

Inertización y valorización de cenizas volantes de residuos sólidos urbanos para la fabricación de morteros de cemento

Inerting and valorization of fly ash from solid urban waste for cement mortar production

Óscar López-Zaldívar, Rafael Vicente Lozano-Diez, Amparo Verdú-Vázquez, Tomás Gil-López

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Dpto. Tecnología de la Edificación. Avda. Juan de Herrera, 6 - Madrid 28040.

Tfno: +34 91 336 75 99. oscar.lopezz@upm.es

ABSTRACT

- This article expands upon the results of previous research into inerting fly ash from urban solid waste and its encapsulation in mortar matrices. Given the heterogeneous composition of the MSWIFA, it was decided to replicate the inerting process with NaHCO_3 in order to prove its efficiency. The results are conclusive, reducing the chloride content by close to 99%. Mortars were produced using two different types of cement (CEM-I and CSA) and incorporating treated fly ash using a substitution percentage of 10% in weight of the aggregate used. The physical and mechanical properties have been obtained through workability, dimensional stability, density and mechanical strength tests. The conclusions drawn are that CSA mortars containing inerted fly ash and coarser aggregates (0/4) improve the reference compressive strengths by more than 11% while bending resistance remains unaltered. These types of mortar also have a reduced workability period and better dimensional stability than the reference mortars and those containing fine aggregates (0/2).
- **Keywords:** Fly ash; Solid urban waste; Mortars; Sulfoaluminate cement; Immobilization; valorization.

RESUMEN

Este artículo amplía los resultados de una investigación previa sobre la inertización de cenizas volantes de residuos sólidos urbanos y su encapsulación en matrices de morteros de cemento. Dada la heterogeneidad en la composición de las cenizas volantes, se ha reproducido el proceso de inertización con NaHCO_3 . Los resultados son concluyentes y confirman la validez del mecanismo de inertización obteniendo una reducción del contenido en cloruros cercana al 99%. Se han elaborado morteros con dos tipos de cementos (CEM-I y CSA), granulometrías de árido de 0/4 e incorporando las cenizas volantes inertizadas como "filler", asimilando un 10% en peso del árido y añadiéndolo a la mezcla como sustitución de parte del árido. Se han analizado las propiedades físicas y mecánicas de los morteros a través de ensayos de trabajabilidad, estabilidad dimensional, densidad y ensayos de resistencia. Las conclusiones demuestran que los morteros elaborados con CSA y áridos con granulometrías 0/4 mejoran las resistencias mecánicas a compresión en más de un 11% con respecto a los morteros de referencia, superando los resultados de investigaciones previas. Las resistencias a flexión permanecen prácticamente inalteradas. Asimismo,

los morteros de CSA con áridos de granulometría 0/4 y con cenizas volantes inertizadas reducen el periodo de trabajabilidad y tienen una mejor estabilidad dimensional que sus homólogos de granulometría 0/2 y que sus morteros de referencia.

Palabras clave: Cenizas volantes; Residuos Sólidos Urbanos; Morteros, Inmovilización, Valorización, Cementos de Sulfoaluminato de Calcio.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el proceso de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU), un 75% del producto generado son gases de combustión, mientras que el 25% restante es remanente sólido. De esta cantidad, el 21 % son escorias y cenizas de fondo, mientras que el 4% restante correspondería a cenizas volantes (CV) [1] que acompañan a los gases de combustión y se caracterizan por su toxicidad, poco peso y una distribución granulométrica fina (1-1000 μm , con más de la mitad por debajo de 65 μm) [2].

El creciente interés en la valorización de residuos [3,4], junto a investigaciones que demuestran que la estabilización/solidificación de las CV en morteros de cemento representa una manera segura de inertizar y reutilizar estos materiales peligrosos [5] son la base de la presente investigación. Sin embargo, esos mismos estudios destacan que la resistencia mecánica de los morteros resultantes se ve claramente afectada en comparación a los morteros de referencia. Por este motivo se ha decidido utilizar Cementos de Sulfoaluminato de Calcio (CSA), ya que su combinación con CV presenta tres hipótesis de trabajo muy interesantes:

- La aparición de etringita en las fases tempranas provoca un rápido endurecimiento del producto con elevadas resistencias iniciales superiores a los cementos Portland ordinarios [6].
- Las CV de RSU son ricas en sulfuros y cloruros. Éstos pueden reaccionar con el sulfoaluminato de calcio y generar productos principales en la hidratación, como etringita y sales de Friedel, para formar una matriz conjunta [7].
- La matriz de los productos derivados del CSA muestra excelentes comportamientos en el lixiviado de metales pesados [8].

Este artículo es continuación de una investigación [9] en la cual se estudia el efecto de la incorporación de CV de RSU inertizadas en forma de carbonatos en las propiedades físico/mecánicas de morteros de cemento elaborados con diversas formulaciones (cemento/árido 1/1 y 1/3) y tipos de árido (granulometría fina 0/2).

La novedad de la investigación aquí presentada radica en la utilización de áridos con granulometrías gruesas (0/4) con la intención de analizar su impacto en el comportamiento mecánico de los morteros. Dado el carácter heterogéneo en la composición de las CV de RSU, se ha procedido a replicar el proceso de inertización de las CV según la investigación mencionada, para comprobar la eficacia de la técnica de inertización desarrollada con bicarbonato sódico.

Todo ello se enmarca dentro del objetivo fundamental de la investigación: la eliminación de un residuo tóxico y peligroso formado por CV de RSU, mediante su encapsulación en morteros de cemento, con la intención de mantener o mejorar sus prestaciones físico/mecánicas.

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

2.1. METODOLOGÍA

Los morteros analizados fueron amasados según la Norma Europea EN 196-1. Se ha considerado estudiar la incidencia del uso de dosificaciones distintas a las establecidas por dicha Norma y su repercusión en los comportamientos físicos y mecánicos de los morteros resultantes. Así, además de los morteros tradicionales de albañilería (relación cemento/árido 1/3), se han confeccionado morteros ricos en cemento (relación cemento/árido 1/1). La incorporación de CV de RSU inertizadas modifica cualitativamente las diversas mezclas, no así cuantitativamente, ya que todas las dosificaciones se obtienen en proporción al peso de los distintos elemento. Según la bibliografía consultada [10,11,12], la incorporación de las CVT se realiza mediante la sustitución de un 10% en peso de parte del árido.

2.1.1. Mortero fresco (UNE-EN196.1)

Para favorecer la comparación entre los morteros se estudió su relación agua/cemento con el fin de mantener la misma trabajabilidad. Se llevó la consistencia de todas las muestras a un valor de escurrimiento de 175 ± 10 mm (EN-1015-3:2000).

Asimismo, se definió el periodo de trabajabilidad en minutos de las muestras (EN-1015-9:2000).

2.1.2. Mortero endurecido

Se ha realizado el estudio de la estabilidad dimensional de las probetas (EN-83831:2010-EX) caracterizado por el análisis de las longitudes y masas iniciales de las probetas de mortero y la variación específica de las mismas, en porcentaje de deformación, a 7, 14 y 28 días. De igual forma, se determinan las densidades medias aparentes en seco de los morteros (EN-1015-10:2000).

Por último, la determinación de la resistencia a flexión y a

compresión del mortero endurecido se ha analizado a 7, 28, 60 y 90 días, según la aplicando de la Norma UNE-EN 1015-11.

2.2. MATERIALES

2.2.1. Cementos

- Cemento Portland, Tipo I 52,5 R (CEM-I)
- Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA).

2.2.2. Áridos

Se utiliza una arena silícea lavada de diámetros 0/2mm y 0/4mm. Ambos diámetros cumplen con la norma UNE-EN-13043:2003/AC:2004 de áridos para morteros con el correspondiente certificado AIDICO de control de producción en fábrica.

2.3. CENIZAS VOLANTES

Las CV de RSU proceden de la planta de tratamiento integral de residuos de Mataró, Barcelona (España), que realiza el proceso de incineración en un horno de parrilla.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. PROCESO DE INERTIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DE LAS CV DE RSU

El proceso de inertización comienza con la búsqueda de los posibles reactivos a utilizar. Para ello se ha revisado en la bibliografía los diferentes aniones que reaccionarían con los metales pesados presentes y que generarían un precipitado insoluble [13]. Se estima que el reactivo que mejor estabiliza al ion Cl^- , es el anión carbonato y se establece la utilización de bicarbonato sódico ($NaHCO_3$) como un método viable de inertizado. La adición del ion Na^+ facilitará, además, que en el proceso de lavado de las CV, se elimine una gran cantidad de cloruros en forma de cloruro sódico. La Tabla 1 muestra los resultados del lavado de las cenizas en el que se consigue una drástica reducción del contenido de cloruros en valores cercanos al 99%.

3.2. DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AGUA DE LOS MORTEROS

Por la importancia que las relaciones agua/cemento tienen en las resistencias finales, se incorpora la Figura 1 de la investigación

Elementos primarios (%)		
	CV	CVT
Cl^- solubles	$10,82 \pm 1,53$	$0,12 \pm 0,01$

Tabla 1: Análisis químico ICP-OES de las CV de RSU y de las cenizas inertizadas (CVT)

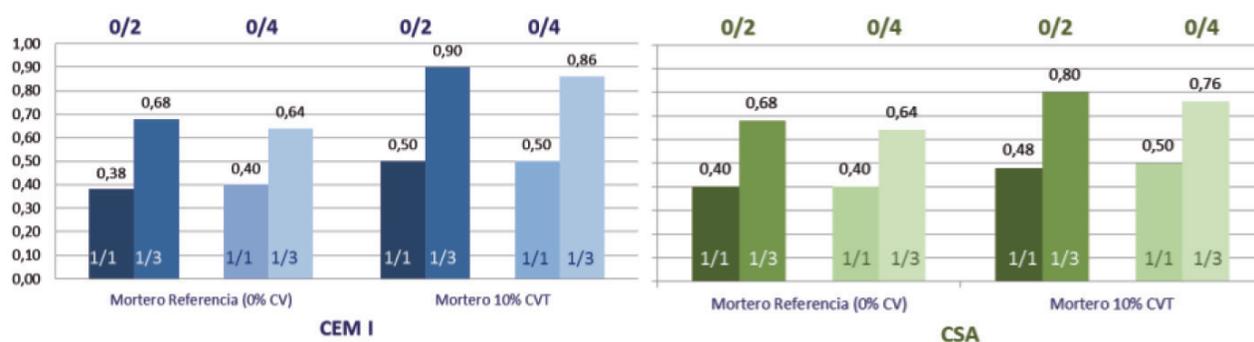


Figura 1: En el eje vertical se presenta la relación óptima agua/cemento para los morteros elaborados con CEM-I y CSA. Consistencia del mortero para un valor de escurrimiento 175 ± 10 mm según EN 1015-3:2000. [9]

inicial [9]. La incorporación de CVT aumenta el agua necesaria para mantener la trabajabilidad de la masa, aunque en menor cantidad para los morteros con áridos 0/4. Este aumento se explica por la incorporación de una mayor cantidad de finos (en forma de partículas de calcita $-\text{CaCO}_3-$), las cuales originan un aumento de la superficie específica del árido [14]. Esto es un condicionante negativo en los morteros porque una mayor relación agua/cemento, reduce la resistencia a compresión de los mismos [15] y puede suponer un inconveniente en la encapsulación de las CV de RSU al favorecer el lixiviado de metales pesados [16]. Por el contrario, los morteros CSA requieren una menor cantidad de agua, con lo que su comportamiento sería beneficioso de cara a mejorar dichos factores.

3.3. DETERMINACIÓN DEL PERIODO DE TRABAJABILIDAD

La Tabla 2 muestra que los morteros CEM-I con CVT, presentan un incremento en sus tiempos de fraguado. Este efecto retardador de las CVT es probablemente causado por las cantidades de P, Zn y Pb de las CV. Los datos vienen a corroborar investigaciones previas según las que los tiempos de fraguado, se ven incrementados cuando la adición de CV llega a valores de un 15% en peso [17]. Por otra parte, la incorporación de estos finos (en forma de partículas de calcita) generan una mayor superficie aparente en los áridos utilizados. De igual forma, la incorporación de CV es comúnmente asociada a mayores requerimientos de agua de ama-

sado lo cual implica un aumento en los tiempos de curado de los morteros [18].

Por el contrario, la presencia de CVT actúa como un acelerador del fraguado ya que los hidratos producidos se comportan como partículas cristalinas que aceleran la hidratación temprana del cemento y su cristalización [19]. También la existencia de Zn o Pb, dependiendo de la cantidad de yeso presente, puede facilitar los procesos de hidratación y reducir los tiempos de fraguado [20].

3.4. ESTABILIDAD DIMENSIONAL

La Figura 2 normaliza el comportamiento dimensional de los morteros ensayados. Los valores mostrados corresponden al cociente entre las distintas longitudes y masas específicas de los morteros con la incorporación de CVT (calculados como media de los valores para cada edad), y los valores de referencia de los mismos morteros sin adiciones, a esas mismas edades. Así se consigue determinar qué morteros presentan mejores estabilidades dimensionales tanto a deformación, como a pérdida de masa (contracción menor que 1 y expansión mayor que 1).

Los mejores resultados en cuanto a deformación a 28 días, se obtienen para los morteros elaborados con CSA (0/2-1/1 y 1/3 y 0/4-1/1). De igual forma, los valores óptimos en estabilidad de masa específica se obtienen para los morteros de CSA en dosificaciones 0/4-1/1. De esta forma, los morteros CSA (0/4-1/1) presentan los mejores valores de estabilidad dimensional de entre todos los analizados.

Cemento	Tamaño del árido (mm)	Dosificación	Trabajabilidad del mortero en minutos	
			R(0%)	CVT(10%)
CEM I	0/2 · 0/4	1/1	193 · 170	205 · 196
		1/3	248 · 250	280 · 320
CSA	0/2 · 0/4	1/1	<15	<15
		1/3	<15	<15

Tabla 2: Periodo de trabajabilidad (en minutos) de los morteros ensayados

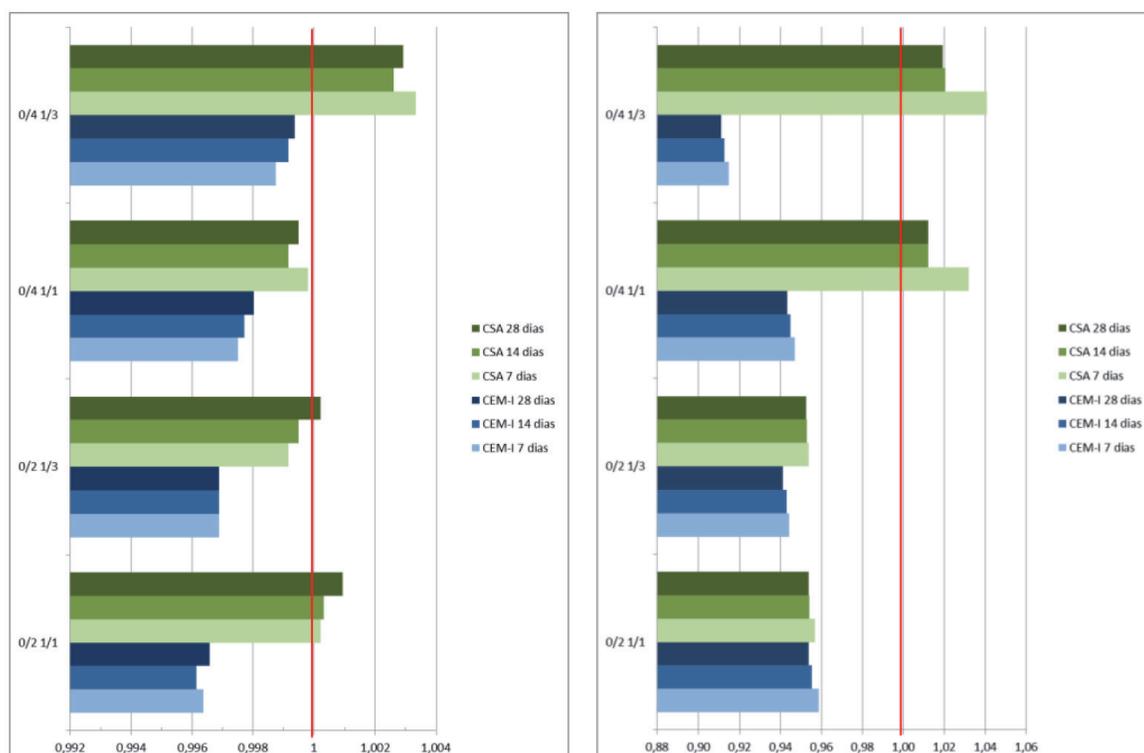


Figura 2: Normalización de resultados de la variación de la longitud específica o deformación (ϵ) [izda] y de la variación de la masa específica (m) [dcha], a 7, 14 y 28 días de cada dosificación ensayada. Los valores mostrados corresponden al cociente entre los distintos valores de los morteros (longitud y masa específica) con la incorporación de CVT, en cada una de las edades, y los valores de referencia de los morteros sin adiciones, a esas mismas edades. [CEM-I (azul). CSA (verde)]

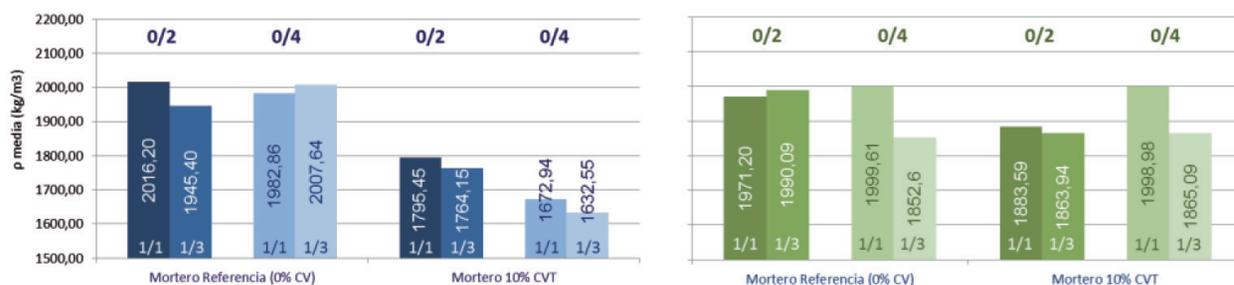


Figura 3: Densidad media aparente en seco, en kg/m³, de los morteros de CEM-I (azul) y CSA (verde)

Son especialmente negativos los resultados de los morteros CEM-I, debido a que el alto contenido en cloruros y sulfatos de las CV de RSU, favorecen la formación de grandes cantidades de etringita y cloroaluminatos, los cuales movilizan gran cantidad de moléculas de agua. La formación temprana de cualquiera de estos hidratos podría explicar las contracciones de morteros que contuvieran CV en fases tempranas. Esa extracción del agua de la pasta de cemento para crear etringita primaria produce retracciones y microfisuración temprana en el cemento hidratado próximo, especialmente si la presencia de CV contribuyen a la formación de los correspondientes productos de hidratación.

3.5. DENSIDAD APARENTE EN SECO DEL MORTERO ENDURECIDO

La Figura 3 muestra los resultados del cálculo de la densidad media aparente en seco de los morteros, siendo todos valores muy homogéneos. La incorporación de CVT a morteros de CEM-I provoca una reducción de la densidad que varía entre un 9,31%, para dosificación 1/3 y tamaño de árido 0/2; hasta un 18,68% para los de la misma dosificación, pero con un árido de mayor diámetro (0/4).

En morteros CEM-I, las densidades disminuyen cuanto mayor es el tamaño del árido y cuanta más cantidad de finos se utilizan en su elaboración. Esto está relacionado con los índices de agua

requerida para el amasado de las mezclas. Los morteros con CVT requieren mayor cantidad de agua, lo cual afecta negativamente a la porosidad de las matrices.

En el caso de los morteros CSA con CVT y áridos de mayor tamaño (0/4), se han conseguido densidades similares a los de los morteros de referencia. El aumento de agua de amasado, no incide directamente en la porosidad del material ya que los resultados no difieren llamativamente si los comparamos con los morteros de referencia. En morteros con dosificación 1/3, la diferencia con el mortero de referencia es de un +0,67%, mientras que en el caso de la dosificación 1/1, esta diferencia es de sólo un -0,03%. La rápida formación de cristales de etringita desarrolla una microestructura de la matriz perfectamente definida [21] lo cual provoca que la inclusión de CVT en los morteros CSA y dosificación 0/4 no afecte a su densidad.

Por el contrario, la disminución del tamaño del árido produce una disminución en la densidad del mortero seco que va desde un 4,44%, para dosificaciones 1/1, a un 6,34% en 1/3. La mayor cantidad de agua de amasado que requieren estos morteros y el efecto relleno que tienen las CV [22] causan una reducción de la densidad en morteros con mayor cantidad de áridos y más finos.

3.6. RESISTENCIAS

La Tabla 3 muestra los resultados de rotura a flexión de los morteros CEM-I. A pesar de ser muy homogéneos, resultan menos desfavorables cuanto mayor cantidad de árido tiene la mezcla (1/3). La mejor dosificación se corresponde con la de los morteros CEM-I-0/2-1/3, en los que la pérdida de resistencia a flexión entre el mortero de referencia y el mismo mortero con CVT, es un 17,06%. Los valores de tensión a flexión con la incorporación de CVT, son los que peores resultados presentan en relación a sus morteros de referencia.

Por otra parte, la incorporación de CVT reduce en aproximadamente una quinta parte, las tensiones de rotura a compresión. Las cantidades de portlandita presentes en las CV de RSU originales no tiene ningún efecto en los morteros analizados, ya que el tratamiento efectuado a través del lavado con bicarbonato sódico (NaHCO₃) produce una transformación de los hidróxidos en carbonatos, especialmente carbonato cálcico (CaCO₃), el cual es inerte. Las pérdidas de resistencia tienen su explicación en que las partículas de CVT son puntos débiles en la matriz del mortero. De igual manera, se ha demostrado [23] que la reactividad entre las mezclas de pastas de cemento y las CV son especialmente débiles. Por otro lado, esta reducción de las propiedades mecánicas es atribuible al alto grado de agua necesaria para su amasado. También es conocido que el contenido de CaCO₃ puede incrementar el contenido en aire de las mezclas lo que, una vez más, puede provocar una reducción de las resistencias a compresión [24].

Los morteros de CSA con CVT y con mayor cantidad de áridos, tienen un mejor comportamiento a flexión que aquellos con dosificaciones más ricas. De igual forma, los morteros CSA-1/3 son los únicos que mejoran los valores de referencia en su comportamiento

Dosificación	%CVT	Tensión de rotura a flexión	Tensión de rotura a compresión
CEM-I-0/2-1/1 R(0%)		10,91	86,46
	CVT 10%	8,78 (-19,50%)	69,42 (-19,71%)
CEM-I-0/2-1/3	R(0%)	8,80	44,35
	CVT 10%	7,30 (-17,06%)	33,07 (-25,44%)
CEM-I-0/4-1/1	R(0%)	10,48	84,83
	CVT 10%	8,11 (-22,60%)	68,76 (-18,95%)
CEM-I-0/4-1/3	R(0%)	8,41	47,11
	CVT 10%	6,67(-20,71%)	36,63 (-22,24%)
CSA-0/2-1/1	R(0%)	9,09	67,70
	CVT 10%	5,73 (-36,96%)	64,40 (-4,88%)
CSA-0/2-1/3	R(0%)	5,05	28,90
	CVT 10%	5,10 (+1,15%)	31,21 (+8,01%)
CSA-0/4-1/1	R(0%)	8,83	67,28
	CVT 10%	5,60 (-36,58%)	58,80 (-12,60%)
CSA-0/4-1/3	R(0%)	5,37	32,84
	CVT 10%	5,29 (-1,37%)	36,74 (+11,89%)

Tabla 3: Valores medios de tensión de rotura a flexión y a compresión a 90 días, en N/mm².

En verde, porcentaje comparativo de ganancia de resistencias. En rojo, porcentaje de pérdida de resistencias

a compresión. La investigación demuestra que, durante el proceso de hidratación, una mayor cantidad de áridos y de mayor diámetro, favorece la porosidad y, por lo tanto, a la carbonatación del mortero, la cual incide de manera positiva a la resistencia mecánica de los mismos. A todo ello hay que añadir que los CSA presentan claros beneficios en comparación con los cementos Portland. En primer lugar, la aparición de etringita en las fases tempranas tiene como consecuencia un rápido endurecimiento del producto, lo cual confiere a los morteros elaborados con este tipo de cementos una elevada resistencia inicial y resistencias finales superiores a los cementos Portland ordinarios [6]. En segundo lugar, la combinación con CV de RSU, ricas en sulfuros y cloruros, provocan su reacción con el sulfoaluminato de calcio presente en el cemento y generan productos principales en la hidratación del cemento como etringita y sales de Friedel, para formar una matriz conjunta que favorece la estabilización/solidificación del residuo en su matriz.

4. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos tras el lavado de las CV de RSU con NaHCO_3 son concluyentes y han servido de ayuda para la comprobación de la validez del mecanismo de inertización desarrollado previamente. El porcentaje de cloruros se reduce en un 98.89%.
- La elaboración de morteros de albañilería con la incorporación de CV inertizadas en forma de carbonatos, en una proporción de sustitución de un 10% en peso de los áridos, es técnicamente posible. Se trata de un método viable para conseguir la estabilización/solidificación de este residuo.
- Los morteros elaborados con cementos CSA con la inclusión de CVT y una dosificación de árido 0/4 muestran periodos de trabajabilidad similares a aquellos realizados con áridos finos (0/2). Por el contrario, éstos son mucho más cortos que los ofrecidos por los morteros de cemento Portland en todas sus dosificaciones.
- Los morteros de CSA con CVT y árido 0/4 en su dosificación presentan los mejores valores de estabilidad dimensional, obteniendo mejores valores que los ofrecidos por los morteros referencia.
- Las densidades de los morteros de CSA y áridos 0/4 no se ven afectadas por la inclusión de CVT, al contrario de lo ocurrido en el resto de morteros ensayados.
- La incorporación de CVT afecta negativamente a los valores medios de tensión de rotura tanto a compresión, como a flexión, de los morteros CEM-I en cualquiera de sus dosificaciones y tipo de árido utilizado.
- Los morteros CSA con CVT, árido 0/4 y dosificaciones árido/cemento 3/1 presentan resistencias a compresión un 11,89% superiores a sus morteros de referencia. Este dato supera a los de investigaciones previas con áridos finos. Estos resultados quedan acreditados en la Patente de Invención con examen previo ES 2470568 B2 [25].
- La utilización de cementos belíticos para la encapsulación de CV de RSU inertizadas es más favorable, desde el punto de vista de las resistencias, que la cementos con base de alita, con el consiguiente beneficio ambiental que conlleva.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sabbas, T., Poletti, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelmar, O. & Mostbauer, P. (2003). Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Management*, 23(1), 61-88.
- [2] Ribeiro, A., Mateus, E., Lima, A.T., García Rubio, A., Vereda Alonso, C. & Gómez Lahoz, C. (2008). Flying ash from solid urban waste incinerators: Treatment and applications. *Ingeniería Química* 40(460), 110-122.
- [3] Hidalgo-Barrio, M., Martín-Marroquín, J., Gómez-Rincón, M., Aguado-Pesquera, A., Antolín-Giraldo, G. (2014). Integral and sustainable system for multi-waste recycling and valorisation - revawaste project. *DYNA*, 89(3), 309-315. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/6975>
- [4] Alameda, L.; Calderón, V.; Gadea, J.; Gutiérrez-González, S. Recycling of gypsum plasterboard lightened with polyurethane waste. *Anales de Edificación*, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 33-39, mayo 2015. ISSN 2444-1309. doi: <http://dx.doi.org/10.20868/ade.2015.3037> .
- [5] Mangialardi, T., Panei, L., & Piga, L. (2004). Cement-based immobilisation of municipal incinerator fly ash and reuse of solidified products as a construction material. *Waste Management and the Environment II*, pp. 35-44.
- [6] Péra, J., & Ambroise, J. (2004). New applications of calcium sulfoaluminate cement. *Cement and Concrete Research*, 34(4), 671-676.
- [7] Suryavanshi, A. K., Scantlebury, J. D., & Lyon, S. B. (1996). Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tri-calcium aluminate. *Cement and Concrete Research*, 26(5), 717-727.
- [8] Peysson, S., Péra, J., & Chabannet, M. (2005). Immobilization of heavy metals by calcium sulfoaluminate cement. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2261-2270.
- [9] López-Zaldivar O, Mayor-Lobo P, Fernández-Martínez F, Hernández-Olivares F. (2015) Improved cement mortars by addition of carbonated fly ash from solid waste incinerators. *Materiales de Construcción* 2015;65(319):e062.
- [10] Rémond S, Pimienta P, Bentz DP. (2002) Effects of the incorporation of Municipal Solid Waste Incineration fly ash in cement pastes and mortars: I. Experimental study. *Cem Concr Res* 2002;32(2):303-311.
- [11] Cinquepalmi MA, Mangialardi T, Panei L, Paolini AE, Piga L. (2008) Reuse of cement-solidified municipal incinerator fly ash in cement mortars: Physico-mechanical and leaching characteristics. *J Hazard Mater* 2008;151(2-3):585-593.
- [12] Lima AT, Ottosen LM, Ribeiro AB. (2012) Assessing fly ash treatment: Remediation and stabilization of heavy metals. *J Environ Manage* 2012;95(SUPPL):S110-S115.
- [13] Chang, J. C. (1990) Solubility product constants. CRC handbook of chemistry and physics. (71st Edition, ed.). Boca Raton, FL.
- [14] Aubert, J. E., Husson, B., & Sarramone, N. (2006). Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Part 1: Processing and characterization of MSWI fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 624-631.
- [15] Mangialardi, T., Paolini, A. E., Poletti, A., & Sirini, P. (1999). Optimization of the solidification/stabilization process of MSW fly ash in cementitious matrices. *Journal of Hazardous Materials*, 70(1-2), 53-70.
- [16] Coutand, M., Clastres, P., Cyr, M. (2011) Quantification of uncertainty of experimental measurement in leaching test on cement-based materials. *Journal of Environmental Management*. Volume 92, Issue 10, October 2011, Pages 2494-2503
- [17] Siddique, R. (2010). Utilization of municipal solid waste (MSW) ash in cement and mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1037-1047.
- [18] Wesche, K. (1991). Fly ash in concrete: Properties and performance (Technical Committee No. 67). FAB: Use of fly ash in building: Chapman & Hall, London.
- [19] Fan, Y., Yin, S., Wen, Z., & Zhong, J. (1999). Activation of fly ash and its effects on cement properties. *Cement and Concrete Research*, 29(4), 467-472.
- [20] Wei, G., Liu, H. & Zhang, S. (2011). Using of different type cement in solidification/stabilization of MSWI fly ash. *Advanced Materials Research*. Vols. 291-294. Pp 1870-1874.
- [21] Irico, S., Gastaldi, D., Canonico, F., & Magnacca, G. (2013). Investigation of the microstructural evolution of calcium sulfoaluminate cements by thermoporometry. *Cement and Concrete Research*, 53(0), 239-247.
- [22] García-Maté, M., De la Torre, A. G., León-Reina, L., Aranda, M. A. G., & Santacruz, I. (2013). Hydration studies of calcium sulfoaluminate cements blended with fly ash. *Cement and Concrete Research*, 54(0), 12-20.
- [23] Kessler, B., Rollet, M., & Sorrentino, F. (1992). Microstructure of cement pastes as incinerator ash host. *Proceedings of the First International Symposium on Cement Industry Solution to Waste Management*. Calgary. pp. 235-251.
- [24] Goh, C. C., Show, K. Y., & Cheong, H. K. (2003). Municipal solid waste fly ash as a blended cement material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Nov/Dec, 513-523.
- [25] López-Zaldivar O, Mayor-Lobo P, Fernández-Martínez F, Hernández-Olivares F. (2014). Improvement of calcium sulfoaluminate cement mortar using inerted solid urban waste fly ash in the form of carbonates. *ES 2 470 568 B2*.