

Influencia del residuo de mampostería (RM) como material cementicio suplementario en la elaboración de morteros¹

Influence of masonry residue (RM) as supplementary cementitious material in the production of Mortars

Recibido: 21- 01 - 2017 Aceptado: 08-05-2017

Yimmy Fernando Silva Urrego²
Marisol Gordillo³
Silvio Delvasto Arjona⁴

¹ **Proyecto:** FP44842-399- 2015: "Investigación de un material cementicio ecoeficiente para elementos de construcción de bajo costo" financiado por COLCIENCIAS.

² Colombiano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia. yimmy.silva@correounivalle.edu.co.

³ Colombiana, Profesora Titular, Ph.D. Grupo Materiales Compuestos, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.

⁴ Colombiano, Profesor Titular, Ph.D. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Resumen

La producción del cemento portland es responsable de aproximadamente el 5% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) en todo el mundo. Una importante contribución a la sostenibilidad de esta industria es el empleo de puzolanas que disminuyan el contenido de cemento portland para la elaboración de concreto, y más si el material que se utiliza proviene de un residuo como son los de construcción y demolición; por ello se propone el empleo de residuos de mampostería como material alternativo a las puzolanas. En este artículo se presentan los resultados experimentales de la caracterización de un residuo de mampostería (RM) y su evaluación puzolánica. El RM en primera instancia se sometió a un estudio de molienda y posterior análisis mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX), análisis termo-gravimétrico (TG) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Adicionalmente se evaluó el efecto de la incorporación de RM en la resistencia a la compresión en morteros de cemento portland mediante el reemplazo de este en un rango de 0 a 50% a diferentes edades de curado (7; 28; 65 y 90 días), así como las propiedades de densidad y porosidad a 28 días de curado. Los resultados exhiben que este residuo (RM) presenta un comportamiento puzolánico y su porcentaje óptimo de reemplazo en morteros de cemento portland es de 20%.

Palabras clave: Residuo de mampostería; cemento portland; actividad puzolánica; morteros; resistencia a la compresión.

Abstract

Portland cement production is responsible for approximately 5% of global emissions of carbon dioxide (CO₂) around the world. An Important contribution to

the sustainability of this industry is the use of pozzolans that reduce the content of Portland cement for concrete Manufacturing, and more if the material used comes from a residue like construction and demolition; for that reason it is proposed the use of masonry waste as an alternative material to pozzolans. This article presents the experimental results of the characterization of a Masonry residue (RM) and its pozzolanic evaluation. The MRI in the first instance was submitted to a Milling and subsequent analysis using the techniques of X-ray fluorescence (FRX), X-ray diffraction (XRD), Thermo-gravimetric (TG) analysis and electron microscopy (SEM). In addition, the effect of Incorporation of RM in the compressive strength in Portland cement mortars by replacing This in a range of 0 to 50% at different curing ages (7, 28, 65 and 90 days), as well as the properties of density and Porosity at 28 days of curing. The results show that this residue (RM) presents a pozzolanic behavior and their optimum percentage of replacement in Portland cement is 20%.

Keywords: Residue of masonry; portland cement; pozzolanic activity; mortars; compressive strength.

Introducción

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son cada vez más comunes en la sociedad moderna, estos están constituidos por diferentes materiales entre los que se encuentran residuos de concretos, cerámicos, maderas, plásticos, metales entre otros (Vegas et al., 2015; Gomes et al., 2015; Özalp et al., 2016). El volumen de estos residuos (RCD) se genera en grandes cantidades, principalmente en zonas urbanas, causando daños al medio ambiente por falta de sitios adecuados para la eliminación, y también por el descuido de la sociedad (Poon, 2007). Entre los materiales que componen los RCD, el concreto y los cerámicos son los que se presentan en mayor cantidad, y en ellos se encuentran los residuos de mampostería (RM).

En la ciudad de Cali-Colombia se producen cerca de 2480 m³ de escombros diarios de los cuales el 23,4% lo aportan las remodelaciones domiciliarias (Ortiz & Silva, 2013). La práctica más común para eliminarlos es la disposición en vertederos autorizados que no dan abasto y por ello mucho de estos residuos son dejados en zonas verdes, parques o lotes. Se estima que hay 108 botaderos crónicos de basura y escombros en la ciudad de Cali así como puntos críticos (El País, 2013), lo que generan problemas debido al deterioro ambiental y paisajístico en las áreas urbanas.

El reciclaje y reutilización de los RCD se ha convertido en un tema de interés mundial y hay una necesidad elevada de tener alternativas de aplicaciones para los diferentes materiales que componen estos residuos. Numerosos estudios se han llevado a cabo con resultados aceptables sobre el uso de RCD como agregado reciclado para aplicaciones en bases y sub-bases de carreteras (Leite, Motta, Vasconcelos & Bernucci, 2011; Rahman et al., 2015; Xuan, Molenaar & Houben, 2015), como agregado grueso para la producción de un concreto nuevo (Shi-cong, Bao-jian & Chi-sun, 2012; Xuan, Zhan & Poon, 2016) y como reemplazo del agregado fino natural (Fan, Huang, Hwang & Chao 2016; Bogas, De Brito & Ramos, 2016).

Otra manera de emplear los RCD y más específicamente los residuos de mampostería (ladrillo de arcilla con mortero adherido) es como reemplazo de cemento portland, ya que su mayor componente: el ladrillo de arcilla, ha experimentado un proceso de cocción (entre 500 °C y 900 °C) donde se produce la deshidroxilación de los minerales arcillosos y se da lugar a la formación de metacaolín el cual es un material amorfo con alta reactividad. Por lo tanto, los residuos en polvo de ladrillo de arcilla (PLA) podrían ser empleados como reemplazo de cemento, generando beneficios ambientales ya que al aprovechar este residuo se logra reducir la disponibilidad de este material en los vertederos, además de disminuir las emisiones de CO₂ generadas en la industria cementera (Ioannou, Ilia & Philokyprou, 2009). Por lo general las arcillas contienen caolinita (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O) que se transforma en metacaolín por calcinación (Siddique & Klaus, 2009; Ilić et al., 2016). La reacción entre la sílice amorfa y la alúmina del metacaolín con el hidróxido de calcio producido en la hidratación del cemento da lugar a la formación de silicato de calcio hidratado (CSH) y aluminato de calcio hidratado (C₄AH₁₃), los cuales promueven en las mezclas (morteros o concretos) alta resistencia y baja permeabilidad (Singh & Garg, 2006).

El objetivo de esta investigación fue explorar la viabilidad de producir morteros de cemento portland mediante el empleo de residuos de mampostería (RM). En consecuencia, esto ayudará a reducir el costo de la producción del mortero y disminuir el impacto ambiental producido por los RCD y la industria cementera. Para ello se evaluó y caracterizó la reactividad puzolánica de los RM provenientes de una demolición domiciliaria, para su posterior uso en la elaboración de morteros. Adicionalmente se estableció el contenido óptimo de incorporación de este material de acuerdo con la resistencia a la compresión.

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, la metodología que se siguió se presenta en la Figura 1. Como primera instancia, se realizó un muestreo del residuo de mampostería en una vivienda en demolición de la zona de Cali, la cual estaba construida en ladrillos de arcilla con mortero de pega de cemento portland (Figura 2). Posteriormente, se realizó la adecuación del residuo (RM) mediante la reducción de tamaño empleando inicialmente

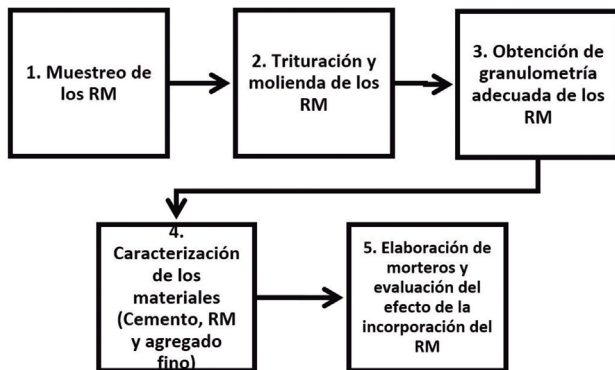


Figura 1. Metodología desarrollada para la caracterización y evaluación del residuo de mampostería (RM).

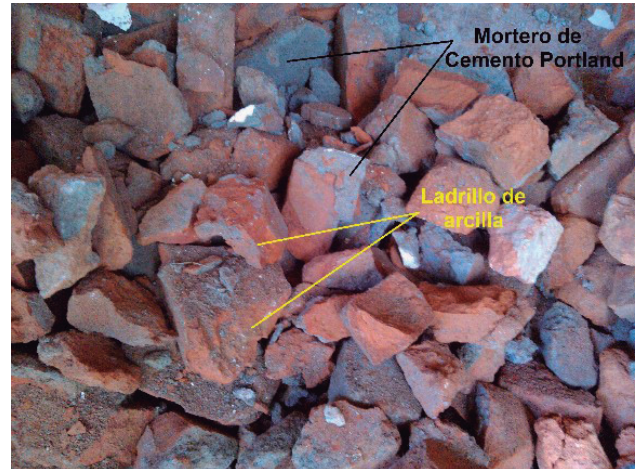


Figura 2. Residuo de mampostería sin moler

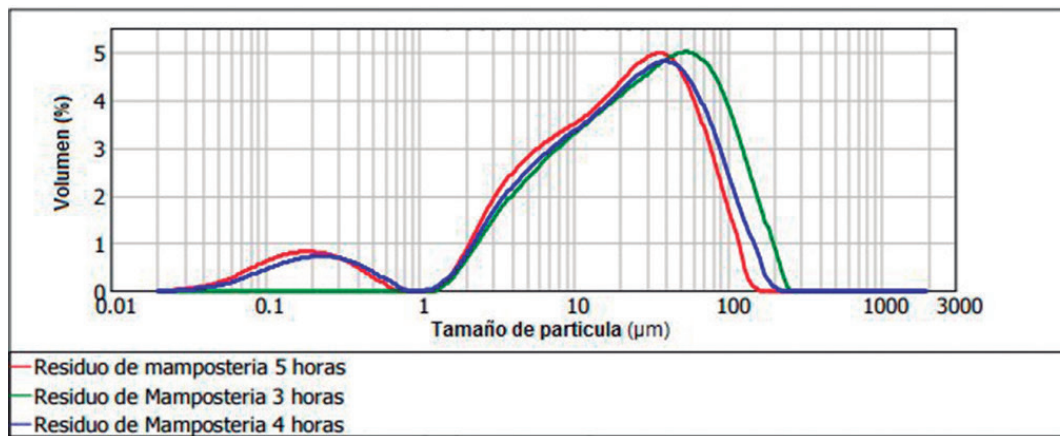


Figura 3. Curva de granulometría del RM a diferentes tiempos de molienda.

Tabla 1. Valores de distribución granulométrica del RM a diferentes tiempos de molienda.

RM	Tiempo de Molienda		
	3 horas	4 horas	5 horas
Diámetro medio (μm)	44,16	31,65	24,08
Diámetro $d(0,1)$ (μm)	4,99	2,19	1,80
Diámetro $d(0,5)$ (μm)	29,01	20,01	15,89
Diámetro $d(0,9)$ (μm)	106,95	78,75	65,04

Materiales

Cemento

Se utilizaron dos tipos de cemento portland, uno sin adición, conocido como cemento concretero para la caracterización puzolánica del RM y otro de uso general para la elaboración de los morteros. La composición química de los cementos se obtuvo mediante fluorescencia de rayos X (FRX).

Residuo de mampostería (RM)

El residuo de mampostería obtenido del proceso de molienda se caracterizó por medio de diferentes técnicas. Primero se determinó la composición química y mineralógica mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX) respectivamente. Además se utilizó microscopía electrónica de barrido (MEB) para conocer la morfología de las partículas. Por último, un análisis térmico mediante termo-gravimetría (TGA) se empleó para determinar la pérdida o ganancia de masa de la muestra, y la derivada termo-gravimétrica (DTG) para observar la variación de peso frente a la temperatura.

Métodos de evaluación de la actividad puzolánica del RM

La evaluación de la actividad puzolánica del residuo de mampostería (RM) fue determinado por medio de dos métodos:

1. Evaluación de la puzolanidad por la norma ASTM C618

La norma ASTM C618 presenta los requerimientos químicos y físicos para las cenizas volantes y puzolanas naturales e incorpora los métodos de ensayo estándar de la norma ASTM C311. Los criterios más importantes para la actividad puzolánica son (1) la suma de los componentes químicos, es decir $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ y (2) el índice de actividad puzolánica (IAP), que se define como la relación de la resistencia a la compresión de un mortero con reemplazo del material puzolánico en un 20% (en este caso RM) en masa del cemento con un mortero de control (100% cemento portland). Para la elaboración de estos morteros se empleó una relación agua / cementante de 0,55, cemento sin adición y arena de Ottawa estandarizada.

2. Método químico

El método químico empleado para determinar la actividad puzolánica del RM fue el ensayo de Frattini a 7 y 28 días de curado, descrito en la norma NTC 1512, la cual compara la cantidad de hidróxido de calcio presente en una solución acuosa en contacto con el cemento hidratado contra la cantidad de hidróxido de calcio capaz de saturar un medio de la misma alcalinidad.

Efecto del residuo de mampostería en las propiedades del mortero en estado endurecido

El efecto de la incorporación del RM se determinó mediante la elaboración de morteros con diferentes niveles de sustitución de cemento portland (0% a 50% en peso) por RM en la resistencia a la compresión mediante la evaluación en cubos de 5,08 cm de lado. Para ello se utilizó 1 parte de cemento portland de uso general por 2,75 partes de arena de río y una relación agua/aglutinante de 0,65 (con la que se logró la consistencia adecuada de todas las mezclas). La evaluación de la resistencia a la compresión se realizó a 7,28, 65 y 90 días de curado, con la finalidad de hacer un seguimiento a las reacciones puzolánicas. También se determinó absorción y porosidad bajo el procedimiento descrito en la norma ASTM C642, para ello los especímenes se secaron en un horno a una temperatura de 105 ± 5 °C durante 24 horas. Después de retirar los especímenes del horno, se dejaron enfriar en aire seco y se pesaron. A continuación, las muestras se sumergieron en agua durante 48 horas y se pesaron. Posteriormente las muestras se sumergieron nuevamente en agua y se hirvieron durante 5 horas, seguido a esto se enfriaron y se eliminó la humedad superficial con una toalla para la toma del peso. Como paso final, se tomó el peso hidrostático de cada una de las muestras. Este estudio permitió conocer el rango óptimo de reemplazo de cemento por RM a los 28 días de curado, por medio de un diseño de experimentos completamente al azar, de efectos fijos balanceados.

Diseño del experimento

En la Tabla 2 se presentan las condiciones del diseño, donde se planteó un solo factor (tipo de mezcla) con 6 niveles, lo cual generó 6 tratamientos que fueron asignados al azar a las unidades experimentales, midiendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

Tabla 2. Condiciones de diseño experimental para optimización de reemplazo de RM en morteros.

Factores	Niveles (%OPC-%RM)	Tratamientos	Unidad experimental	Variable de respuesta
Tipo de mezcla	M1: (1-0)	6	Especímenes de morteros	Resistencia a la compresión (28 días de curado)
	M2:(0,9-0,1)			
	M3:(0,8-0,2)			
	M4:(0,7-0,3)			
	M5:(0,6-0,4)			
	M6:(0,5-0,5)			

Para el análisis de los resultados, se plantea un diseño completamente al azar (D.C.A), donde la variable de respuesta (y_{ij}) es la resistencia a la compresión, μ es la media general, α_i es el efecto debido a la mezcla y ε_{ij} es el error aleatorio. El modelo está dado por:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6. \quad j = 1, 2, 3.$$

La comparación de las mezclas se realizó por medio de un análisis de varianza (ANOVA), pruebas posanova, y un gráfico de efectos principales. Las hipótesis asociadas al D.C.A son: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_6$, vs $H_a: \mu_i \neq \mu_j$, las cuales se prueban por medio del ANOVA. Todos los cálculos de los resultados del análisis estadístico se realizaron en el paquete estadístico Minitab 16.

Resultados y discusiones

Cemento

La composición química de los dos tipos de cemento portland se determinó mediante FRX y se presentan en la Tabla 3. Se aprecia una mayor pérdida por ignición (PI) en el cemento de uso general (CG), esto atribuido a la adición calcárea (caliza) que presenta este cemento en su fabricación.

El tamaño de partícula se determinó mediante granulometría láser y los valores de distribución granulométrica se registran en la Tabla 4. En esta se observa que el 50% de las partículas de cemento CG y CA están por debajo de 15,821 y 17,079 respectivamente, presentando un porcentaje mayor de partículas finas el CG.

Tabla 3. Composición química del cemento de uso general (CG) y cemento sin adición (CA)

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PI
CG % en peso	19,39	4,13	4,70	55,68	1,70	0,31	0,28	3,9	9,21
CA % en peso	17,99	3,88	4,76	62,28	1,71	0,23	0,32	4,03	4,14

Tabla 4. Valores de distribución granulométrica de los dos cementos Portland (CG y CA).

Cemento Portland	CG	CA
Diámetro medio (μm)	20,670	21,650
Diámetro d(0,1) (μm)	1,964	3,594
Diámetro d(0,5) (μm)	15,821	17,079
Diámetro d(0,9) (μm)	46,818	46,555

Residuo de Mampostería (RM)

La composición química del residuo de mampostería se presenta en la Tabla 5, donde se aprecia que se compone principalmente de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y CaO. La arcilla roja se caracteriza por un bajo contenido de calcio y un mayor contenido de alúmina en comparación con la arcilla amarilla o negra (Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016). En este caso, el residuo de mampostería molido al tener mortero de

cemento portland en su composición se puede presentar una variación en los componentes, al compararse con una arcilla que se emplea para la elaboración de ladrillos. La Figura 4 muestra las imágenes de microscopia electrónica de barrido del RM tomadas a 500X y 1000X. La morfología SEM del RM reveló diferentes tamaños de partículas no mayores a 30 μm. Algunas partículas más finas que otras, con morfología irregular.

Tabla 5. Composición química del residuo de mampostería

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PI
% en peso	56,859	15,528	7,636	7,881	2,954	2,492	1,362	0,557	3,39

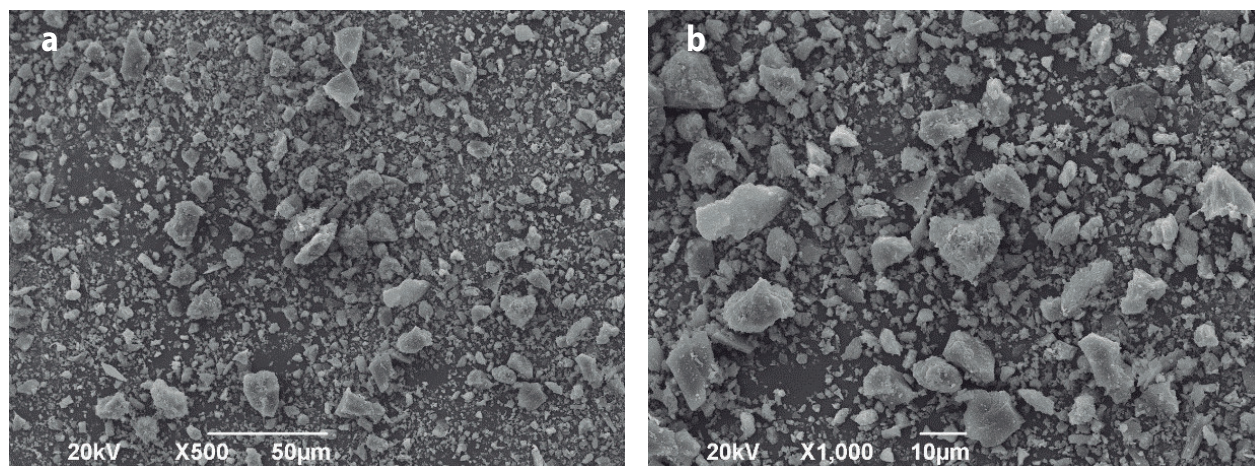


Figura 4. Micrografía SEM del residuo de mampostería a) 500X y b) 1000X

En la Figura 5 se presenta el patrón de difracción del RM obtenido del ensayo de DRX. Se observan picos prominentes correspondientes al cuarzo (picos característicos en 2θ - 24,267; 31,032; 46,16; 49,718; 58,943; 64,69) y picos de otros minerales con menor intensidad como los de la albíta, cordierita, anortita y hematita. El pico de mayor intensidad indica que la muestra tiene una gran cantidad de cuarzo (SiO₂), correspondiente a la arena presente en el mortero de pega y al cuarzo que se encuentra en el polvo de ladrillo.

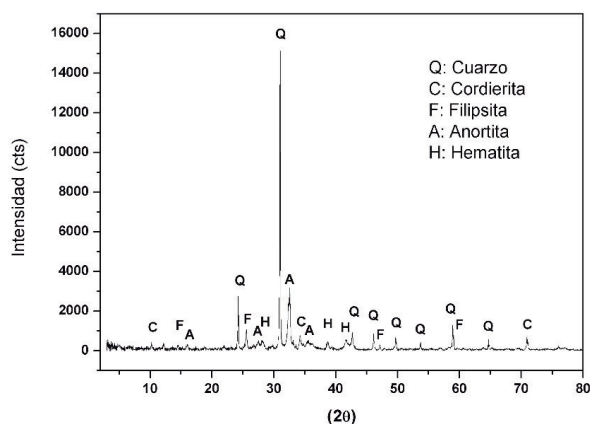


Figura 5. Patrón de DRX de residuo de mampostería.

La Figura 6, presenta los resultados del RM sometido a un análisis simultáneo de termogravimetría (TGA / DTG) detectando los cambios asociados a pérdida de masa por la temperatura. Con el TGA / DTG fue posible determinar la pérdida de peso a diferentes etapas de calentamiento hasta 1100 °C. Se detectó una pérdida de peso en el rango de 25 °C a 150 °C asociada a la humedad presente en la muestra. La

pérdida de peso registrada entre 550 °C y 660 °C se asocia a la reacción endotérmica debida a la transformación de los materiales más comunes presentes en la arcilla: caolinita e ilita (Matias, Faria & Torres, 2014).

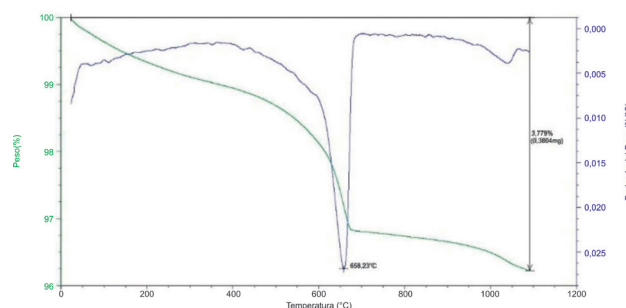


Figura 6. Resultados del análisis térmico diferencial del residuo de mampostería

Valoración de la actividad puzolánica

Puzolanicidad por la norma ASTM C618

Basado en la norma ASTM C618, el índice de actividad puzolánica (IAP) es uno de los criterios más importantes para la determinación del rendimiento puzolánico. El IAP se calculó de acuerdo con la relación entre la resistencia a la compresión del mortero adicionado con RM (20%) y el mortero sin adición con base en lo descrito en la norma ASTM C311. De acuerdo con la Tabla 6, el RM cumple con el requerimiento de la norma ASTM C618, la suma de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ es más del 80% y el IAP a los 28 días de curado supera el valor límite establecido en la norma el cual es 75%, por lo que se puede afirmar desde

el punto de vista de composición química y desempeño mecánico que el RM presenta potencial para ser empleado como una adición puzolánica natural. No obstante, el

comportamiento puzolánico de un material debe ser corroborado por medio de otras técnicas que permitan establecer el comportamiento reactivo del RM.

Tabla 6. Propiedades químicas y físicas de las puzolanas de acuerdo con la norma ASTM C618

Requerimientos	Puzolana	
	clase N, ASTM C618	RM
Requerimiento Químico		
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	min, 70,0	80,023
Trióxido de azufre (SO_3)	Max, 4,0	0,557
Contenido de humedad (%)	Max, 3,0	0,21
Perdida por Ignición (%)	Max, 10,0	3,39
Requerimiento Físico		
Índice de actividad Puzolánico (IAP) a 28 días, porcentaje de control	min, 75	84,36

Método Químico - Frattini

Con el fin de complementar los resultados obtenidos de la actividad puzolánica de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C618, se empleó el método químico de Frattini. Este método evalúa la actividad puzolánica mediante la comparación del contenido de $[\text{Ca}^{2+}]$ y $[\text{OH}^-]$ en una solución acuosa que cubre la muestra (80% cemento + 20% puzolana) hidratada a 40 °C por un periodo dado (7 y 28 días), se emplea la curva de solubilidad del hidróxido de calcio en una solución alcalina a la misma temperatura. Según la cantidad máxima de hidróxido de calcio con que la puzolana pueda combinarse y la velocidad a la cual ocurra esta reacción, el material se ubicara en la zona puzolánica (por debajo de la isoterma de solubilidad) o

no puzolánica de la curva de saturación de Frattini. En la Figura 7, se observa que al pasar 7 días de contacto entre los materiales, no se aprecia una actividad puzolánica aceptable debido a que el consumo de los iones de calcio y la alcalinidad total no fueron suficientes, por lo que el RM se ubica por encima de la isoterma de solubilidad de $\text{Ca}(\text{OH})$. Sin embargo, a los 28 días, la concentración de CaO en la solución disminuye al igual que la alcalinidad, por lo que el RM logró ubicarse en la región puzolánica o de baja saturación, este comportamiento indica que una gran proporción de hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento portland ha sido consumida por la reacción puzolánica (Tironi, Trezza, Scian & Irassar, 2012), de esta forma se corroboran los resultados obtenidos por el método mecánico (IAP).

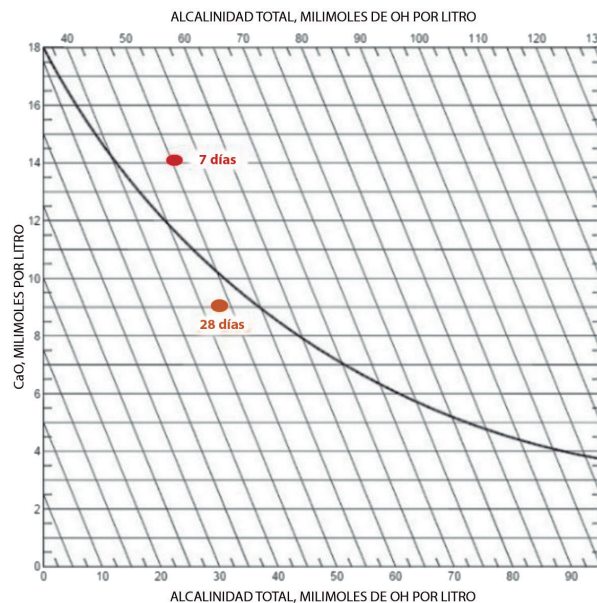


Figura 7. Diagrama de la prueba de Frattini para el residuo de mampostería.

Efecto de la incorporación del residuo de mampostería en diferentes proporciones en las propiedades del mortero en estado endurecido

Una vez evaluado el comportamiento puzolánico del RM, mediante sus características físicas y químicas; se produjeron 6 diferentes mezclas de morteros, con las proporciones en peso de material cementante: 1:2,75 arena. Las mezclas se designaron de la siguiente manera: la mezcla de control - (M1), la mezcla con 10% de RM - M2:(0,9-0,1); con 20% de RM - M3:(0,8-0,2); con 30% de RM - M4:(0,7-0,3); con 40% de RM - M5:(0,6-0,4) y 50% de RM - M6:(0,5-0,5). La resistencia a la compresión de las mezclas se evaluó a diferentes edades de curado (7, 28, 65 y 90 días) y los resultados se presentan en la Figura 8. Se observa que la resistencia a la compresión está influenciada por el porcentaje de sustitución del RM. En general, la sustitución parcial del cemento por RM resulta en una menor resistencia, sin embargo en el caso de los morteros con reemplazos hasta el 20% de RM la diferencia no es tan grande. La reducción de la resistencia se hace mayor a medida que el nivel de reemplazo incrementa. La influencia del decrecimiento es más importante a edades cortas (7 y 28 días de curado), después de este tiempo, esta diferencia disminuye debido a que la resistencia del mortero de referencia se hizo casi estable, pero los morteros con RM incrementaron continuamente hasta los 90 días de curado. En los morteros con RM, cuando el nivel de sustitución cambio de 0 a 10%, 20%, 30%, 40% y 50% la resistencia a la compresión disminuyó en 9,4%, 19,3%, 32,3%, 48,5% y 59,9% respectivamente a los 28 días y 7,1%, 13,1%, 24,4%, 38,43% y 48,42% a los 90 días. La reducción podría ser causada por el efecto dilución y la baja reactividad del material reactivo presente en el RM principalmente a edades tempranas, por lo que el efecto puzolánico de la adición se evidenció a los 90 días de curado, disminuyendo la diferencia entre la resistencia del mortero en referencia y las mezclas que contienen este residuo.

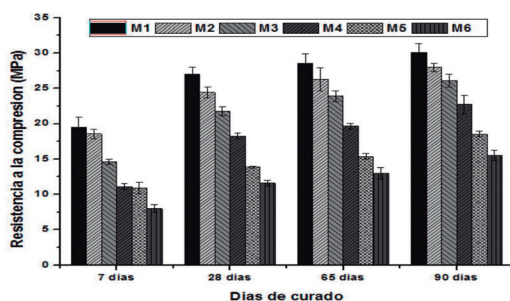


Figura 8. Resistencia a la compresión de morteros con RM.

Por otra parte, en el análisis del modelo del diseño (Tabla 7), se hallaron los siguientes resultados:

- El modelo cumple con los supuestos sobre el error (normalidad, homogeneidad) a niveles de significancia mayores del 10%.
- Con un R^2 del 98,75%, el cual indica que se ejerció un buen control del experimento, dado que la variación está siendo explicada por la mezcla y no por los errores, resultado que también se evidencia en la suma de cuadrados.
- Con respecto a la comparación de las mezclas, a un nivel de significancia 0,0000 existe diferencia entre las medias de las mezclas (M1, M2, M3, M4, M5 y M6), es decir, que por lo menos hay un par de medias que tienen un efecto distinto sobre la resistencia a la compresión de los morteros.

Tabla 7. Análisis de varianza de la resistencia a la compresión (MPa)

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	p-valor
Mezcla	544,3	0,0000
Error	4,83	
Total	249,16	

Con el fin de establecer que, entre las mezclas hay diferencias y cuál es la mezcla óptima de sustitución de cemento portland por RM en morteros a los 28 días de curado, se realizó una prueba post-anova empleando la prueba de Tukey a un nivel de significancia del 5% (Tabla 8). Se encontró que las mezclas M2 y M3 se hallan por encima de la media (ubicados en el mismo grupo de la mezcla de control-M1), como se observa en la Figura 9, lo que indica que hasta un 20% de RM de incorporación de este material presentan resultados apropiados que superan los 21 MPa a los 28 días de curado, además de tener una ventaja desde el punto de vista ambiental y económico ya que se está dando un empleo apropiado a este residuo generando una disminución en el consumo de cemento portland, lo que conlleva una menor producción de CO_2 derivado de la fabricación de este aglomerante, además de darle un uso a los grandes volúmenes de residuos de construcción y demolición, lo que evita la necesidad de más zonas de disposición final.

Tabla 8. Prueba Post-Anova empleando el método Tukey

Tipo de Mezcla	N	Subconjunto					
		1	2	3	4	5	6
M6	3	11,52					
M5	3		13,89				
M4	3			18,26			
M3	3				21,51		
M2	3					24,46	
M1	3						26,99

Fuente: Los Autores

Otras variables importantes que se midieron fueron la absorción, la densidad aparente y el volumen de poros permeables, los cuales se calcularon de acuerdo con la norma ASTM C642 posterior a los 28 días de curado. Los resultados se muestran en la Tabla 9. Como se evidencia en la Tabla, la adición del RM genera un aumento en el

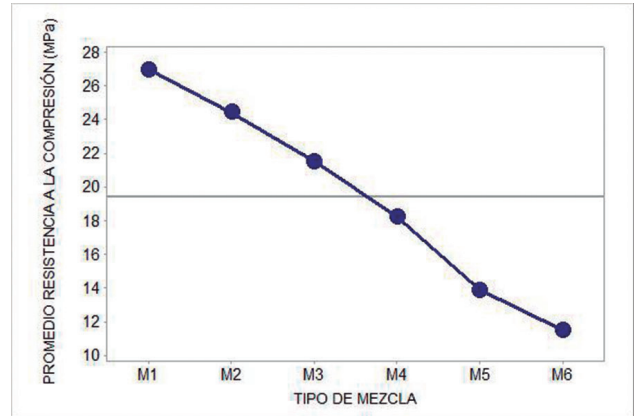


Figura 9. Gráfico de efectos principales de la resistencia a la compresión a 28 días de curado.

porcentaje de absorción y volumen de poros permeables; y una disminución en la densidad aparente. Esto puede ser atribuido a que al no reaccionar completamente el agua en la mezcla, como consecuencia de la presencia del RM, esta queda libre en la estructura y al evaporarse deja poros en la mezcla.

Tabla 9. Resultados de absorción, densidad y porosidad de acuerdo con la norma ASTM C642.

Mezcla	% de absorción después de inmersión	Densidad Aparente (kg/m³)	% de Volumen de poros permeables
M1	11,62	2599	22,59
M2	11,91	2554	22,77
M3	12,28	2537	23,01
M4	12,70	2536	24,16
M5	13,4	2525	25,21
M6	13,54	2524	25,52

Conclusiones

El presente trabajo pretendía caracterizar y valorar los residuos de mampostería domiciliaria-RM (ladrillo de arcilla y mortero de cemento portland) en la ciudad de Cali, Colombia. Este material de desecho de construcción y demolición se incorporó en morteros de cemento portland como reemplazo parcial de este aglomerante y su influencia en el comportamiento mecánico de los morteros con diferentes porcentajes fue analizado, obteniendo las siguientes conclusiones:

La caracterización del RM respecto a su comportamiento físico y químico revela que este material puede ser considerado como material puzolánico, ya que el IAP fue superior al 75% como está especificado en la norma

ASTM C618 y el ensayo de Frattini muestra la fijación del calcio ubicándolo por debajo de la curva de saturación a los 28 días.

La resistencia a la compresión de los morteros con RM en su composición, presentaron valores inferiores al mortero de referencia, independientemente del porcentaje de reemplazo. Esta diferencia se hizo menor a medida que se incrementaban las edades de curado, lo que permite concluir que el RM es una adición de lenta reacción ya que a edades tempranas no aporta a la evolución de resistencias, por el contrario afecta estos desarrollos por el efecto dilución.

El RM presenta un color rojizo lo que le otorga a las mezclas con cemento portland una pigmentación, que puede ser interesante para fines de conservación,

rehabilitación y en algunos casos prescindir de la necesidad de pinturas, por ejemplo en elementos arquitectónicos. Por lo tanto, la sustitución del cemento portland por RM parece ser una solución prometedora.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a: Grupo de materiales Compuestos (GMC) de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle y Centro de Excelencia de Nuevos Materiales (CENM); al proyecto FP44842-399- 2015: "Investigación de un material cementicio ecoeficiente para elementos de construcción de bajo costo" financiado por COLCIENCIAS- "El Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas y al Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología (Colciencias)" por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación.

Bibliografía

- Bogas, J.A., De Brito, J. & Ramos, D. (2016). Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 115, 294-304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.065>
- El País (2013). Elpais.com.co. Recuperado de <http://www.elpais.com.co/elpais/california/noticias/estos-son-cinco-problemas-cronicos-rehusan-desaparecer-cali>
- Eliche-Quesada, D. & Leite-Costa, J. (2016). Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. *Waste management*, 48, 323-333. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.042>
- Fan, C., Huang, R., Hwang H. & Chao, S.J. (2016). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*. 112, 708-715. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154>
- Gomes, P.C.C., Ulsen, C., Pereira, F.A., Quattrone, M. & Angulo S.C. (2015). Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates. *Waste Management*. 45, 171-179. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.008>
- Ilić, B., Radonjanin, V., Malesev, M., Zdujic, M. & Mitrivic A. (2016). Effects of mechanical and thermal activation on pozzolanic activity of kaolin containing mica. *Applied Clay Science*. 123, 173-181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.029>
- Ioannou, I., Ilia, A. & Philokyprou M. (2009). Use Of Crushed Fired Clay Ceramics In The Production Of Mortars. *Sustainable Development and Planning IV*. 120, 257-264. doi: <https://doi.org/10.2495/sdp090251>
- Leite, F.C., Motta, R.S., Vasconcelos, K.L. & Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*. 25(6), 2972-2979. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>
- Matias, G., Faria, P. & Torres, I. (2014). Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of components and their influence on the mechanical behavior. *Construction and Building Materials*. 73, 523-534. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.108>
- Ortiz, H., Silva, M.S. (2013). Elpais.com.co. Recuperado de <http://www.elpais.com.co/mundo/infografia-de-donde-vienen-y-a-donde-van-a-parar-los-escombros-de-cali.html>
- Özalp, F., Yilmaz, H.D., Kara, H.D., Kaya, O. & Sahin A. (2016). Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*. 110, 17-23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030>
- Poon, C.S. (2007). Reducing construction waste. *Waste Management*, 27(12), 1715-1716. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.013>

- Rahman, M.A., Imteaz, M.A., Arulrajah, A., Piratheepan, J. & Disfani M.M. (2015). Recycled Construction and Demolition materials in permeable pavement systems: Geotechnical and hydraulic characteristics. *Journal of Cleaner Production*. 90, 183-194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.042>
- Shi-cong, K., Bao-jian, Z. & Chi-sun, P. (2012). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*. 28, 549-556. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.027>
- Siddique, R. & Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*. 43(3-4), 392-400. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>
- Singh M. & Garg M. (2006). Reactive pozzolana from Indian clays – their use in cement mortars. *Cement and Concrete Research*. 36(10) 1903–1907. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.12.002>
- Tironi, A., Trezza, M.A., Scian, A. & Irassar E. (2012). Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. *Construction and Building Materials*. 28(1) 276–281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.064>
- Vegas, I., Broos, K., Nielsen, P., Oliver, L. & Lisbona A. (2015). Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. *Construction and Building Materials*. 75, 121-128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.109>
- Xuan, D., Zhan, B. & Poon, C.S. (2016). Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 65, 67-74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018>
- Xuan, D.X., Molenaar, A.A.A. & Houben L.J.M. (2015). Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases. *Journal of Cleaner Production*. 100, 77-83.