

ELECCIÓN DE MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO Y DE GEOPOLÍMEROS PARA SU EMPLEO EN IMPRESIÓN 3D

Adrián Isidro Yoris-Nóbile¹⁻², Elena Blanco-Fernandez¹, María Josefina Positieri², Bárbara Belén Raggiotti²

¹ GITECO – Universidad de Cantabria, Santander, España, yorisai@unican.es

² CINTEMAC – UTN – Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina, belenraggiotti@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se aborda el desarrollo y elección de materiales para la elaboración de morteros de cemento y morteros de geopolímero para que puedan ser aplicados en impresión 3D mediante extrusión. En la composición de los morteros se emplean materiales de bajo impacto ambiental y reciclados, como son los cementos con bajo contenido en Clinker, *fly ash*, arena de vidrio triturado y de residuos de construcción y demolición (RCD). Los morteros en estado fresco son caracterizados háptica y visualmente, comprobándose su imprimibilidad directamente en el equipo de impresión 3D, en tanto que, en estado endurecido, los morteros son caracterizados mediante ensayos de resistencia a compresión. Los resultados muestran que se logró obtener morteros de cemento y de geopolímero empleando materiales de bajo impacto ambiental, con características mecánicas aceptables y que pueden ser empleados en impresión 3D por extrusión.

Palabras claves: mortero de geopolímero, mortero de cemento, impresión 3D, sustentabilidad.

INTRODUCCIÓN

Por las grandes cantidades de agregados (más de 1.2 billones de toneladas al año en Europa), por ser responsable del 8 % de las emisiones totales de CO₂ a nivel mundial, por reducir los recursos naturales disponibles, entre otras alteraciones, la industria de la construcción es muy cuestionada actualmente [1, 2]. Para hacer frente a esta situación, se promueven acciones como la sustitución de agregados naturales por reciclados [3, 4] y reemplazo del cemento por aglomerantes sostenibles con el medio ambiente [5, 6].

En este sentido, los geopolímeros surgen como una alternativa a los cementos, aunque su tecnología se encuentra aún en desarrollo. Este conglomerante inorgánico hace uso de subproductos industriales con elevado contenido de aluminosilicatos, como el *fly ash* o escorias de alto horno, que al mezclarse con una fuente alcalina, como el hidróxido de sodio y/o silicato sódico, provocan una reacción química que permite la geopolimerización y endurecimiento de la mezcla [7, 8].

Otras formas de atenuar los impactos ambientales de la construcción, se desarrollan en la tecnología industrial, como es el caso de *3D Concrete Printing* (3DcP). Este modo de impresión 3D o fabricación aditiva (AM), engloba a todas las tecnologías que hacen uso del hormigón o mortero como material de impresión. El empleo de estas tecnologías en el ámbito de la construcción, permitiría diseños geométricos más complejos y optimización de formas,

aportando la capacidad de realizar construcciones sin el uso de encofrados, reduciendo el desperdicio de materiales y optimizando recursos [9].

En el presente trabajo se analizan varios materiales para ser usados en morteros, con el objetivo de ser aplicados en impresión 3D mediante fabricación aditiva con una impresora tipo Delta. Se elaboran múltiples variantes de dosificaciones de morteros de cemento y morteros de geopolímero, en los que se emplean distintos materiales reciclados o subproductos industriales. Los morteros obtenidos se evalúan en estado fresco y endurecido y se analizan sus resultados y comportamiento para definir los materiales con los cuales elaborar mezclas para ser empleadas en impresión en 3D con buen desempeño.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Materiales

Para la elaboración de morteros de cemento se emplearon dosificaciones con distintos aglomerantes, aditivos, adiciones y arena. También se hicieron pruebas con morteros de geopolímero, empleando *fly ash* como precursor principal, distintos activadores, adiciones, aditivos y arenas (Tabla 1).

Los cementos tipo III empleados en los morteros de cemento, son cementos de bajo contenido en Clinker y según la norma UNE-EN 197-1 tienen un contenido de Clinker, en proporción de masa, entre 35 % y 64 % en los A, y entre 20 % y 34 % en los B, siendo el resto de la composición, escoria de alto horno en su mayoría.

El *fly ash* es un subproducto industrial proveniente de las centrales térmicas, producto de la quema del carbón, con disponibilidad a nivel mundial en grandes cantidades [10]. En los morteros de cemento se empleó este material como adición, en tanto que en los morteros de geopolímero se empleó como fuente principal de aluminosilicato. El empleo de *fly ash* como precursor en geopolímeros es uno de los más habituales por el alto contenido en alúmina y silicatos, lo que lo hace adecuado para ser activado alcalinamente [8, 10].

El hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3) son los activadores más comunes empleados para obtener geopolímeros [11, 12]. En este trabajo se empleó NaOH industrial con concentración molar 25 M, NaOH en pellets para análisis, con pureza 99 % y Na_2SiO_3 . Para lograr las concentraciones utilizadas en este trabajo, se diluyó el NaOH con agua de grifo, con un tiempo de preparación de 24 h mínimo.

Como agregado fino se emplearon arenas naturales y arenas recicladas o provenientes de desechos industriales. Los agregados naturales eran las arenas silíceas y calcáreas. Las arenas silíceas estaban compuestas de cuatro fracciones: [0,1-0,3], [0,2-0,4], [0,7] y [1-2] mm; en tanto que las arenas calcáreas se emplearon en dos fracciones [0-1] y [0-3] mm. Por su parte, los agregados finos reciclados estaban compuestos por arenas de vidrio triturado (fracción [0-3] mm) proveniente de lunetas de coches y arenas de residuos de la construcción y demolición -RCD- (fracción [0-2] mm) (Figura 1).

Se emplearon aditivos para modificar trabajabilidad y resistencia mecánica de los morteros. Para ello se empleó superplastificante MasterEaser 3850 (S.P.), suspensión de nanosílice precipitada MasterRoc MS 685 (N.S.) y microsílice densificada MasterRoc MS 610 (M.S.). Con el objetivo de mejorar la cohesividad y plasticidad de los morteros, se probaron diferentes adiciones, como arcilla colorada, caolín, *fly ash*, cal CL-90S (UNE-EN 459-1) y Cem III/B 32.5 (UNE-EN 197-1).

Tabla 1: Materiales empleados en los morteros de cemento y de geopolímero.

	Morteros de cemento	Morteros de geopolímero
Aglomerante	Cem III/A 42.5 N/SRC; Cem III/B 32.5 N-SR	-
Precursor	-	<i>Fly ash</i>
Activador	-	NaOH pelets; NaOH industrial; Na ₂ SiO ₃
Arena	Caliza [0-1] y [0-3]; Vidrio [0-3]; RCD [0-2]	Caliza [0-1] y [0-3]; Vidrio [0-3]; Sílicea
Adición	Caolín; Fly ash	Arcilla colorada; Caolín; Cal; Cem
Aditivo	N.S.; M.S.; S.P.	N.S.; M.S.; S.P.

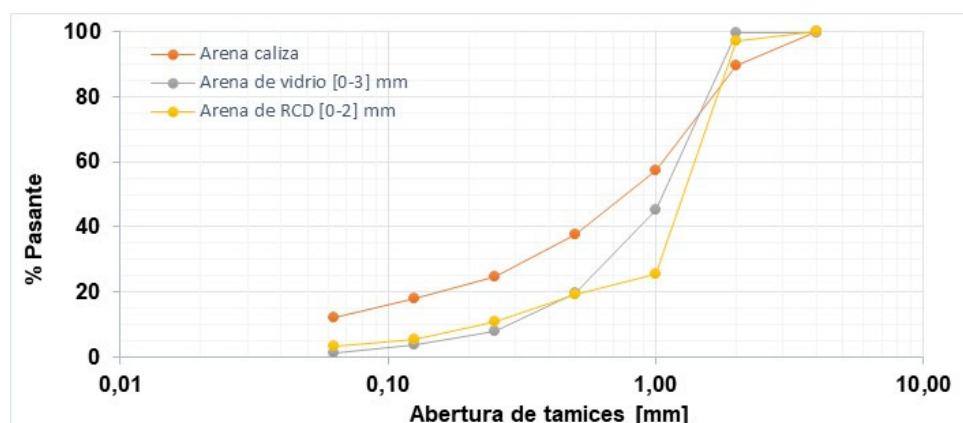


Figura 1: Curva granulométrica de las arenas empleadas en los morteros.

Dosificación y caracterización

Se plantearon dosificaciones que permitieran la extrusión de los morteros mediante impresión 3D, con el objetivo de que una vez impreso conserve la forma y tenga la resistencia mecánica prevista. Para ello se elaboraron 50 variantes de mezclas de morteros de cemento y 126 variantes de mezclas de morteros de geopolímero. Sin embargo, en este trabajo se presentan los resultados de aquellas combinaciones de dosificaciones con las que se obtuvieron mejores resultados.

Los morteros se elaboraron con una amasadora de rotación y movimiento planetario (UNE-EN 196-1). Las velocidades y tiempos de amasado tuvieron una influencia directa en los comportamientos en estado fresco de los morteros, por lo que se probaron varias metodologías de amasado y se definió la indicada en la Tabla 2.

Tabla 2: Metodología de amasado empleada en los morteros.

Tiempo	Velocidad	Morteros de cemento
0:00:15	Lenta	Homogeneizar los materiales en seco.
0:01:45	Lenta	Introducir el agua. Una vez homogenizada la mezcla, incorporar el aditivo.
0:01:00	Rápida	-
0:00:30	-	Introducir el material de los laterales del cuenco y reposo de la mezcla.
0:00:30	Rápida	-
Tiempo	Velocidad	Morteros de geopolímero
0:00:30	Lenta	Homogeneizar los materiales en seco.
0:02:30	Lenta	Introducir el activador. Una vez homogenizada la mezcla, incorporar el aditivo.
0:01:00	Rápida	-

Los morteros se caracterizaron mecánicamente mediante la elaboración de probetas prismáticas de 4x4x16 cm en moldes metálicos (UNE-EN 196-1) y se ensayaron a compresión a las edades de 1, 7 y 28 días. Todas las probetas se desmoldaron al día siguiente de haberse elaborado y se curaron al aire en ambiente de laboratorio.

RESULTADOS

Morteros de cemento

Los morteros con Cem. III/A tienen mayor resistencia mecánica, en comparación con los Cem. III/B, debido a que poseen un mayor contenido de Clinker (entre 35-64 % y 20-34 % respectivamente) (Figura 2). Sin embargo, los morteros con Cem. III/B responden a un material más sustentable con el medio ambiente por su bajo contenido en Clinker.

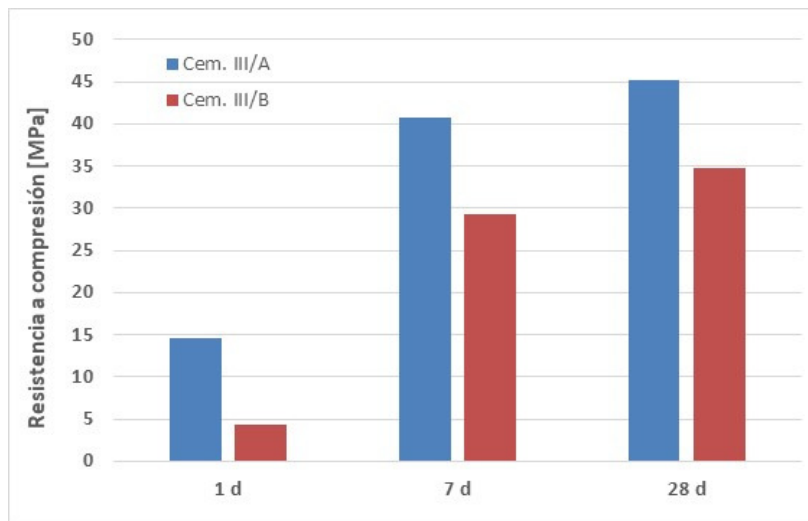


Figura 2: Resistencia a compresión de morteros con distintos tipos de cemento.

La resistencia mecánica de los morteros con arena caliza [0-3] mm arrojó mejores resultados que los morteros con fracción [0-1] mm. En los morteros con arena de RCD, a medida que se aumentó el porcentaje de reemplazo, las resistencias mecánicas disminuyeron. Por su parte, en los morteros con arena de vidrio, se observó un aumento en la resistencia con el 25 % de reemplazo y prácticamente sin variación con el 50 % (Figura 3). Este comportamiento se puede atribuir a que la parte líquida (agua y aditivos) de todas las variantes, se dosificaron para lograr una trabajabilidad adecuada de los morteros que permitiera su extrusión mediante impresión 3D, por ende, son variables según cada caso.

La incorporación de cenizas volantes como adición, introdujo un mayor contenido de finos en los morteros, lo que permitió una mejora considerable en la trabajabilidad, quitando el comportamiento quebradizo que presentaban los morteros. La incorporación de caolín permitió obtener mezclas más cohesivas. La combinación de ambas adiciones otorgó un comportamiento plástico adecuado para poder extrudir los morteros mediante impresión 3D. Con la incorporación de estas adiciones, se observó también que las propiedades en estado fresco permanecían por más tiempo.

Con el objetivo de otorgar mayor plasticidad sin tener que aumentar la cantidad de agua, se probaron diferentes aditivos, entre ellos: S.P., N.S. y M.S. El S.P. demostró tener una afinidad muy adecuada con estos morteros, permitiendo obtener las características buscadas. Las propiedades de cohesividad y modificador estructural incorporadas por los

aditivos N.S. y M.S. respectivamente, se obtuvieron también mediante las adiciones de *fly ash* y caolín.

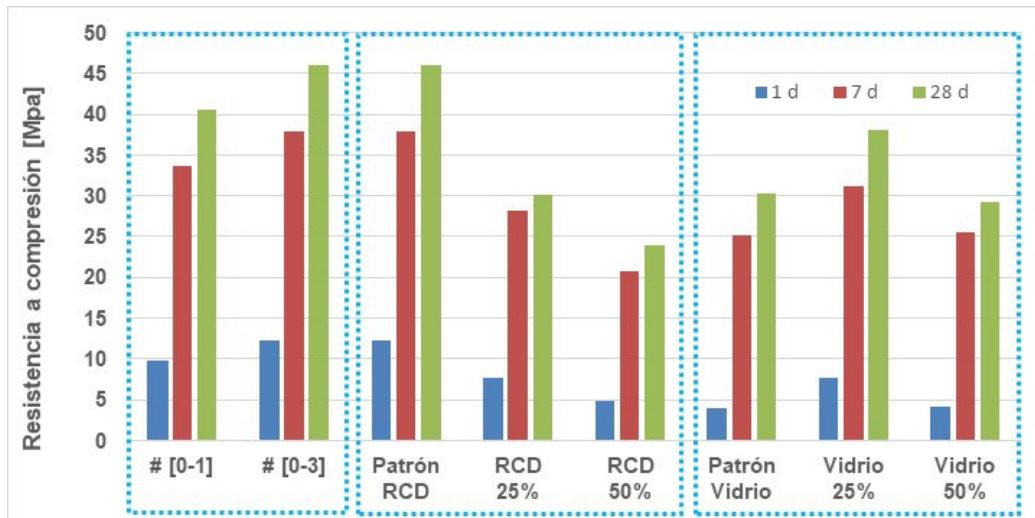


Figura 3: Resistencia a compresión de morteros de cemento con diferentes tipos de arenas.

Morteros de geopolímero

El Na_2SiO_3 se utilizó como único activador y mezclado con NaOH en diferentes proporciones. Los morteros elaborados con el Na_2SiO_3 tuvieron un comportamiento autonivelante en estado fresco, por lo que no podían ser utilizados como material de impresión, ya que el mortero no tenía la capacidad de mantener la forma luego de salir del extrusor.

Con NaOH en pellets se analizaron concentraciones desde 6 M a 13 M y con NaOH industrial concentraciones desde los 13 M a 16 M y 10 M. Al cambiar del formato pellets a industrial, la resistencia de los morteros se redujo notablemente (Figura 4), atribuyendo este comportamiento a que el NaOH industrial puede contener mayores impurezas en su composición. Pese a este comportamiento, se optó por el formato industrial, ya que garantizaba un menor costo del producto y una mayor disponibilidad del mismo.

A medida que se aumentó la concentración, aumentó también la cantidad de solución necesaria para obtener la misma trabajabilidad en los morteros. Además, con el aumento de la concentración, los morteros se tornaron más viscosos y difíciles de manipular. El uso de NaOH como único activador permitió conservar las propiedades de los morteros en estado fresco por mayor tiempo. En los morteros elaborados con concentraciones de NaOH superiores a 12 M, se observó que, con la incorporación de una pequeña cantidad de agua libre, se podía disminuir el comportamiento viscoso.

La arena caliza, respecto a la arena silíceo, permitió obtener mezclas con mejor comportamiento en estado fresco y trabajabilidad adecuada, además de lograr morteros estables una vez extruidos mediante impresión 3D. Esta mejora se atribuye al contenido de finos (pasante del tamiz $75 \mu\text{m}$) de la arena caliza (próximo al 15%). Además, del mismo modo que sucedió con los morteros de cemento, el uso de arena caliza de fracción [0-3] mm arrojó mejores resultados mecánicos que la fracción [0-1] mm. La arena de vidrio se utilizó con diferentes porcentajes de reemplazo respecto a la arena caliza. Porcentajes de vidrio superiores al 30%, otorgaron fluidez a la mezcla, lo que provocó que la misma no conservara la forma una vez extruido el mortero mediante impresión 3D. Además, a mayor

porcentaje de reemplazo por vidrio triturado, se obtuvo mayor pérdida de resistencia mecánica (Figura 4).

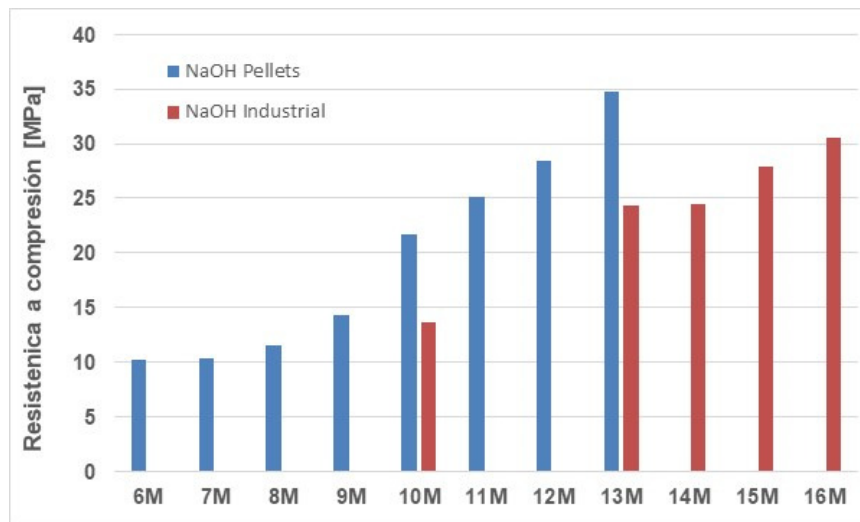


Figura 4: Resistencia mecánica a 28 días de morteros de geopolímero con distintas concentraciones y tipos de NaOH.

La incorporación de arcilla colorada y caolín en los morteros de geopolímeros, no aportaron una mejora significativa al estado fresco de los mismos y tampoco en su estado endurecido. La adición de cemento y cal en los geopolímeros activados con NaOH y Na_2SiO_3 , provocó pérdida de trabajabilidad en los morteros a partir de los 15 y 30 minutos luego de su amasado, y endurecimiento completo después de 1 o 2 h. Sin embargo, en los geopolímeros activados con NaOH únicamente, no aportaron mejora.

Los aditivos se usaron según las proporciones indicadas por los fabricantes, considerando al *fly ash* como el aglomerante principal. Con esta consideración, el aditivo S.P. no tuvo ningún efecto en el estado fresco de los morteros. En tanto que el N.S. (en un 5 %) otorgó mayor trabajabilidad, sin necesidad de incorporar más cantidad de activador. Por su parte, M.S. proporcionó mejoras en la resistencia mecánica (Figura 5).

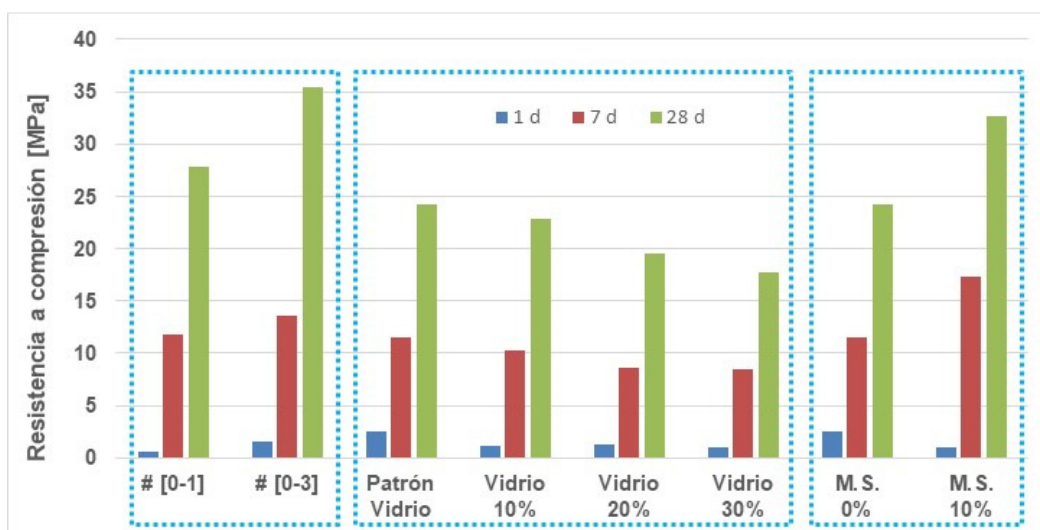


Figura 5: Resistencia a compresión de morteros de cemento: diferentes tipos de arenas e incorporación de M.S.

Selección de materiales

Con los resultados de los ensayos y consideraciones realizados anteriormente, se seleccionaron los materiales con los cuales se elaboraron morteros de cemento a base de arena caliza (CL) y de arena de vidrio (CG) al igual que de morteros de geopolímero a base de arena caliza (GL) y de arena de vidrio (GG) (Tabla 3). A la izquierda de la Figura 6 se indican los resultados de resistencia mecánica a diferentes edades de estos morteros, en tanto que a la derecha, se muestra un objeto impreso con el mortero de geopolímero GL, como prueba preliminar de impresión.

Tabla 3: Materiales y dosificación establecidos para morteros de impresión 3D.

Morteros de cemento			Morteros de geopolímero		
Materiales	CL	CG	Materiales	GL	GG
Cem. III/B	600,0 g	600,0 g	Fly ash	600,0 g	600,0 g
Agua	318,4 g	310,8 g	NaOH [14M]	256,6 g	259,6 g
<i>Fly ash</i>	300,0 g	300,0 g	Water	36,3 g	39,9 g
Caolín	25,0 g	25,0 g	N.S.	30,0 g	30,0 g
S.P.	6,0 g	6,0 g	M.S.	60,0 g	60,0 g
Caliza [0-3]	1200,0 g	600,0 g	Caliza [0-3]	1200,0 g	840,0 g
Vidrio [0-3]	-	600,0 g	Vidrio [0-3]	-	360,0 g

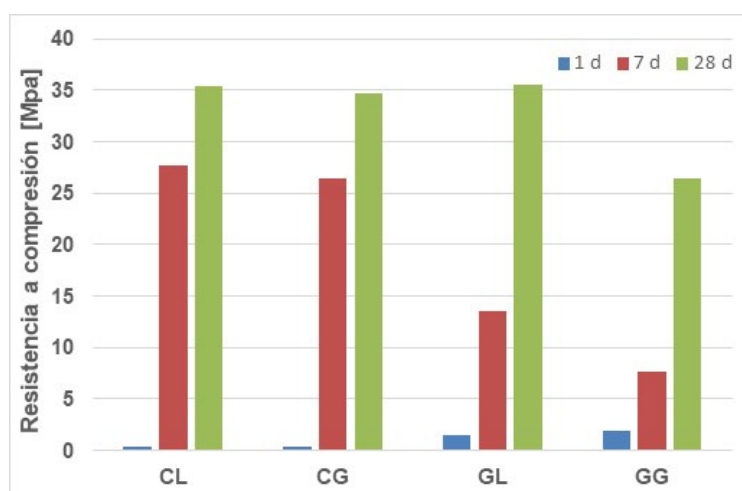


Figura 6: Izquierda: Resistencia mecánica de los morteros con los materiales seleccionados. Derecha: Objeto impreso con mortero de geopolímero GL.

CONCLUSIONES

Como conclusiones preliminares, en todos los morteros, la arena caliza [0-3] mm proporcionó mejores resultados de resistencias a compresión y de trabajabilidad.

Con respecto a los morteros de cemento:

- Se eligió el Cem. III/B como aglomerante debido a las resistencias a compresión desarrolladas y a su menor impacto ambiental.
- No se considera adecuado el uso de arenas de RCD debido a la pérdida de resistencia obtenida, mientras que un reemplazo de hasta 50 % por arena de vidrio, es aceptable.
- El empleo de *fly ash*, caolín y S.P., es esencial para lograr morteros de cemento imprimibles, en tanto que los aportes que otorgan N.S. y M.S., se logran también con las adiciones.

Con respecto a los morteros de geopolímeros:

- La disolución de NaOH en concentración 14 M, es la más adecuada como activador ya que se obtienen las resistencias a compresión y trabajabilidad necesarias.
- Es posible un reemplazo de hasta un 30 % de arena caliza, por arena de vidrio.
- El empleo de N.S., M.S. se consideran necesarios para mejorar la trabajabilidad y resistencia. Sin embargo, el empleo de adiciones no resultó adecuado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional a través del programa *Interreg Atlantic Area*, en el marco del proyecto 3DPARE (EAPA_174/2016). Además, los autores quieren agradecer a las siguientes empresas por su contribución: *Solvay*, por el suministro del fly ash y el NaOH; *BASF*, por el suministro de los aditivos utilizados en la investigación; *Reciclajes Camargo S.L.*, por el suministro de la arena de RCD; *FCC ámbito*, por el suministro del vidrio reciclado triturado y *Grupo Cementos Portland Valderribas* (planta de Mataporquera) por el suministro del cemento. Por último, este trabajo refleja la opinión de los autores, por lo que las autoridades del programa no se hacen responsables del uso de la información aquí incluida.

REFERENCIAS

- [1] "EUROPEAN AGGREGATES ASSOCIATION A Sustainable Industry for a Sustainable Europe," (2016).
- [2] Lehne J, Preston F, *Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*, Chatham Ho. London: The Royal Institute of International Affairs, (2018).
- [3] Gonzalez-Corominas A, Etxeberria M, Poon C-S, "Influence of the Quality of Recycled Aggregates on the Mechanical and Durability Properties of High Performance Concrete," *Waste Biomass Valor*, vol. 8, (2017), 1421–1432.
- [4] López-Uceda A, Ayuso J, López M, Jimenez JR, Agrela F, Sierra MJ, "Properties of non-structural concrete made with mixed recycled aggregates and low cement content," *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 2, (2016), p. 74.
- [5] Asensio E, Medina C, Frías M, de Rojas MIS, "Characterization of Ceramic-Based Construction and Demolition Waste: Use as Pozzolan in Cements," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 99, no. 12, (2016), 4121–4127.
- [6] Sadiqul Islam GM, Rahman MH, Kazi N, "Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice," *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 6, no. 1, (2017), 37–44.
- [7] Ng C, Alengaram UJ, Wong LS, Mo KH, Jumaat MZ, Ramesh S, "A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, (2018), 550–576.
- [8] Meesala CR, Verma NK, Kumar S, "Critical review on fly-ash based geopolymer concrete," *Struct. Concr.*, (2019), 1–16.
- [9] El-Sayegh S, Romdhane L, Manjikian S, "A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 2. Springer, (2020).
- [10] Xie T, Ozbakkaloglu T, "Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature," *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 4, (2015), 5945–5958.
- [11] Rashidian-Dezfouli H, Rangaraju PR, "A comparative study on the durability of geopolymers produced with ground glass fiber, fly ash, and glass-powder in sodium sulfate solution," *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, (2017), 996–1009.
- [12] Görhan G, Kürklü G, "The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures," *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, (2014), 371–377.