

Desarrollo sostenible de cementos activados alcalinamente a partir de las fracciones residuales generadas durante la gestión de los residuos municipales

Josep Maria Chimenos
Universitat de Barcelona – España
chimenos@ub.edu

Àlex Maldonado-Alameda
Universitat de Barcelona – España
alex.maldonado@ub.edu

Jessica Giro-Paloma
Universitat de Barcelona – España
jessicagiro@ub.edu

Mercè Segarra
Universitat de Barcelona – España
m.segarra@ub.edu

ABSTRACT

This research work promotes an environmental challenge focused on the development of new activated alkaline cements (AAC) based on both the bottom ash (IBA) from the incineration of municipal solid waste and a ceramic waste generated in the recycling plants of glass (ceramic, stone and porcelain, CSP), both used as precursors. Likewise, to supplement the alumina deficit necessary for the formation of the cementing phases, a residual material generated in the aluminium recycling plants (PAVAL) was also added. These new AACs are presented as an alternative to Portland Cement in the field of construction. The results obtained of the compressive resistance and its environmental behaviour are promising and allow to predict the viability of these alkaline cements as substitutes of the Portland cement. Along with the mechanical properties, a physical-chemical characterization was also carried out to determine the neoformed mineralogical phases and the structure of these new cementing materials.

Keywords: Alkali activated cements; geopolymers; incineration bottom ash; CSP.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, la construcción es uno de los sectores que más contribuye al crecimiento del Producto Interior Bruto (PIB) de los países más desarrollados del mundo. A su vez, la producción del cemento a partir de recursos naturales es la industria más contributiva de este sector, ya que este es considerado como un material esencial en la construcción y la obra civil. Sin embargo, su producción constituye una de las actividades con mayor impacto ambiental (ALLWOOD; CULLEN, 2012).

El cemento Portland (OPC) ha constituido un gran avance para la sociedad desde su descubrimiento en el siglo XIX. Sin embargo, la industria cementera es una de las más contaminantes, siendo la responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial, y una gran consumidora de energía primaria, estimada en aproximadamente un 7% del consumo global (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018). En este sentido, la industria cementera debe afrontar el reto de buscar nuevas vías para degradar menos el entorno, consumir menos energía y reducir las

emisiones contaminantes. Entre estas, destacar el desarrollo de cementos alternativos más sostenibles, con menos emisiones de gases efecto invernadero y capaces de incorporar residuos en sus formulaciones, contribuyendo a las políticas estratégicas de la UE para 2050, una sociedad baja en carbono y eficiente en el uso de recursos (HÜBLER; LÖSCHEL, 2013).

Los cementos activados alcalinamente (CAA) o materiales activados alcalinamente (MAA) abarcan esencialmente cualquier sistema aglutinante que deriva de la reacción entre un metal alcalino y un silicato sólido en forma de polvo (ROY, 1999). Este sólido puede ser un silicato o un precursor de silicoaluminato, como una escoria metalúrgica, puzolana natural o cenizas volantes de las centrales térmicas, mientras que las fuentes alcalinas pueden incluir cualquier sustancia soluble que suministre cationes de metales alcalinos, eleve el pH de la mezcla de reacción y acelere la disolución del precursor sólido, como hidróxidos alcalinos, silicatos, carbonatos, sulfatos o aluminatos.

En los años 60, en una época de fuerte crecimiento de la construcción en Rusia, Glukhovsky fue de los primeros investigadores en estudiar los CAA. Observó que estos cementos endurecían y tenían unas prestaciones de resistencia similares a los OPC. Años después, 1972, Davidovits (Francia) acuñó por primera vez el término geopolímero para referirse a una estructura sintética tridimensional de silicoaluminatos activados alcalinamente. Los CAA, de interés creciente en el campo científico-tecnológico, son una alternativa al extenso uso del OPC, más sostenibles y con menor huella medioambiental; requiere menos energía para su fabricación y generan hasta un 80% menos emisiones de CO₂ (VAN DEVENTER et al., 2010). Estos han sido ya utilizados en la formulación de elementos estructurales y de obra civil en países como Rusia, Ucrania, China, Polonia, Bélgica, Finlandia o Australia entre otros (PROVIS et al., 2014), con resultados excelentes, tanto en soluciones constructivas llevada a cabo in-situ como en elementos prefabricados, utilizando principalmente residuos de las centrales térmicas o de la industria siderúrgica.

La obtención de CAA consiste en la reacción de un precursor en polvo, con un elevado contenido de silicoaluminatos amorfos, con altos o bajos contenidos en calcio, y una solución activadora fuertemente alcalina. El resultado de la reacción, después de un tiempo de curado, es un sólido compacto con buenas propiedades mecánicas y de fórmula general: $M_n[-Si-O_2]_z[-Al-O]_n \cdot wH_2O$. En condiciones adecuadas de temperatura (entre 20 y 90°C) y un determinado tiempo de curado, se forma un gel que por interacción iónica solidifica formando una estructura sólida tridimensional, base del CAA. En función del contenido en calcio, el gel formado puede ser de silicoaluminatos cálcicos hidratados (C-A-S-H), para aquellos ricos en calcio, o de silicoaluminatos alcalinos hidratados, mayoritariamente sódicos al utilizar activadores de este metal alcalino (N-A-S-H) (GARCIA-LODEIRO et al., 2011).

Son numerosos los trabajos de investigación que han surgido en la última década para el estudio de la síntesis de CAA como técnica para la incorporación de residuos o subproductos en su formulación (ALTUNDOAN et al., 2002; KHALE; CHAUDHARY, 2007; MEJÍA; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; PUERTAS, 2013; TORRES-CARRASCO; PUERTAS, 2017). Es una solución interesante para la revalorización de subproductos que han finalizado su ciclo de vida, siendo estos utilizados como una fuente secundaria en un segundo ciclo productivo. En este sentido, los residuos con un contenido en alúmina y sílice pueden ser utilizados como precursores de la formación de geopolímeros, independientemente de su contenido en álcalis. Sus propiedades dependen en gran medida de la composición de estas fuentes secundarias, así como del ion alcalino utilizado y, principalmente, de las

condiciones de la reacción de policondensación; reportándose, por ejemplo, resistencias a compresión desde los 7 hasta los 105 MPa, para temperaturas de curado comprendidas entre los 25°C y los 85°C y tiempos de curados que oscilan entre las pocas horas y los meses, con o sin activación mecánica.

Con el fin de contribuir en el desarrollo de nuevos materiales más respetuosos con el medio ambiente, el presente trabajo se centra en la utilización de dos fuentes residuales diferentes como precursores para la formulación de CAA, ambas generadas durante la correcta gestión de los residuos municipales: escorias de incineración de residuos sólidos urbanos y una fracción residual obtenida durante la eliminación de impropios en el proceso de reciclaje del vidrio de envases. El principal objetivo de este estudio preliminar es evaluar el potencial que tiene ambas fuentes residuales para su uso como precursores principales en la síntesis de geopolímeros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

2.1.1 Escorias de incineración de los residuos sólidos urbanos (IBA).

La valorización energética por vía térmica (incineración) es clave en el modelo de gestión de los residuos municipales (RM) en Europa. Ésta permite la recuperación de la energía contenida en los RM, disminuyendo la fracción gestionada en vertederos, de acuerdo con la jerarquía de gestión y las directrices de la Directiva 2008/98/CE30.

Durante el proceso de incineración se genera aproximadamente un 20% de un material residual denominado escoria (IBA), recogido a la salida de los hornos, y un 4% de cenizas volantes (APC), recogidas en los sistemas de depuración de los gases. Mientras que las APC son catalogadas como residuo peligroso que debe gestionarse en vertederos de Residuos Peligrosos, las IBA son catalogadas como residuo no peligros, revalorizado como material secundario en el campo de la construcción o la obra civil, previa estabilización a la intemperie durante 2-3 meses (CHIMENOS et al., 1999).

Debidamente acondicionada (mediante procesos de tamizado y trituración del rechazo, separación magnética de metales férricos y separación de metales no férricos mediante corrientes de Foucault y eliminación de ligeros mediante soplado), aproximadamente un 30% del peso de las BA presenta un tamaño de partícula entre 8 - 30 mm, formado principalmente por vidrio y cerámicos sintéticos (DEL VALLE-ZERMEÑO et al., 2017). El resto, con un tamaño < 8 mm, presenta también como material mayoritario el vidrio (primario o secundario), así como la mayor parte de la carga de elementos tóxicos y peligrosos (CHIMENOS et al., 2003), formada principalmente por óxidos de metales pesados, la mayoría de los cuales son pH-dependientes que puede movilizarse en la fase acuosa de un posible proceso de lixiviación.

Atendiendo a lo anteriormente expuesto, para su uso como precursor en la formulación de CAA, en el presente estudio de investigación se ha tomado únicamente la fracción granulométrica > 8 mm de IBA, cuya composición química de mayoritarios y minoritarios, determinada mediante fluorescencia de rayos X (FRX), es la que se describe a continuación en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Caracterización química de la fracción > 8 mm de IBA determinada mediante FRX.

Componentes	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	MgO	LOI
Porcentaje (%)	4,00	14,31	56,87	8,26	0,42	6,52	2,42	5,40

LOI: Lost of Ignition (900°C).

2.1.2 Impropios del reciclaje del vidrio (CSP).

Durante el proceso de reciclaje del vidrio procedente de los envases recogidos de forma voluntaria a pie de acera, debe procederse a la eliminación de los materiales improprios contenidos en el flujo residual. Son materiales ajenos al vidrio, depositados inadecuadamente y recogidos junto al mismo, que complican mucho su reciclaje y cuyo contenido final en el vidrio reciclado está limitado (20 g por tonelada). Se calcula que los improprios pueden llegar a ser aproximadamente el 2% del total recogido (ARC, 2016), siendo los más habituales los envases de PET, la cerámica y la porcelana (tazas y platos) y algunos residuos metálicos. La eliminación de los improprios es relativamente sencilla en el caso de los restos metálicos y plásticos mediante separadores electromagnéticos y mecánicos, respectivamente. Pero en el caso de la cerámica y la porcelana, su separación se convierte en una tarea difícil que requiere el uso de equipos de clasificación óptica que permitan discriminar los fragmentos opacos de los transparentes o translúcidos, obteniendo un residuo conocido con el nombre de CSP (Cerámica, Piedra y Porcelana). Sin embargo, en el CSP aún se puede encontrar hasta un 80% de vidrio, debido a que los equipos no reconocen como elementos translúcidos u opacos los fragmentos de vidrio con etiquetas o los cuellos y culos de botella, siendo su destino final los vertederos de residuos municipales.

En el presente estudio, para su uso como precursor en la formulación de CAA, se ha tomado la fracción íntegra de CSP, generada durante el reciclaje del vidrio, cuya composición química de mayoritarios y minoritarios, determinada mediante FRX, se describe a continuación en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Caracterización química del CSP determinada mediante FRX.

Componentes	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MgO	LOI
Porcentaje (%)	0,57	9,37	70,78	4,81	11,15	0,94	0,13	1,61	0,99

LOI: Lost of Ignition (900°C).

2.1.3 PAVAL

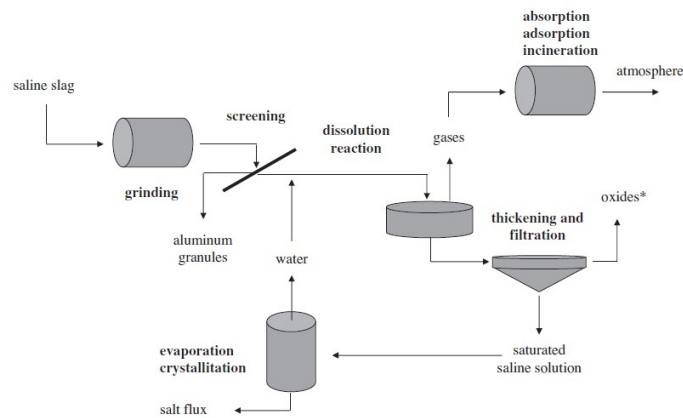
Dado el bajo contenido en alúmina (Al₂O₃) de ambos precursores (IBA y CSP) utilizados para la formulación de CAA, en el estudio se pretende utilizar un precursor adicional, denominado PAVAL, rico en Al₂O₃ y generado durante los procesos de reciclaje del aluminio a partir de fuentes secundarias (ver **Figura 1**), compuesto principalmente de Al₂O₃ y otros óxidos metálicos contenidos en las escorias generadas durante la refusión y afino del aluminio secundario (LÓPEZ-DELGADO; TAYIBI, 2011). La caracterización química de los elementos mayoritarios y minoritarios, determinada mediante FRX, es la que se muestra a continuación en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Caracterización química del PAVAL determinada mediante FRX.

Componentes	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MgO	LOI
Porcentaje (%)	2,65	2,24	7,93	61,02	3,22	0,68	0,80	4,73	15,71

LOI: Lost of Ignition (900°C).

Figura 1. Esquema de producción del PAVAL en la empresa BEFESA (Valladolid, España).



2.2 Método

Muestras homogéneas y debidamente cuarteadas (aproximadamente 2,5 kg) de todos los precursores utilizados en la formulación de los CAA fueron previamente secadas en una estufa a 105° C durante toda la noche y hasta peso constante. Posteriormente las muestras de IBA y CSP fueron trituradas en una machacadora de mandíbulas hasta un tamaño de partícula inferior a 1,5 mm, eliminando en el proceso las partículas metálicas contenidas. Finalmente, todas las muestras fueron molturadas por separado en un molino de bolas hasta un tamaño de partícula inferior a los 80 µm.

La formulación de los CAA se realizó mezclando íntimamente los precursores residuales objeto de estudio, previamente molturados, con soluciones de NaOH y silicato sódico (wáter-glass), estas últimas utilizadas como activadores alcalinos de los precursores. Las formulaciones de los CAA estudiadas se llevaron a cabo empleando diferentes proporciones de los activadores y/o concentraciones de los mismos, en función de la actividad de las fases mineralógicas y disponibilidad de la sílica y alúmina contenida en los precursores. En las **Tablas 4 y 5** se describe detalladamente las formulaciones objeto de estudio para cada uno de los precursores residuales estudiados (IBA y CSP, respectivamente).

Tabla 4. Formulaciones de los CAA utilizando como precursor la fracción granulométrica > 8 mm de las escorias de incineración de los residuos sólidos urbanos.

Precursor	Escorias de incineración, fracción granulométrica > 8 mm (IBA)											
Solución Activadora	Silicato sódico (47 °Be) – NaOH (xM) : 80 – 20 (% , v/v)											
S / L	0,6 (p/p)											
Concentración NaOH	2M			4M				6M				
IBA / PAVAL (%)	100/0	99/1	95/5	90/10	100/0	99/1	95/5	90/10	100/0	99/1	95/5	90/10

En caso de estudio de las formulaciones de los CAA utilizando como precursor IBA, tras ensayos previos de fluidez y trabajabilidad, se decidió realizar todas las formulaciones con una relación sólido – líquido (S/L) de 0,6; mientras que en las formulaciones utilizando como precursor CSP fueron estudiadas las relaciones S/L de 0,5 y 0,6 respectivamente.

Tabla 5. Formulaciones de los CAA utilizando como precursor el CSP generado durante el reciclaje del vidrio.

Precursor	CSP		
Solución Activadora	NaOH (xM)		
S / L	0,5 - 0,6 (p/p)		
Concentración NaOH	1M	4M	8M
IBA / PAVAL (%)	90 / 10	90 / 10	90 / 10

Para todas las formulaciones se siguió el mismo protocolo de mezcla y preparación de probetas a partir de las pastas obtenidas, añadiendo siempre la solución alcalina activadora sobre el precursor sólido debidamente homogeneizado. La mezcla de la pasta se llevó a cabo durante 60 s, para posteriormente ser vertida sobre el molde, eliminando el aire ocluido en la mesa vibratoria durante 60 s. El curado de las probetas formuladas con IBA se llevó a cabo a temperatura ambiente ($25\pm 2^\circ\text{C}$), mientras que las probetas formuladas con CSP la temperatura de curado fue de 40°C . En todas las formulaciones el tiempo de curado fue de 21 días, antes de proceder a los ensayos para su caracterización.

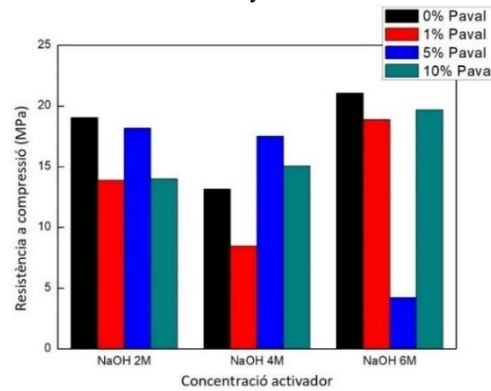
La caracterización de los diferentes CAA formulados se realizó mediante ensayos mecánicos de compresión, utilizando una máquina universal, determinación de las fases mineralógicas mediante análisis de difracción de rayos X (DRX), determinación de la variación de la señal de *stretching* correspondiente a los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al mediante espectroscopía de infrarrojos con transformada de Fourier (FTIR), determinación de la densidad por Arquímedes, determinación estructural mediante imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) y determinación del potencial contaminante mediante test de lixiviación dinámico (EN-12457-4) y análisis de los metales traza en el lixiviado mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

3. RESULTADOS

3.1 CAA formulados con IBA

En la **Figura 2** se describe la variación de la resistencia a compresión de los CAA formulados con IBA, en función de la alcalinidad de la solución activadora y de la cantidad adicionada de PAVAL, como fuente de aluminio. Aunque no se observa una tendencia significativa, hay que mencionar que los mejores resultados de compresión se obtuvieron con las probetas de CAA formuladas a mayor alcalinidad (NaOH 6M). Referente a la adición de PAVAL, y a pesar de haber confirmado la mayor presencia de fase mineralógicas de aluminosilicatos sódicos (ver **Figura 3**) al aumentar la adición de PAVAL, puede afirmarse que desde el punto de vista macroscópico no se observa una tendencia en el comportamiento mecánico, y éste parece ser mayoritariamente una consecuencia de los defectos de estructura internos de las diferentes probetas de CAA formuladas.

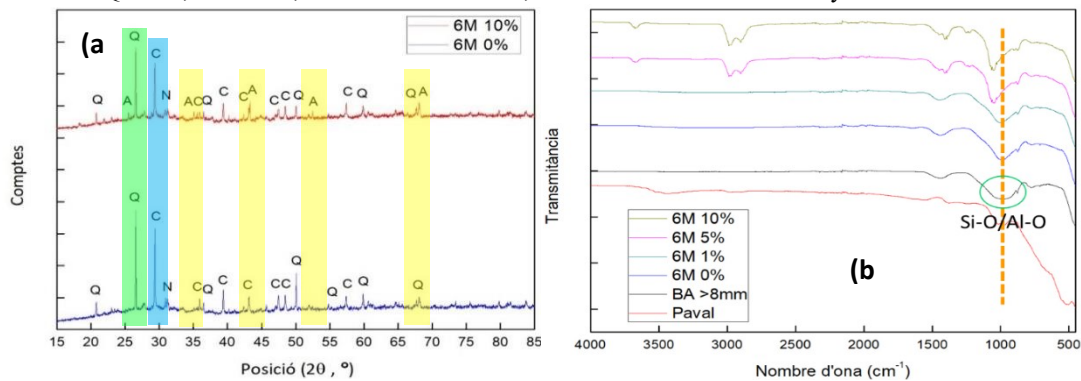
Figura 2. Resistencia a la compresión de las probetas de CAA formuladas con IBA, en función de la alcalinidad de la solución activadora y de la adición de PAVAL.



Remarcar que los resultados de compresión obtenidos ($\approx 15\text{-}20$ MPa) son del mismo orden de magnitud que aquellos que pudieran obtenerse con morteros formulados con cemento Portland, lo que da aún más valor a la utilización de este tipo de materiales cementantes.

A pesar de que a nivel macroscópico no se observa una variación significativa debida a la adición de PAVAL, los análisis por DRX y FTIR, descritos en la **Figura 3**, demuestran un aumento y desplazamiento de la señal *stretching* correspondiente a los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al, así como la presencia de fases mineralógicas de aluminosilicatos sódicos y cálcicos y de la disminución de la intensidad de los picos correspondientes a la presencia de sílica y calcita, confirmando la formación de geles (N)CASH (GARCIA-LODEIRO et al., 2011).

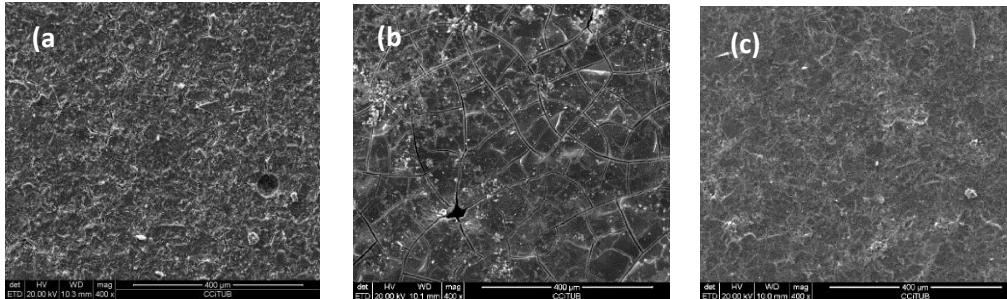
Figura 3. Difractograma y espectro FTIR de los CAA formulados con IBA y PAVAL. (a) DRX y (b) FTIR. Q=SiO₂; C=calcita; A=óxido de aluminio; N: Aluminosilicatos sódicos y cálcicos.



Significar que la densidad de todas las probetas de CAA formuladas con IBA se situó en el intervalo de 1,65 y 1,80 t/m³, aunque no se apreció una tendencia respecto a la adición de PAVAL o al aumento de la alcalinidad. Por el contrario, la porosidad dio resultados de aproximadamente 22 – 27 %, observándose una ligera disminución de la misma al aumentar la alcalinidad de la solución activadora.

En la **Figura 4** se observa imágenes SEM de la estructura de los CAA formulados a partir de IBA como precursor, en función de la alcalinidad de la solución activadora. Puede apreciarse que para una misma adición de PAVAL, al aumentar la alcalinidad se observa una mayor cohesión de la estructura.

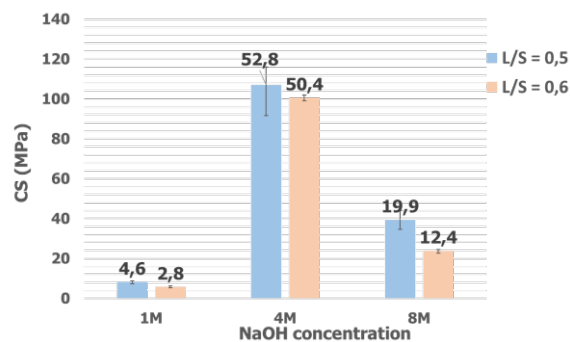
Figura 4. Imágenes SEM de los CAA formulados con IBA, para una misma adición de PAVAL y en función de la alcalinidad de la solución activadora. (a) NaOH 2M; (b) NaOH 4M; (c) NaOH 6M.



3.1 CAA formulados con CSP

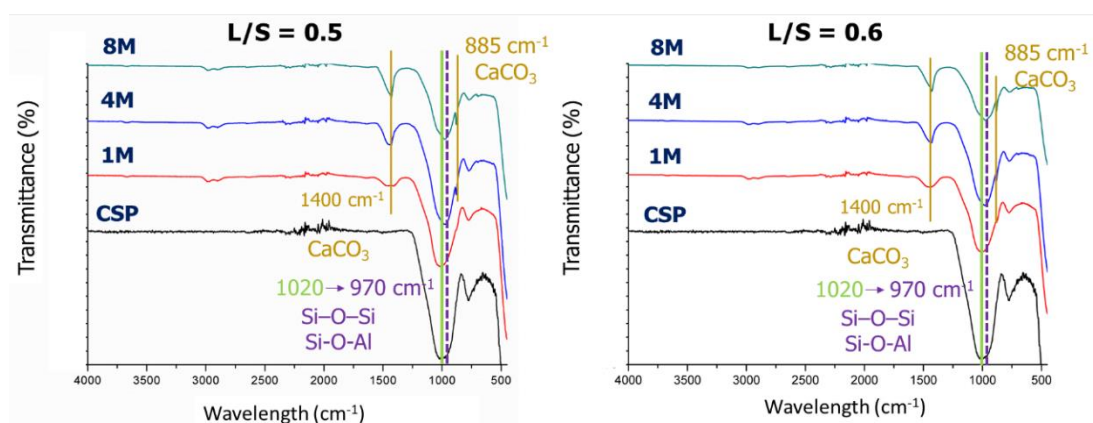
En la **Figura 5** se describe la variación de la resistencia a compresión de los CAA formulados con CSP, en función de la alcalinidad de la solución activadora y de la relación S/L. Aunque las diferencias son leves al variar la relación S/L, sí que se aprecia una diferencia significativa al variar la alcalinidad de la solución activadora, obteniéndose las mejores resistencias con la solución de NaOH 4M. En este caso, los resultados a compresión (≈ 50 MPa) son muy superiores a los obtenidos con los CAA formulados con IBA, y también mucho mayores que los morteros formulados con cemento Portland.

Figura 5. Resistencia a la compresión de las probetas de CAA formuladas con CSP, en función de la alcalinidad de la solución activadora y de la relación S/L.



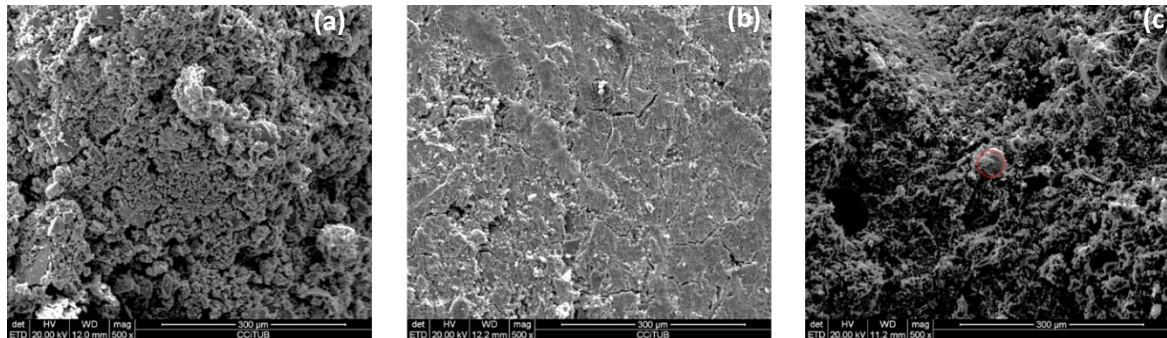
Nuevamente la espectroscopía de FTIR (**Figura 6**) muestra un desplazamiento de la señal de *stretching* correspondientes a los enlaces Si-O-Si y Si-O-Al, debido a la formación de geles NASH formadores de las fases cementantes.

Figura 6. Espectro FTIR de los CAA formulados con CSP y PAVAL.



Nuevamente, las imágenes de SEM (**Figura 7**) muestran una mayor cohesión de las fases cementantes correspondiente con la formulación obtenida con una relación S/L de 0,5 y una solución activadora de NaOH 0,5 M, correspondiente con aquella que también presenta mejores resistencias mecánicas y cuya densidad es de 1,75 t/m³.

Figura 7. Imágenes SEM de los CAA formulados utilizando como precursor CSP y PAVAL. S/L = 0,5; NaOH (a) 1M; (b) 4M; (c) 8M.



3. CONCLUSIONES

Los cementos activados alcalinamente (CAA) formulados a partir de fuentes secundarias son una buena alternativa al cemento Portland, introduciendo los materiales residuales utilizados en un nuevo ciclo productivo, lo que permite obtener materiales más sostenibles, disminuir la energía requerida para su obtención y disminuir la emisión de CO₂ y otros gases efecto invernadero.

La utilización de residuos ricos en vidrio procedente de los envases (SiO₂), generados durante la correcta gestión de los residuos urbanos, como son la fracción de mayor tamaño de las escorias de incineración de los residuos municipales (IBA) o los improprios del reciclaje del vidrio (CSP), como precursores en la formulación de CAA, permite incrementar el ciclo de vida de estos materiales, la mayoría de los cuales son actualmente gestionados en vertederos. En este caso, y con el objetivo de suplir la deficiencia de Al₂O₃, necesaria para la formación de fases cementantes de los CAA, se ha utilizado un material residual generado durante el reciclaje del aluminio (PAVAL).

Los resultados preliminares de la resistencia mecánica de los CAA formulados con IBA o CSP son del mismo orden de magnitud, o superior, a la de los morteros formulados con cemento Portland, lo que demuestra el potencial y la viabilidad de estos materiales para su uso en el campo de la construcción.

AGRADECIMENTOS

El trabajo está financiado por el Gobierno de España (BIA2017-83912-C2-1-R). Agradecer al Gobierno de Catalunya la acreditación de calidad otorgada al grupo de investigación DIOPMA (2017 SGR 118). Agradecer a las empresas SIRUSA (Tarragona), Daniel Rosas, S.A. (Barcelona) y BEFESA (Valladolid) por el suministro del IBA, CSP y PAVAL, respectivamente. Àlex Maldonado-Alameda agradece al Gobierno de Catalunya la beca de investigación otorgada (FI-DGR 2017). Así mismo, agradecer a CYTED - Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo a través de la Red CIREs.

REFERENCIAS

- ALLWOOD, J. M.; CULLEN, J. M. **Sustainable Materials. With both eyes open.** Cambridge: UIT Cambridge, 2012.
- ALTUNDOAN, H. S. et al. Arsenic adsorption from aqueous solutions by activated red mud. **Waste Management**, v. 22, n. 3, p. 357–363, 2002.
- ARC. **Agència de Residus de Catalunya.** Disponível em: <<http://residus.gencat.cat/es/lagencia/>> (accessed 01.01.2016).>.
- CHIMENOS, J. . et al. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. **Journal of Hazardous Materials**, v. 64, n. 3, p. 211–222, fev. 1999.
- CHIMENOS, J. M. et al. Short-term natural weathering of MSWI bottom ash as a function of particle size. **Waste Management**, v. 23, n. 10, p. 887–895, 2003.
- DEL VALLE-ZERMEÑO, R. et al. Material characterization of the MSWI bottom ash as a function of particle size. Effects of glass recycling over time. **Science of the Total Environment**, v. 581–582, 2017.
- GARCIA-LODEIRO, I. et al. Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 9, p. 923–931, 2011.
- HÜBLER, M.; LÖSCHEL, A. The EU Decarbonisation Roadmap 2050-What way to walk? **Energy Policy**, v. 55, p. 190–207, 2013.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap. Low-Carbon Transition in the Cement Industry.** France: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>>.
- KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 3, p. 729–746, 2007.
- LÓPEZ-DELGADO, A.; TAYIBI, H. Can hazardous waste become a raw material? The case study of an aluminium residue: a review. **Waste Management & Research**, v. 30, n. 5, p. 474–484, nov. 2011.
- MEJÍA, J. M.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; PUERTAS, F. Rice husk ash as a source of silica in alkali-activated fly ash and granulated blast furnace slag systems | Ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice en sistemas cementicios de ceniza volante y escoria activados alcalinamente. **Materiales de Construcción**, v. 63, n. 311, p. 361–375, 2013.
- PROVIS, J. L. et al. **Demonstration projects and applications in building and civil infrastructure.** [s.l.: s.n.]. v. 13
- ROY, D. M. Alkali-activated cements: Opportunities and challenges. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 2, p. 249–254, 1999.
- TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 342–354, 2017.
- VAN DEVENTER, J. S. J. et al. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 145–155, 2010.