiendo del país.

La comisión Económica para América Latina, cifró el déficit habitacional del Área en 25,7 millones de acciones de rehabilitación imprescindibles para mantener en uso el stock de viviendas y en 27,9 millones, el número de nuevas viviendas necesarias, déficit propiamente dicho. Adoptando una medida de cinco personas por alojamiento, se llega a la conclusión de que 130 millones de latinoamericanos habitan en alojamientos precarios, y que 140 millones carecen de vivienda (Salas 2002).

Por otra parte, hay que tener en cuenta que el coste económico asociado a la vivienda será muy distinto dependiendo del contexto. Así, los materiales de construcción en países desarrollados constituyen una inversión que oscila en torno al 50% del coste total de la construcción. En contextos de subdesarrollo, la elección de dichos materiales adquiere una relevancia mucho mayor, ya que su valor puede superar el 80% del coste total, debido a los requisitos relativamente bajos para otros insumos, tales como equipos, instalaciones y conocimientos especializados (UN-HABITAT 1985). En algunos proyectos de cooperación al desarrollo basados en la autoconstrucción de viviendas o infraestructuras por los propios beneficiarios, el coste de los materiales de construcción puede llegar hasta el 100% del coste total, lo que pondría de manifiesto de forma todavía más rotunda si cabe, la relevancia del coste económico de los materiales de construcción.

Además del coste económico, otro factor clave en la elección de materiales de construcción en contextos de subdesarrollo es el uso de materiales localmente disponibles que, además, tengan potencial para el desarrollo socioeconómico de la población y sean sustentables.

Centrándonos en este último factor, el respeto al medio ambiente, cabe señalar que el cemento Pórtland ha resultado ser uno de los principales responsables de la degradación ambiental del planeta porque, siendo el material industrial más consumido, su proceso productivo implica la explotación intensiva de recursos no renovables (materias primas y combustibles) y un elevado consumo de energía (874Kcal/kg de clínker de cemento Pórtland), además de la emisión de significativos volúmenes de gases de efecto invernadero, uno de los principales agentes causantes del calentamiento global.

Podemos encontrar diversas alternativas para minimizar dicho impacto (Mahasenan et al 2003, Gartner 2004, Szabó et al 2006, Damtoft et al 2008, Barker et al 2009), como el uso de combustibles alternativos en el proceso de producción del cemento Pórtland para reducir las emisiones de CO₂ asociadas a los combustibles fósiles o la sustitución parcial de cemento Pórtland por adiciones minerales de residuos, tanto en la producción de morteros como de hormigones, mejorando incluso las propiedades finales del conglomerante, además de presentar ventajas en los ámbitos ecológico, social, económico y tecnológico.

Sin embargo, para alcanzar el objetivo acordado por la comunidad internacional para el año 2050, consistente en reducir las emisiones de CO₂ en un 80% respecto al año 1990 (COP15 2009), es necesario un mayor avance tecnológico.

En esa línea podemos encontrar los materiales geopoliméricos, que pueden significar un paso más en la sustitución del cemento Pórtland, llegando a reemplazarlo por completo. Un geopolímero es un material cementante formado mediante un proceso de activación alcalina, esto es, una reacción química de polimerización inorgánica entre un material sólido de origen silicoaluminoso (que llamaremos *precursor* o *catalizador*), mezclado con una solución de elevada alcalinidad (llamado *activador*) (Van Wazer 1970, Davidovits 1991, Davidovits 2008).

En el actual contexto de cambio climático, los conglomerantes geopoliméricos presentan la gran ventaja de reducir notablemente la emisión de CO₂ (Shi et al 2011), pudiendo llegar a disminuirla en algunos casos hasta en un 80% respecto al cemento Pórtland (Gartner 2004), además de aportar rendimientos comparables a los conglomerantes de cemento Pórtland.

En la investigación que se presenta, se han utilizado residuos disponibles en contextos de subdesarrollo como material precursor, pero también, y lo que resulta más novedoso en este campo, como activador al ser mezclados con soluciones alcalinas, potenciando las ventajas medioambientales y económicas de los geopolímeros.

En concreto, se ha utilizado catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) como precursor, y mezclas de ceniza de cáscara de arroz (CCA) e hidróxido sódico como activador alcalino. El FCC, con una baja demanda de agua, supone un alivio de vertederos debido a su reutilización y un evidente menor valor monetario, presentando así un bajo coste ambiental y económico en comparación a otros precursores habituales como el metacaolín.

El activador más común en los conglomerantes geopoliméricos es una mezcla de agua, hidróxido sódico y silicato sódico. En este proyecto se ha sintetizado el silicato sódico a partir de mezclas de ceniza de cáscara de arroz (en adelante CCA) e

hidróxido sódico, mantenidas a 65°C durante 24 horas, dados los buenos resultados de estudios anteriores (Bouzón et al 2014). Cabe destacar el potencial de la CCA como fuente de sílice, ya que presenta entre el 87% y el 97% de su composición (Ordóñez 2007), mayoritariamente en estado amorfo. La CCA reacciona con el NaOH generando silicato sódico que, junto con el NaOH sobrante de la reacción, forma la solución activadora.

Por lo expuesto hasta ahora, queda claro que la presente investigación tiene un doble objetivo: reducir tanto el coste económico como el coste medioambiental de los materiales estudiados. Este doble objetivo abre la posibilidad del uso de estos materiales en contextos de subdesarrollo en los que se generen como residuos la CCA y el FCC.

Se presentan los resultados obtenidos en la preparación de hormigones geopoliméricos para la elaboración de bloques de bajo coste económico y medioambiental, a partir de catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) como precursor, y mezclas de ceniza de cáscara de arroz (CCA) e hidróxido sódico como activador alcalino.

2. Materiales y metodología

En la fabricación de los hormigones se utilizó agua corriente y árido calizo: gravas de tamaño 4/6 y arena machacada con una humedad media del 3%.

El FCC utilizado como precursor de la activación alcalina ha sido suministrado por la empresa Omya Clariana S.L., con un 44% de SiO₂ y un 46% de Al₂O₃.

En la preparación de las soluciones alcalinas fue utilizado hidróxido sódico fabricado en perlas por la empresa Suavizantes y Plastificantes Bituminosos, S.L. y con una pureza superior al 98%.

La CCA, suministrada por la empresa Maicerías Españolas DACSA S.A. y con un contenido en Sílice del 90%, se utilizó como materia prima para la síntesis de silicato sódico.

Tanto en la fabricación de probetas como de bloques, se utilizó una hormigonera de eje vertical con tambor giratorio y una capacidad de 100 litros.

En la determinación de la resistencia a compresión simple de probetas y bloques se utilizó una prensa servocontrolada Ibertest, modelo MEH-3000-LCMD2W, de 3000 kN.

Se utilizaron moldes para fabricar probetas cúbicas de dimensiones 100×100×100 mm³, además de mesa vibratoria y curado en cámara húmeda.

Para la fabricación de bloques huecos se utilizó una bloquera autónoma Parry Associates, modelo BLP 80 (ver Figura 1), de dimensiones 100×390×190 mm, compuesta por un molde exterior, un molde interior acoplable y una máquina vibratoria de 12 V conectada a batería, que se acopla al molde exterior para facilitar la vibración del hormigón (Parry and Associates 1992). Se trata de un bloquera cuyo uso está muy extendido en países en vías de desarrollo.

Figura 1 Bloquera de vibrado portátil con alimentación mediante batería.



Fuente: elaboración propia.

La solución activadora se colocó en el baño termostático a $65\pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas agitándola ocasionalmente para su homogenización.

La fabricación, vibrado, enrasado, desmoldado, curado y resistencia a compresión de probetas se realizó conforme a las normas UNE-EN 12390-2 (UNE-EN 2009a) y UNE-EN 12390-3 (UNE-EN 2009b).

En el caso de los bloques, el hormigonado se realizó siguiendo el manual de la propia bloquera (Parry and Associates 1992). La compactación durante el hormigonado se realizó mediante la máquina vibratoria acoplada al molde, y el curado de los bloques se dio en ambiente de laboratorio, con una humedad relativa media de aproximadamente 60%. La obtención de la resistencia a compresión se realizó según la norma UNE-EN 772-1 (UNE-EN 2011). Los bloques definitivos pueden observarse en la Figura 2.

Figura 2 Bloques fabricados



Fuente: elaboración propia.

Se diseñaron las series A1, A2, A3 y A4, con una relación árido/conglomerante de 3,33; 4,44; 5,55 y 6,66; respectivamente. En todos los casos, la relación agua/conglomerante fue 0,6 (compromiso entre la trabajabilidad de la mezcla y su resistencia); excepto en la serie A4, que se añadió agua durante el amasado para conseguir una mezcla más homogénea, alcanzándose una relación agua/conglomerante de 0,66. Se busca maximizar dicha relación, siempre y cuando la mezcla posea suficiente resistencia y trabajabilidad, con el objetivo de reducir el coste económico y medioambiental asociado al uso de conglomerante.

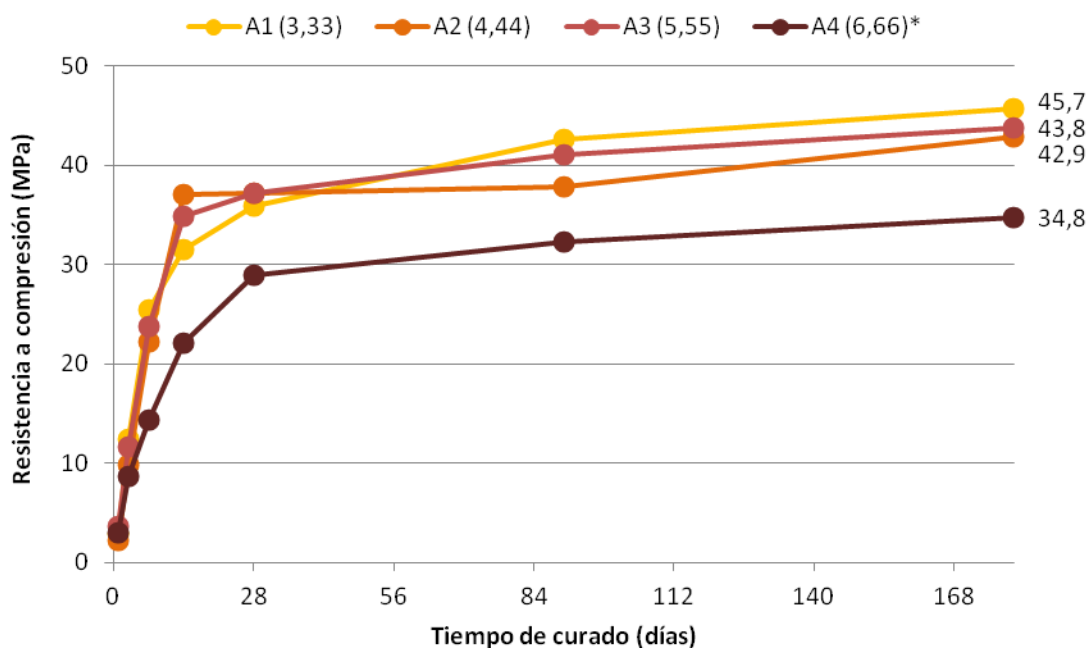
El resto de parámetros fueron optimizados en trabajos previos del grupo de investigación: relación grava/arena de 1,5 (compromiso entre la demanda de agua, resistencia y trabajabilidad) y cantidades de CCA e NaOH para la preparación de la solución activadora.

3. Resultados

Influencia de la relación árido/conglomerante sobre la resistencia mecánica del hormigón.

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión obtenidos, para edades de rotura comprendidas entre 1 día y 180 días, se muestran gráficamente en la Figura 3.

Figura 3 Resistencia a compresión de probetas cúbicas para distintas relaciones árido/conglomerante (* relación agua/conglomerante 0,66).



Fuente: elaboración propia.

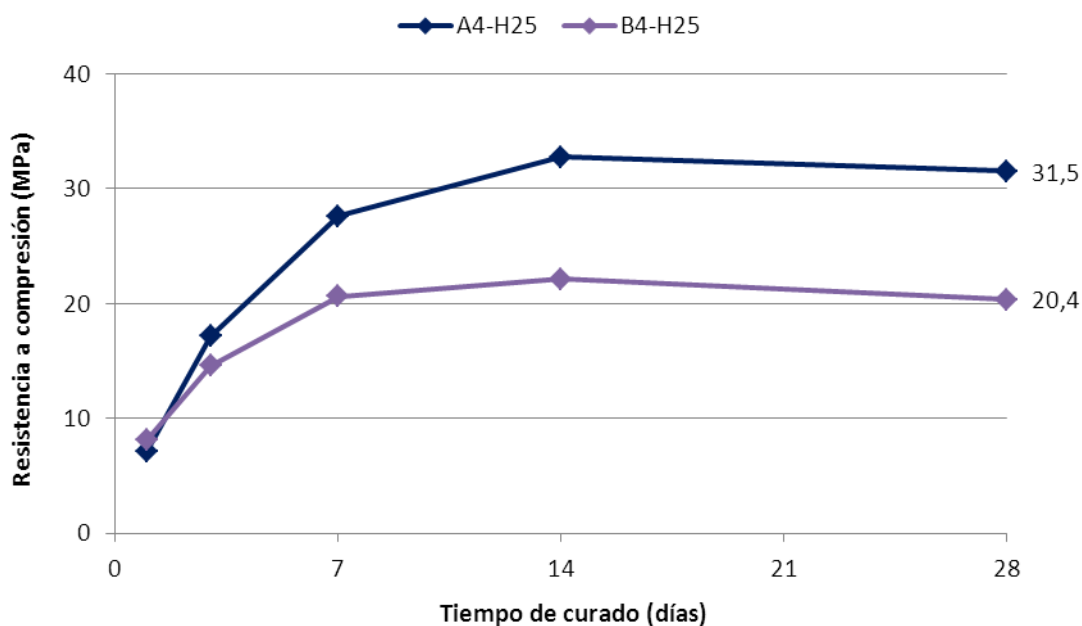
No se observaron diferencias significativas entre las series A1, A2 y A3, pese a la variación en sus relaciones árido/conglomerante (de 3,33 hasta 5,55; respectivamente), que supuso una reducción muy importante en las cantidades de

hidróxido sódico y CCA utilizadas. Sí hay una diferencia significativa entre aquéllas y la última serie (A4), debido a una mayor relación agua/conglomerante (0,66) en la serie A4, consecuencia de la adición de agua durante el amasado para mejorar su trabajabilidad.

Resultados de los ensayos a compresión de los bloques: Se fabricaron bloques de serie B4 con diferentes cantidades de agua añadida durante el amasado, seleccionando la mezcla B4-H25 (con el 25% del agua que se añadió durante el amasado de la serie A4, que tomamos como referencia) para la fabricación de los bloques definitivos, siendo excesiva la adherencia en las mezclas con menor cantidad de agua (0%), y elevada la trabajabilidad en las mezclas con mayor cantidad de agua (50%). Por lo que se optó por la series B4-H25 y A4-H25, que presentaban una relación agua/conglomerante de 0,615.

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión de dicho hormigón hasta la edad de 28 días se presentan gráficamente en la siguiente Figura 4.

Figura 4 Resistencia a compresión de los bloques definitivos B4-H25 y su correspondiente amasada de probetas cúbicas 10x10x10 cm³ A4-H25



Fuente: elaboración propia.

Los resultados del ensayo a compresión a los 28 días de edad confirmaron la aptitud de los bloques fabricados frente a esfuerzos a compresión, alcanzando una resistencia media de 20,4 MPa.

4. Conclusiones

Las pruebas preliminares realizadas para bloques con una relación árido/conglomerante de 6,66 y con distintas relaciones agua/conglomerante, pusieron de manifiesto que la dosificación óptima, debido a su adherencia media y trabajabilidad baja, era la B4-H25, con una relación agua/conglomerante de 0,615. La resistencia a compresión media a los 28 días de curado fue de 20,4 MPa. El coste medioambiental de los bloques geopoliméricos sería muy inferior al de los bloques convencionales. Sin embargo, el coste económico sería superior, debido al coste energético necesario para favorecer la reacción química entre la CCA y el hidróxido sódico, y también al coste del hidróxido sódico. Para reducir dichos costes se propone para futuras investigaciones el análisis, en primer lugar, de otros métodos como el aprovechamiento de la propia energía liberada en la hidratación del NaOH o el uso de cocinas u hornos solares para el calentamiento de las mezclas CCA-NaOH. Como el valor obtenido de resistencia a compresión es muy superior al requerido para el uso estructural de los bloques en viviendas de una o dos alturas en países en vías de desarrollo, existe margen para optimizar el contenido en hidróxido sódico de los hormigones geopoliméricos, aun a costa de reducir la resistencia a compresión de los mismos.

5. Agradecimientos

Al Ministerio de Economía y Competitividad por el apoyo a través del proyecto GEOCEDEM BIA 2011-26947 "Reutilización de residuos cerámicos y de demolición en la preparación de nuevos materiales geopoliméricos".

A la Generalitat Valenciana por el apoyo mediante el proyecto 3018/2009 “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)”.

A la empresa Maicerías Españolas DACSA S.A. por el suministro de la Ceniza de Cáscara de Arroz.

A la empresa OMYA CLARIANA por el suministro del Catalizador de Craqueo Catalítico Usado.

6. Bibliografía

BARKER DJ, TURNER SA, NAPIER-MOORE PA, CLARK M, DAVISON JE (2009). CO₂ Capture in the Cement Industry, *Energy Procedia*. 1: 87-94.

BOUZÓN N, PAYÁ J, BORRACHERO MV, SORIANO L, TASHIMA MM AND MONZÓ J (2014). Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders. *Mater Lett*, 115, 72–74.

COP15 (2009), XV Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático.

DAMTOFT JS, LUKASIK J, HERFORT D, SORRENTINO D, GARTNER EM (2008). Sustainable development and climate change initiatives, *Cement and Concrete Research*. 38: 115-127.

DAVIDOVITS J (1991) *J Therm Anal* 37: 1633

DAVIDOVITS J (2008). *Geopolymer chemistry and applications*, 2a edition, France.

GARTNER E (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements, *Cement and Concrete Research*. 34: 1489–1498.

- J.P.M.PARRY AND ASSOCIATES LTD (1992). JPA-ITW Concrete block technology, User's Manual.
- MAHASENAN N, SMITH S, HUMPHREYS K (2003). The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO2 Emissions, en: Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference, Pergamon, Oxford, págs. 995-1000.
- ORDÓÑEZ BELLOC LM (2007). Reutilización de la Ceniza de Cáscara de Arroz como material de Construcción: Valorización y Optimización de sus Propiedades Puzolánicas. Tesis Doctoral.
- SALAS SERRANO, J (2002). Latinoamérica: Hambre de vivienda. Boletín del Instituto de la Vivienda, vol.17, número 045. Universidad de Chile, Santiago. Chile. pp. 58-69.
- SHI C, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PALOMO A (2011). New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. Cem Concr Res 41: 750–63.
- SZABÓ L, HIDALGO I, CISCAR JC, SORIA A (2006). CO2 emission trading within the European Union and Annex B countries: the cement industry case, Energy Policy. 34: 72-87.
- UNE-EN (2009). 12390-2, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.
- UNE-EN (2009). 12390-3, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- UNE-EN (2011). 772-1, Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.
- UN-HABITAT (1985). The use of selected indigenous building materials with potential for wide application in developing countries.
- VAN WAZER JR (1970) Inorg Macromol Rev 1: 89