

# USO DE CENIZA DE CÁSCARA DE ALMENDRA Y DE ARROZ EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Oussama Khodjet el Fehem<sup>1</sup>, Lourdes Soriano<sup>2</sup>, María Victoria Borrachero<sup>3</sup>, Jordi Payá<sup>4</sup>, José María Monzó<sup>5</sup>

<sup>1</sup>University of Bechar, Argelia; Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España, khodjetelfehm.oussama@univ-bechar.dz

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España

<sup>2</sup>lousomar@upvnet.upv.es; <sup>3</sup>vborrachero@cst.upv.es; <sup>4</sup>jppaya@cst.upv.es; <sup>5</sup>jmonzo@cst.upv.es

**Palabras clave:** cenizas de biomasa, activación alcalina, materiales residuales, sostenibilidad

## Resumen

Los cementos de activación alcalina son conglomerantes que presentan buenas propiedades tanto físicas como químicas. Son materiales que se están utilizando también para la estabilización de suelos con buenos resultados. En estas investigaciones preliminares que se presentan, se ha evitado el uso de reactivos químicos en la síntesis de los cementos de activación alcalina, siendo sustituidos éstos por materiales residuales como la escoria de alto horno, la ceniza de cáscara de almendra y la ceniza de cáscara de arroz. El objetivo del presente trabajo es conocer el comportamiento de estas cenizas de biomasa utilizadas como activadores de la escoria de alto horno, estudiando la variación de la resistencia a compresión con el tiempo de curado, así como la capacidad de absorción de agua y su estabilidad frente a la inmersión en agua. De los resultados obtenidos se confirma que la mezcla de los residuos anteriormente mencionados presenta la capacidad de aglutinar las partículas de suelo obteniendo resistencias a compresión elevadas que superan los 9,5 MPa, frente a los 3,1 MPa de suelos sin estabilizar, en ambos casos a los 90 días de curado; así mismo, los suelos estabilizados tienen un buen comportamiento frente a la absorción y a la inmersión en agua.

## 1 INTRODUCCIÓN

La tierra es un material que ha sido utilizado a lo largo de la historia como material de construcción con muy buenos resultados. En la actualidad, la tierra se utiliza como material de construcción fundamentalmente en viviendas rurales donde se dispone fácilmente de tierra con propiedades adecuadas para la preparación de adobe y tapial. Si se desea aumentar las prestaciones del material, se pueden utilizar los bloques de tierra compactada, también conocidos como BTC, para cuya preparación se utiliza una máquina Cinva Ram, que consigue la compactación de los bloques mediante un prensado manual, mejorando así las propiedades mecánicas por este fenómeno físico. Ya en el ámbito de la química, se pueden mejorar las prestaciones de los bloques con el uso de estabilizantes que faciliten la unión de las partículas de tierra. Los más habituales son los estabilizantes minerales, como la cal, mezclas de cal y puzolanas de distintos tipos, y el cemento portland solo o en combinación también con puzolanas (Minke, 2005). Hasan et al. (2016) han utilizado ceniza de bagazo de caña de azúcar mezclado con cal hidratada en una relación 3:1 en masa, demostrando unas buenas prestaciones en suelos expansivos. Los resultados pusieron de manifiesto la mejora de la mezcla cal-puzolana frente a solamente cal. Otros investigadores como Basha et al. (2005) utilizaron mezclas de cemento portland con ceniza de cáscara de arroz, mejorando los resultados con respecto al cemento portland solo. Rahgozar y Saberian (2018) estudiaron también el sistema cemento portland-ceniza de cáscara de arroz, observando que adiciones de 6% de RHA y 8% de OPC mejoraron hasta 25 veces la resistencia del suelo sin estabilizar.

Los datos alarmantes que ponen de manifiesto el fenómeno del cambio climático han llevado a reducir la producción de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>: este hecho ha sido recogido en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 13, Acción por el Clima (PNUD). El cemento portland presenta una huella de carbono significativa, siendo responsable de

aproximadamente entre el 6 y el 8% de las emisiones antropogénicas totales de dióxido de carbono (Andrew, 2018). Por este motivo existe recientemente un interés cada vez mayor en el desarrollo de nuevos materiales conglomerantes con menores emisiones asociadas de CO<sub>2</sub> (Payá et al., 2019a). Uno de estos materiales son los cementos de activación alcalina, que se producen a partir de materiales ricos en aluminio y silicio o bien aluminio, silicio y calcio, denominados precursores, que se activan con disoluciones de elevada alcalinidad fundamentalmente hidróxidos y/o silicatos sódicos y/o potásicos comerciales, denominados activadores. Si bien estos cementos de activación alcalina, en general, tienen una huella de carbono significativamente menor que el cemento portland, su coste económico puede ser superior, lo que desincentivaría su uso en contextos de subdesarrollo. Por todo ello, se viene trabajando en una línea de investigación interesante que tendría un doble objetivo: por un lado, reducir el coste económico; y, por otro lado, reducir más el coste medioambiental. Las investigaciones irían encaminadas a sustituir en la medida de lo posible el activador por materiales residuales, obteniendo así cementos de activación alcalina de un menor coste tanto económico como medioambiental. Así se han podido sustituir los silicatos alcalinos por mezclas de hidróxido alcalino (NaOH o KOH) y cenizas de biomasa ricas en sílice, tales como la ceniza de cáscara de arroz (Mellado et al., 2014), la ceniza de bagazo de caña de azúcar (Tchakouté et al., 2017) y la ceniza de hoja de caña de azúcar (Moraes et al., 2018), entre otros. Recientemente, utilizando cenizas de biomasa ricas en calcio y/o en potasio se han podido realizar reacciones de activación alcalina sin la necesidad de utilizar reactivos químicos. Por ejemplo, una ceniza de madera con alto contenido en calcio se utilizó en la activación de ceniza volante de central termoeléctrica (Ban et al., 2017). Así mismo, Font et al. (2017) han conseguido activar la escoria de alto horno con ceniza de hueso de oliva, rica en calcio y en potasio. En la investigación que se presenta se ha utilizado una mezcla de ceniza de cáscara de almendra, ceniza de cáscara de arroz y escoria de alto horno, todos ellos materiales residuales, para la estabilización de un suelo, evitando la utilización de reactivos químicos, reduciendo así el coste económico y medioambiental.

## 2 OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es conocer el comportamiento de las cenizas de biomasa provenientes de la combustión de la cáscara de almendra y de arroz utilizadas como activadores de la escoria de alto horno (precursor) en la preparación de cementos de activación alcalina para la estabilización de suelos. Se estudió la variación de la resistencia a compresión de bloques de suelo compactado con el tiempo de curado, así como la capacidad de absorción de agua y su estabilidad frente a la inmersión en agua.

## 3 METODOLOGÍA

El suelo utilizado fue suministrado por la empresa Pavasal, se trata de un suelo dolomítico obtenido por machaqueo. El tamaño máximo de los granos fue de 4 mm, cuya composición granulométrica es la siguiente (% que pasa): 2mm = 73,6%; 1,15mm = 59,3%; 0,40mm = 39,3%; 0,16mm = 31,4%; 0,08mm = 26,9%. La escoria de alto horno (337,5g), la ceniza de cáscara de almendra (67,5g) y la ceniza de cáscara de arroz (45g) han sido molidas conjuntamente (comolienda) durante 30 minutos en un molino de bolas Gabbrielli-2 utilizando una jarra de un volumen de un litro y 80 bolas de alúmina de 18mm de diámetro. El diámetro medio obtenido después del proceso de molienda fue de 24,8µm (determinado con granulometría láser, suspensión en agua, Malvern Mastersizer 2000). En la tabla 1 se muestra el análisis químico de los tres materiales.

Tabla 1. Análisis químico de la escoria de alto horno (ESC), la ceniza de cáscara de almendra (ABA) y ceniza de cáscara de arroz (CCA).

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Otros	PF*
ABA	0.19	0.64	18.73	0.57	46.98	0.37	1.68	2.84	28.0
ESC	10.55	30.53	40.15	1.29	0.57	0.87	7.43	3.08	5.53
CCA	0.25	85.58	1.83	0.21	3.39	-	0.50	1.25	6.99

\*. PF. Pérdida al fuego

Para determinar la cantidad de agua, necesaria para la obtención de la densidad óptima, se siguió el ensayo de compactación con Proctor modificado con mini Harvard según ASTM STP479 (1970). La norma UNE 103501 (1994) fue seguida para la determinación de la máxima densidad con la humedad óptima. La energía de compactación usada fue de  $2632 \text{ J/cm}^3$ . 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 ( $140 \pm 5 \text{ rpm}$  para la rotación de la pala y  $62 \pm 5 \text{ rpm}$  para el movimiento planetario). Primeramente, se mezcló el agua (variando entre el 7,5 y 10% del total de la mezcla) con del cemento preparado por comolienda (6% con respecto a la cantidad de suelo) durante 4 minutos; posteriormente se añadió 1100 g de suelo y se amasó durante 3 minutos más, obteniendo una mezcla homogénea. También se realizó el mismo tipo de ensayo únicamente con suelo, en este caso variando también la cantidad de agua (7,5 al 10% del suelo) con 1100 g de suelo siguiendo el mismo procedimiento con un tiempo total de amasado de 7 minutos.

Para la preparación de las probetas, se eligió la mezcla de máxima densidad obtenida en el ensayo de compactación con Proctor modificado (9% de agua para el suelo con cemento y 8.5% de agua para el suelo sin estabilizante). Las mezclas obtenidas se compactaron utilizando un molde cúbico que permitió la fabricación de probetas de 40 mm de lado: se procedió a compactar el material en tres tongadas, usando una maza tipo Army de 1,5 kg. La energía aplicada fue la misma que la del ensayo miniproctor ( $2632 \text{ J/cm}^3$ ), para ello se utilizó una maza de 1,5 kg, la cual fue lanzada desde 20 cm de altura un total de 19 veces. Las probetas cúbicas se guardaron con un film plástico, para evitar la evaporación del agua de la mezcla. Dichas probetas se curaron durante 28 días a  $20\text{-}23^\circ\text{C}$  en el laboratorio. Posteriormente se retiró el film plástico y se dejaron secar al ambiente de laboratorio. Las probetas para ensayo a compresión (6-7 cubos) se dejaron secar durante 2 días, mientras que las probetas para los ensayos de absorción (3 cubos) y de resistencia a compresión posterior a inmersión en agua (4 cubos) se dejaron secar al ambiente hasta peso constante (7-10 días aproximadamente).

El ensayo a compresión se llevó a cabo en una máquina universal INSTRON modelo 3382, con una velocidad de desplazamiento de  $1 \text{ mm/min}$ . En 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); posteriormente se ensayaron a compresión. También se realizó una experiencia de inmersión en agua durante un tiempo de 72 horas usando las probetas procedentes del ensayo de absorción.

#### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio preliminar se obtuvieron las resistencias a compresión de los suelos estabilizados con un 6% en peso de cemento de activación alcalina respecto al suelo; el cemento estaba formado por una mezcla de escoria de alto horno (75% en peso), ceniza de cáscara de almendra (15% en peso) y ceniza de cáscara de arroz (10% en peso). Se prepararon las probetas siguiendo el procedimiento indicado en el apartado 3; para ello fue necesario calcular la humedad para la obtención de la densidad óptima, mediante el ensayo de compactación con Proctor modificado con mini Harvard según ASTM STP479 (1970). Los resultados obtenidos tanto para el suelo sin estabilizar como para el suelo estabilizado con un 6% de cemento de activación alcalina se muestran en la figura 1. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la humedad para una densidad seca óptima para el suelo sin estabilizar es del 8,5% y para el suelo estabilizado con un 6% de cemento de activación alcalina fue del 9% aproximadamente.

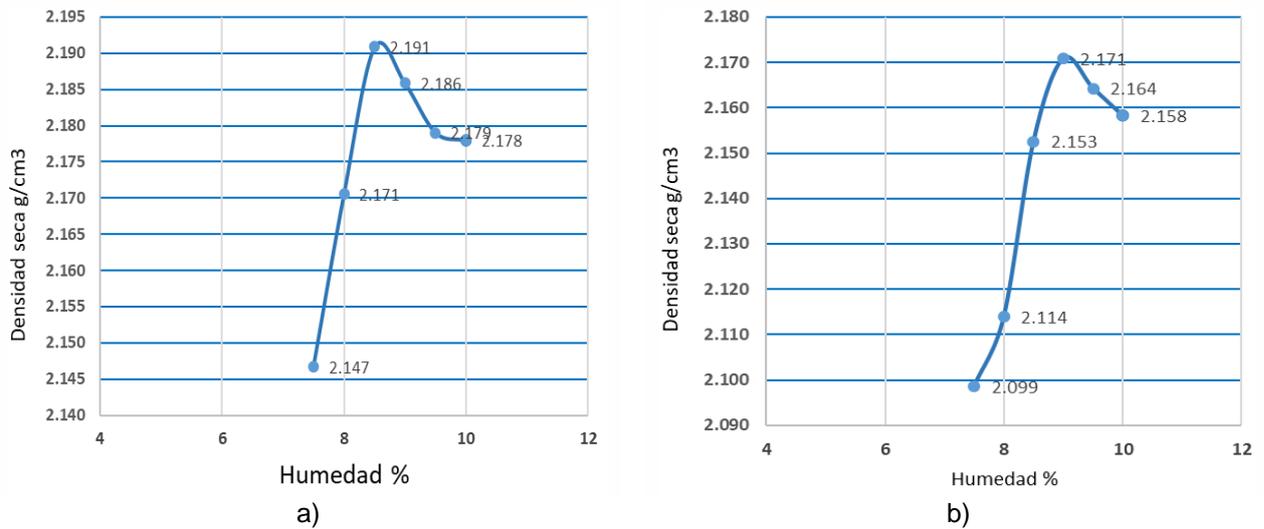


Figura 1. Curvas de densidad seca frente a la humedad de la mezcla: a) suelo sin estabilizar; b) suelo estabilizado con un 6% de cemento de activación alcalina

A partir de los datos obtenidos se prepararon y ensayaron las probetas correspondientes de acuerdo a la normativa indicada en el apartado 3. Los resultados se muestran en la figura 2.

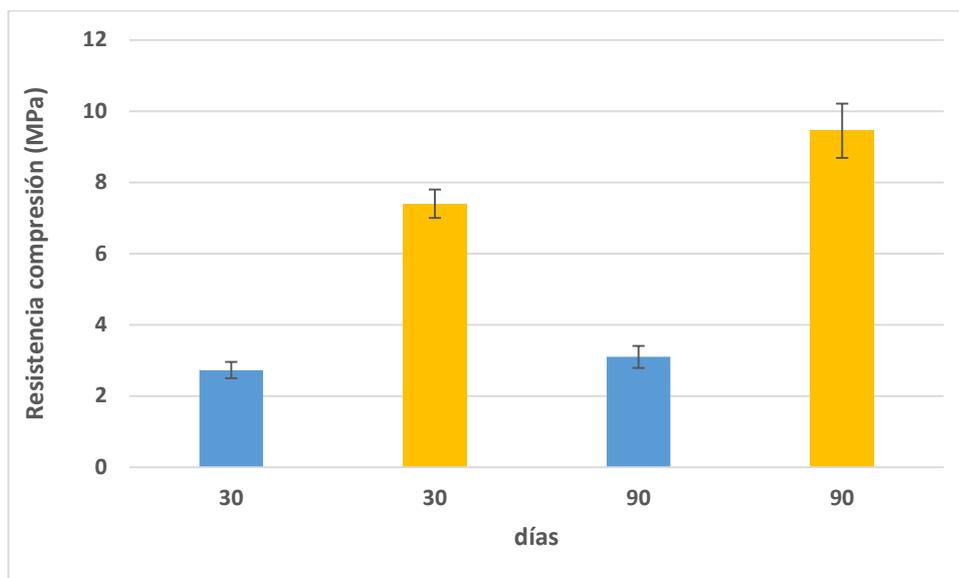


Figura 2. Resistencia a compresión a 30 y 90 días de curado para el suelo sin estabilizar (color azul) y el suelo estabilizado con un 6% de cemento de activación alcalina (color amarillo).

Los resultados ponen de manifiesto en ambos casos un incremento de la resistencia a compresión con el tiempo de curado, si bien ésta es más acusada como cabía esperar en el suelo estabilizado. Los valores del suelo estabilizado triplican al del suelo sin estabilizar constatándose, además, un aumento significativo entre el dato a los 30 días (7,4MPa) y los 90 días (9,5MPa) para el suelo estabilizado (incremento del 28,4%). Esta estabilización se debe a la formación de geles cementantes generados en la activación de la escoria de alto horno. La ceniza de cáscara de almendra genera un medio alcalino que permite la hidratación de la escoria, mientras que la ceniza de cáscara de arroz también se disuelve en medio alcalino y suministra al medio aniones silicato. En esas condiciones, y teniendo en cuenta que la ceniza de cáscara de almendra es rica en calcio y potasio, se formarán geles cementantes en la activación de la escoria, del tipo C(K)-S-H y C(K)-A-S-H.

El ensayo de absorción y el ensayo de resistencia al agua se llevaron a cabo con las probetas secas al ambiente. Solamente se realizaron los ensayos sobre suelo estabilizado, ya que las probetas con suelo sin estabilizar se desmoronaron a lo largo del ensayo. La absorción por capilaridad del suelo estabilizado, a los 10 minutos, dio como resultado un incremento de masa de  $2,35 \pm 0,16\%$  el coeficiente de absorción fue de  $85 \pm 6 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$ . Este dato es ligeramente superior al encontrado en otras investigaciones (Payá et al., 2019b) en suelo estabilizado con cemento de activación alcalina al 10%, basado en escoria de alto horno, ceniza de biomasa (de cáscara de almendra o de hueso de oliva). En la figura 3 se muestra la evolución de la absorción con el tiempo.

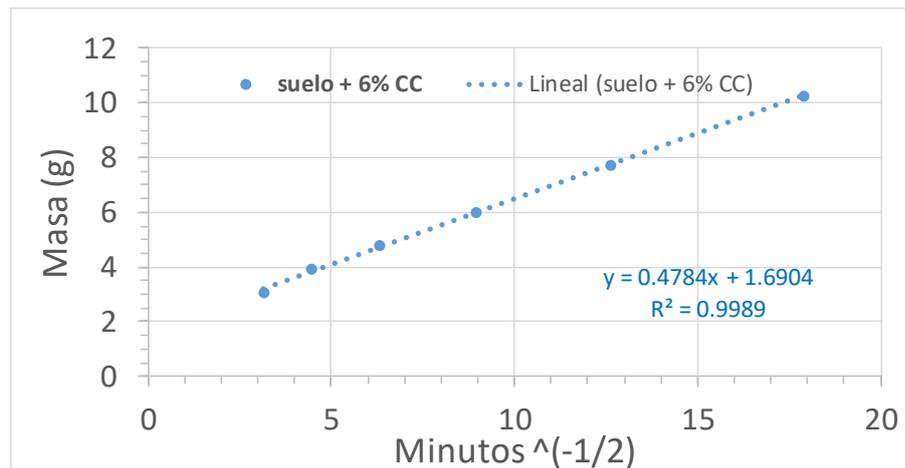


Figura 3. Curva de absorción de agua de probetas de suelo estabilizado con 6% de cemento de activación alcalina.

Las probetas sumergidas durante 2 horas en agua obtuvieron una resistencia mecánica a compresión de  $4,8 \pm 0,7 \text{ MPa}$ , con un incremento de masa final del  $7,37 \pm 1,12 \%$ . Se ha producido un descenso significativo de la resistencia (resistencia remanente del 50%), lo que indica que la estabilización ha sido parcial, aunque en estas condiciones drásticas se concluye que este tipo de material presenta buen comportamiento.

En cuanto a la inmersión durante 72 horas, las probetas procedentes del ensayo de absorción fueron sumergidas en agua y se monitorizó la variación de masa y la resistencia a compresión. Se observó un incremento de masa con respecto a la probeta seca (previo al ensayo de absorción) del  $8,18 \pm 0,41 \%$ . Verse por tanto que no se ha producido un gran incremento con respecto a las dos horas, lo que concluye que a las dos horas el sistema se puede considerar saturado de agua. Sorprendentemente, el valor de resistencia mecánica a compresión fue de  $5,6 \pm 0,7 \text{ MPa}$ . Este valor es ligeramente mayor que el obtenido a las 2 horas de inmersión, lo cual significa que durante la inmersión a largo tiempo se ha producido una ligera contribución cementante. Ello puede ser debido a que había parte de escoria sin reaccionar y que, en contacto con el agua, se ha producido una mayor extensión de la hidratación de la escoria. De ese modo, se incrementa ligeramente la resistencia y se demuestra que el sistema es muy estable en condiciones extremadamente drásticas: los geles cementantes no han perdido la capacidad de unir las partículas de suelo.

## 5 CONCLUSIONES

Los resultados ponen de manifiesto que es factible estabilizar un suelo dolomítico mediante un cemento de activación alcalina obtenido exclusivamente a partir de residuos, sin la utilización de reactivos químicos comerciales. Se confirma que la mezcla de escoria de alto horno, ceniza de cáscara de almendra y ceniza de cáscara de arroz presenta propiedades cementantes capaces de aglutinar las partículas de suelo obteniendo unas resistencias a compresión elevadas que superan los  $9,5 \text{ MPa}$ , frente a los  $3,1 \text{ MPa}$  de suelos sin estabilizar, en ambos casos a los 90 días de curado. Los suelos estabilizados tienen un buen comportamiento frente a la absorción y a la inmersión en agua. Los geles cementantes

generados en la activación de la escoria de alto horno son estables en condiciones drásticas de inmersión y siguen manteniendo fuertemente unidas las partículas de suelo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrew, R. (2018): "Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production", *Earth System Science Data*, 10, 2213-2239.
- ASTM STP479 (1970). Special procedures for testing soil and rock for engineering purposes. USA: ASTM International
- Ban, Ch.; Ken, P. W.; Ramli, M (2017). Mechanical and durability performance of novel self-activating geopolymer mortars. *Procedia Engineering* 171, 564-571. doi:10.1016/j.proeng.2017.01.374
- Basha E. A.; Hashim, R.; Mahmud, H. B.; Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials* 19, 448-453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>.
- Font, A.; Soriano, L.; Moraes, J. C. B.; Tashima, M. M.; Monzó, J.; Borrachero, M. V.; Payá, J. (2017). A 100% waste-based alkali-activated material by using olive-stone biomass ash (OBA) and blast furnace slag (BFS). *Materials Letters* 203, 46-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.05.129>
- Hasan, H.; Dang, L.; Khabbaz, H.; Fatahi, B.; Terzaghi, S. (2016). Remediation of expansive soils using agricultural waste bagasse ash. *Procedia Engineering*, 143, 1368-1375.
- 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, 23846-23852. doi:10.1039/C4RA03375B
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.230>
- 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
- Payá, J.; Agrela, F.; Rosales, J.; Martín Morales M.; Borrachero, M. V. (2019a). Application of alkali-activated industrial waste. In: J. de Brito and F. Agrela. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. Woodhead Publishing (Duxford, United Kingdom).
- Payá J., Monzó J., Roselló J., Borrachero M.V., Font A. y Soriano L., (2019b). Cenizas alcalinas de biomasa: una alternativa para la estabilización de bloques de tierra compactada. SIACOT 2019, Conservación sostenible del paisaje: tierra y agua 19º Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra VII Volver a la Tierra, Oaxaca (México), 15 al 18 de octubre de 2019.
- PNUD. Objetivos desarrollo sostenible, Agenda 2030 para el desarrollo sostenible: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sdgoverview/post-2015-development-agenda.html>
- Rahgozar, M. A.; Saberian, M.; Li, J. (2018). Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study. *Transportation Geotechnics* 14, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.09.004>
- Tchakouté, H. K.; Rüscher, C. H.; Hinsch, M.; Djobo, N. Y.; Kamseu, E.; Leonelli, C. (2017). Utilization of sodium waterglass from sugar cane bagasse ash as a new alternative hardener for producing metakaolin-based geopolymer cement. *Chemie der Erde - Geochemistry* 77, 257-266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemer.2017.04.003>
- UNE 103501 (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

### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España por la financiación del proyecto Ecosost (RTI2018-097612-B-C21) y a los Fondos FEDER. Los autores también agradecen a las empresas PAVASAL, Cementval, Borges Agrícola & Industrial Nuts (BAIN) y Maicerías Españolas DACSA S.A. por el suministro de las muestras de cenizas y de otros materiales para la preparación de los suelos estabilizados.

### **AUTORES**

Oussama Khodjet el Fehem. Es ingeniero civil y estudiante de doctorado en el departamento de Ingeniería Geotécnica en la Universidad de Bechar en Argelia.

Lourdes Soriano, licenciada en química, doctora por la Universitat Politècnica de València. Co-autora de 70 comunicaciones en revistas indexadas, 6 capítulos de libro y más de 70 comunicaciones en congresos nacionales e internacionales. Investigadora de ICITECH en temas de materiales de construcción en base cemento y nuevas matrices de activación alcalina. Co-directora de 4 tesis doctorales y 11 tesinas final de máster. ORCID 0000-0002-5749-4609

M<sup>a</sup> Victoria Borrachero Rosado, doctora en químicas y Catedrática de Universidad en el área de Ingeniería de la Construcción. Co-autora de más de 120 artículos científicos en revistas indexadas, 6 capítulos de libro. Investigadora en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón de la UPV. Co-directora de 9 tesis doctorales Índice h = 35; Researcher ID L-5436-2014; Código Orcid 0000-0002-7873-0658

Jordi Payá, doctor en ciencias químicas (1990), licenciado de grado en ciencias químicas (1986). Catedrático de Universidad en la Universitat Politècnica de València y Director del Grupo de investigación en Química de los Materiales de Construcción (GIQUIMA). Coautor de 190 artículos en revistas de impacto (JCR) y cerca de 250 comunicaciones en congresos. Orcid ID: 0000-0001-7425-5311. Currículum completo en <http://www.upv.es/ficha-personal/jjpaya>.

José María Monzó Balbuena, doctor en químicas (1990). Es coautor de más de 100 publicaciones en revistas indexadas en el JCR. Tiene un índice h de 33. Ha dirigido 7 tesis doctorales. Es Catedrático de la Universitat Politècnica de Valencia desde el año 2002 y miembro del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Research ID: L-7253-2014. Código Orcid: 0000-0002-3657-3076. Currículum completo en <http://www.upv.es/ficha-personal/jmmonzo>