



ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE: RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y ABSORCIÓN DE AGUA

Verónica de Dios¹, Juan Cosa², Miguel Ángel Carrión³, Jordi Payá⁴, M^a Victoria Borrachero⁵, Lourdes Soriano⁶, José María Monzó⁷

Grupo de Investigación en Química de los Materiales, Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Universitat Politècnica de València, España, ¹vededio@hotmail.com; ²jcosa@hotmail.com; ⁴jjpaya@cst.upv.es; ⁵vborrachero@cst.upv.es; ⁶lousomar@upvnet.upv.es; ⁷jmonzo@cst.upv.es

³Departamento de Ingeniería del Terreno, Universitat Politècnica de València, España, mcarrio@upvnet.upv.es

Palabras clave: geopolímero, ceniza de cascarilla de arroz, catalizador gastado de craqueo catalítico, suelo estabilizado

Resumen

Se ha estudiado la estabilización de un suelo dolomítico con dos tipos de cementos activados alcalinamente o geopolímeros. En los dos geopolímeros se utilizó como precursor el catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) que es un residuo de la industria petroquímica; sin embargo el activador usado fue diferente. En el primero de los geopolímeros, se utilizó como activador una mezcla de hidróxido sódico y silicato sódico ambos reactivos químicos comerciales. En el segundo geopolímero, se utilizó como activador una mezcla de ceniza de cascarilla de arroz e hidróxido sódico. Estos suelos estabilizados se compararon con el suelo estabilizado con cemento portland. Los resultados obtenidos mostraron mayores resistencias a compresión simple para los suelos estabilizados con geopolímero. Las probetas fueron sumergidas en agua para estudiar su durabilidad en ambientes húmedos. Los resultados mostraron un mejor comportamiento, también, para los suelos estabilizados con geopolímero. Finalmente, se estudió la absorción de agua, siendo la menor aquella obtenida para las probetas estabilizadas con el geopolímero que utilizó una mezcla de hidróxido y silicato sódico como activador. Como conclusión, se ha demostrado la viabilidad del uso de este tipo de geopolímeros en la estabilización de suelos y la ventaja del uso de residuos que minimiza el impacto medioambiental final: menos cemento portland (por sustitución total con FCC) y menos reactivos químicos (con sustitución del silicato sódico por la ceniza de cascarilla de arroz).

1 INTRODUCCIÓN

En septiembre de 2015, los estados miembros de la ONU aprobaron la Agenda 2030 (PNUD, sf) para el desarrollo sostenible que incluye 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Los ODS han supuesto un avance importante sobre los objetivos de desarrollo del milenio (ODM), en la medida que supone una transversalización en lo que se refiere a la implicación de todos los países, y no sólo de los países en desarrollo. En el ODS 11 se hace hincapié en la necesidad de modificar la forma de construcción, mejorando la sostenibilidad de las ciudades, garantizando el acceso a la vivienda. Durante las últimas décadas se ha incrementado el déficit de viviendas, fundamentalmente en los países en desarrollo, así como en muchos casos, el uso de materiales de construcción inadecuados (PNUD, sf). La tierra o suelo es un material de construcción ampliamente utilizado, sobretodo en zonas rurales, donde es un material abundante, de bajo coste económico y medioambiental, y que presenta, en general, buenas propiedades para la construcción de viviendas. La construcción con tierra comprimida combina la fuerza ejercida para compactar con el poder estabilizante de un conglomerante. Históricamente, durante siglos, se han utilizado distintos tipos de estabilizantes, por ejemplo productos animales como sangre, orina, estiércol, caseína y cola animal. También se han utilizado savias de plantas aceitosas y con contenido de látex así como derivados del sisal. Los más utilizados son los estabilizantes minerales, como la cal, el bitumen y el cemento portland. El cemento portland actúa como estabilizante en suelos con bajo contenido en arcilla. Cuando aumenta el contenido en arcilla, se requiere

incrementar el contenido en cemento para alcanzar el mismo efecto de estabilización (Minke, 2005). La industria cementera está clasificada como un sector muy contaminante y de elevado impacto ambiental; se estima que la producción de cemento portland es responsable de aproximadamente el 6% de las emisiones totales de CO₂ (Shi; Fernández, Palomo, 2011). La producción de una tn de cemento portland requiere de un elevado consumo de materias primas no renovables como la caliza y la arcilla, y además produce la emisión de aproximadamente 900 kg de CO₂ además de otros gases de efecto invernadero como NO_x y SO_x (Imbabi; Carrigan; McKenna, 2012). El ODS 13, acción por el clima, pone de manifiesto la urgente necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, para mitigar el cambio climático. Si bien es cierto que a día de hoy el cemento portland es insustituible para ciertos usos, no es menos cierto que para otros usos, podría ser sustituido por otros conglomerantes con una huella de carbono menor (Mellado et al, 2014). Uno de los conglomerantes que está siendo investigado en las últimas décadas como un serio candidato a la sustitución del cemento portland, es el cemento activados alcalinamente (CAA) o geopolímero. Los CAA están formados por un precursor de naturaleza silicoaluminosa y un activador de elevada alcalinidad. Cuando se mezcla el precursor con el activador se produce una reacción química como consecuencia del ataque alcalino del activador al precursor, que da lugar a la reacción de geopolimerización (Glukhowsky, 1981; Glukhowsky; Pakhomov, 1978). Como precursores se han utilizado entre otros, metacaolín, escoria de alto horno, cenizas volantes (Marin et al., 2009; Khan et al., 2016; Nath; Sarker, al. 2014), catalizador gastado de craqueo catalítico (Trochez et al., 2015; Tashima et al., 2012; 2013; Rodríguez et al., 2013) y cerámica sanitaria (Cosa et al., 2018). Como activadores habitualmente se utilizan mezclas de hidróxidos de sodio o potasio con silicatos también de sodio o potasio. Más recientemente, buscando sistemas más sostenibles, se han utilizado residuos como la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) mezclándola con hidróxido sódico para la obtención del activador (Bouzón et al., 2014) y también ceniza de hoja de caña de azúcar (Sugarcane Straw Ash, SCSA) (Moraes et al., 2018). Los CAA han sido utilizados con éxito en la estabilización de suelos (Zhang et al., 2013), teniendo importantes implicaciones prácticas en la ingeniería civil. Los suelos estabilizados con CAA necesitan tiempos más cortos para desarrollar una alta resistencia inicial, frente al cemento portland. Así mismo, presentan una mayor ductibilidad, pudiéndose reducir la fisuración de los pavimentos.

2 OBJETIVO

El objetivo del trabajo que se presenta es el estudio de la resistencia a compresión simple y de la absorción de agua de suelos estabilizados con un CAA, en cuya síntesis se ha utilizado un residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC) como precursor. Como activador se ha utilizado, por una parte, una mezcla de hidróxido sódico y silicato sódico, y, por otra, una mezcla de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) con hidróxido sódico, con el fin de reducir la huella de carbono del activador, y por tanto del agente estabilizante.

3 METODOLOGÍA

El suelo que se ha utilizado para ser estabilizado fue suministrado por la empresa Pavasal. Se trata de un suelo procedente de roca dolomítica machacada. El tamaño máximo fue de 4 mm y su granulometría fue (% que pasa): 2mm = 73,6%; 1,15mm = 59,3%; 0,40mm = 39,3%; 0,16mm = 31,4%; 0,08mm = 26,9%. El cemento portland (CP) fue del tipo CEM I-52,5R suministrado por Lafarge (Valencia, España). La ceniza de cáscara de arroz (CCA) fue suministrada por la empresa Maicerías Españolas DACSA S.A.; la CCA proviene de una planta de cogeneración (Valencia, España) y su diámetro medio de partícula es de 62,3 µm. El catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) proviene de una refinería de petróleo y fue suministrado por la empresa Omya Clacriana S.A. (Tarragona, España); se ha molido previamente a su uso, y su diámetro medio es de 17,1 µm. La disolución de silicato sódico (SS) fue suministrada por Merck, siendo su composición química 28% SiO₂, 8% Na₂O y 64%

de H₂O. El hidróxido sódico (NaOH) en forma de pellets fue suministrado por Panreac (98% de pureza). En la tabla 1 se muestra la composición de las mezclas estudiadas.

Tabla 1. Composición de las mezclas estudiadas

Material	Suelo sin estabilizar	Suelo estabilizado		
		CP	Geo	Geo-CCA
Suelo (g)	1000	1000	1000	1000
CP (g)		100		
FCC (g)			100	100
NaOH (g)			22,82	32,80
SS (g)			105,27	
CCA (g)				31,88
Agua (g)	100	97,3	44,91	109,37

Para determinar la cantidad de agua necesaria para la obtención de la densidad óptima, se siguió el ensayo de Proctor modificado con mini Harvard según ASTM STP479 (1970). La norma UNE 103 501 (1994) fue seguida para la determinación de la máxima densidad con la humedad óptima. La energía de compactación usada fue de 2632 J/cm³. El procedimiento de mezcla se llevó a cabo con una mezcladora de mortero de acuerdo con la normativa UNE EN 196-1 (2018), usando la velocidad más baja (140±5 rpm para la rotación de la pala y 62±5 rpm para el movimiento planetario). El proceso de amasado para el suelo sin estabilizar fue el siguiente: se mezcló el suelo durante un minuto, después se añadió el agua y se amasó durante dos minutos más. El amasado del suelo estabilizado con CP se realizó de la siguiente forma: se mezcló el suelo durante un minuto, se añadió el CP y se mezcló durante un minuto más, finalmente se añadió el agua y se amasó durante dos minutos más. El proceso del suelo estabilizado con geopolímero Geo y Geo-CCA fue de la siguiente manera: se mezcló el suelo durante un minuto, se añadió el FCC y se mezcló durante un minuto más; finalmente, se añadió la disolución activadora correspondiente y se amasó durante dos minutos más.

El suelo se compactó usando un molde para elaborar probetas cúbicas de 40 mm de lado: se procedió a compactar el material en tres tongadas, usando una maza tipo Army de 1,5 kg, dejada caer desde una altura de 20 cm un total de 19 veces. La energía aplicada fue la misma que la del ensayo miniproctor (2632 J/cm³). Las probetas cúbicas se mantuvieron en el ambiente del laboratorio durante aproximadamente dos horas, posteriormente se introdujeron en una estufa a 70±1°C hasta peso constante y después se extrajeron para los ensayos de resistencia a compresión simple, inmersión en agua (2 y 24 horas) y absorción de agua. Para cada uno de los ensayos (resistencia a compresión, inmersión en agua y absorción) se utilizaron tres probetas.

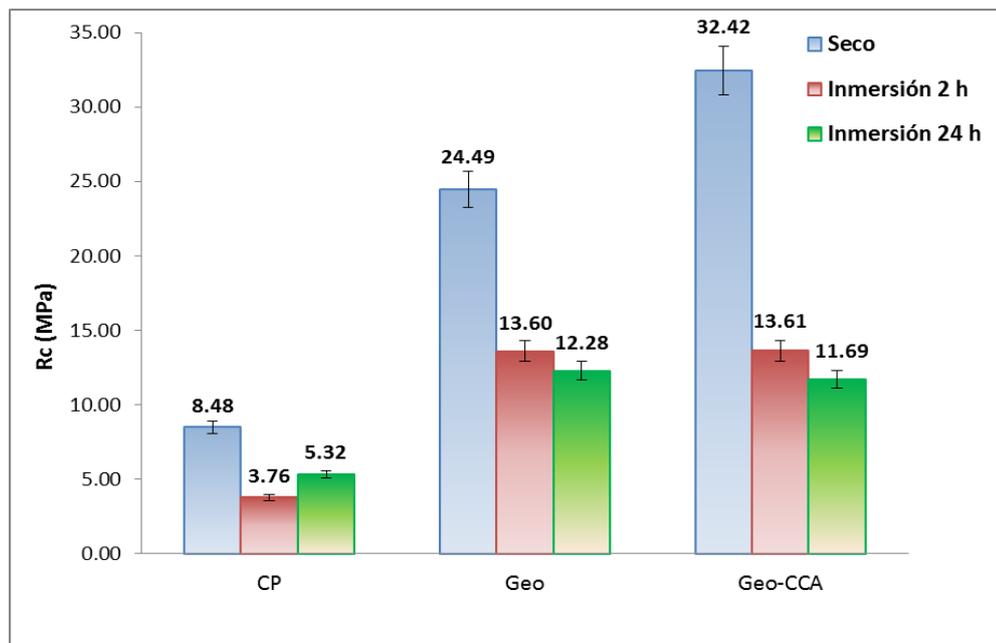
El ensayo a compresión simple se llevó a cabo en una máquina universal INSTRON modelo 3382, con una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min. El ensayo de absorción se llevó a cabo de acuerdo con UNE 41410 (2008). Las probetas sometidas a inmersión en agua, se dejaron bajo agua durante 2 horas, de acuerdo con la norma NTC 5324 (2004) y otra tanda de probetas también se dejó bajo agua durante 24 horas; una vez cumplido el tiempo de inmersión se secaron con papel y se ensayaron a compresión.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se representa la resistencia a compresión simple del suelo estabilizado con los distintos tipos de conglomerantes; a efectos comparativos se representan también la resistencia a compresión de las probetas sin sumergir en agua. Los resultados ponen de manifiesto, como cabía esperar, que el uso de conglomerantes mejora la resistencia a

compresión simple (R_c) del suelo sin estabilizar. El suelo sin estabilizar presentó una R_c de 3,49 MPa, frente a los 8,48 MPa, 24,49 MPa y 32,42 MPa de los suelos estabilizados con los tres conglomerantes estudiados: cemento portland (CP); geopolímero obtenido a partir de FCC, NaOH y Na_2SiO_3 (Geo); y geopolímero obtenido a partir de FCC, NaOH y CCA (Geo-CCA). Si se comparan los tres conglomerantes estudiados se observa que los que presentan un mayor poder de estabilización son los geopolímeros Geo y Geo-CCA, en ambos casos superiores al CP. Si se comparan los dos geopolímeros estudiados Geo y Geo-CCA, los resultados indican que el geopolímero obtenido a partir de CCA consigue un mayor poder de estabilización, 32,42 MPa frente a 24,49 MPa. Esta diferencia podría deberse a que haya podido formarse una mayor cantidad de Na_2SiO_3 en la reacción del NaOH con la CCA. Un resultado sin duda interesante ya que Geo-CCA tiene un menor coste económico y medioambiental, estando en sintonía con el ODS 13, acción por el clima. No olvidar que la diferencia entre Geo y Geo-CCA radica en que en este último caso el silicato sódico se ha sintetizado mezclando en un sistema termostático, NaOH y CCA (fuente de sílice) en estado sólido con agua, para aprovechar el calor liberado en la disolución del NaOH, que favorece la formación del Na_2SiO_3 .

Una vez estudiada la capacidad de estabilización de los tres conglomerantes mencionados anteriormente, mediante una experiencia sencilla se estudió la durabilidad frente al agua de los distintos suelos estabilizados. La experiencia consistió en sumergir en agua las probetas durante 2 y 24 horas ensayándolas posteriormente a compresión simple.



CP: cemento portland

Geo: geopolímero obtenido a partir de FCC, NaOH y Na_2SiO_3

Geo-CCA: geopolímero obtenido a partir de FCC, NaOH y CCA

Figura 1. Comparación de la resistencia a compresión simple de las muestras CP, Geo y Geo-CCA sumergidas en agua durante 2 y 24 horas

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto en todos los casos una disminución de la resistencia cuando se sumergen en agua. Esta reducción es más significativa cuando se sumergen las probetas durante 24 horas, salvo en el caso de los suelos estabilizados con CP. Este hecho, a priori, sorprendente, podría explicarse teniendo en cuenta el proceso de curado a que han sido sometidas las probetas. En el caso de las probetas estabilizadas con CP, casi con toda seguridad, debido a la rápida pérdida de agua producida en el secado en estufa, no hubo tiempo suficiente para la hidratación de todo el CP. Por este motivo cuando las probetas se sumergieron en agua durante 24 horas se produjo la hidratación de una cantidad significativa del CP que no se había podido hidratar con anterioridad. Esta hidratación del CP supuso un aumento de la resistencia a compresión de 3,76 MPa (2 horas de inmersión) a 5,32 MPa (24 horas de inmersión).

Los resultados obtenidos después de la inmersión en agua pusieron de manifiesto que la resistencia a compresión de los suelos estabilizados con geopolímero (Geo y Geo-CCA) fueron netamente superiores a las de los suelos estabilizados con CP. En el caso de los suelos estabilizados con geopolímeros, las diferencias observadas entre 2 y 24 horas de inmersión fueron pequeñas, de menos de 2 MPa en los dos casos. Para Geo y Geo-CCA la resistencia a compresión después de la inmersión en agua durante 24 horas, fue en los dos casos superior a 11 MPa, una resistencia a compresión muy considerable, más del doble de la obtenida por el suelo estabilizados con CP, que fue de 5,32 MPa. Estos resultados ponen de manifiesto las posibilidades de uso de los geopolímeros en la estabilización de suelos.

En la figura 2 se representa la ganancia de masa de las probetas sumergidas durante 2 y 24 horas respectivamente, calculada mediante la diferencia entre después y antes de la inmersión.



Figura 2. Ganancia de masa (en g) de las muestras CP, Geo y Geo-CCA sumergidas en agua durante 2 y 24 horas

Los resultados supusieron ganancia de masa en todos los casos, existiendo una diferencia significativa entre 2 y 24 horas de inmersión. Es evidente que a las 2 horas de inmersión, se ha producido un incremento de las masas considerable en todos los casos (6,69 a 13,07 g). En todo caso, se constata que la penetración de agua en la muestra Geo-CCA es significativamente menor que en los otros casos, lo que puede estar de acuerdo con una mayor compacidad del material: la reacción geopolimérica ha conseguido unir las partículas de árido y además ha reducido la porosidad accesible, lo que da lugar a una menor entrada de agua a través de la superficie de la probeta. Los resultados a 24 horas muestran que sigue habiendo un incremento de agua que penetra en la probeta: de nuevo, en este ensayo se observa un mejor comportamiento para la muestra Geo-CCA.

Finalmente, en la figura 3 se representa con doble eje el incremento de masa y el porcentaje de absorción adaptado de la norma UNE 41410 (2008) para probetas de 40x40x40 mm

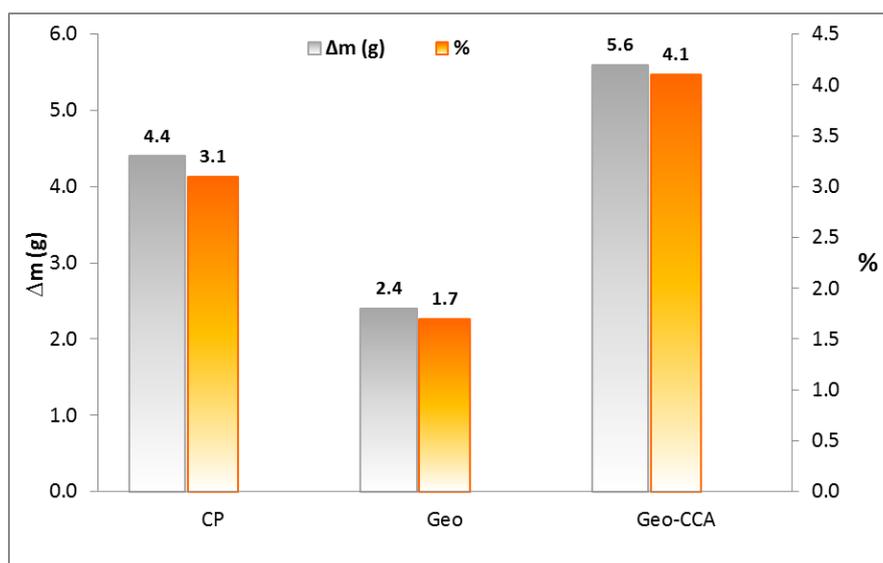


Figura 3. Incremento de masa y porcentaje de absorción de las muestras CP, Geo y Geo-CCA

Los mayores valores de absorción corresponden a las probetas de suelo estabilizado con Geo-CCA, si bien esta mayor absorción, como se vio en los resultados de resistencia a compresión simple representados en la figura 1, no se tradujo en menores valores de resistencia a compresión, sino en lo contrario. Las probetas Geo-CCA presentaron la resistencia a compresión más elevada (32,42 MPa). Los menores valores de absorción correspondieron a las probetas Geo, que fue del 1,7%, muy por debajo de las probetas CP, que fue del 3,1%. Es posible que el proceso de curado de Geo-CCA haya dado lugar a una mayor porosidad superficial que da lugar a una elevada absorción; sin embargo, el agua del interior de la probeta no fue evaporada, de manera que el geopolímero formado dio lugar a una gran estabilidad mecánica. Es evidente que se requieren más ensayos para confirmar ese proceso de evaporación superficial en el proceso de curado.

En la tabla 2 se muestran los valores de emisiones de CO₂ asociadas a cada uno de los tres suelos estabilizados.

Tabla 2. Emisiones de CO₂ asociadas a los suelos estabilizados.

Componentes	Contribuciones (emisiones de CO ₂ , kg de suelo estabilizado)			Porcentaje de contribución (%)		
	CP	Geo	Geo-CCA	CP	Geo	Geo-CCA
Suelo						
Cemento	0,090			100		
FCC		0,007	0,007		4,2	15,2
NaOH		0,026	0,037		16,1	84,8
SS		0,126			79,7	
CCA						
Total	0,090	0,158	0,043	100	100	100

Los valores de CO₂ por kg de materia prima, cemento portand (CP), NaOH, silicato sódico (SS) y catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC), se han obtenido de Mellado et al. (2014), considerando una molienda industrial de FCC. Se observa que para la muestra CP, la única contribución a las emisiones de CO₂ es la que corresponde al cemento: 0,09 kg por kg de suelo. Para la mezcla Geo, se constata que hay varias contribuciones, pero destaca sobremanera el CO₂ asociado al SS (supone casi el 80% de las emisiones totales); además, se debe destacar que el CO₂ asociado a Geo es muy superior al asociado a CP (0,158

frente 0,090 kg de CO₂/kg de suelo): ello significa que el uso de geopolímeros no supone necesariamente una reducción en las emisiones de CO₂. Sin embargo, la sustitución del SS por CCA (incrementando la cantidad de NaOH) ha supuesto una reducción muy importante de las emisiones de CO₂: se obtiene un valor de 0,043 kg de CO₂ por kg de suelo estabilizado, esto es aproximadamente el 52% menos que para CP. En este caso, la mayor contribución a las emisiones está relacionada con NaOH (84%). Por todo ello, se puede afirmar que la huella de carbono asociada al suelo estabilizado con FCC/NaOH/CCA es muy ventajosa.

5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la viabilidad del uso de conglomerantes basados en cementos de activación alcalina (CAA), en la estabilización de suelos. Por un lado, cuando se comparan los CAA con el CP, se observan unas mejores resistencias a compresión simple de los primeros, así como un mejor comportamiento frente a la inmersión en agua. Por otro lado, cuando se compara los dos CAA estudiados (Geo y Geo-CCA), se obtuvieron mejores resultados, en lo que a resistencia a compresión simple se refiere, para Geo-CCA. La absorción de agua mayor correspondió a Geo-CCA, seguida de CP y finalmente Geo. Cabe destacar que la elaboración de estos suelos estabilizados supone la reutilización de residuos tales como FCC o CCA, y que adicionalmente se produce una reducción de la huella de carbono del Geo-CCA frente al CP.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM STP479 (1970). Special procedures for testing soil and rock for engineering purposes. USA: ASTM International
- Bouzón, N.; Payá, J.; Borrachero, M. V.; Soriano, L.; Tashima, M. M.; Monzó, J. (2014). Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders, *Materials Letters*, 115, 72–74.
- Cosa, J.; Soriano, L.; Borrachero, M. V.; Reig, L.; Jordi 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>
- 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
- Imbabi, M. S.; Carrigan, C.; McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 194-216. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.05.001>
- 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 and 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. (2009). Synthesis and characterization of a concrete based on metakaolingeopolymer. *Inorganic Materials*, 45 (12), 1429-1432.
- Mellado, A.; Catalán, C.; Bouzón, N.; Borrachero, M. V.; Monzó, J. M.; Payá, J. (2014). Carbon footprint of geopolymeric mortar: study of the contribution of the alkaline activating solution and assessment of an alternative route. *RSC Advances*, 4, 23846.
- Minke, G. (2005). Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Editorial Fin de Siglo
- Moraes, J. C. B.; Font, A.; Soriano, L.; Akasaki, J. L.; Tashima, M. M.; Monzó, J.; Borrachero, M. V.; Payá, J. (2018). New use of sugar cane straw ash in alkali-activated materials: A silica source for the preparation of the alkaline activator. *Construction and Building Materials*, 171, 611-621. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.230>.

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 and Building Materials*, 66, 163-171.

NTC 5324 (2004). Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones, especificaciones, métodos de ensayo, condiciones de entrega (traducción de la norma francesa XP P 13-901 del año 2001). Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación

PNUD, (sf). Objetivos desarrollo sostenible, Agenda 2030 para el desarrollo sostenible: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sdgoverview/post-2015-development-agenda.html>

Rodríguez, E. D.; Bernal, S. A.; Provis, J. L., Gehman, J. D.; Monzó, J.; Payá, J. (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>.

Shi, C.; Fernández Jiménez, A.; Palomo, A. (2011). The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research* 41, 750-763.

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). *Materials Letters*, 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. *Materiales de Construcción*, 65 (3), <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.00814>.

UNE 103 501 (1994). Geotecnia: ensayo de compactación Proctor modificado. España: Asociación Española de Normalización y Certificación

UNE 41410 (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. España: Asociación Española de Normalización y Certificación

UNE-EN 196-1 (2018). Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias. España: Asociación Española de Normalización y Certificación

Zhang M.; Guo, H.; El-Korchi, T.; Zhang, G.; Tao, M. (2013). Experimental feasibility study of geopolymers as the next generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 47, 1468-1478

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España por la financiación el proyecto Apligeo (BIA2015 70107-R), Ecosost (RTI2018-097612-B-C21) y a los Fondos FEDER; a la empresa Pavasal por su colaboración aportando el suelo, a Omya Clariana S.A. por suministrar el FCC, a Maicerías Españolas DACSA S.A. por la CCA y a Lafarge por el CP.

AUTORES

Verónica de Dios es estudiante de Arquitectura en la Universitat Politècnica de València desde el año 2012, finalizando este año el grado. Ha participado en diferentes cursos de imagen, tales como Rhinceros + Vray (con el estudio Draw Your Dreams) y Photoshop avanzado (con el estudio Agraph). Ha participado en dos concursos internacionales, quedando finalista en ambos (con la compañía Arquideas).

Juan Cosa Martínez es estudiante de doctorado en Ingeniería de la Construcción, Máster en Dirección y Gestión de Proyectos y Arquitecto Técnico. Es miembro del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València (UPV).

Miguel Angel Carrión es Profesor Titular del Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universitat Politècnica de València. Es Máster en Mecánica de Suelos por el Imperial College London. Es Doctor Ingeniero por la UPV en colaboración con el Imperial College London. Sus líneas de investigación son: análisis experimental y comportamiento hidromecánico de suelos y análisis de riesgos por deslizamiento. Ha publicado artículos en revistas de alto impacto como *Landslides* y *Soils and Foundation*.

Jordi Payá es Doctor en Ciencias Químicas por la Universitat de València; Catedrático de Universidad de la Universitat Politècnica de València; miembro del grupo de investigación en Química de Materiales de Construcción (GIQUIMA) y del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la UPV; autor de más de 150 publicaciones JCR y de más de 250 comunicaciones a congresos científicos.

M^a Victoria Borrachero es Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad de Murcia; Catedrática de Universidad de la Universitat Politècnica de València; miembro del grupo de investigación en Química de Materiales de Construcción (GIQUIMA) y del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la UPV; autora de más de 100 publicaciones JCR y de más de 150 comunicaciones a congresos científicos.

Lourdes Soriano es Doctora en Ciencias Químicas por la Universitat Politècnica de València, técnico medio del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, miembro del grupo de investigación en Química de Materiales de Construcción (GIQUIMA) y del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la UPV, autora de más de 60 publicaciones JCR y de más de 60 comunicaciones a congresos científicos.

José María Monzó Balbuena es Doctor en Ciencias Químicas por la Universitat de València; Catedrático de Universidad de la Universitat Politècnica de València; miembro del grupo de investigación en Química de Materiales de Construcción (GIQUIMA) y del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la UPV; 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 23. Ha dirigido 7 tesis doctorales. Es coautor de una patente.