

Evaluación de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados mixtos y escoria blanca en reemplazo del hidróxido de calcio

Amaury Sosa Gutiérrez

amaury.gutierrez@ptocarena.ohc.cu

Oficina del Historiador de La Habana (Cuba)

Joaquín Raúl Cuetara Ricardo

jrcuetara@gmail.com

Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT). (Cuba)

Resumen: Se evaluó el efecto de las sustituciones totales de los áridos naturales más empleados en la región occidental de Cuba (La Habana) por áridos reciclados mixtos y por filler natural: hidrato de cal y escoria blanca granulada (residuo industrial) en la elaboración de morteros de albañilería. Con los áridos reciclados se elaboraron morteros de albañilería según las especificaciones de la norma cubana. Se determinaron las siguientes propiedades: resistividad eléctrica, resistencia a la compresión, resistencia a la adherencia y retención de agua; comparándolas con un mortero patrón, elaborado con árido natural y filler natural. Los valores muestran resultados satisfactorios, a partir de morteros elaborados con áridos reciclados necesarios para los morteros de albañilería Tipo III (adecuado para mortero de colocación y revestimiento sobre el nivel de terreno).

Palabras clave: mortero de albañilería; reciclaje; residuo de construcción y demolición.

Evaluating masonry mortars made with white slag and mixed recycled aggregates to replace calcium hydroxide

Abstract: The effect of the total substitutions of the most used natural aggregates in the western region of Cuba (Havana) by mixed recycled aggregates and by natural filler were evaluated such as: lime hydrate and granulated white slag (industrial waste) in the elaboration of masonry mortars. Masonry mortars were prepared with the recycled aggregates according to the Cuban standard specifications, determining the following properties: compressive strength, adhesion resistance, electrical resistivity and water retention, comparing them with a standard mortar made with natural aggregates and natural filler. The values show satisfactory results, from mortars made with recycled aggregates needed for masonry mortars Type III (suitable for installing and coating above ground level).

Keywords: masonry mortar; recycling; construction and demolition waste.

Introducción

La creciente explotación de las canteras de áridos naturales debido a su elevada demanda para ejecutar acciones de intervención y construcción crea la necesidad de evaluar opciones que permitan reducir este escenario, como es la fabricación de áridos reciclados a partir de los residuos de construcción y demolición (RCD) que se generan en la capital; alternativa que se emplea a nivel internacional. La mayor parte de la producción de los residuos sólidos urbanos lo constituyen los RCD y figuran entre el 30 %-40 % de los desechos; por ejemplo: en la Unión Europea se generan 850 000 000 t de RCD por año, valor que representa el 31 % de los residuos en esa región (Safiuddin *et al.*, 2013).

En Cuba los volúmenes de RCD son considerables, debido a las causas anteriormente descritas, además de la generación de escombros durante la ocurrencia de eventos meteorológicos, ocupando el lugar cimero la provincia de La Habana, con una generación de 350 kg/habitante/año, que representa el 10 % de los desechos sólidos urbanos (Pavón, Etxeberría y Díaz, 2012) apreciado por la existencia de una gran variedad de tipologías de viviendas, que se encuentran en mal estado. Debido a una carencia de una política de reciclaje organizada y selectiva, los RCD que se obtienen son de carácter mixto en su gran mayoría, conteniendo materiales de diferente naturaleza (hormigón, cerámica, morteros, etc.).

Otro residuo que se desaprovecha, este de origen industrial, son las escorias granuladas de hornos de arco eléctrico; las cuales proceden de la fabricación del acero en la Empresa Siderúrgica José Martí (Antillana de Acero), sita en el municipio de Cotorro, provincia de La Habana. Cada día se hace más necesario la preservación de los recursos naturales y el control de la contaminación ambiental. Estas perspectivas conllevan a la preocupación por un desarrollo sostenible, especialmente en la construcción. El reciclaje de subproductos industriales, unido al creciente agotamiento de los recursos naturales, estimula la búsqueda de tácticas hacia un consumo de áridos más sostenible; esto minimiza las extracciones de áridos naturales, una vez se usen los subproductos industriales, como son las escorias siderúrgicas.

La ausencia de una alternativa de uso técnica y económicamente viable para este subproducto ha dado lugar a que el destino final para las escorias blancas en nuestra capital consista en la deposición en vertedero propio de la Empresa Siderúrgica Antillana

de Acero José Martí. Sin embargo, la desusada cantidad de escorias generadas demanda la existencia de grandes superficies de terreno disponible, y hace que año tras año la situación se agrave; este tipo de gestión plantea, además, a corto y mediano plazo, serios problemas, tanto para la empresa generadora en cuestión, como para el medio ambiente y la sociedad en general.

Los estudios y aportaciones previos hacen pensar en la escoria blanca (tras su valorización), no como un residuo a eliminar o problemático en su incorporación al ámbito de la construcción, sino como un material con propiedades adecuadas para su empleo en el sector. Un uso responsable de este material es capaz de aportar notables beneficios, tal y como lo acreditan trabajos anteriores (Manso *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2013; Papayianni y Anastasiou, 2010; Manso *et al.*, 2011; Ortega, 2011; Polanco *et al.*, 2011) y otros ya más recientes (Montenegro *et al.*, 2012; Manso *et al.*, 2013; Rodríguez *et al.*, 2013).

También se ha demostrado la capacidad hidráulica que presentan las escorias granuladas de horno de arco eléctrico (Metha & Monteiro, 2005; Malhotra y Metha, 2004; Tokyay, 2016), por lo que emplearla en la fabricación de morteros como material de relleno juega un papel fundamental para la industria de la construcción, así como para la industria siderúrgica, pues también se ha demostrado la influencia negativa, principalmente sobre el suelo (Sosa, Banda-Noriega & Guerrero, 2013).

Martínez y demás colaboradores (2012) investigaron los morteros de albañilería fabricados con diferentes rellenos, entre ellos la escoria blanca, y los resultados obtenidos demostraron que los morteros de albañilería producidos con una combinación de agregados finos reciclados y cualquiera de los tipos de relleno mencionados anteriormente no solo cumplían con los requisitos establecidos en la normativa cubana, sino que en la mayoría de los casos las propiedades que se obtuvieron de estos morteros fueron mejores que los morteros elaborados con árido natural.

En el presente trabajo se estudia la influencia del empleo de los residuos de construcción y demolición y la escoria blanca en la fabricación de morteros de albañilería. Para ello se fabricaron briquetas de morteros para analizar su desempeño a partir de ensayos de resistencia mecánicas y otras propiedades que exige la NC 175: 2002, además de las mediciones de resistividad eléctrica.

Materiales y métodos

Para la fabricación de los morteros de albañilería se utilizó un cemento Portland ordinario (CPO) que responde a la denominación P-35 (tipo I) de la fábrica Cementos Curazao, del municipio de Mariel, en la provincia de Artemisa. La Tabla 1 muestra sus principales características y los valores se comparan con los establecidos por la norma cubana (NC-95, 2001).

Tabla 1. Propiedades físicas del CPO (P-35)

Propiedades	Valores	Aceptación NC 95: 2011
Superficie específica (Blaine) (cm ² /g)	3 317	mín. 2800
Finura (%)	1,7	máx. 10
Tiempo de fraguado inicial (min)	102:00:00	mín. 45
Tiempo de fraguado final (h)	3:02:00	máx. 10
Peso volumétrico (kg/m ³)	1 168	-
Densidad (g/cm ³)	3,15	-
Consistencia normal (%)	24,5	-

Los áridos finos utilizados en el estudio son de origen natural de las canteras La Victoria, Reforma y Arimao, y residuos de demolición y construcción constituidos principalmente por materiales cerámicos, cerámica y hormigón y bloques de hormigón, bajo el código de AF-C, AF-CH y AF-BH, respectivamente. Todos los ensayos se realizaron según establecen las normas cubanas correspondientes (NC-181, 2002; NC-177, 2002 y NC-182, 2002). En las Tablas 2 y 3 se detallan las propiedades físicas de los áridos naturales y los RCD, en ese orden, y en la Figura 1 se precisan las curvas granulométricas de todos los áridos.

Tabla 2. Propiedades físicas de los áridos finos reciclados y de origen natural

Propiedad	Árido fino natural			Árido fino reciclado		
	Victoria	Reforma	Arimao	AF-C	AF-CH	AF-BH
Densidad (kg/dm ³)	2,42	2,58	2,6	2,13	2,09	2,11
Absorción de agua (%)	3,77	2,55	1,3	4,71	7,45	6,27
Masa volumétrica suelta	1,44	1,49	1,48	1,25	1,16	1,29
Módulo de finura	3,74	3,89	2,93	2,78	2,92	3,12
Material más fino que 75 µm	5	3	1	13	12	8

Tabla 3. Composición química de los áridos reciclados

Composición (%)	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
AF-C	4,93	0,08	0,38	26,09	0,83	0,08	47,43	13,29	3,82	2,21
AF-CH	4,03	0,07	0,24	46,76	0,68	0,15	31,16	7,82	5,77	1,10
AF-BH	1,71	0,08	0,17	65,30	0,37	0,10	13,24	3,42	5,77	0,2

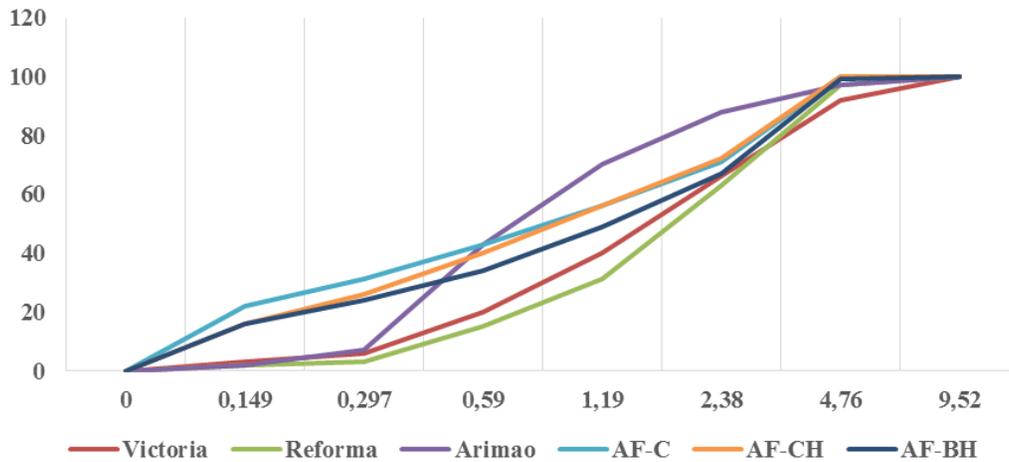


Figura 1. Distribución granulométrica de los áridos estudiados.

También se empleó un material de relleno alternativo con la intención de probar su efecto sobre las prestaciones de los morteros de albañilería y con el fin de reemplazar el hidróxido de calcio (HC). La escoria blanca o comúnmente conocida como escoria granulada de horno de arco eléctrico es un residuo de la industria siderúrgica (Antillana de Acero). La escoria blanca (EB), de acuerdo con Malhotra & Mehta (2004) y Mehta & Monteiro (2005), se clasifica como un material con actividad hidráulica, compuesta fundamentalmente por aproximadamente: 47 % de CaO, 27,5 % de SiO₂, 13 % de MgO y 9 % de Al₂O₃, tal y como se recoge en la Tabla 3. En la Tabla 4 se muestran las propiedades físicas de la escoria blanca, material de relleno que se empleó para el estudio como una alternativa para fabricar morteros de albañilería en reemplazo total del hidróxido de calcio.

Tabla 4. Composición química de la escoria blanca

Composición (%)	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
Escoria blanca	1,33	0,50	0,53	47,29	0,04	0,02	27,43	8,90	13,08	0,03

Método experimental

El interés del estudio es conocer la influencia que tienen los áridos finos RCD en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros de albañilería. Además, todas las propiedades determinadas en los morteros de albañilería serán comparadas entre ellos y con los áridos naturales para estimar diferencias significativas en su empleo para la fabricación de dichos morteros. Se midieron las propiedades de retención de agua (RA), resistividad eléctrica (RE), resistencia a la compresión (RC) y resistencia a la adherencia (RAD).

Para estudiar en detalle cada propiedad se decidió usar un diseño factorial multinivel, el cual se realizó por cada tipo de árido. El factor Tiempo Curado incluyó dos niveles (7 y 28 días) al igual que el factor Tipo Árido (natural y RCD) y el factor Tipo Relleno (HC y EB). En la Tabla 5 se especifican los factores a estudiar y sus niveles. A cada tratamiento se le asignaron tres bloques a ensayar, o sea, se realizó un experimento y dos réplicas por cada tratamiento y por cada bloque a ensayar se fabricaron tres briguetas de mortero.

Tabla 5. Factores bajo estudio y sus niveles

Factores	Bajo (-1)	Medio (0)	Alto (+1)
Tiempo_Curado (días)	7		28
Tipo_Árido	Árido natural	-	Árido RCD
Tipo_Relleno	HC	-	EB

El análisis de los datos se realizó a partir de una herramienta estadística fundamental para este tipo de diseño: el análisis de varianza. Este es un procedimiento estadístico que fue creado por R. A. Fisher en 1925 para descomponer la variabilidad de un experimento en componentes independientes que pueden asignarse a causas distintas; constituye la base de los métodos estadísticos utilizados en su gran mayoría en el campo del diseño de experimentos (Serpa, Guerra, & Vallina, 2011). En el caso en cuestión el empleo de este procedimiento implica documentar si el valor esperado cambia o no cuando la variable de respuesta se somete a distintos niveles de un factor documentado. En el presente trabajo se determinó de forma experimental los niveles del factor que puede conllevar a obtener una respuesta óptima con la ayuda del software estadístico StatGraphics Centurion XV (Polhemus, 1999).

Conjuntamente se realizaron comparaciones simples entre los niveles de cada factor para evaluar el comportamiento de las variables de respuesta. Por otra parte, se analizaron, basados en los conceptos explicados anteriormente, las interacciones entre los niveles de cada factor.

Descripción del procedimiento

Se consideró como mortero patrón aquellos fabricados con áridos naturales y HC. El tipo de mortero a fabricar es el tipo III que especifica la NC 175: 2002. Las mezclas consideradas en el estudio se relacionan en las Tablas 6 y 7. Para los morteros elaborados con áridos reciclados se utiliza una dosificación volumétrica 1:5:1. En estudios anteriores (Martínez *et al.*, 2013) se comprobó que esta dosificación es equivalente a la 1:4:2, establecida por la norma cubana para áridos naturales, pues el mayor contenido de finos de los áridos reciclados compensa la menor utilización de filler.

Tabla 6. Dosificación y cantidad de materiales para los morteros fabricados con árido natural

Nomenclatura	Dosificación volumétrica	Árido	Filler	a/c
MAF-V-HC	1:4:2	Victoria	Hidrato de Cal	1,32
MAF-R-HC	1:4:2	Reforma	Hidrato de Cal	1,30
MAF-A-HC	1:4:2	Arimao	Hidrato de Cal	1,28
MAF-V-EB	1:4:2	Victoria	Escoria blanca	1,28
MAF-R-EB	1:4:2	Reforma	Escoria blanca	1,30
MAF-A-EB	1:4:2	Arimao	Escoria blanca	1,32

Tabla 7. Dosificación y cantidad de materiales para los morteros fabricados con árido RCD

Nomenclatura	Dosificación volumétrica	Árido	Filler	a/c
MAF-C-HC	1:5:1	AF-C	Hidrato de Cal	1,77
MAF-CH-HC	1:5:1	AF-CH	Hidrato de Cal	1,79
MAF-BH-HC	1:5:1	AF-BH	Hidrato de Cal	1,66
MAF-C-EB	1:5:1	AF-C	Escoria blanca	1,60
MAF-CH-EB	1:5:1	AF-CH	Escoria blanca	1,63
MAF-BH-EB	1:5:1	AF-BH	Escoria blanca	1,61

Resultados y discusión

Los ensayos se realizaron acorde a las normas cubanas. A continuación, se presentan los resultados de cada ensayo realizado y el análisis derivado de ellos con base en el software Statgraphics. Asimismo, se evalúa la influencia de cada factor (tiempo de curado, filler de relleno y tipo de árido) sobre cada una de las propiedades obtenidas de los ensayos realizados.

Resistividad eléctrica

La Figura 3 muestra los valores obtenidos como resultado del ensayo de resistividad eléctrica. En general, todos los valores se mantuvieron en el rango entre 10-50 k·ohm·cm, lo que indica un riesgo de corrosión moderado (Polder *et al.*, 2000). Sin embargo, los morteros fabricados con áridos reciclados de cerámica y cerámica y hormigón mostraron valores de resistividad eléctrica superiores a los áridos naturales y a 20 k·ohm·cm. Esto se debe al contenido de materiales más finos que el tamiz de 200 (75 µm) que presentan estos áridos reciclados, de 15 % y 13 %, respectivamente.

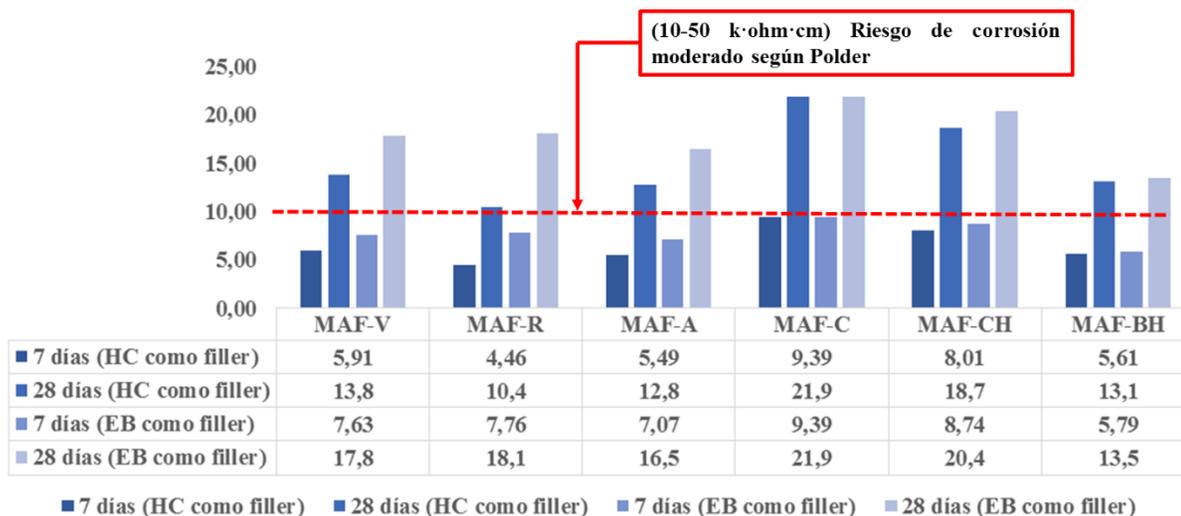


Figura 2. Diagrama de barras de valores de resistividad eléctrica.

Resistencia a la compresión

Los resultados se muestran en el diagrama de barras de la Figura 3. En ella se detalla un incremento de los valores de resistencia a la compresión, especialmente en los morteros fabricados con áridos naturales. En el caso de los morteros con áridos naturales de la cantera La Reforma y Arimao mostraron los valores más elevados de resistencia a la compresión, con independencia del tipo de relleno empleado. En todos los casos los valores fueron superiores al que especifica la norma NC 175: 2002 para un mortero de albañilería tipo III. Los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Martínez y otros investigadores (2013), quienes explican que existe un comportamiento similar entre los morteros fabricados con ambos áridos, con una ligera tendencia a decrecer en el caso de los RCD.

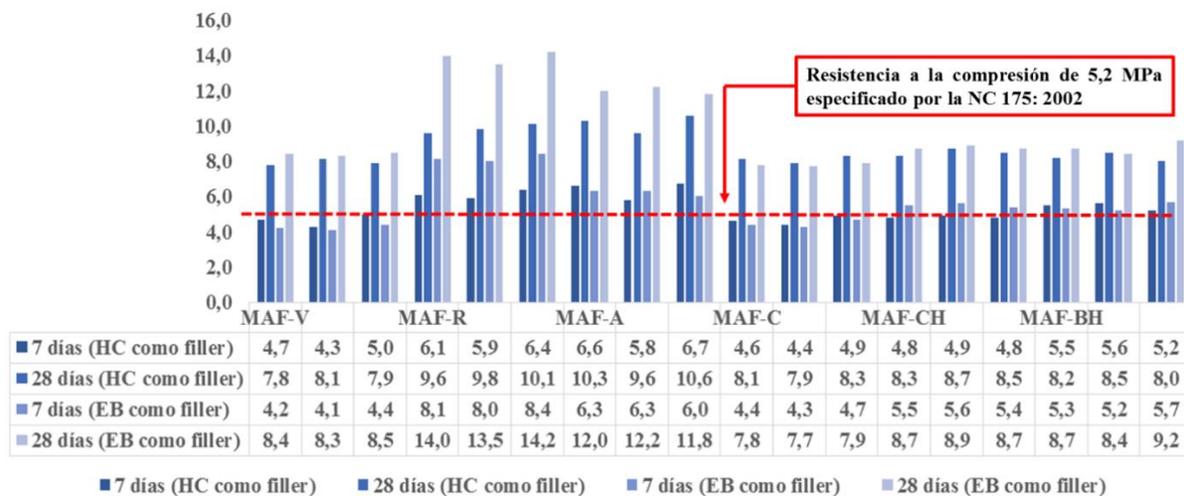


Figura 3. Diagrama de barras de valores de resistencia a la compresión.

Resistencia a la adherencia

Para morteros de revestimiento, una de las propiedades fundamentales es la adherencia con la superficie sobre la que será aplicado. La norma cubana NC 175: 2002 establece como valor mínimo para paredes que no utilizarán enchapes los 0,2 MPa. En la Figura 4 se presentan los valores de adherencia de cada mortero; los mayores valores se corresponden a los morteros con áridos naturales. Por otra parte, se aprecia un ligero decrecimiento en la adherencia de los morteros fabricados con EB como filler de relleno. En ninguno de los casos los valores mintieron más abajo del mínimo que especifica la norma cubana.

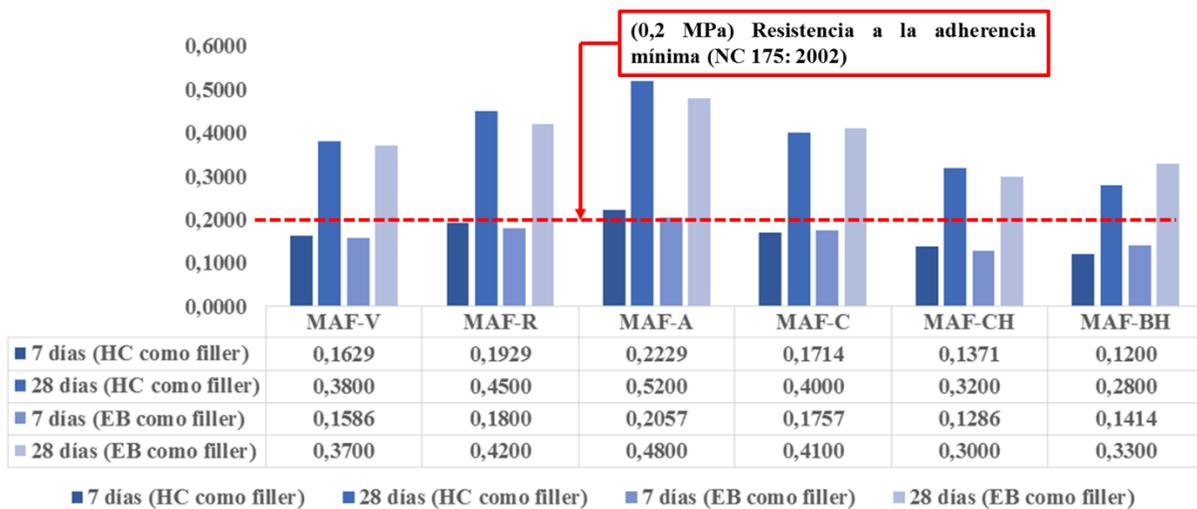


Figura 4. Diagrama de barras de los valores de resistencia a la adherencia

Retención de agua

La norma cubana NC 175: 2002 recomienda un valor mínimo de retención de agua del 90 %. En la Figura 5 se muestran los valores de retención de agua obtenidos tanto para los morteros reciclados como para los morteros fabricados con áridos naturales.

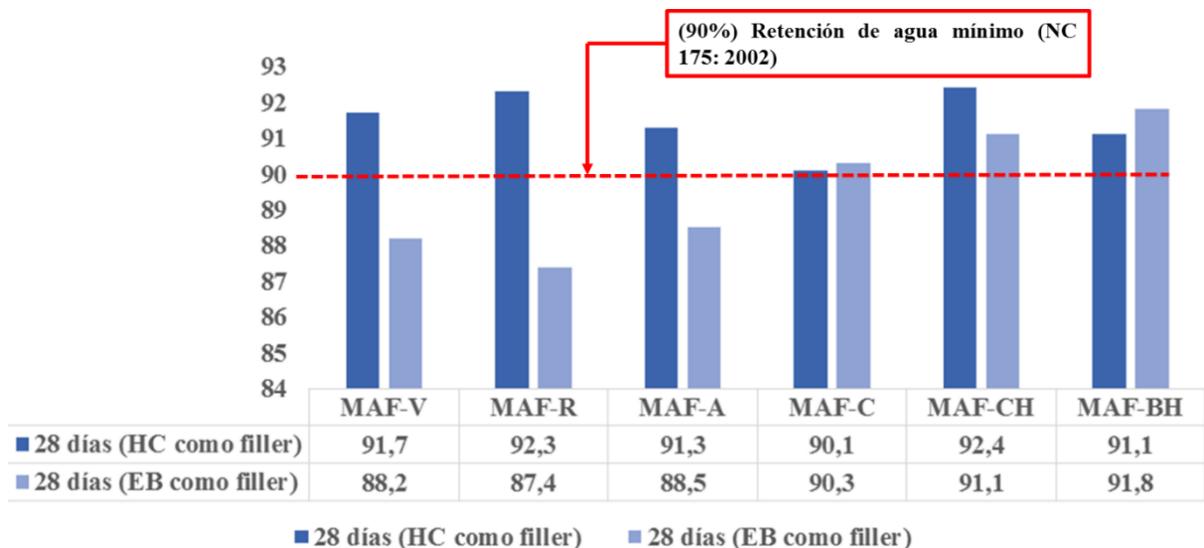


Figura 5. Diagrama de barras de valores de retención de agua.

En general, los valores estuvieron por encima del valor que especifica la norma cubana; sin embargo, los morteros fabricados con áridos naturales mostraron un comportamiento

superior a los áridos reciclados. En el caso de los morteros donde se empleó EB como filler de relleno no influyó en la retención de agua de estos, y en cuanto a los áridos reciclados los valores mostraron una tendencia a aumentar a partir del empleo de EB.

Las partículas muy finas de áridos reciclados se describieron como conducentes eventualmente a un efecto de relleno que mejoró el estado fresco de los morteros (Martínez *et al.*, 2013). Un aumento del contenido de árido reciclado dentro de las mezclas de mortero tuvo el efecto de producir un mayor valor de retención de agua (Neno, Brito & Veiga, 2014).

Influencia de los factores principales sobre las variables de respuesta

Las figuras que se muestran a continuación resumen las previas conclusiones a las que se arribó en cada epígrafe, basados en el análisis de los efectos estandarizados y representados en los diagramas de Pareto y efectos principales. Estas responden al experimento propuesto en el capítulo anterior, donde se evalúa la influencia que tienen los factores principales (tipo de filler, tiempo de curado y tipo de árido) sobre las variables de respuesta (resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, resistencia a la adherencia y retención de agua).

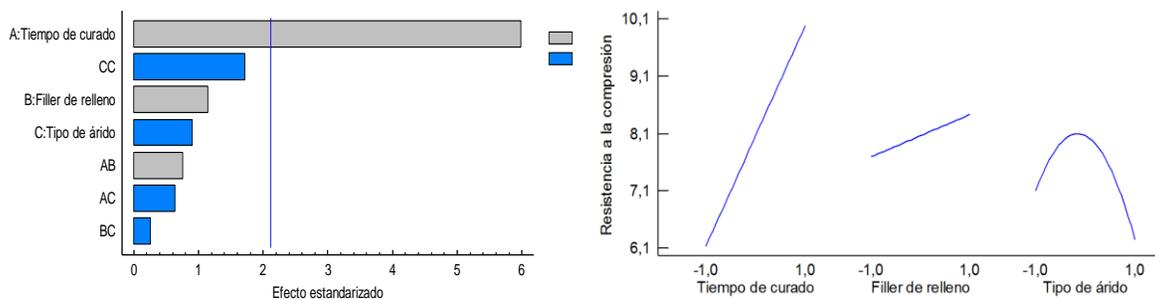


Figura 6. Diagrama de Pareto y efectos principales de las mediciones de resistencia a la compresión.

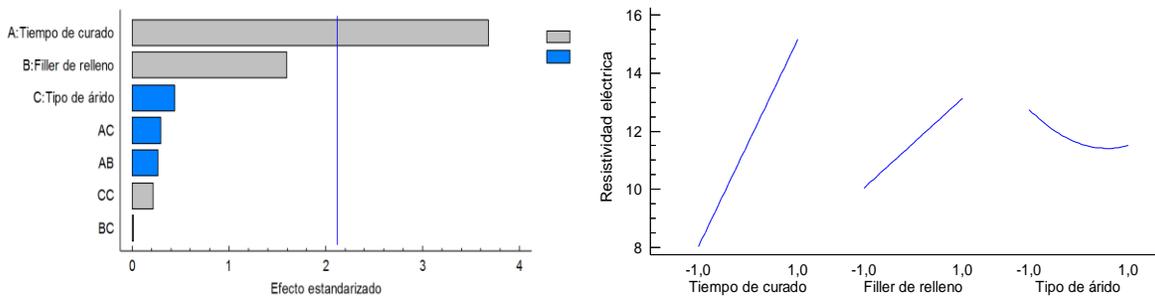


Figura 7. Diagrama de Pareto y efectos principales de las mediciones de resistividad eléctrica.

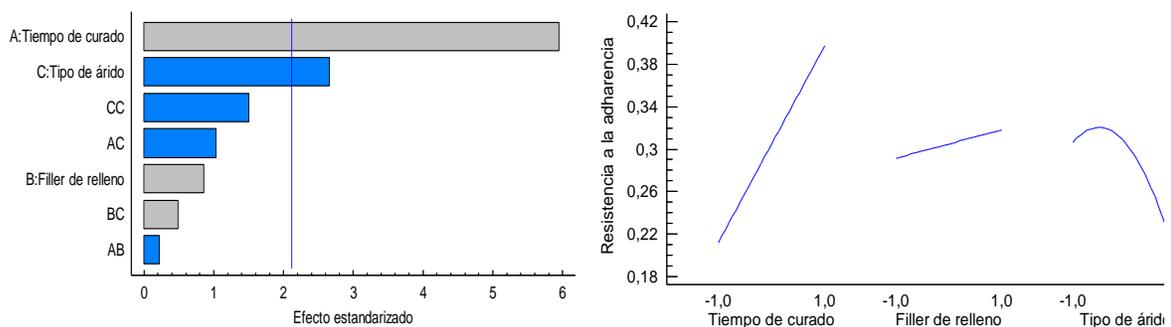


Figura 8. Diagrama de Pareto y efectos principales de las mediciones de resistencia a la adherencia.

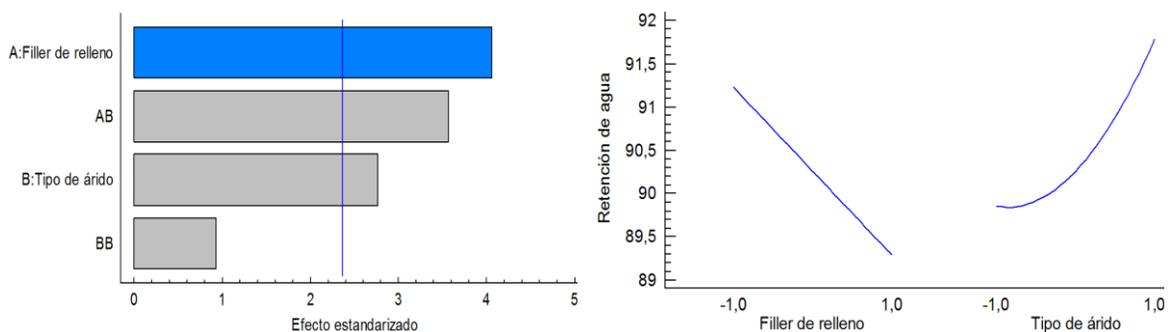


Figura 9. Diagrama de Pareto y efectos principales de las mediciones de retención de agua.

Existe un factor que juega un papel fundamental en los materiales de base cementante: es el tiempo de curado el término empleado para definir la resistencia característica o media a la compresión de cualquier mortero u hormigón. Como se detalla en cada una de las figuras anteriores, excepto en el caso de retención de agua, el cual se ensayó únicamente a los 28 días, el tiempo de curado influyó notablemente en cada una de las variables de respuesta o rendimiento. Como es lógico, los valores de resistencia a la compresión aumentaron con el tipo de filler, debido a su capacidad hidráulica, y disminuyeron con el empleo de árido reciclado, por el elevado contenido de finos.

En el caso de la resistividad eléctrica (Figura 7) un factor que influyó, aunque no significativamente, fue el filler de relleno. Cuando se emplea EB en ambos morteros los valores tienden a aumentar en comparación con el HC; sin embargo, el empleo de los RCD influyó de forma negativa en comparación con los áridos naturales. Similar sucedió con la resistencia a la adherencia, pero en este caso el empleo de los RCD actuó representativamente sobre esta variable de respuesta. Por otra parte, la EB mostró ligeras mejoras en las propiedades de los morteros.

En cuanto a la resistencia a la adherencia (Figura 8), el tiempo de curado resulta muy influyente en esta propiedad. El empleo del tipo de relleno favorece la propiedad analizada en cuestión, siendo mayor con el uso de EB; asimismo, el tipo de árido afecta de manera negativa tal propiedad, lo cual se observa en el momento en que se emplean áridos procedentes de RCD.

La retención de agua (Figura 9) se midió en estado fresco, y especialmente en este caso, el tipo árido influyó de manera significativa, pues la cantidad de finos contenidos en los RCD propician la retención de agua. Sin embargo, la influencia del empleo de la EB como material de relleno promueve un descenso en los valores de esta propiedad.

Conclusiones

En todos los materiales con base de cemento portland el tiempo de curado juega un papel fundamental, sin embargo, existen propiedades como la resistividad eléctrica y la retención de agua que dependen exclusivamente de la capacidad hidráulica de la escoria blanca y el filler de los RCD, respectivamente.

Se demuestra que el filler que aporta los RCD influye de manera negativa en la resistencia a la adherencia de los morteros fabricados. Por otro lado, la escoria blanca mejora ligeramente tal propiedad cuando es empleada como filler de relleno.

Generalizando, los áridos reciclados mixtos pueden ser empleados en la elaboración de morteros de albañilería tipo III (morteros de colocación y revestimiento adecuado para su utilización sobre el nivel del terreno), pues cumplen con los valores que especifica la norma cubana para ese tipo de mortero.

Referencias bibliográficas

- FISHER, R. A. 1925. Theory of statistical estimation. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 22(5): 700-725. Cambridge University Press.
- MALHOTRA, V. M. & MEHTA, P. K. 2004. *Pozzolanic and cementitious materials*. Crc Press.
- MANSO, J. M.; LOSAÑEZ, M.; POLANCO, J. A. & GONZÁLEZ, J. J. 2005. Ladle furnace slag in construction. *Journal of materials in civil engineering* 17(5): 513-518.
- MANSO, J. M.; ORTEGA, V.; POLANCO, J. A. & SETIÉN, J. 2013. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 40: 126-134.
- MANSO, J. M.; RODRÍGUEZ, Á.; ARAGÓN, Á. & GONZÁLEZ, J. J. 2011. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. *Construction and Building Materials* 25(8): 3508-3519.
- MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRIA, M.; PAVÓN, E. & DÍAZ, N. 2013. A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. *Construction and Building Materials* 49: 384-392.
- MARTÍNEZ, I.; ETXEBERRÍA, M.; PAVÓN, E. & DÍAZ, N. 2012. Evaluación de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados mixtos con diferentes procesos de obtención. *Revista Cubana de Ingeniería* 3(2): 11-16.
- METHA, P. K. & MONTEIRO, J. P. 2005. Concrete Microstructure. *Properties and materials*. Third Edition.
- MONTENEGRO, J. M.; CELEMÍN-MATACHANA, M.; CAÑIZAL, J. & SETIÉN, J. 2012. Ladle furnace slag in the construction of embankments: expansive behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(8): 972-979.
- NENO, C.; BRITO, J. D. & VEIGA, R. 2014. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. *Materials research* 17(1): 168-177.
- NORMA CUBANA NC 95: 2001: Cemento Portland. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, La Habana.

Norma Cubana NC 175: 2002. Mortero endurecido. Determinación de la resistencia a la adherencia por tracción. Oficina Nacional de Normalización, La Habana.

ORTEGA, L. 2011. *Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales*. Tesis doctoral. Universidad de Burgos.

PAPAYIANNI, I. & ANASTASIOU, E. 2010. Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products. *Construction and Building Materials* 24(8): 1412-1417.

PAVÓN, E.; ETXEBERRIA, M. & DÍAZ, N. E. 2012. Estudio de la aplicabilidad del hormigón con árido grueso reciclado en La Habana, Cuba. *Materiales de Construcción* (307): 431-441.

POLANCO, J. A.; MANSO, J. M.; SETIÉN, J. & GONZÁLEZ, J. J. 2011. Strength and Durability of Concrete Made with Electric Steelmaking Slag. *ACI Materials Journal* 108(2).

POLDER, R.; ANDRADE, C.; ELSENER, B.; VENNESLAND, Ø.; GULIKERS, J.; WEIDERT, R. & RAUPACH, M. 2000. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures* 33(10): 603-611.

POLHEMUS, N. W. 1999. Statistical analysis using Statgraphics Plus. *Quality control and experimental design*, 2.

RODRÍGUEZ, A.; GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S.; HORGNIÉS, M. & CALDERÓN, V. 2013. Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag. *Materials & Design (1980-2015)* 52: 987-994.

SAFIUDDIN, M.; ALENGARAM, U. J.; RAHMAN, M. M.; SALAM, M. A. & JUMAAT, M. Z. 2013. Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review. *Journal of Civil Engineering and Management* 19(6): 796-810.

SERPA, A. D. C.; GUERRA, E. F. & VALLINA, M. L. B. 2011. *Diseño y análisis estadístico de experimentos*. Ed CUJAE, La Habana.

SOSA, B. S.; BANDA-NORIEGA, R. B. & GUERRERO, E. M. 2013. Industrias de fundición: aspectos ambientales e indicadores de condición ambiental. *Revista de Metalurgia* 49(1): 5-19.

TOKYAY, M. 2016. *Cement and concrete mineral admixtures*. CRC Press.