



PROPIEDADES DE SUELOS ESTABILIZADOS CON GEOPOLÍMEROS FABRICADOS CON RESIDUOS

Juan Cosa¹, José Monzó², Jordi Payá³, Lourdes Soriano⁴, M^a Victoria Borrachero⁵

Grupo de Investigación en Química de los Materiales (GIQUIMA), Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València (UPV), España

¹jcosa@hotmail.es; ²jmmonzo@cst.upv.es; ³jjpaya@cst.upv.es; ⁴lousomar@upvnet.upv.es; ⁵vborrhachero@cst.upv.es;

Palabras clave: activación alcalina, residuo FCC, estabilización de suelo, resistencia a compresión

Resumen

La estabilización del suelo es una técnica basada en el uso de un aglutinante, que puede mejorar la unión de las partículas del suelo, aumentando las propiedades mecánicas y la durabilidad. El aglutinante principal usado es el cemento portland, que presenta una gran huella de carbono. El objetivo de este trabajo es estudiar la estabilización de un suelo dolomítico a partir de geopolímero preparado con reactivos químicos y usando un 85% de materiales residuales, comparando con un suelo estabilizado con cemento Portland. Se ha estudiado por diversas técnicas la microestructura de estos suelos estabilizados. Los resultados demuestran que se pueden conseguir estabilizaciones similares a las conseguidas usando cemento portland, por lo que se considera la opción del uso de geopolímeros como una opción más viable y sostenible desde un punto de vista medioambiental, sobre todo aquella que utiliza un 85% de materiales residuales.

1 INTRODUCCIÓN

El lecho del suelo debe soportar todas las tensiones generadas transmitidas por las estructuras o capas que soporta. A menudo es débil y no tiene suficiente estabilidad en cargas pesadas. El diseño principal de muchos análisis geotécnicos en condiciones de servicio a largo plazo conlleva un análisis del refuerzo por la deformación y la tensión generada, así como la estabilidad de las estructuras del suelo. En los sistemas de edificios, cada desplazamiento puede generar tensiones internas que no se han previsto en el análisis y diseño de estructuras que deberían anticiparse (Ramaji, 2012).

Para la estabilización de suelos existen procedimientos con aditivos naturales o sintéticos para incrementar las propiedades de los suelos, que a veces son utilizados en conjunto. Las técnicas de estabilización de suelos pueden ser clasificadas desde distintos puntos de vista. Uno de ellos se muestra en la figura 1 (Hejazi et al., 2012).

Las prestaciones que se consiguen con la estabilización de suelos permiten una reducción del índice de plasticidad o de su expansión, y un incremento de la durabilidad y la resistencia.

Los métodos mecánicos como la compactación, son ampliamente usados. En este método es importante conocer la relación entre el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima en seco. Se han realizado muchos estudios en este sentido (Yan; Wu, 2009; Ferber et al. 2009). Se pueden destacar los estudios microestructurales, usando porosimetría de intrusión de mercurio (Wang et al., 2017, Cui, 2017).

Los aditivos químicos de tipo convencional también son ampliamente utilizados: Estos aditivos incluyen la cal, el cemento portland y las cenizas volantes y todos ellos tienen en común que son a base de compuestos cálcicos. En presencia de agua, reaccionan químicamente bien con el suelo o por ellos mismos, mejorando la matriz del suelo, reduciendo la expansión, y mejorando la resistencia y durabilidad frente a los ciclos humectación-secado (Soltani et al., 2017a). Mecanismos como intercambio catiónico, floculación y sedimentación, reacción puzolánica y carbonatación son algunos de los procesos identificados en su uso como estabilizantes (Al-Swaidani; Hammoud; Meziab,

2016; Tashima et al, 2012). Otros aditivos usados son los betunes, aunque pueden tener un impacto negativo en el suelo, y su uso debe limitarse por su excesivo contenido en agua. Solo la introducción de betún espumado a la tecnología de construcción de carreteras permitió utilizar el aglomerante de betún para la estabilización del suelo (Hamzah et al., 2015).

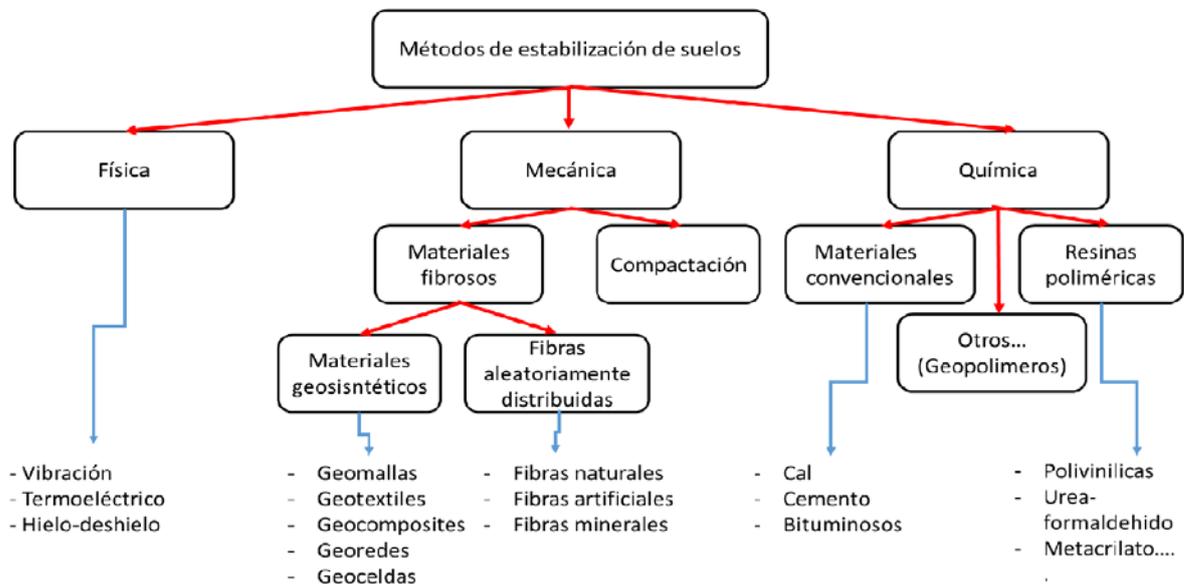


Figura 1. Clasificación de técnicas de estabilización de suelos (adaptada de Hejazi et al., 2012)

Existen otros aditivos que no son tan convencionales que también pueden reaccionar químicamente con el suelo y/u otros agentes que con la suficiente humedad pueden producir interacciones fisicoquímicas con la matriz del suelo. Estos productos pueden incluir aceites sulfonados (Soltani et al, 2017b), o resinas poliméricas (Onyejekwe; Ghataora, 2015)

Recientemente, las investigaciones realizadas sobre el desarrollo de materiales activados alcalinamente revelaron que este método tiene un enorme potencial para ser considerado como un nuevo tipo de conglomerante (Davidovits, 1998; Davidovits, 1994). La activación alcalina (o "geopolimerización") se ha descrito como una policondensación de estructuras de alúmina y sílice dispuestas alternativamente y tetraédricamente, interconectadas por átomos de oxígeno, que conlleva una etapa de destrucción donde se disuelven los enlaces de la materia prima para posteriormente producirse una reacción de coagulación seguida de una condensación y/o cristalización. El proceso de activación alcalina utiliza un material precursor (aluminosilicato) con una disolución fuertemente alcalina. Como precursor se han usado diversos tipos de fuentes de aluminosilicato, por ejemplo, cenizas volantes silicoaluminosas, escorias de alto horno granuladas molidas, las cenizas de combustible de aceite de palma, residuos de la industria petroquímica, etc. (Cristello et al., 2012; Pourakbar et al, 2015; Fasihnikoutalab et al., 2017; Paya et al., 2019). Varias publicaciones mostraron la efectividad del proceso geopolimérico para la estabilización del suelo (Habert et al., 2011, Sargent et al., 2013, Zhang et al., 2013, Cosa et al, 2017). Basadas generalmente en las pruebas microestructurales, estas investigaciones confirmaron que se desarrolla un gel polimerizado de aluminosilicato estructurado. Dentro de los huecos del suelo; este gel ayuda a formar microestructuras más densas y, como resultado, mejora fundamentalmente, la resistencia a la compresión y la durabilidad.

2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es estudiar la estabilización de un suelo dolomítico comparando la estabilización a base de cemento portland con la realizada a partir de geopolímero. Dichos

geopolímeros son preparados a partir de reactivos químicos y usando un 85% de materiales residuales.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo que se ha utilizado para ser estabilizado es de naturaleza dolomítica (procedente de roca dolomítica machadada) y fue suministrado por la empresa Pavasal. Previo a su uso, la muestra de suelo se homogeneiza mediante un cuarteo y posteriormente se tamiza por 4mm, para retirar el material más grueso. El tamaño máximo fue de 4 mm y con la siguiente granulometría (% que pasa): 2mm = 73.6%; 1.15mm = 59.3%; 0.40mm = 39.3%; 0.16mm = 31.4%; 0.08mm = 26.9%. Posteriormente se seca en la estufa a 60°C hasta peso constante, para eliminar la humedad.

El suelo ha sido estabilizado con cemento CEM I-42,5R y mediante un proceso de activación alcalina. Para el proceso de activación alcalina se requiere la mezcla de un precursor y de una disolución activadora fuertemente alcalina. En este trabajo, el precursor usado es un residuo de la industria petroquímica; el catalizador de craqueo catalítico (FCC) material residual de composición silicoaluminosa. Dicho precursor se adiciona en un 10% en peso respecto de la cantidad de suelo utilizado, y ha sido suministrado por la empresa Omnya Clariana, S.L.

La disolución activadora se prepara con una mezcla de NaOH comercial, suministrado por la empresa Panreac S.A., agua y una fuente de sílice. En este trabajo se usan dos opciones como fuente de sílice: una disolución de silicato sódico comercial de la empresa Merck, con una composición del 28% SiO₂, 8% Na₂O, y 64% H₂O; y una ceniza de cáscara de arroz (CCA) suministrada por la empresa Maicerías DACSA que es obtenida de un proceso de combustión con cogeneración de energía.

La disolución activadora con silicato sódico comercial se realiza con 60,8% de Na₂SiO₃, 24% de H₂O, y 13,22% de NaOH, a temperatura ambiente. Su preparación implica una liberación de calor, por lo que antes de utilizarla en la amasada se deja reposar al menos 30 minutos para que pierda el calor producido por la reacción química. En el caso de las disoluciones con CCA se utiliza un recipiente termostatzado para aprovechar la reacción exotérmica de la disolución del NaOH en la disolución de la sílice de la CCA; el procedimiento seguido es añadir en primer lugar, el hidróxido sódico, en segundo lugar, la ceniza de cáscara de arroz y finalmente el agua. Se agita hasta que se obtiene una mezcla homogénea, despresurizando de vez en cuando, tras varias agitaciones y se deja reposar 24 horas antes de su uso.

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 2) es la concreta para el suelo utilizado, obtenida a partir del ensayo de Proctor modificado con mini Harvard según ASTM STP479. La energía de compactación usada fue de 2632 J/cm³.

Las probetas utilizadas para el estudio son de 40x40x40 mm, realizadas con un molde de diseño propio (figuras 3 y 4), 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 a temperatura ambiente en el laboratorio.

El ensayo a compresión se llevó a cabo en una máquina universal INSTRON modelo 3382, con una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min.

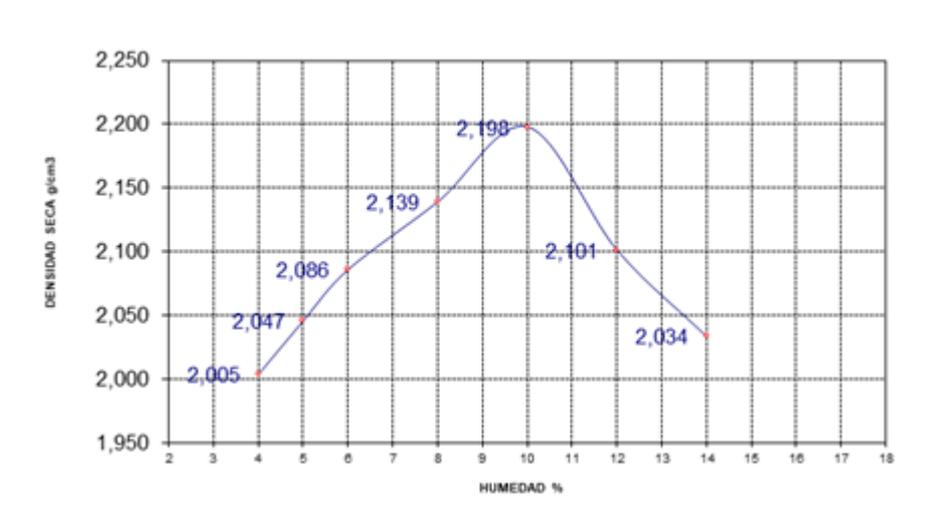


Figura 2. Representación de la curva de Proctor modificada mediante mini harvard (tomada de Cosa et al., 2017)

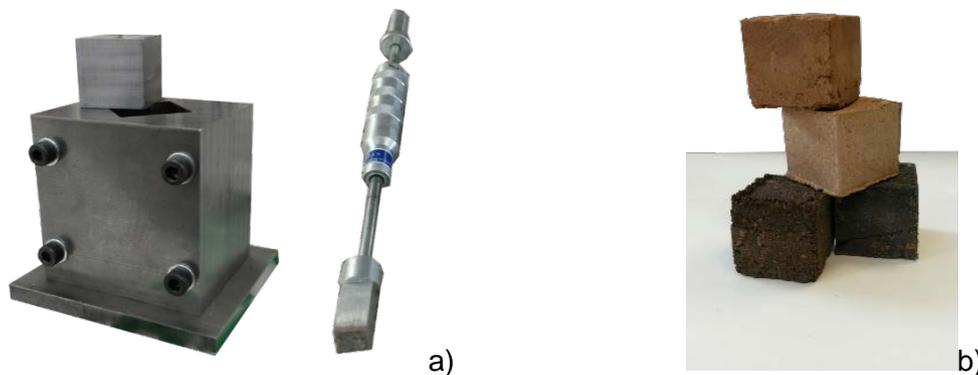


Figura 3. a) Molde de probetas cúbicas; b) Probetas cúbicas de 40 mm x 40 mm x 40 mm

Los estudios microestructurales han sido realizados mediante análisis termogravimétrico, y difracción de rayos X. Una porción de la muestra se machacó en un mortero y se tamizó por 125µm. La muestra resultante se secó a 60°C durante 30 min y se guardó en un eppendorf, para ser sometida a los respectivos análisis.

Para la caracterización química del cemento (OPC), FCC y CCA se ha utilizado un equipo de fluorescencia de rayos X, Philips-MagixPro, equipado con tubo de rodio y ventana de berilio; Para el análisis por difracción de rayos X de los materiales de partida y de las mezclas de suelos estabilizados se han usado un difractómetro Bucker AXS-DS; el intervalo barrido de 2θ ha sido desde 5-70°, con un ángulo de paso de 0.02° y un tiempo de acumulación de 2 s.

En el caso de las muestras analizadas por termogravimetría se ha usado un equipo Mettler Toledo-TGA 850 con un intervalo de calentamiento entre 35-1000°C, a una velocidad de calentamiento de 20°/min, usando una atmósfera de aire seco de 70µL/min y en un crisol de alúmina.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de los compuestos de partida

En la tabla 1 se muestra la composición química del cemento usado, del precursor geopolimérico FCC y de la CCA usada como fuente de sílice en la preparación de la disolución activadora. El FCC presenta en su composición SiO_2 y Al_2O_3 en proporciones en

peso similares y la CCA tiene SiO₂ por encima de un 80%. Se utiliza una ceniza de cáscara de arroz original, con un tamaño de partícula de 62.3 µm (Bouzon et al., 2014).

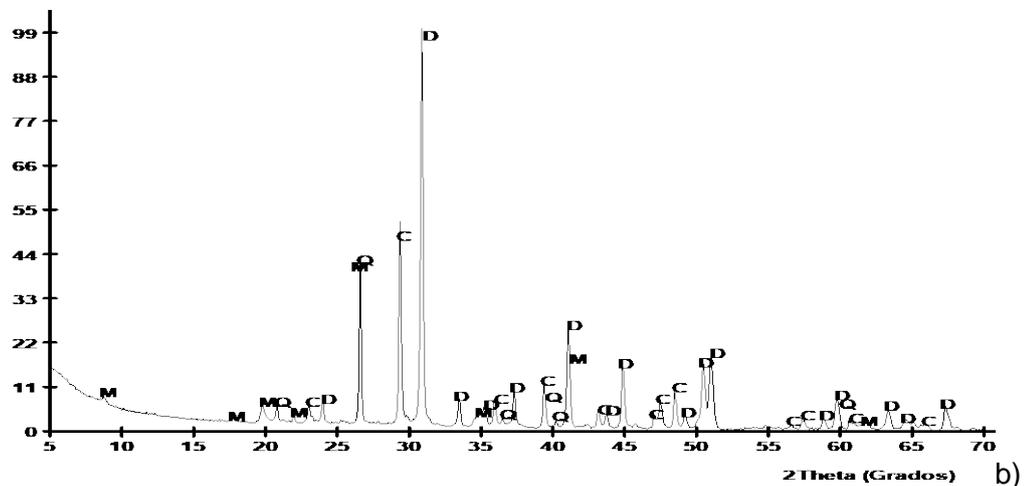
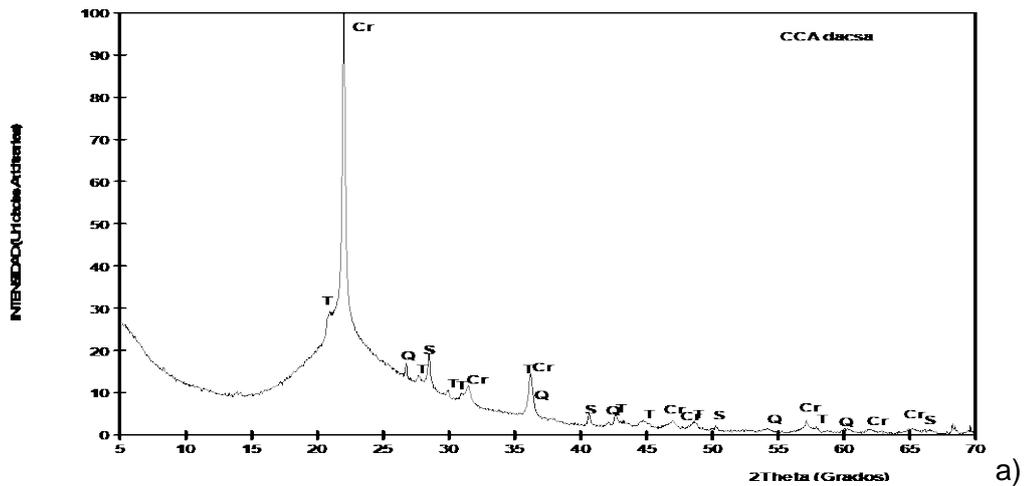
Tabla 1. Composición química de los materiales de partida

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cl ⁻	Others	LOI*
OPC	20,80	3,60	4,80	65,60	1,20	1,70	1,00	0,07	-	-	-	-	1,23
FCC	47,76	49,26	0,60	0,11	0,17	0,02	0,02	0,31	0,01	1,22	-	-	0,51
CCA	85,58	0,25	0,21	1,83	0,5	0,26	3,39	-	0,67	-	0,32	-	6,99

* LOI: Loss of ignition

Respecto a la composición mineralógica de estos materiales se puede destacar que el DRX del FCC usado como precursor presenta como pico principal un aluminosilicato de naturaleza zeolítica (faujasita), acompañado de cuarzo, mullita y trazas de feldespatos tipo albita (Monzó et al, 2001). La ceniza de cáscara de arroz usada presenta una naturaleza fundamentalmente amorfa con picos de cristobalita (Cr) fundamentalmente y trazas de tridimita (T) y silvina (S). Los pequeños picos detectados de cuarzo (Q), se atribuyen a impurezas del suelo donde fue recogida la cáscara de arroz (figura 4a).

El suelo utilizado es de carácter dolomítico. Su difractograma de rayos X (figura 4b) muestra que es mayoritariamente dolomita (D) con calcita (C) y cuarzo (Q) como minerales secundarios y trazas de compuestos tipo filosilicatos como mica moscovita (M) (ver figura 4b). Así mismo, la curva DTG en su análisis termogravimétrico (Figura 4c) muestra un doble pico en el intervalo de temperaturas (600-800°C), que indica una mezcla de dolomita y calcita (Cosa et al., 2017).



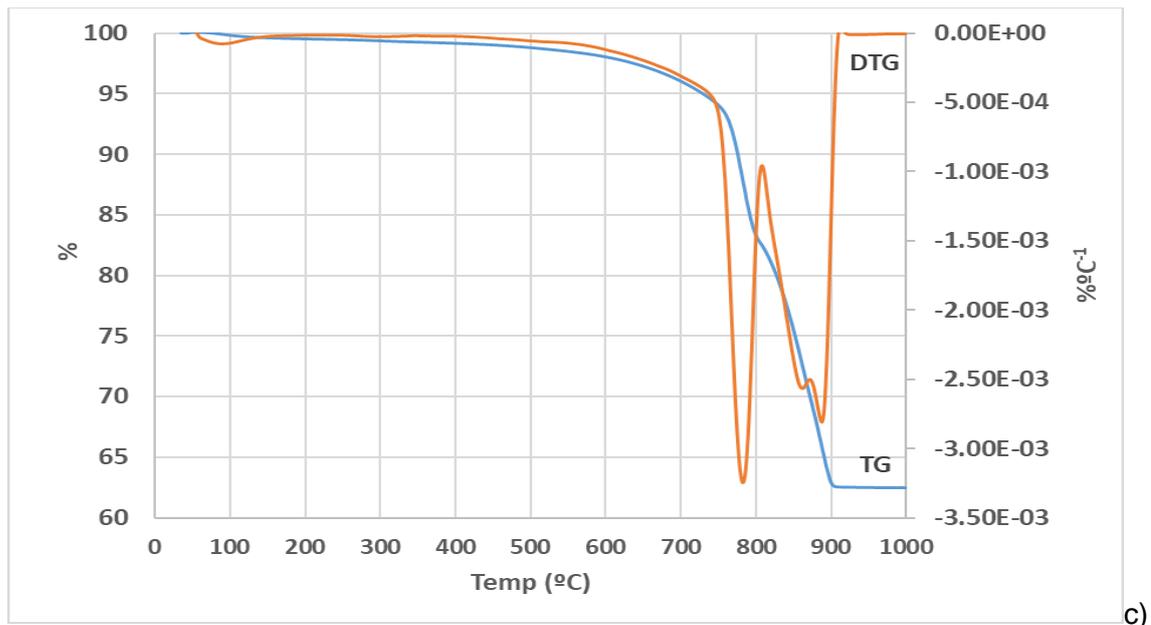


Figura 4. a) Difractograma de rayos X de la muestra de ceniza de cáscara de arroz; b) Difractograma de rayos X de la muestra de suelo; c) Curva TG y DTG de la muestra de suelo (Cosa et al., 2017)

4.2. Resistencias mecánicas a compresión

En la figura 5 se representan los valores de resistencia a compresión de las probetas de suelo sin estabilizar, solamente suelo + agua (denominadas “suelo”) y las probetas de suelo estabilizado. Se puede observar que todas las muestras de suelo estabilizado cumplen con lo establecido en la norma UNE-EN 41410 (2008). Respecto a las probetas que contienen geopolímero las estabilizadas usando CCA son las que mayor resistencia a compresión presentan, por encima de las que contienen el silicato de sodio comercial o las que contienen cemento. Este mejor comportamiento del sistema con CCA constituye una doble mejora, se consiguen tanto beneficios en prestaciones mecánicas como mejoras para el medio ambiente. Este tipo de activaciones alternativas han demostrado que consiguen una reducción de la huella de carbono de hasta un 63% comparado con el cemento portland (Bouzon et al., 2014; Mellado et al., 2014)

Analizando los datos, se puede observar una doble mejora. Respecto del suelo estabilizado con cemento, la muestra con CCA muestra una ganancia de resistencia del 74% a 7 días, lo que indica una mayor velocidad de estabilización respecto al cemento. Por otra parte, el valor de resistencia a compresión del suelo con CCA se incrementa entre un 50-55% a 7 y 28 días, respecto a la estabilizada con geopolímero fabricado con silicato sódico.

4.3. Estudio de la microestructura de los suelos estabilizados: Termogravimetría.

Se han estudiado por termogravimetría las muestras de suelo estabilizado con cemento y con geopolímero activado de las dos maneras. En la figura 6a, se recogen las curvas DTG de las muestras de suelo con agua (suelo), estabilizado con cemento (OPC), estabilizado con geopolímero (FCC + NaOH + NaSiO₃) (SIL) y estabilizado con geopolímero alternativo (FCC + NaOH + CCA) (CCA), todas ellas, a 28 días de curado. Se puede observar dos zonas diferenciadas por tramos de temperatura en estas curvas que son mostradas de forma ampliada en las figuras 6b y 6c

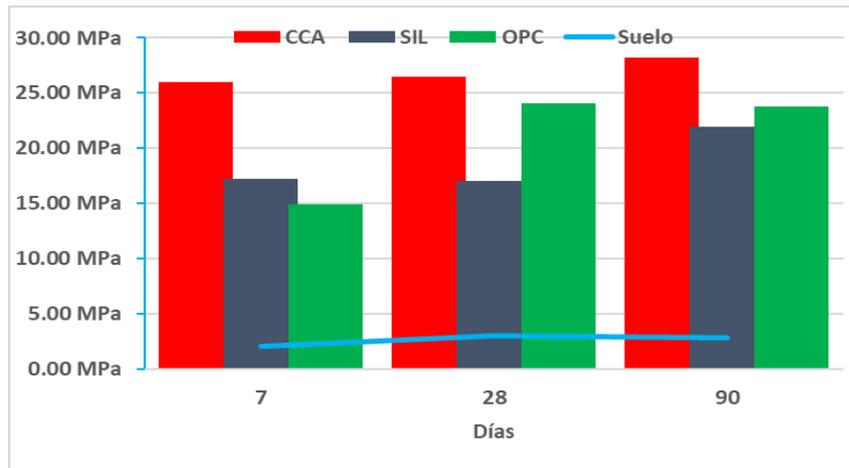


Figura 5. Resistencias a compresión de probetas de suelo sin estabilizar (línea azul) y suelo estabilizado con cemento (OPC), con FCC y mezcla de silicato sódico + NaOH (SIL) y estabilizado con FCC y mezcla de NaOH + CCA (CCA).

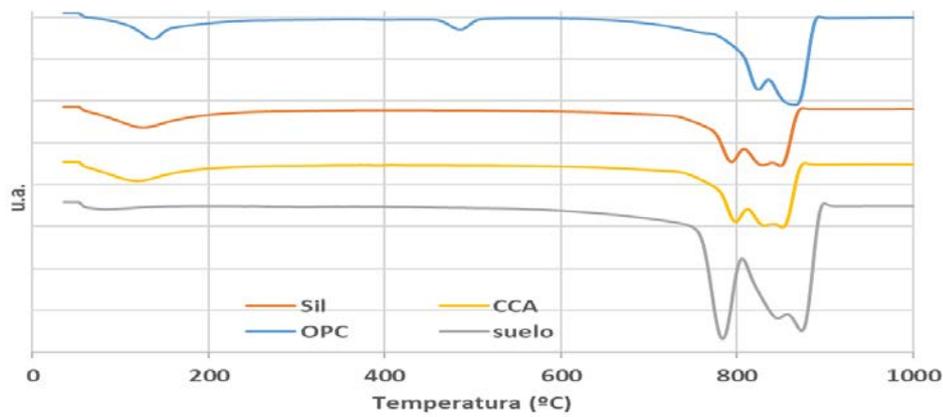


Figura 6a) Curvas DTG de las muestras de suelo curadas a 28 días (Suelo: suelo+ agua; OPC: estabilizada con cemento portland; SIL: estabilizada con geopolímero a partir de FCC, Na_2SiO_3 y NaOH; CCA: estabilizada con geopolímero a partir de FCC, CCA y NaOH)

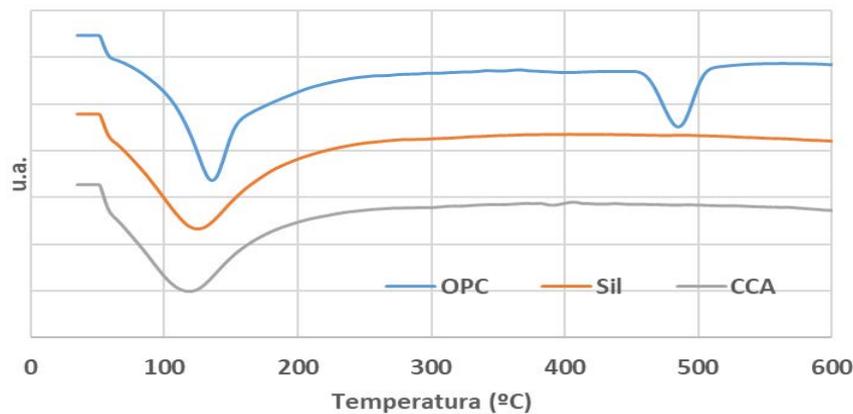


Figura 6b) Curvas DTG de las muestras de suelo estabilizadas a 28 días de curado. Zona ampliada en el intervalo de temperaturas 35-600°C

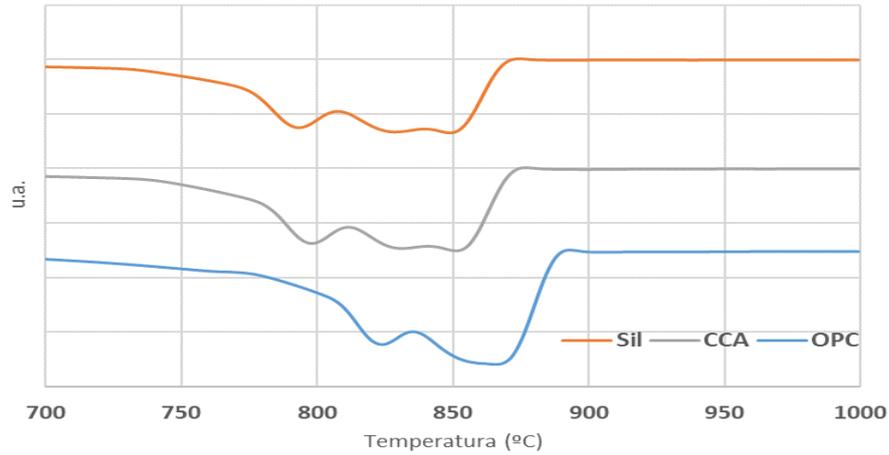


Figura 6c) Curvas DTG de las muestras de suelo estabilizadas a 28 días de curado. Zona ampliada en el intervalo de temperaturas 700-1000°C

En la figura 6b se observan las curvas DTG de las muestras de suelo estabilizadas en el intervalo de temperaturas 35-600°C. Entre 100-250°C, se observa en la curva DTG en los suelos estabilizados un pico. En el caso de la muestra estabilizada con cemento, es debido a la formación de hidratos cementantes propios de la hidratación del cemento, (C-S-H fundamentalmente) mientras que en las muestras estabilizadas con geopolímero es debido a la formación de geles geopoliméricos tipo NASH (Tashima et al., 2012). Además, en la muestra estabilizada con cemento, se puede observar otro pico entre 450-550°C, debido a la presencia de portlandita en la muestra, que también se ha formado por la hidratación del cemento portland.

Por otra parte, al observar el intervalo de temperaturas entre 750-900°C, (Figura 6c) podemos destacar diferencias entre los picos debidos a la descomposición de los carbonatos. En la muestra de cemento se observan fundamentalmente dos picos solapados uno centrado a 824°C y el segundo centrado a 868°C.

En el caso de las muestras con geopolímero, se identifica una banda ancha con tres picos solapados (798°C, 830 y 850°C). Este hecho, es más visible en las muestras con CCA que las realizadas con el silicato comercial. Esto podría ser debido a una cierta interacción de los carbonatos del suelo con la reacción de geopolimerización. Este hecho ya ha sido detectado en otras investigaciones (Payá et al., 2012)

En la tabla 2, se recogen las pérdidas de masa obtenidas por termogravimetría con el tiempo de curado de las muestras de suelo analizadas.

Tabla 2. Datos termogravimétricos de las muestras de suelo analizadas

Muestra	Tiempo de curado (días)	Pérdidas de masa (Pi %)			
		50-1000°C	50-300°C	450-550°C ^o	700-950°C
Suelo	7	37,65	--	--	34-84
	28	36,32	--	--	33,72
OPC	7	36,30	3,58	0,47	31,97
	28	35,36	3,89	0,70	30,47
SIL	7	33,07	2,68	--	25,49
	28	33,01	4,37	--	27,63
CCA	7	31,51	2,32	--	26,09
	28	33,97	3,83	--	28,36

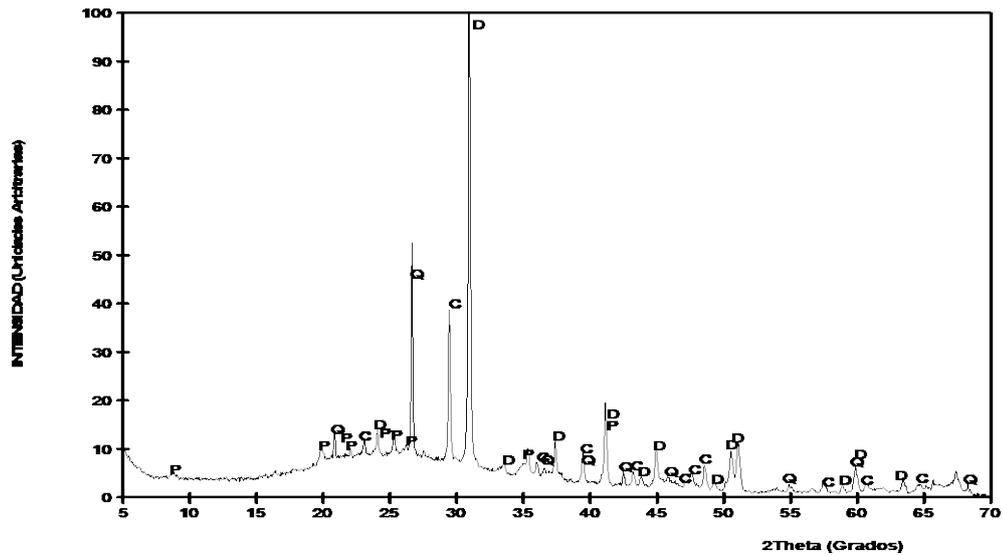


Figura 7b) Difractograma de rayos X de la muestra estabilizada con geopolimero a partir de FCC, Na_2SiO_3 y NaOH

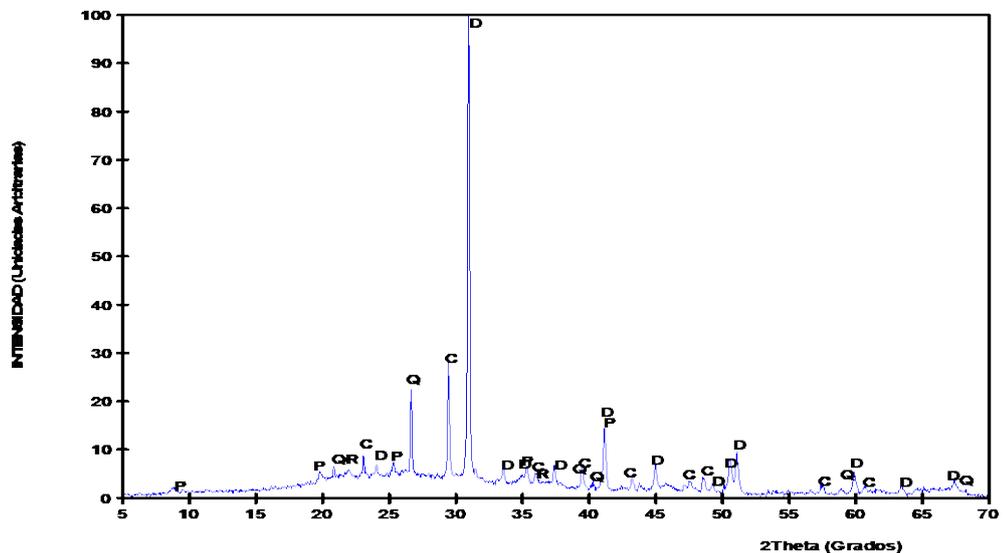


Figura 7c) Difractograma de rayos X de la muestra estabilizada con geopolimero a partir de FCC, CCA y NaOH

5. CONCLUSIONES

Se ha estudiado la estabilización de un suelo dolomítico mediante un proceso de geopolimerización usando para la fabricación de la disolución activadora una mezcla de hidróxido sódico con un reactivo comercial o un residuo de ceniza de cáscara de arroz como fuente de sílice. Las resistencias a compresión de estas últimas son en general las que mayor incremento presentan, tanto en comparación con suelo estabilizado con cemento como con en activación alcalina con el reactivo químico. La microestructura de las probetas de suelo se ha analizado mediante diversas técnicas comprobando que en las que contienen cemento se detectan compuestos de tipo cementante y portlandita, mientras que en las activadas alcalinamente se detecta el gel geopolimérico tipo NASH. En DRX, se detecta en estos últimos la formación de material tipo filosilicato de la familia de las micas.

El uso de materiales residuales para fabricar geopolímeros y su posible utilización como estabilizador de suelos ha quedado demostrado que es una solución viable para sustituir al cemento como material estabilizador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Swaidani, A., Hammoud, I., Meziab, A. (2016) Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 714-725. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.04.002>
- 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. (2013), Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders, *Materials Letters*, 115 (2014) 72–74. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.10.001>
- Cosa, J, Soriano, L., Borrachero, M. V., Payá, J., Monzó, J. (2017) Use of alkaline activated cements from residues for soil stabilization. In *Proceedings of 17th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (17th NOCMAT 2017)* 357-365
- Cristelo N, Glendinning S, Miranda T, Oliveira D, Silva R (2012) Soil stabilization using alkaline activation of fly ash for self-compacting rammed earth construction. *Construction Building Materials* 36, 727–735 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037>
- Cui, Y. J. (2017) On the hydro-mechanical behaviour of MX80 bentonite-based materials. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9, 565-574
- Davidovits J. (1988) Geopolymer chemistry and properties In: Davidovits J., Orlins EJ (eds) *Proceedings of 1st European conference on soft mineralogy (Geopolymer 88)*. The Geopolymer Institute, Compiegne, France, 25-48
- Davidovits J. (1994) Properties of geopolymer cements. In: *Proceeding of first international conference on alkaline cements and concretes* 1, 131-149
- Fasihnikoutalab MH, Asadi A, Unluer C, Huat BK, Ball RJ, Pourakbar S (2017) Utilization of alkali-activated olivine in soil stabilization and the effect of carbonation on unconfined compressive strength and microstructure. *Journal Materials in Civil Engineering* 29, 601–613
- Ferber V., Auriol J.C., Cui Y.J., Magnan, J.P. (2009) On the swelling potential of compacted high plasticity clays. *Engineering Geology*. 104, 200-210 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.10.008>
- Firoozi, A.A., Olgun C.G., Firoozi A.A., Baghini M.S. (2017) Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8:26 <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Habert G, d'Espinose de Lacaillerie JB, Roussel N (2011) An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal Cleaner Production* 19, 1229–1238 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>
- Hamzah H.N., Abdullah M.M., Yong H.C., Zainol M.R., Hussin K. (2015) Review of soil stabilization techniques: Geopolimerization method one of the new technique. *Key engineering materials*, 660, 298-304. Doi 10.4028/www.scientific.net/KEM.660.298
- Hejazi, S.M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S.M., Zadhoush A. (2012) A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 30, 100-116
- 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
- Monzó, J., Payá, J., Borrachero, M. V., Mora, E., Velázquez, S. (2001) Fluid Catalytic Cracking Residue (FC3R) as a New Pozzolanic Material: Thermal Analysis Monitoring of FC3R/Portland Cement Reactions, In: *Seventh CANMET/ACI., International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Supplementary papers, 22-27.
- Onyejekwe S., Ghataora G.S. (2015) Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 74, 651-665 <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0667-8>
- Payá J., Borrachero M.V., Monzó J., Soriano L., Tashima M.M. (2012) A new geopolymeric binder from hydrated-carbonated cement. *Materials letters*, 74, 223-225 doi:10.1016/j.matlet.2012.01.132
- Payá J.; Agrela, F.; Rosales, J.; Martín Morales M.; Borrachero, M.V. (2019). 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).

- Pourakbar S, Asadi A, Huat B. B, Fasihnikoutalab, M. H (2015) Soil stabilization with alkali-activated agro-waste. *Environmental Geotechnics* 2, 359–370
- Ramaji A. E. (2012) A review on the soil stabilization using low-cost methods. *Journal of Applied Sciences Research*, 8, 2193-2196
- Sargent P, Hughes PN, Rouainia M, White ML (2013) The use of alkali-activated waste binders in enhancing the mechanical properties and durability of soft alluvial soils. *Engineering Geology* 152, 96–108 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.10.013>
- Soltani A., Taheri A., Khatibi M., Estabragh AR. (2017a) Swelling potential of a stabilised expansive soil: a comparative experimental study. *Geotechnical and geological Engineering*, 35, 1717-1744
- Soltani A., Deng A., Taheri A., Mirzababaei M. (2017b) A sulphonated oil for stabilisation of expansive soils. *International Journal of Pavement Engineering* <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1408270>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.04.051>
- Wang, Y.X., Guo; P.P., Ren; W.X., Yuan B.X. (2017) Laboratory Investigation on Strength Characteristics of Expansive Soil Treated with Jute Fiber Reinforcement. *International Journal of Geomechanics*, 17
- UNE-EN 41410 (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. España: Asociación Española de Normalización y Certificación
- Yan K., Wu. L. (2009) Swelling behaviour of compacted expansive soils. In *GeoHunan international conference, ASCE 2009* [https://doi.org/10.1061/41044\(351\)1](https://doi.org/10.1061/41044(351)1)
- Zhang M, Guo H, El-Korchi T, Zhang G, Tao M (2013) Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction Building Materials* 47, 1468–1478 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las empresas PAVASAL y Maicerias DACSA, por el suministro de las muestras de suelo y ceniza de cáscara de arroz.

AUTORES

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).

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 23. 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.

Jordi Payá, 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 los materiales de construcción (GIQUIMA); autor de más de 150 publicaciones JCR y de más de 250 comunicaciones a congresos científicos.

Lourdes Soriano, 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 los materiales de construcción (GIQUIMA), autor de más de 60 publicaciones JCR y de más de 60 comunicaciones a congresos científicos.

M^a Victoria Borrachero, 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 los materiales de construcción (GIQUIMA); autora de más de 100 publicaciones JCR y de más de 150 comunicaciones a congresos científicos.