

USO DE GEOPOLÍMEROS OBTENIDOS A PARTIR DE RESIDUOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Juan Cosa¹; María Victoria Borrachero²; Jordi Payá³; Lourdes Soriano⁴; José María Monzó⁵

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València (UPV), Valencia, España

¹juacoma2@upv.es; ²vborrachero@cst.upv.es; ³jjpaya@cst.upv.es; ⁴lousomar@upvnet.upv.es; ⁵jmmonzo@cst.upv.es

Palabras clave: cemento de activación alcalina, cerámica sanitaria, catalizador de craqueo catalítico, ceniza de cascara de arroz, sostenibilidad

Resumen

Habitualmente los suelos se estabilizan con cemento Portland, que es un material con una elevada huella de carbono, ya que aproximadamente entre el 5% y el 7% de las emisiones de dióxido de carbono a nivel global son consecuencia de su producción. Los geopolímeros son materiales que tienen poder conglomerante, pero tienen una huella de carbono mucho menor. El objetivo es la utilización de conglomerantes alternativos al cemento Portland que presenten un menor coste económico y medioambiental, y que presenten similares o superiores prestaciones. Se prepararon probetas de suelo estabilizado de dimensiones reducidas utilizando un suelo de tipo dolomítico. El geopolímero se preparó utilizando una mezcla de ceniza de cascarilla de arroz e hidróxido sódico como activador y como precursor residuo de catalizador de craqueo catalítico (residuo producido en la industria del petróleo) y residuos de cerámica sanitaria. Se realizaron mezclas de catalizador de craqueo catalítico y residuos de cerámica sanitaria obteniendo resistencias mecánicas de suelo estabilizado suficientes para una aplicación práctica. Los resultados ponen de manifiesto la viabilidad del uso de los geopolímeros obtenidos a partir de residuos como conglomerantes en la estabilización de suelos

1 INTRODUCCIÓN

El mundo se está viendo sometido a grandes cambios, debidos al crecimiento económico y demográfico, especialmente en algunos países en desarrollo, véase los denominados “BRICS” (Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica). Por ejemplo, en China, la producción de cemento ha aumentado un 3.000% desde 1980. Según la National Geographic¹, desde el año 2012, China fabricó más cemento que Estados Unidos desde 1900. Esto implica que tal como se aprecia en la figura 1, la producción mundial de cemento portland en 2017, según el US Geological Survey, se sitúe en 4.100 millones de toneladas. Con la consiguiente repercusión en la emisión de CO₂, ya que la producción de una tonelada de cemento portland, implica la emisión de otra tonelada a la atmósfera de CO₂.

Según la RPP noticias, ciencia y tecnología², la Organización Meteorológica Mundial (OMM) alertó que por primera vez las concentraciones mensuales de dióxido de carbono en la atmósfera superaron el umbral de 400 partes por millón (ppm) en todo el hemisferio norte durante el mes de abril de 2014.

En este contexto derivado del desarrollo demográfico, en septiembre de 2015, los estados miembros de la Organización de Naciones Unidas (ONU) aprobaron la agenda 2030 para el desarrollo sostenible, que incluye un conjunto de 17 Objetivos³. En su objetivo 11, se expresa la necesidad de garantizar el acceso a la vivienda, así como de transformar la forma de construir mejorando la sostenibilidad de las ciudades. En el objetivo 9, se explica que hay que aprovechar los avances tecnológicos para resolver problemas económicos y

¹ http://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/actualidad/china-bate-record-produccion-cemento_11123

² <http://rpp.pe/tecnologia/mas-tecnologia/omm-concentracion-de-co2-alcanza-nivel-record-en-hemisferio-norte-noticia-695134>

³ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

ambientales. En el objetivo 12, se extiende también a la gestión eficiente de recursos y desechos. En sus objetivos 7 y 13, se manifiesta, la problemática que supone el impacto producido por las emisiones de gases de efecto invernadero, y la necesidad urgente de tomar medidas.

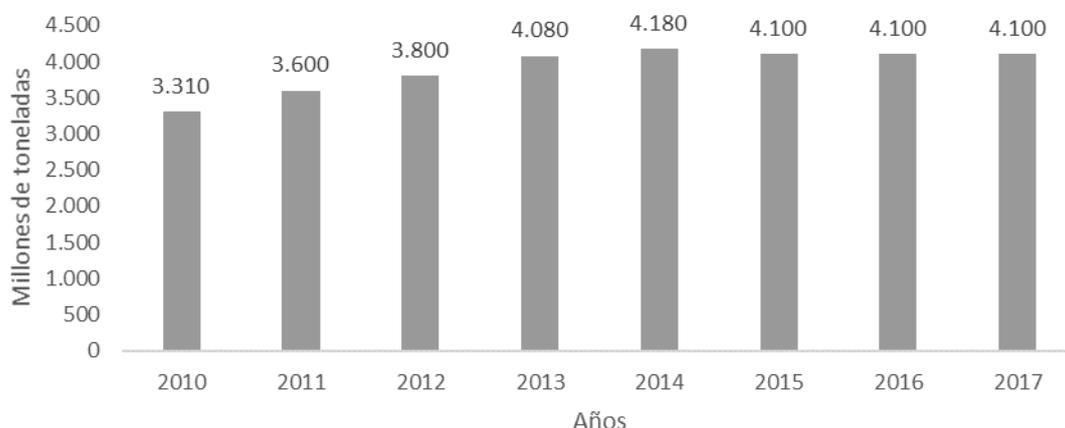


Figura 1. Producción mundial de cemento portland de 2010 a 2017 (Fuente: US Geological Survey)

El problema surgido por el impacto ambiental derivado de la contaminación y del incremento constante del consumo energético se ha transmitido a la sociedad civil, empresas y organizaciones que la componen, viéndose reflejado en la edificación a través de la creación de estándares y certificaciones. Así, se puede ver el estándar Passivhaus basado en el ahorro y eficiencia energética del Passive House Institute de Alemania⁴, donde se cuidan minuciosamente los acabados en encuentros de elementos constructivos con el fin de evitar cualquier filtración en los aislamientos térmicos que suelen poseer unas características y dimensionamiento muy superiores a las edificaciones tradicionales, no Passivhaus con reducciones respecto a las mismas de hasta el 90% del consumo energético.

Pero la edificación bioclimática va más allá del ahorro energético derivado de habitar en un edificio. Implica cubrir muchos más aspectos de la edificación. Siguiendo la misma línea han ido apareciendo diferentes certificaciones, como son BREEAM⁵ del Building Research Establishment, institución creada en 1921 en Reino Unido, LEED⁶ desarrollada por el US Green Building Council, institución creada en 1993, o VERDE⁷ desarrollado por el Green Building Council España, institución creada en 2002.

Así, BREEAM, explica en su web que se “evalúan impactos en 10 categorías: gestión, salud y bienestar, energía, transporte, agua, materiales, residuos, uso ecológico del suelo, contaminación e innovación”.

Se puede observar que tanto entidades de certificación como la propia ONU señalan la necesidad de reducir el impacto ambiental de las edificaciones, haciéndolas más sostenibles y, en la medida de lo posible, más accesibles. En algunos países en desarrollo, donde es común la autoconstrucción de la vivienda, el 100% del coste son los materiales utilizados. Utilizando los de bajo coste, como la propia tierra que se puede encontrar en el lugar de edificación de la vivienda, y diferentes residuos, se podría hacer de una manera más sostenible y accesible (Salas, 2010).

Cuando la ejecución de la vivienda se realiza mediante bloques de tierra comprimida (BTC), se puede optar por estabilizar el suelo, lo que permite mejorar las propiedades del BTC. Habitualmente se utiliza el cemento Portland para estabilizar el suelo. Se puede sustituir esto cemento, cuya industria está catalogada como de alto impacto ambiental por otro tipo

⁴ http://passivehouse.com/02_informations/01_what_is_a_passive_house/01_what_is_a_passive_house.htm

⁵ <http://www.breeam.es/>

⁶ <https://new.usgbc.org/>

⁷ <http://www.gbce.es/>

de cemento con menor huella de carbono. Esto permite reutilizar residuos como parte de sus componentes, se conseguido un tratamiento más adecuado a ellos. Además, se reduce la contaminación, el gasto energético y económico (respecto a los BTC estabilizados con cemento Portland), y el impacto ambiental.

Estos cementos son los de activación alcalina (CAA), también conocidos como geopolímeros. Ellos se componen por un precursor de naturaleza silicoaluminosa y un activador altamente alcalino. Al combinarlos, se produce una reacción química derivada del ataque alcalino del activador al precursor, que da lugar a una reacción de geopolimerización (Glukhovsky, 1959; 1965; 1981; Glukhovsky; Pakhomov, 1978).

Se ha venido utilizando metacaolín, escoria de alto horno, o cenizas volantes para la obtención de los CAA (Marin et al., 2009; Khan et al., 2016; Nath; Sarker, 2014); en menor medida, residuo de catalizador del craqueo catalítico (FCC), o cerámica sanitaria (CS) para el precursor (Trochez et al., 2015; Tashima et al., 2012; 2013; Rodríguez et al., 2013; García de Lomas, Sánchez; Frías, 2007; Cosa et al., 2018). Como activador, lo más común es una disolución de hidróxidos con silicatos de sodio o potasio. Estudios más recientes muestran la posibilidad de utilizar residuos para la obtención del activador, como es la ceniza de cascara de arroz (CCA) (Bouzón et al., 2014).

Los suelos estabilizados con CAA necesitan menos tiempo que los estabilizados con cemento Portland para desarrollar altas resistencias a compresión, además mejoran la ductilidad y con ello el agrietamiento por retracción en los diferentes paramentos, mejorando por un lado el acabado estético, y por otro dificultando el anidamiento de insectos, tanto por la reducción de grietas, como por aumentar la alcalinidad del material. Algunos de estos insectos son un verdadero peligro para el ser humano, como es el caso de la vinchuca (*Triatoma infestans*) en países como Bolivia o Chile. En 2013, El País⁸ comunicaba la estimativa que la vinchuca infecta a 10 millones de personas en el mundo, y provoca 10.000 muertos al año derivado del mal de Chagas que transmiten.

Los CAA se presentan por tanto como un sustituto al cemento Portland. Este estudio se centra en la aplicación de los CAA en la estabilización de suelos cuya aplicación más extendida en la construcción arquitectónica es el BTC, y, en menor medida, el tapial. Sin embargo, los CAA también pueden utilizarse como morteros u hormigones en aquellos elementos constructivos donde el uso de suelos estabilizados podría verse comprometido (figura 2), como es el caso de cimentaciones, determinados elementos estructurales, o revestimientos que pudieran verse afectados por los agentes atmosféricos. Así mismo, también cabe la posibilidad de su uso en refuerzo de cimentaciones deficientes de edificaciones ejecutadas con aplicación de CAA, por ejemplo, mediante *jet-grouting* (figura 3).

⁸ https://elpais.com/elpais/2013/02/25/eps/1361790800_865167.html

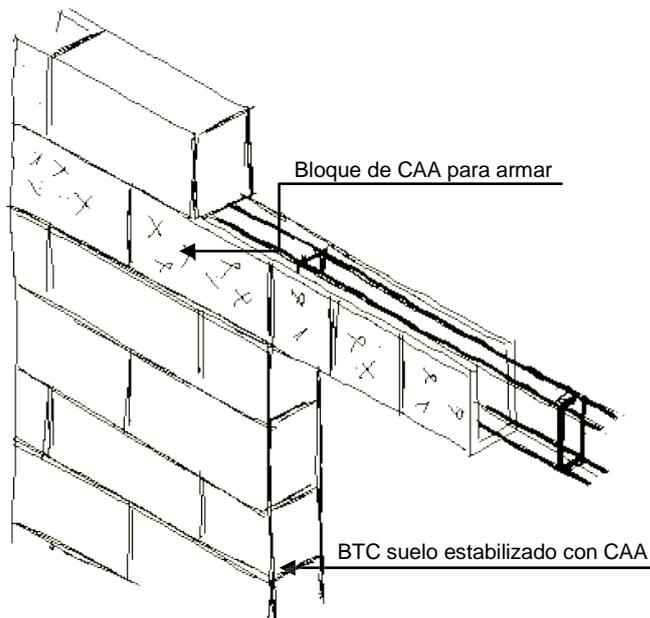


Figura 2. Muro de cerramiento ejecutado con BTC de suelo estabilizado con CAA. Dintel de bloque prefabricado de hormigón de CAA para armado

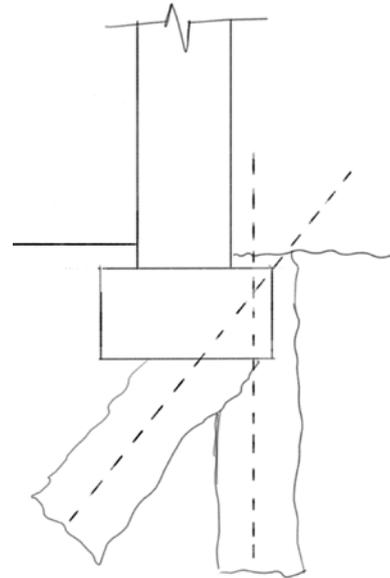


Figura 3. Estabilización de zapata de cimentación, inyectando lechada de CAA mediante *jet-grouting*

2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se utiliza un suelo seleccionado, proveniente de cantera⁹, de naturaleza dolomítica. Se ensayó a compresión el suelo compactado estabilizado con CAA y sin estabilizador, siempre con densidad seca óptima de Proctor, para conocer la diferencia que existe con estabilizador y sin el mismo. La muestra de suelo se homogeneiza mediante la técnica de cuarteo, y posteriormente se pasa por tamiz de 4 mm y se sustrae la humedad en estufa a 60°C, hasta conseguir peso constante.

Para el precursor del estabilizador, se ha optado por el uso de FCC, bien al 100%, o con sustituciones de FCC por CS, donde se ha optado por una relación 70% CS – 30% FCC, ya que en su uso en estudios anteriores en morteros parece una relación óptima si no en máxima resistencia a compresión, si la que más reduce el impacto económico y ambiental, aprovechando mejor la reutilización de residuos con una resistencia a compresión aceptable (Cosa et al., 2018).

Para la disolución activadora se han utilizado tres opciones como fuente de sílice silicato sódico¹⁰, con una composición de 28% SiO₂, 8% Na₂O, y 64% H₂O; un residuo de tierras diatomeas usado como filtrante en la industria cervecera (DH) y CCA, ambas con SiO₂ en su composición superior al 80%. En todas ellas se utiliza NaOH¹¹; el agua procede de la red de abastecimiento de la Universitat Politècnica de València.

La disolución activadora con silicato sódico comercial, se realiza con 60,8% de Na₂SiO₃, 24% de H₂O, y 13,22% de NaOH. Se utiliza a temperatura ambiente, por lo que se deja reposar 30 minutos para que pierda el calor producido por la reacción química. En el caso de las disoluciones de residuos (DH y CCA), se utiliza un recipiente termostatzado para aprovechar la reacción exotérmica, se añade en primer lugar, el hidróxido sódico 19%, en segundo lugar, el residuo 18% (DH o CCA según el caso), por último, se añade el agua 63%. Se agita hasta que se obtiene una mezcla homogénea, despresurizando de vez en cuando, tras varias agitaciones. Se deja reposar 24 horas antes de su uso.

⁹ suministrado por la empresa constructora PAVASAL S.A.

¹⁰ comercial de Merck

¹¹ de Panreac S.A.

La amasada de suelo estabilizado, se realiza mezclando 1000 g de suelo en la amasadora un minuto, a continuación, se añade 100 g de precursor y se mezcla durante 1 minuto más, por último, se añaden 174 g de la disolución activadora y se deja mezclar dos minutos más. La densidad seca óptima (figura 4), es la concreta para el suelo utilizado, obtenida a partir del ensayo de Proctor modificado con mini Harvard según ASTM STP479 (1970).

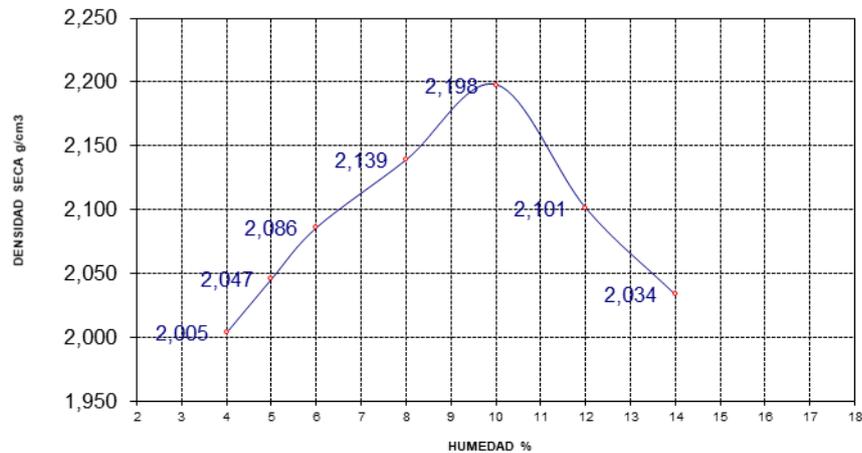


Figura 4. Representación de la curva de proctor modificado mediante mini harvard

Las probetas utilizadas para el estudio son de 40x40x40 mm, realizadas con un molde de diseño propio (figuras 5 y 6), siguiendo el procedimiento habitual para el Proctor modificado. Se rellena el molde en tres capas dejando caer una masa de 1,5 kg desde 20 cm de altura, con 19 golpes por capa. El proceso de curado se realiza en una cámara controlada a 22°C y 50% de humedad relativa. Al utilizar probetas de reducidas dimensiones, se reduce el coste de los recursos materiales, personales, y ambientales, permitiendo obtener resultados preliminares, antes de un estudio en detalle con BTC estabilizados con CAA o incluso de la ejecución de una vivienda con suelo estabilizado, bien sea con BTC o por tapial, que se realizará más adelante.



Figura 5. Molde para probetas cúbicas



Figura 6. Probetas cúbicas de 40x40x40mm

3 RESULTADOS

En los resultados de la figura 7, se observa la resistencia del suelo sin estabilizador que se encuentra entorno a los 2 MPa y, por otra parte, se representa el suelo estabilizado con CAA, donde se ha hecho una división en función del tipo de disolución activadora.

Con un 30% de FCC se obtienen 4,35 MPa a 7 días, con lo que los BTC realizados entrarían en 7 días dentro de las categorías propuestas por la norma UNE 41410 (2008), BTC 1 y 3, y cercano en sólo 7 días a BTC 5. Si se añade CS se observa un incremento considerable de la resistencia a compresión, llegando a 9,6 MPa. Con 100% de FCC se obtienen 17,2 MPa.

Si al estabilizar suelo, en lugar de silicato sódico comercial en la disolución activadora, se

utiliza una disolución a partir de residuos como la DDH y DCCA, se obtienen para la relación 70%CS-30%FCC, 11,2 MPa y 12,5 MPa respectivamente. Siendo para el 100% FCC de 20,5 MPa y 26 MPa.

No se incluye una comparación de resultados con otros autores, debido a que la diferencia entre los suelos y las características entre las probetas, podrían inducir a errores.

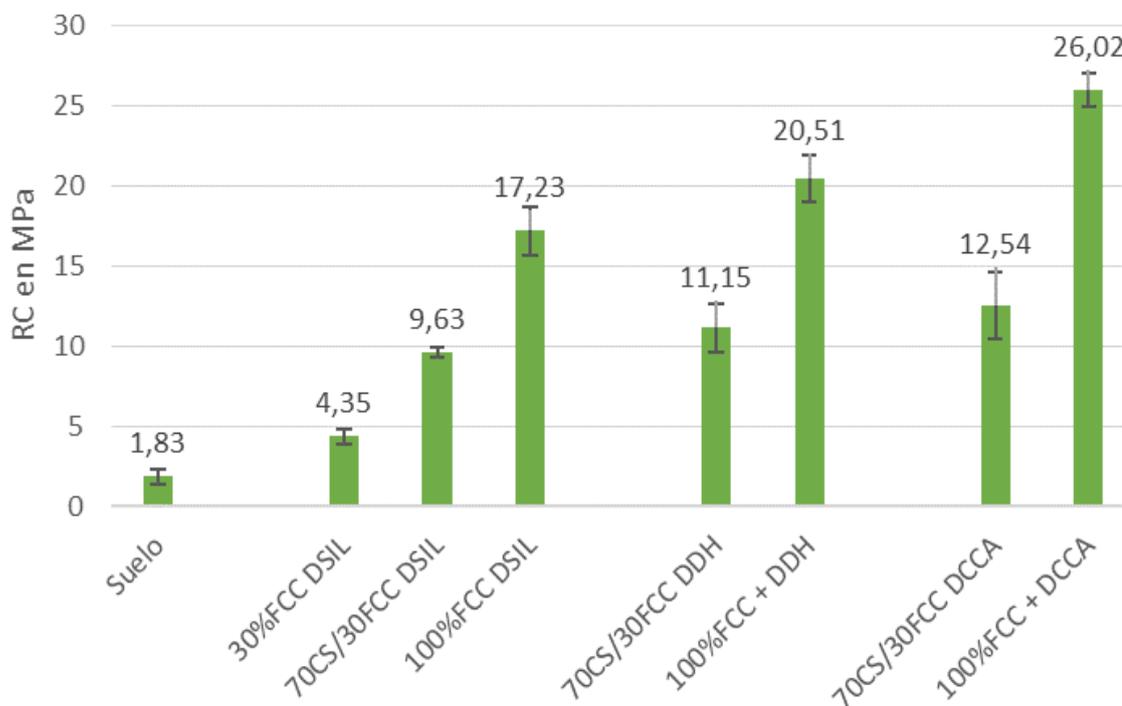


Figura 7. Promedio y desviación estándar de la resistencia a compresión a 7 días de suelo sin estabilizar y suelo estabilizado con CAA, con diferentes disoluciones activadoras, disolución de silicato sódico (DSIL), de residuo de diatomeas (DDH) y de ceniza de cascara de arroz (DCCA)

4 CONCLUSIONES

Las resistencias a compresión obtenidas son muy superiores a las indicadas por las normas, tanto para BTC, como si se pretende estabilizar suelo para caminos o firmes de carretera. De ello se desprende que con un pequeño aporte de residuos es posible mejorar notablemente las propiedades físicas del suelo, independientemente de su uso en BTC, tapial, etc.

En el caso del sistema CS-FCC, se consigue incrementar notablemente las propiedades del suelo tras la estabilización, reduciendo la cantidad de FCC aportado, reutilizando un residuo que por sí mismo no tendría ningún valor, como es la cerámica sanitaria. En general, se demuestra por tanto que es viable el uso de residuos tanto en precursor como en el activador de hecho, se observa que las disoluciones con residuo funcionan incluso mejor que las preparadas con silicato sódico comercial.

En estabilización de suelos, es posible el uso de CAA como alternativa más sostenible al cemento Portland, con menor impacto económico y medioambiental. Por otra parte, se mejora el acceso a la vivienda en países en desarrollo con un amplio abanico de aplicaciones en construcción de viviendas de nueva planta, rehabilitaciones de edificios en forma de BTC, tapial, solados, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM STP 479 (1970). Special procedures for testing soil and rock for engineering purposes: Fifth Edition. USA: ASTM International

- Bouzón, N; Payá, J.; Borrachero, M. V.; Soriano, L.; Tashima, M. M.; Monzó, J. (2013). Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders. *Materials Letters*, 115 (2014) 72–74.
- Cosa, J.; Soriano, L.; Borrachero, M. V., Reig, L.; Payá, J.; Monzó, J. M. (2018). Influence of addition of fluid catalytic cracking residue (FCC) and the SiO₂ concentration in alkali-activated ceramic sanitary-ware (CSW) binders. *Minerals*, 8(4), 123. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/min8040123>
- García de Lomas, M.; Sánchez de Rojas, M. I.; Frías, M. (2007). Pozzolanic reaction of a spent fluid catalytic cracking catalyst in FCC-cement mortars. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 90 (2), 443-447.
- Glukhovskiy V.D. (1959). *Soil silicates*, Kiev: Gosstroyizdat Publishers
- Glukhovskiy V.D. (1965). *Soil silicates, their Properties, technology and manufacturing and fields of application*. Kiev: Doct Tech Sc. Degreee thesis. Civil Engineering Institute.
- Glukhovskiy V.D.; Pakhomov V.A. (1978). *Slag-alkaline cements and concretes*. Kiev: Budivel'nik Publishers
- Glukhovskiy, V.D. (1981). *Slag alkaline fine aggregate concretes*. Kiev, USSR
- Khan, M. Z. N.; Shaikh, F. A.; Hao, Y.; Hao, H. (2016). Synthesis of high strength ambient cured geopolymer composite by using low calcium fly ash. *Construction Building Materials*, 125, 809-820.
- Marin, C.; Araiza, J.L.R.; Manzano, A.; Avalos, J.C.R.; Perez, J.J.; Muniz, M.S.; Ventura, E.; Vorobiev, Y. Synthesis and characterization of a concrete based on metakaolingeopolymer. *Inor. Mat.* (2009), 45 (12), 1429-1432.
- Nath, P.; Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction Building Materials*, 66, 163- 171.
- Rodriguez, E. D.; Bernal, S. A.; Provis, J. L.; Gehman, J. D.; Monzó, J.; Payá, J.; Borrachero, V. (2013). Geopolymers based on spent catalyst residue from a fluid catalytic cracking (FCC) process. *Fuel*. 109, 493-502. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.053>.
- Salas, J (2010). Reflexiones sobre la enseñanza y la investigación tecnológica para la vivienda de las mayorías, p.121-131. Disponible en: <http://www.habitatsociedad.us.es>
- Tashima, M. M.; Akasaki, J. L.; Castaldelli, V. N.; Soriano, L.; Monzó, J.; Payá, J.; Borrachero, M. V. (2012). New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC). *Mat. Lett.*, 80, 50-52.
- Tashima, M. M.; Akasaki, J. L.; Melges, J. L. P.; Soriano, L.; Monzó, J.; Payá, J.; Borrachero, M. V. (2013). Alkali activated materials based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): Influence of SiO₂/Na₂O and H₂O/FCC ratio on mechanical strength and microstructure. *Fuel*, 108, 833-839.
- Trochez, J. J.; Mejía de Gutiérrez, R.; Rivera, J.; Bernal, S. A. (2015). Synthesis of geopolymer from spent FCC: Effect of SiO₂/Al₂O₃ and Na₂O/SiO₂ molar ratios. *Materials Construction*, 65 (3), X-Y. Disponible en <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.00814>.
- UNE 41410 (2008). *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. España: Asociación Española de Normalización y Certificación

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ministerio de Economía y competitividad del gobierno de España por su apoyo mediante el proyecto Apligeo (BIA2015 70107-R) que incluye este estudio. A la empresa PAVASAL por su colaboración aportando el suelo, a OMYA Clariana S.A. por suministrar el FCC, a DACSA, S.A. por la CCA, a Heineken España S.A. por el residuo del filtrado de tierras diatomeas, al Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), y a la Universitat Politècnica de València (UPV) por ceder sus instalaciones para el desarrollo experimental.

AUTORES

Juan Cosa Martínez, estudiante de doctorado en ingeniería de la construcción, master en dirección y gestión de proyectos, arquitecto técnico. Miembro del instituto de ciencia y tecnología del hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València (UPV).

María Victoria Borrachero Rosado, doctora en Químicas (2001) por la Universidad de Murcia en 1990, Catedrática de Universidad en 2008 en la Universitat Politècnica de Valencia e investigadora en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (UPV). Es autora de más de 80 publicaciones en revistas de alto impacto y más de 100 comunicaciones en congresos nacionales e internacionales, de 3 capítulos de libro. Ha dirigido 8 tesis doctorales.

Jordi Payá Bernabeu, licenciado en Químicas (1986) y Doctor en Químicas (1990) por la Universitat de Valencia. Es autor de más de 150 publicaciones en revistas especializadas listadas en Journal Citation Reports y más de 200 trabajos presentados en congresos nacionales e internacionales. Tiene un índice h de 29. Ha dirigido 19 tesis doctorales y 22 tesis de máster. Coautor de 2 patentes.

Lourdes Soriano Martínez, licenciada en Químicas (2001) por la Universitat Jaume I de Castellón y Doctora (2008) por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Es autora de más de 40 publicaciones en revistas especializadas y de 49 trabajos presentados en congresos nacionales e internacionales, de 3 capítulos de libro, participado en 13 proyectos de investigación. Y ha dirigido 2 tesis doctorales y 7 tesinas de máster.

José María Monzó Balbuena, licenciado en Químicas (1985) y Doctor en Químicas (1990) por la Universitat de Valencia. Es autor de más de 90 publicaciones en revistas indexadas en el Journal Citation Reports y de más de 100 comunicaciones en congresos nacionales e internacionales. Tiene un índice h de 21. Ha dirigido 7 tesis doctorales. Es coautor de una patente. Es catedrático del departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Valencia y miembro del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón.