



Valorización de cenizas de lodo de depuradora como componente de hormigones para prefabricados

F. Baeza Brotons¹, P. Garcés Terradillos¹, J. Payá Bernabeu², O. Galao Malo¹

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, España.

²Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València, España.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/r.a.v5i1.76>

Artículo recibido el 10 de octubre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 04 de enero de 2015. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2015 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2015.

© 2015 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 5, No. 1, Enero – Abril 2015, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de enero de 2015.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

Se plantea la combinación binaria y ternaria de cenizas de lodo de depuradora (CLD) con ceniza volante, polvo de mármol y ceniza de cáscara de arroz, como sustitución parcial o como adición respecto al cemento Portland en hormigones, con una dosificación similar a la utilizada en la prefabricación de bloques (consistencia muy seca). Se llevaron a cabo ensayos físico-mecánicos sobre probetas de mortero y hormigón con edades de curado de 28 y 90 días: densidad, absorción y resistencia a compresión. Se comprueba que la sustitución de cemento por CLD supone una disminución de la densidad y de la resistencia respecto a la muestra patrón, sin embargo, las combinaciones con otros residuos mejoran notablemente las características de los materiales cementantes. La adición de CLD proporcionó densidades y resistencias similares a la muestra de control y reduce significativamente la absorción de agua.

Palabras claves: sostenibilidad; subproductos industriales; adiciones minerales.

ABSTRACT

This paper proposes binary and ternary combinations of sewage sludge ash (SSA) with fly ash, marble dust and rice hull ash, as partial replacement or addition relative to Portland cement in concretes with a similar dosage to that used in the manufacture of precast blocks, with very dry consistency given its manufacturing process in plant. Several physical-mechanical tests were carried out on concrete and mortar specimens with curing ages of 28 and 90 days: density, water absorption and compressive strength. It is proved that replacing cement by SSA involves a decrease in density and compressive strength compared to the reference sample, however, the combinations of residues significantly improve the characteristics of the cementitious materials. The addition of SSA provided densities and resistances similar to the control sample and significantly reduces the water absorption.

Keywords: sustainability; industrial products; mineral additions.

RESUMO

Impõe-se a combinação binária e ternária de cinzas de lodo de esgoto com cinza volante, pó de mármore e cinzas de casca de arroz, tal como uma substituição parcial ou adição em relação ao cimento Portland em concretos. Com esses materiais foram produzidos argamassas e concretos com consistência similar à utilizada na pré-fabricação de blocos (consistência muito seca). Nas argamassas e concretos, com idades de 28 dias e 90 dias, foram realizados os seguintes ensaios físico-mecânicos: densidade, resistência à compressão e absorção. Verificou-se que a substituição de cimento por cinza de lodo de esgoto acarretou uma diminuição na densidade e na resistência em comparação com a amostra padrão. Por outro lado, as combinações com outros resíduos melhoraram significativamente as características das argamassas e concretos. A adição de cinza de lodo de esgoto proporcionou densidades e resistências similares à amostra padrão e reduziu significativamente a absorção de água.

Palavras-chave: sustentabilidade; produtos industriais; aditivos minerais.

Autor de correspondencia: Francisco Baeza (fbaeza.brotons@ua.es)

1. INTRODUCCIÓN

La generación y gestión de los residuos constituye un problema ambiental grave de las sociedades modernas. El abandono o la gestión inadecuada de los residuos producen impactos notables en los medios receptores, y pueden provocar contaminación en el agua, en el suelo, en el aire, contribuir al cambio climático y afectar a los ecosistemas y a la salud humana. Sin embargo, cuando los residuos se gestionan de forma adecuada, se convierten en recursos que contribuyen al ahorro de materias primas, a la conservación de los recursos naturales y del clima, y al desarrollo sostenible (PNIR, 2008).

Algunos de los residuos pueden ser utilizados en hormigones como adiciones minerales, las cuales son definidas como materiales inorgánicos, puzolánicos o de hidraulicidad latente, que finamente divididos pueden ser añadidos al hormigón y al mortero a base de cemento Pórtland con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales (Hewlett, 1998).

En el presente trabajo, además de ceniza de lodo de depuradora (CLD), se utilizaron tres residuos generados en diferentes procesos industriales: a) Ceniza volante de central termoeléctrica de carbón (CV); b) Polvo de mármol (PM); d) Ceniza de cascarilla de arroz (CCA). Dos de estos residuos, CLD y PM, suponen un grave problema a escala local debido al volumen producido: la cantidad de lodo de depuradora producido en España fue de aproximadamente 1,06 millones de toneladas de materia seca (European Commission, 2010). El destino de la CLD es: uso como fertilizante (65-80%), depósito en vertederos controlados (8-20%) o incineración para reducir su volumen. Alrededor de un 4-10% de la cantidad total de lodos se incineran, pero la tendencia es aumentar esta cantidad hasta un 20-25%, que es el porcentaje medio de lodos de aguas residuales que son incinerados en Europa (European Commission, 2010; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013; Cyr et al., 2007). El problema que presentan estos residuos tras su incineración es la presencia de metales pesados en su composición, lo cual lo convierte en un potencial contaminante y justifica una intensa búsqueda de alternativas a su depósito en vertedero. Respecto al PM, aunque no es un residuo peligroso según la lista europea de residuos (Ministerio de Medio Ambiente, 2002), con un 98% de carbonato cálcico, su vertido incontrolado constituye un problema histórico a escala local, ya que puede provocar daños ambientales, fundamentalmente por impacto visual y por contaminación de cursos de agua. Actualmente la provincia de Alicante (España) produce y exporta el 70% del mármol nacional, siendo el país el 2º productor europeo y 7º mundial. Dicha actividad genera en la comarca donde se concentra la industria cerca de 500000 toneladas anuales de fangos como consecuencia del corte y pulido de la piedra natural (Asociación del Mármol de Alicante, 2013).

Es conocido el efecto de estos residuos de manera individual o combinados, esto último en menor medida, como sustitutos del cemento en matrices conglomerantes convencionales:

- En el caso de la CLD, por ejemplo cuando fue utilizada como sustitución parcial del cemento en proporciones del 10%, o con 2% de sustitución de arena, las probetas de hormigón presentaron resistencias a la compresión similares a las muestras control. En cuanto al estudio de lixiviación, los resultados indicaron que la mezcla de cenizas CLD con cemento y arena para producir mortero u hormigón indujeron una estabilización de Molibdeno y Selenio, siendo un buen tratamiento de las cenizas (Chen et al., 2013). Otros trabajos han demostrado también que morteros que contienen CLD presentan buenas propiedades mecánicas (Monzó et al., 1996; Alcocel et al., 2006). La mejora observada se debe a la actividad puzolánica de la CLD (Payá et al., 2002).
- Las CV se han empleado desde hace varias décadas como adiciones y sus características más destacadas son: esfericidad de sus partículas, elevados contenidos en SiO_2 y Al_2O_3 vítreos y actividad puzolánica a tiempos medios y largos. La incorporación de las CV en mezclas con el

cemento Portland, aumenta la trabajabilidad y consistencia de los morteros y hormigones (Peris et al., 1993).

- En los sistemas ternarios cemento/CLD/CV para la fabricación de aglomerantes, las CLD poseen una puzolanidad importante, incrementando las resistencias mecánicas de los morteros entre los 7 y los 28 días. Así mismo, la CLD reduce la fluidez de los morteros mientras que la CV la mejora (Monzó et al., 1999; Borrachero et al., 2002).
- Diversos estudios demuestran que la adición de PM en matrices cementantes es efectiva para mejorar la cohesión de la mezclas, permite sustituir hasta un 10% de arena sin afectar a la resistencia a compresión, con un mejor comportamiento mecánico con respecto a mezclas que contienen filler calizo, y proporciona una menor permeabilidad al agua (Corinaldesi et al., 2010; Binici et al., 2007).
- En trabajos en los que se utilizó CCA como sustituto parcial del cemento en hormigones, los resultados para sustituciones del 25% mostraron los mismos o mejores resultados en comparación con el hormigón convencional (Khana et al., 2012). Con sustituciones de hasta el 30% se producían mejoras en la durabilidad y la homogeneidad, no aumentando la resistencia a compresión a edad temprana aunque mejoraba a edades más avanzadas (Madandoust et al., 2011).

El principal objetivo del presente trabajo fue ampliar el conocimiento sobre las sinergias generadas en los estados fresco y endurecido de hormigones destinados a la fabricación de bloques prefabricados (con características particulares debido su proceso de fabricación), al sustituir parcialmente o adicionar el cemento Portland con los residuos de manera individual y combinados de forma binaria y ternaria, con especial atención sobre la CLD. Está basado parcialmente en otros trabajos anteriores relacionados con: sustitución de cemento en pastas y morteros por combinaciones binarias y ternarias de residuos (Baeza et al., 2014a) y adición de CLD respecto al cemento en hormigones destinados a la fabricación de bloques (Baeza-Brotons et al., 2014b). El resto de los nuevos datos aportados se encuadran en el marco de la tesis doctoral sobre uso de CLD en este ámbito (Baeza-Brotons, 2012). El origen de todos estos estudios, basados en la utilización de CLD, se encuentra en la investigación sobre bloques de hormigón prefabricado (Pérez-Carrión et al., 2014), en el que la adición de CLD aporta unas interesantes respuestas mecánicas, con mejoras respecto al patrón de hasta el 25%.

A pesar de que los resultados obtenidos en este estudio, con probetas cúbicas de hormigón, no serían comparables directamente con los resultados que se obtendrían con bloques de hormigón fabricados en planta, ya que difieren en sus dimensiones, configuración y proceso de fabricación, sin embargo, dado que existe coincidencia en la dosificación, este trabajo podría suponer un paso previo a la fabricación piloto de bloques en planta con aquellas adiciones con una mejor respuesta técnica en laboratorio.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Material.

Las adiciones minerales utilizadas (Figura 1) tienen la siguiente procedencia: a) La ceniza de lodo de depuradora (CLD) fue suministrada a granel por la planta incineradora de la estación depuradora de aguas residuales de Pinedo en Valencia (España), donde fue obtenida de la descarga del filtro electrostático en el incinerador de lecho fluidizado, con una temperatura máxima aplicada de 800 °C; b) La ceniza volante (CV) de la central termoeléctrica de carbón de Andorra-Teruel (España) suministrada igualmente a granel; c) El polvo de mármol (PM) fue obtenido de un vertedero situado en el municipio de Novelda en la provincia de Alicante (España), que recoge los residuos generados por numerosas industrias locales; d) La ceniza de cáscara de arroz (CCA)

procede de DACSA, una planta de cogeneración de energía en Valencia (España) que utiliza la cáscara de arroz como uno de los combustibles.

El cemento Portland utilizado en los morteros fue del tipo CEM II/B-L-32,5R, suministrado en sacos de 25 kg. El árido de los morteros el de referencia CEN, EN 196-1, suministrado en bolsas con la cantidad requerida (1350 g). El cemento Portland utilizado en los hormigones fue del tipo CEM II B-M (S-LL)-42,5R, el mismo que el usado en planta local para la fabricación de los bloques de hormigón; se trata por tanto de un cemento mixto, de clase resistente 42,5 N/mm² y alta resistencia inicial, con la siguiente composición porcentual en masa: clínker entre un 65-79%, escoria de alto horno más caliza entre 21-35% y otros componentes minoritarios entre 0-5%, según la instrucción para la recepción de cementos española (RC-08). Los áridos, triturados de tipo calizo, fueron facilitados por la planta de fabricación de bloques citada y se correspondían con las fracciones granulométricas designadas según la instrucción de hormigón estructural española (EHE-08) como F1:0/4-T-C y F2:2/8-T-C.



Figura 1. Adiciones minerales utilizadas en la investigación (de izquierda a derecha): Ceniza de lodo de depuradora (CLD); ceniza volante (CV); polvo de mármol (PM); ceniza de cáscara de arroz (CCA).

2.2. Dosificación y denominación de las mezclas.

El mortero tomado como referencia, denominado patrón (P), es el indicado en la norma UNE-EN 196-1(AENOR, 2005): una parte de cemento, tres partes de arena y media parte de agua, manteniendo constante en todas las mezclas la relación agua/bínder, o lo que es lo mismo agua/(cemento+adiciones minerales), igual a 0,5.

Se planteó un tipo de hormigón de referencia con dosificación similar a la usada en la fabricación de bloques en la planta local de prefabricados, de consistencia seca (asiento en Cono de Abrams igual a cero). Dicha consistencia es imprescindible en el proceso de elaboración de estos prefabricados, ya que el hormigón es vertido en los moldes y separado de los mismos de manera inmediata para su curado. La dosificación patrón, en kg por m³, fue la siguiente: 125,6 kg de cemento, 85,6 kg de agua, 1227 kg de árido fracción 0/4 y 571 kg de árido fracción 4/8. En todas las mezclas se mantuvo constante la relación agua/bínder igual a 0,68. Se puede observar que las cantidades de agua y cemento son inferiores a las de un hormigón convencional; si a esto le unimos una elevada proporción de áridos finos (F-0/4), lo que lleva asociado una mayor absorción de agua, el resultado es un hormigón en estado fresco con una consistencia muy seca.

Además de las muestras patrón descritas, fueron realizadas 18 dosificaciones de los distintos residuos en ambas matrices cementantes divididas en cuatro grupos:

a) Sustituciones del 10% de cemento respecto a la muestra patrón por cada uno de los residuos minerales estudiados. De esta manera, en la mezcla denominada *S10(D)* se sustituyó el 10% de cemento por CLD, en la *S10(A)* por CCA, en la *S10(M)* por PM, y en la *S10(V)* por CV;

- b) Sustituciones del 20% de cemento. Además de la mezcla *S20(D)*, donde se sustituye el 20% de cemento por sólo CLD, se realizaron combinaciones binarias (10+10%) de dos residuos en las muestras *S20(DV)*, *S20(DM)*, *S20(MV)* y *S20(DA)*;
- c) Sustituciones del 30% de cemento: mezcla *S30(D)*, sólo con CLD, combinación ternaria *S30(DVA)*, con 10% de cada uno de residuos, y *S30(DA)*, con 20% CLD y 10% CCA;
- d) Escala de adiciones de CLD respecto al cemento del 5, 10, 15 y 20%, denominadas *A5(D)*, *A10(D)*, *A15(D)*, *A20(D)*, adición del 15% de PM, denominada *A15(M)*, y por último sustitución del 10% de la arena de la dosificación patrón por CLD, denominada *Sa10(D)*.

2.3. Programa experimental y procedimiento.

Como paso previo a la fabricación de las probetas de hormigón, se realizó el ensayo de Fluorescencia de Rayos X de las adiciones minerales, utilizando para ello un espectrómetro secuencial de rayos X (Philips Magix Pro) equipado con tubo de rodio y ventana de berilio. Por otro lado, se determinó la resistencia a compresión de los morteros curados durante 28 y 90 días (cada muestra representada por tres probetas), según norma española UNE-EN 196-1 (AENOR, 2005) y usando una prensa multiensayos Suzpecar MEM-101-10A.

Cada muestra de hormigón estaba representada por seis probetas cúbicas de 150 mm de lado (Figura 2), tres destinadas a ensayos físicos y otras tres a ensayos mecánicos, con una edad de curado de 28 días.



Figura 2. Procedimiento para la fabricación de las probetas de hormigón (de izquierda a derecha): Probetas cúbicas de 150 mm de lado; mezclado previo de los componentes en seco; mezclado en hormigonera; conservación de las probetas en cámara húmeda.

Los ensayos realizados sobre estas probetas fueron los siguientes (Figura 3): obtención de la densidad con masa seca (D_{ms}), absorción de agua (A_{bs}) y resistencia a compresión (R_c), todos ellos incluidos en la lista de ensayos iniciales establecidos por normativa europea EN 771-3 (AENOR, 2011), a aplicar en bloques de hormigón prefabricados. Se siguió el procedimiento indicado en las normas de referencia UNE-EN 12390-2 (AENOR, 2001), UNE-EN 12390-3 (AENOR, 2003) y UNE-EN 12390-7 (AENOR, 2009).



Figura 3. Procedimiento para ensayo de las probetas de hormigón (de izquierda a derecha): Probetas sumergidas hasta saturación; obtención de la densidad y absorción; rotura en prensa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Ensayos previos.

3.1.1. Fluorescencia de rayos X de los residuos industriales utilizados como aditivos.

En la Tabla 1 se recogen los resultados sobre concentración de óxidos de las cuatro adiciones minerales utilizadas obtenidos mediante Fluorescencia de Rayos X.

Se observa que la CLD posee un contenido considerable de SiO₂ (17,27%) y Al₂O₃ (9,64%), lo que genera una buena expectativa para su aplicación como adición mineral activa en conglomerantes a base de cemento Pórtland. Destaca también el contenido en CaO, SO₃, P₂O₅ y Fe₂O₃. La CV tiene un alto contenido en sílice (36,70%) y alúmina (25,57%), mucho mayor que la CLD, por tanto se podría decir que se trata de adición mineral puzolánica y clasificarla como CV de tipo F (según la norma ASTM C618). También destaca su contenido en Fe₂O₃. En el caso del PM su contenido esencial es CaO (64,25%), por tanto se espera de él un comportamiento como residuo mineral inerte. Por último, la CCA compuesta básicamente de SiO₂ (81,57%), por tanto también con elevadas expectativas como adición puzolánica.

Tabla 1. Concentración de óxidos (% en masa) de los residuos industriales – Análisis por fluorescencia de rayos X.

CLD			CV			PM			CCA		
Analito	Form	Conc.	Analito	Form	Conc.	Analito	Form	Conc.	Analito	Form	Conc.
Na	Na ₂ O	0,94	Na	Na ₂ O	0,17	Na	Na ₂ O	0,39	Na	Na ₂ O	0,09
Mg	MgO	3,22	Mg	MgO	1,06	Mg	MgO	6,90	Mg	MgO	0,67
Al	Al ₂ O ₃	9,64	Al	Al ₂ O ₃	25,57	Al	Al ₂ O ₃	1,39	Al	Al ₂ O ₃	0,44
Si	SiO ₂	17,27	Si	SiO ₂	36,70	Si	SiO ₂	3,77	Si	SiO ₂	81,57
P	P ₂ O ₅	14,25	P	P ₂ O ₅	0,65	P	P ₂ O ₅	0,09	P	P ₂ O ₅	0,95
S	SO ₃	8,95	S	SO ₃	1,53	S	SO ₃	1,27	S	SO ₃	0,33
K	K ₂ O	1,28	K	K ₂ O	1,28	K	K ₂ O	0,30	K	K ₂ O	3,51
Ca	CaO	30,24	Ca	CaO	5,56	Ca	CaO	64,25	Ca	CaO	1,23
Ti	TiO ₂	0,92	Ti	TiO ₂	0,90	Fe	Fe ₂ O ₃	0,35	Ti	TiO ₂	0,02
Cr	Cr ₂ O ₃	0,17	Cr	Cr ₂ O ₃	0,03	Sr	SrO	0,04	Mn	MnO	0,16
Mn	MnO	0,07	Mn	MnO	0,04	Cl	Cl	0,13	Fe	Fe ₂ O ₃	0,16
Fe	Fe ₂ O ₃	8,52	Fe	Fe ₂ O ₃	15,72				Zn	ZnO	0,01
Ni	NiO	0,03	Ni	NiO	0,02				Sr	SrO	0,01
Cu	CuO	0,18	Zn	ZnO	0,03				Cl	Cl	0,28
Zn	ZnO	0,32	As	As ₂ O ₃	0,01				Br	Br	0,00
As	As ₂ O ₃	0,00	Rb	Rb ₂ O	0,01						
Rb	Rb ₂ O	0,01	Sr	SrO	0,11						
Sr	SrO	0,25	Y	Y ₂ O ₃	0,01						
Sn	SnO ₂	0,03	Zr	ZrO ₂	0,02						
Ba	BaO	0,14	Ba	BaO	0,10						
Pb	PbO	0,04	Pb	PbO	0,01						
Cl	Cl	0,15									

3.1.2. Resistencia a compresión de los morteros.

Partiendo de los datos recogidos en la Tabla 2 y la Figura 4, con los valores medios de resistencia a compresión de las probetas representativas de cada amasada para edades de curado de 28 y 90 días, se podrían hacer las siguientes consideraciones:

- Como era de esperar, los valores se incrementan positivamente con el tiempo de curado en todas las mezclas.
- En general la resistencia a compresión no alcanza la de la muestra patrón (P) en las dos edades de estudio, con excepción en dos mezclas curadas durante 90 días: la “S10(A)”, con sustitución del 10% de cemento por CCA, y la “S30(DVA)”, con sustitución del 30% de cemento por la combinación de CLD-CV-CCA, donde se llega a superar dicho valor. Sin embargo, es un dato muy positivo que en la mayoría de las mezclas con una edad de 28 días, los valores superan o se encuentran cercanos a la clase resistente del cemento utilizado (32,5 MPa).
- Al observar las series de referencia formadas por las escalas de sustituciones y adiciones de sólo CLD, a mayor contenido de dicho material menor resistencia a compresión, con una bajada cercana al 40% respecto al patrón para la muestra “S30(D)” (sustitución del 30% de cemento por CLD). Sin embargo, la muestra “Sa10(D)”, con mayor cantidad de CLD que el resto de muestras, al tratarse de una sustitución del 10% de la arena, aporta un resultado muy interesante con un valor relativo del 88%.

Tabla 2. Resistencia a compresión (Rc) en MPa de probetas de mortero con una edad de curado (E) de 28 y 90 días (rel: valor relativo en % respecto a la muestra patrón).

E	Muestra	Rc	rel	Muestra	Rc	rel	Muestra	Rc	rel	Muestra	Rc	rel
28	P	38,0	100	S20(D)	31,9	84	S30(D)	23,5	62	A5(D)	32,4	85
90	P	41,1	100	S20(D)	32,3	79	S30(D)	24,4	59	A5(D)	36,9	90
28	S10(D)	33,5	88	S20(DV)	31,8	84	S30(DVA)	33,6	88	A10(D)	34,1	90
90	S10(D)	35,0	85	S20(DV)	34,8	85	S30(DVA)	45,0	109	A10(D)	35,8	87
28	S10(A)	37,5	99	S20(DM)	30,1	79	S30(DA)	34,0	89	A15(D)	34,0	89
90	S10(A)	44,4	108	S20(DM)	31,2	76	S30(DA)	38,2	93	A15(D)	34,9	85
28	S10(M)	27,9	73	S20(MV)	28,8	76				A20(D)	32,1	84
90	S10(M)	28,5	69	S20(MV)	31,3	76				A20(D)	33,3	81
28	S10(V)	33,5	88	S20(DA)	34,2	90				A15(M)	28,6	75
90	S10(V)	37,8	92	S20(DA)	37,5	91				A15(M)	29,2	71
28										Sa10(D)	32,4	85
90										Sa10(D)	36,3	88

- Se observa también que las muestras que contienen polvo de mármol (material inerte), de manera individual o combinada, experimentan una bajada en los valores del parámetro estudiado, lo que pone de manifiesto la contribución puzolánica a la resistencia a compresión del resto de adiciones.
- Los buenos resultados obtenidos por el uso de CCA y CV individualmente (muestras "S10(A)" y "S10(V)"), se ven reflejados al combinarlos de manera binaria o ternaria con CLD y PM.

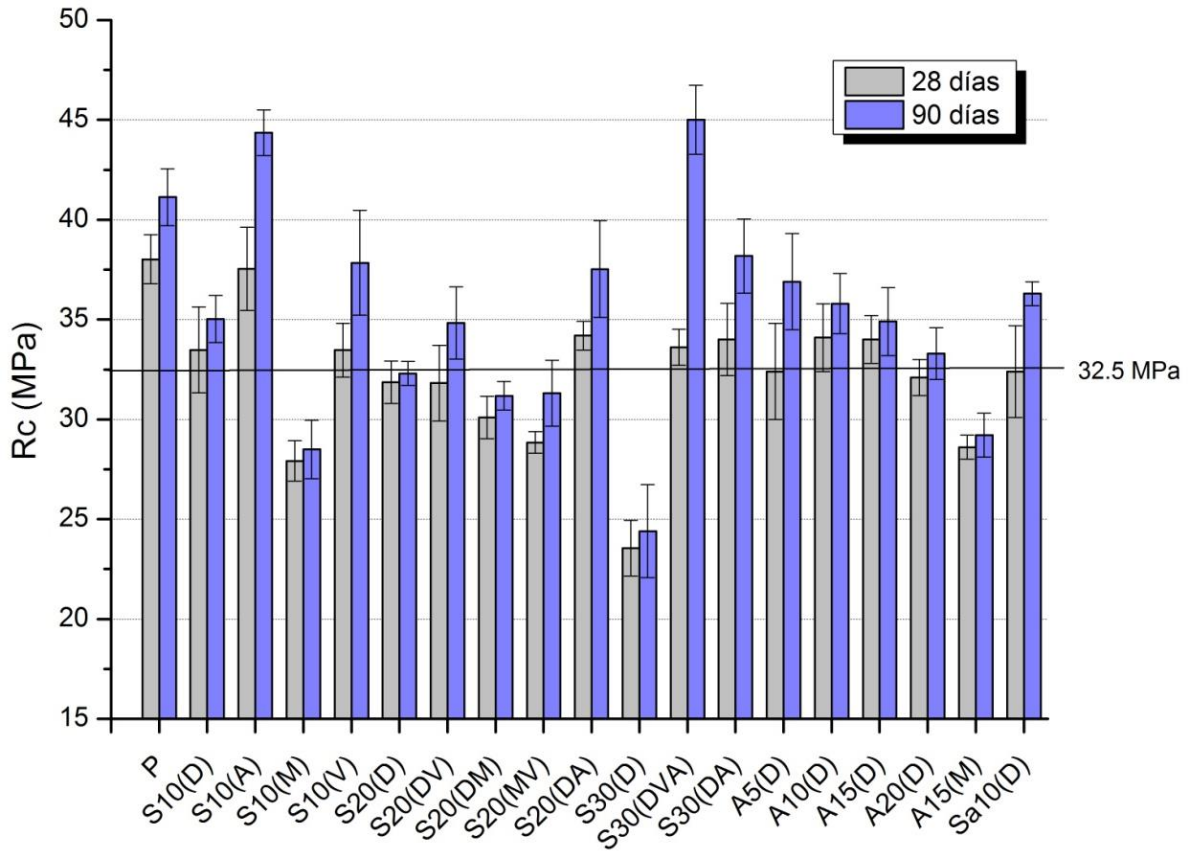


Figura 4. Resistencia a compresión (Rc) de morteros en valores absolutos medios de probetas curadas durante 28 y 90 días.

3.2. Resultados de los hormigones.

3.2.1. Densidad.

La Tabla 3 y la Figura 5 muestran los valores medios de densidad con masa seca de las probetas de hormigón curadas durante 28 días. No existe gran diferencia entre los valores relativos, alcanzándose prácticamente o superando la densidad patrón. No obstante, en la serie formada por las muestras que sólo contienen CLD, sombreadas de distinto color en la Figura 5, se aprecian dos comportamientos:

- En las sustituciones de cemento por dicho material, al aumentar el contenido de CLD se produce una tendencia a la baja de la densidad, lo que puede deberse a que al disminuir la cantidad de cemento los productos obtenidos con la hidratación del mismo disminuyen.
- En las adiciones de CLD respecto al contenido de cemento, se observa un comportamiento contrario al anterior, con una tendencia al alza al aumentar la cantidad de CLD. Esto se debe probablemente al efecto que producen los finos ocupando los huecos entre áridos gruesos, lo que compensa su baja densidad relativa. Destaca en este sentido de nuevo la muestra "Sa10(D)", por ser la que mayor cantidad de CLD contenía de todas.

En esta matriz cementante tan porosa, parece adquirir más importancia el efecto producido por los finos al ocupar huecos que la propia actividad puzolánica de las adiciones, aunque sean inertes como en el caso del PM.

Destacar también que, con las combinaciones ternarias de los residuos se consiguen valores de densidad levemente superiores al alcanzado por la muestra "S30(D)" (sólo CLD).

Tabla 3. Densidad con masa seca (Dms) en kg/m³ de probetas de hormigón curadas durante 28 días (rel: valor relativo en % respecto a la muestra patrón).

Muestra	Dms	rel	Muestra	Dms	rel	Muestra	Dms	rel	Muestra	Dms	rel
P	2058	100	S20(D)	2085	101	S30(D)	2010	98	A5(D)	2059	100
S10(D)	2131	104	S20(DV)	2056	100	S30(DVA)	2039	99	A10(D)	2087	101
S10(A)	2138	104	S20(DM)	2047	99	S30(DA)	2025	98	A15(D)	2096	102
S10(M)	2091	102	S20(MV)	2074	101				A20(D)	2101	102
S10(V)	2101	102	S20(DA)	2104	102				A15(M)	2103	102
									Sa10(D)	2204	107

3.2.2. Absorción.

La Tabla 4 y la Figura 5 muestran los valores medios de absorción de agua de las probetas de hormigón curadas durante 28 días. En esta variable, al igual que ocurriera con la densidad, no existe gran diferencia entre los valores relativos de las amasadas; sin embargo, también se aprecia que al aumentar la cantidad de cemento sustituido por CLD existe una tendencia al aumento de la absorción, y cuando aumenta la adición de CLD respecto al cemento se produce un descenso de la absorción.

Tabla 4. Absorción de agua (Abs) en % de probetas de hormigón curadas durante 28 días (rel: valor relativo en % respecto a la muestra patrón).

Muestra	Abs	rel	Muestra	Abs	rel	Muestra	Abs	rel	Muestra	Abs	rel
P	8,7	100	S20(D)	7,7	89	S30(D)	9,7	111	A5(D)	8,9	102
S10(D)	6,9	79	S20(DV)	8,3	95	S30(DVA)	8,7	100	A10(D)	7,9	91
S10(A)	6,6	76	S20(DM)	8,8	101	S30(DA)	9,2	106	A15(D)	7,3	84
S10(M)	7,7	89	S20(MV)	8,1	93				A20(D)	7,3	84
S10(V)	7,4	85	S20(DA)	7,4	85				A15(M)	8,1	93
									Sa10(D)	6,0	69

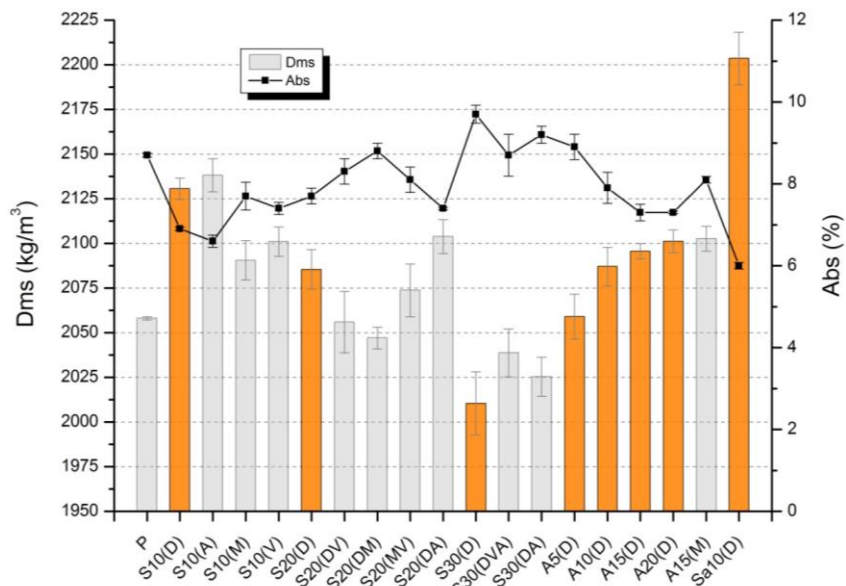


Figura 5. Densidad con masa seca (Dms) y absorción de agua (Abs) de probetas de hormigón curadas durante 28 días.

La circunstancia descrita al inicio de este apartado obliga a determinar el grado de relación existente entre la densidad y la absorción de las muestras estudiadas. En base al análisis estadístico, se puede afirmar que existe una relación significativa entre dichas variables de tipo lineal moderadamente fuerte (coeficiente de correlación -0,92), con representación gráfica en la Figura 6.

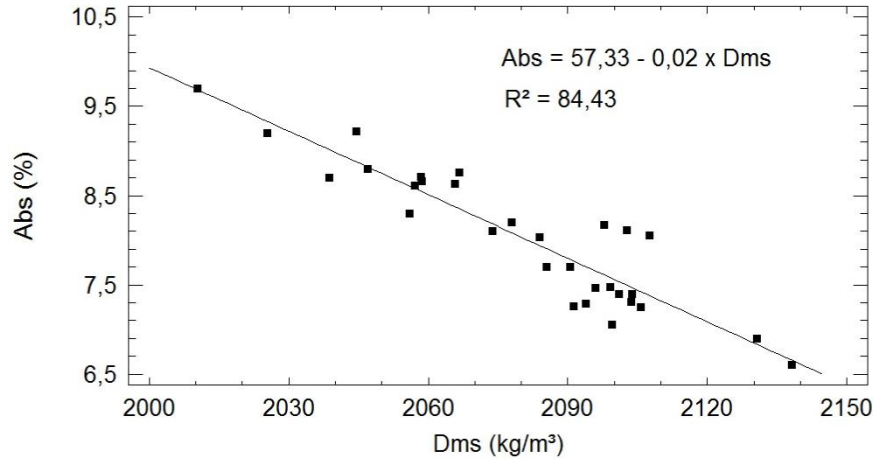


Figura 6. Modelo ajustado de la relación entre densidad con masa seca (Dms) y absorción de agua (Abs) en probetas de hormigón curadas durante 28 días.

3.2.3. Resistencia a compresión.

La Tabla 5 muestra los valores medios de resistencia a compresión de las probetas de hormigón representativas de cada amasada, curadas durante 28 días. Los valores de resistencia mecánica fueron bajos debido a la elevada porosidad de los hormigones para este tipo de prefabricados. Por ejemplo, en la muestra patrón se obtuvo una resistencia de 7 MPa.

Tabla 5. Resistencia a compresión (Rc) en MPa de probetas de hormigón con una edad de curado de 28 días (rel: valor relativo en % respecto a la muestra patrón).

Muestra	Rc	rel	Muestra	Rc	rel	Muestra	Rc	rel	Muestra	Rc	rel
P	7,0	100	S20(D)	5,2	74	S30(D)	4,6	66	A5(D)	7,1	101
S10(D)	6,4	91	S20(DV)	6,6	94	S30(DVA)	6,2	89	A10(D)	6,8	97
S10(A)	7,4	106	S20(DM)	7,1	101	S30(DA)	7,0	100	A15(D)	6,5	93
S10(M)	7,6	109	S20(MV)	6,2	89				A20(D)	5,5	79
S10(V)	7,2	103	S20(DA)	7,5	107				A15(M)	4,0	57
									Sa10(D)	14,4	206

Destacan en primer lugar las sustituciones de cemento o adiciones de únicamente CLD, sombreadas de distinto color en la Figura 7. Suponen una reducción de la resistencia a compresión respecto al patrón, aunque algo más acusado en las sustituciones que en las adiciones. Por ejemplo, la muestra S30(D) no supera el 66% del patrón.

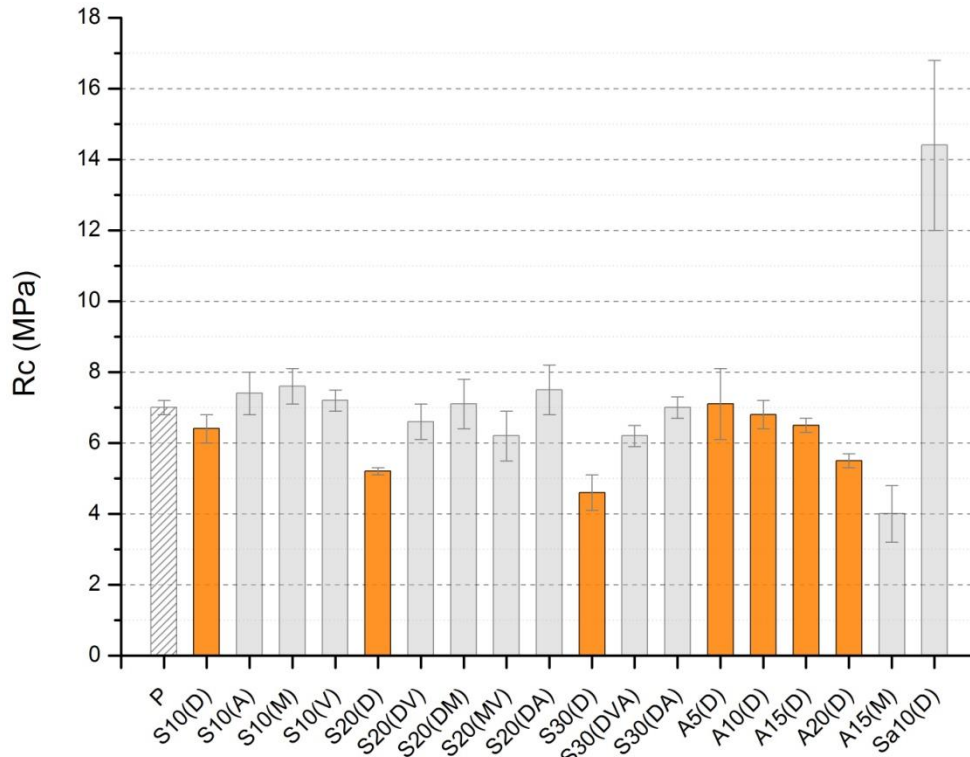


Figura 7. Resistencia a compresión (Rc) de probetas de hormigón curadas durante 28 días.

Las combinaciones de residuos mejoran los resultados de las sustituciones simples de CLD en todos los casos, con valores muy cercanos o que igualan al patrón en varias mezclas: "S20(DM)", "S20(DA)" o "S30(DA)". Es necesario destacar esta última muestra ya que, con una elevada sustitución de cemento (30%) por 20%CLD más 10%CCA, se podría afirmar que se consigue igualar la resistencia alcanzada por la muestra referencia, 7 MPa en ambas. Por tanto, se consigue un importante ahorro de cemento Portland con una excelente respuesta mecánica.

En las adiciones, aunque pueda parecer que la CLD no tiene influencia en el desarrollo de resistencias, ello no es así, ya que al comparar las muestras "A15(D)" y la "A15(M)", con una adición del 15% de CLD en primer caso y del 15% de PM en el segundo, se puede identificar claramente una diferencia en el comportamiento: la primera ofrece 6,5 MPa frente a los 4,0 de la segunda.

Mención aparte merece la muestra "Sa10(D)", con sustitución de arena. Se había observado un mejor comportamiento en cuanto a la densidad y la absorción. Evidentemente en este caso, debido al incremento de finos, se obtiene una matriz que rellena mejor los huecos, y su evolución mecánica es muy superior al patrón.

4. CONCLUSIONES

El análisis de los resultados obtenidos permite establecer las siguientes conclusiones:

1. Se ha identificado y cuantificado el efecto puzolánico de las adiciones minerales utilizadas.
2. La sustitución de cemento por CLD en los hormigones destinados a la fabricación de bloques, supone una disminución de la densidad y de la resistencia respecto a la muestra patrón. Sin embargo, la sustitución de cemento por combinaciones binarias o ternarias de residuos, mejora notablemente las características físico-mecánicas de los materiales cementantes: aumento de la densidad y aumento de la resistencia a compresión, alcanzando valores cercanos o que igualan al patrón en varias mezclas.

3. La adición de CLD en dichos hormigones, aporta una densidad y una resistencia cercana al patrón (sin adición), mientras que la absorción de agua sufre un descenso considerable. Hay que destacar también el comportamiento de la muestra en la que se sustituye un 10% de la arena por CLD, en la que se observa el mejor comportamiento en cuanto a densidad y absorción; evidentemente en este caso, debido al incremento de finos, se obtiene una matriz que rellena mejor los huecos, y su evolución mecánica es muy superior al patrón y al resto de muestras analizadas en el trabajo.

5. REFERENCIAS

- AENOR (2005), “UNE-EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas”.
- AENOR (2011), “UNE-EN 771-3. Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 3: Bloques de hormigón (áridos densos y ligeros)”.
- AENOR (2001), “UNE-EN 12390-2. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia”.
- AENOR (2003), “UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”.
- AENOR (2009), “UNE-EN 12390-7. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad de hormigón endurecido”.
- Alcocel, E.G., Garcés, P., Martínez, J.J., Payá, J., García, L. (2006), “Effect of sewage sludge ash (SSA) on the mechanical performance and corrosion levels of reinforced Portland cement mortars”, *Materiales de Construcción*, V.56, pp. 31-43.
- Asociación del Mármol de Alicante (acceso Julio 2013) <<http://www.marmoldealicante.es>>.
- Baeza, F., Payá, J., Galao, O., Saval, J.M., Garcés, P. (2014a), “Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars”, *Construction and Building Materials*, V.66, pp. 645-653.
- Baeza-Brotons, F., Garcés, P., Payá, J., Saval, J. M. (2014b), “Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks”, *Journal of Cleaner Production*, V. 82, pp.112-124.
- Baeza-Brotons, F. (2012), “Uso de cenizas de lodo de depuradora en hormigones, para industria de prefabricados, y en suelos para aplicación en obra civil”, Tesis doctoral, Universidad de Alicante.
- Binici, H., Kaplan H., Yilmaz, S. (2007), “Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete”, *Scientific Research and Essays*, V. 9, pp. 372-379.
- Borrachero, M. V., Payá, J., Monzó, J., Bonilla, M., Girbés, I. (2002), “Evolución de las resistencias mecánicas de sistemas ternarios cemento/ceniza volante/ceniza de lodo de depuradora: efectos puzolánicos complementarios” in: *Actas PMS2002 VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos*, Gandía: Valencia (España), pp. 601-609.
- Chen, M., Blanc, D., Gautier, M., Mehu, J., Gourdon, R. (2013), “Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction”, *Waste Management*, V. 33, pp. 1268-1275.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., Naik, T. R. (2010), “Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete”, *Construction and Building Materials*, V.24, pp. 113-117.
- Cyr, M., Coutand, M., Clastres, P. (2007), “Technological and environmental behaviour of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials”, *Cement and Concrete Research*, V.37, pp. 1276-1289.
- European Commission (2010), “Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land” in: *Final Report. Part I: Overview Report*, pp. 3-8.

- Hewlett, P.C. (1998), "*Lea's Chemistry of Cement and Concrete*" (Oxford, UK: 4th ed., Elsevier Ltd.).
- Khana, R., Jabbara, A., Ahmada, I., Khana, W., Khana, A. N., Mirzab, J. (2012), "*Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete*", *Construction and Building Materials*, V.30, pp. 360-365.
- Madandoust, R., Ranjbar, M. M., Moghadam, H. A., Mousavi, S. Y. (2011), "*Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete*", *Biosystems Engineering*, V.110, pp. 144-152.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (acceso mayo 2013) <<http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-dep>>.
- Ministerio de Medio Ambiente (2002), "Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valoración y eliminación de residuos y la lista europea de residuos".
- Monzó, J., Payá, J., Borrachero, M. V., Córcoles, A. (1996), "*Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars*", *Cement and Concrete Research*, V.26, pp. 1389-1398.
- Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J., Girbés, I. (1999), "*Morteros de cementos compuestos a base de cenizas volantes de central termoeléctrica de carbón (CV) y cenizas procedentes de la incineración de lodos de depuradora (CLD)*" in: *Actas del III Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, Benalmádena: Málaga (España), pp. 477-483.
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Amahjour, F., Girbés, I., Velázquez, S., Ordóñez, L. M. (2002), "*Advantages in the use of fly ashes in cements containing pozzolanic combustion residues: silica fume, sewage sludge ash, spent fluidized bed catalyst and rice husk ash*", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, V.77, pp. 331-335.
- Pérez-Carrión M., Baeza-Brotons F., Payá J., Saval J. M., Zornoza E., Borrachero M. V., Garcés P. (2014), "*Potential use of sewage sludge ash (SSA) as a cement replacement in precast concrete blocks*", *Materiales de Construcción* 64, 313.
- Peris E., Payá J., Monzó J (1993), "*Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars*", *Cement and Concrete Research* 23: pp. 917-924.
- PNIR - Plan Nacional Integrado de Residuos, Gobierno de España (2008).