

# Evaluación de la resistencia a compresión en morteros de cal, sometidos a diferentes condiciones de curado

## Compression resistance assessment in lime mortars, exposed to different curing conditions

ANDRÉS FELIPE ESPITIA MORALES<sup>1</sup> - NANCY TORRES CASTELLANOS<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

2. Magíster en Estructuras y doctora en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

andres.espitia-m@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/06/2018 Aceptado: 30/07/2018

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)  
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

### Resumen

En este artículo se presenta la evaluación de la resistencia a compresión en morteros de cal, sometidos a diferentes condiciones de curado y diferentes edades de ensayo. En total, se evaluaron las propiedades mecánicas sobre tres tipos de morteros: uno con cal, y los restantes adicionados con puzolanas como metacaolín y polvo de ladrillo. Adicionalmente, en cada uno de los componentes de los morteros se evaluó la composición química mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X. La resistencia a compresión se evaluó a cuatro edades, utilizando tres ambientes de curado: cámara de humedad y temperatura, cámara de carbonatación acelerada y condiciones atmosféricas. Los resultados mostraron que las muestras curadas en cámara de carbonatación presentaron resistencias superiores a las de los especímenes curados en cámara de humedad, debido a que los morteros de cal aumentan su resistencia con la carbonatación del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de la cal. Así mismo, se encontró que la resistencia de las probetas expuestas a condiciones atmosféricas resultó inferior a las curadas con las otras metodologías. A partir de la investigación, se destaca que el uso de puzolanas en morteros de cal mejora las propiedades mecánicas, lo cual resulta atractivo para la rehabilitación de edificaciones patrimoniales y que el tipo de curado se encuentra ligado al desarrollo de la resistencia.

**Palabras claves:** mortero, cal, metacaolín, polvo de ladrillo, carbonatación, resistencia a compresión.

### Abstract

This article shows the compression resistance assessment in lime mortars, exposed to different curing conditions and trial age. The mechanical properties of three types of mortars were assessed: one of lime, and the rest with added pozzolan such as metakaolin and brick dust. Additionally, the chemical composition of the mortars' components was evaluated through an X-ray fluorescence trial. Compression resistance was assessed at four different ages, using three curing environments: moisture chamber and temperatura, accelerated carbonation chamber, and atmospheric conditions. Results showed that samples cured in carbonation chamber had stronger resistances than those cured in moisture chambers, due to lime mortars increasing their resistance with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  carbonation of lime. Likewise, it was found that test tubes exposed to atmospheric conditions showed a weaker resistance than the other two methods. From this research, it can be highlighted that pozzolan-added lime mortars improve their mechanical properties, which is attractive for rehabilitating patrimonial buildings since the curing method is linked to resistance development.

**Keywords:** mortar, lime, metakalin, brick dust, carbonation, compression resistance.

## INTRODUCCIÓN

Los morteros de cal son materiales que se han utilizado con frecuencia a lo largo de la historia y cuyo uso se expandió desde la antigüedad (Luque, Cultrone & Sebastián, 2010). De este modo, la mayoría de las edificaciones construidas antes del siglo XX contienen morteros de cal (Pozo-Antonio, 2015). Sin embargo, con la aparición del cemento Pórtland en 1824 y sus bondades, como endurecimiento rápido y alta resistencia mecánica, el empleo de aglomerantes de cal disminuyó (Álvarez y González, 1994; Radonjic et al., 2001, citados por Luque et al., 2010).

Muchas de estas edificaciones han comenzado a presentar deterioro por la incidencia de diferentes factores, entre ellos cambio en el uso de la estructura (Mercado, 2007; Peñaranda, 2011), demolición parcial de los inmuebles (Peñaranda, 2011), asentamientos en la cimentación (Maldonado, Martín & Maldonado, 2011), empleo de materiales incompatibles con los originales (Lourenço, Van Hees, Fernandes & Lubelli, 2014), o simplemente por los efectos del paso del tiempo en la construcción (Maravelaki-Kalaitzaki, Bakolas, Karatasios & Kilikoglou, 2005).

Es así como durante buena parte del siglo XX los morteros de cemento se destinaron para restauración (Vejmelková, Keppert, Keršner, Rovnaníková & Černý, 2012). Con el tiempo, varios autores indicaron que la utilización de morteros de cemento para rehabilitaciones patrimoniales generaba algunos problemas en las estructuras, entre ellos cristalización de sales y baja flexibilidad de los morteros de cemento (Pozo-Antonio, 2015). Por consiguiente, en algunos inmuebles considerados históricos se ha observado que el proceso de deterioro se acelera con las intervenciones de reparación (Gleize, Motta, Silva & Román, 2009; Vejmelková et al., 2012), debido a la incompatibilidad entre los morteros de cemento y los materiales originales (Lanas & Álvarez, 2003).

Ciertamente, al momento de rehabilitar una edificación patrimonial, el punto de partida para una adecuada selección de los materiales de reparación radica en analizar los materiales existentes (Forster, 2012; Gleize et al., 2009; Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2005). Por ende, es importante considerar que las estructuras históricas poseen características constructivas y materiales que difieren de los modernos (Iucolano, Liguori & Colella, 2013). Aparte de esto, los materiales presentan

variaciones en su composición, por lo que hay dudas relacionadas con las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestos (Ball, El-Turki & Allen, 2011).

Con respecto a los morteros de cal, tienen ciertas ventajas: compatibilidad físico-química con aglomerantes antiguos y mayor plasticidad, lo cual les permite acomodarse a las deformaciones de la mampostería (Lanas & Álvarez, 2003; Pozo-Antonio, 2015). Por otro lado, existen ciertos inconvenientes al utilizar aglomerantes de cal, entre los que se encuentran baja resistencia, endurecimiento lento, alta retracción y baja cohesión entre los morteros y las unidades de mampostería. Para mitigar dichos problemas, se utilizan adiciones ricas en aluminio-silicatos como metacaolín o polvo de ladrillo (Nežerka, Antoš, Litoš, Tesárek & Zeman, 2016).

Por otra parte, el proceso de endurecimiento de los morteros de cal se desarrolla a partir de la reacción entre el  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera, con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de la cal (Pavlík, Benešová, Matiašovský & Pavlíková, 2012), el cual se transforma en  $\text{CaCO}_3$  (Arizzi, Martínez, Cultrone & Benavente, 2011; Luque et al., 2010). De este modo, la tasa de carbonatación resulta ser un factor decisivo que influye en la resistencia y durabilidad de estas mezclas (Arizzi et al., 2011; El-Turki, Ball & Geoffrey, 2009; Pavlík et al., 2012), debido a que la reacción que se presenta genera modificaciones en la estructura de los morteros (Arandigoyen & Álvarez, 2006; Cazalla, 2002). Al parecer, durante el proceso hay un incremento en la masa y el volumen de las partículas endurecidas (Pavlík et al., 2012). Adicionalmente, se ha observado que dicho fenómeno se inicia desde la zona exterior y va hasta la zona interna de los aglomerantes (Arizzi et al., 2011).

De acuerdo con lo anterior, a escala internacional se han hecho varias investigaciones en morteros de cal, en las que se ha encontrado que el desarrollo de la resistencia está relacionado con la calidad de la cal (Lanas & Álvarez, 2003), dado que ésta influye en las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas (Vejmelková et al., 2012). También se ha observado que las tasas de endurecimiento de estos morteros son bajas, lo cual se refleja en la evolución de las propiedades mecánicas (Moropoulou, Bakolas, Moundoulas, Aggelakopoulou & Anagnostopoulou, 2005). Esto se debe a que la resistencia máxima que alcanzan estos aglomerantes se encuentra ligada con la presencia de portlandita sin

carbonatar (Lanas & Álvarez, 2003). Además de esto, la rigidez de los morteros aumenta durante la hidratación de los componentes hidráulicos de los materiales. Por tal razón, las condiciones de curado influyen en la resistencia mecánica, por las reacciones químicas que se presentan (Pozo-Antonio, 2015). Así mismo, a medida que disminuye la relación cal/agregado la resistencia decrece (Lanas & Álvarez, 2003), por lo que los morteros con mayores contenidos de cal presentan mayores resistencias debido a que son más porosos, lo cual facilita el proceso de carbonatación y por ende, el desarrollo de las propiedades mecánicas (Lanas, Pérez Bernal, Bello & Álvarez, 2006).

Como se mencionó anteriormente, al utilizar adiciones ricas en aluminosilicatos se pueden mitigar algunos problemas que se registran en los morteros de cal. Entre dichas adiciones se encuentra el metacaolín, material que al emplearse en morteros presenta algunas ventajas como aumento de resistencia mecánica, mejora de resistencia ante ataques químicos, incremento en la durabilidad, disminución de retracción por fraguado (Cazalla, 2002; Siddique, 2008). Por consiguiente, en morteros de cal adicionados con metacaolín se han observado propiedades mecánicas y microestructurales compatibles con las encontradas en materiales tradicionales (Vejmelková et al., 2012), por lo que pueden ser útiles para rehabilitaciones de mampostería (Aggelakopoulou, Bakolas & Moropoulou, 2011).

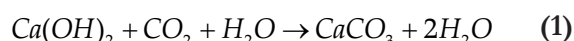
Por otra parte, en algunos estudios se han evidenciado caídas de resistencia a largo plazo en este tipo de morteros, lo cual se atribuye a la aparición de microfisuras por la retracción de las mezclas (Aggelakopoulou et al., 2011; Velosa, Rocha & Veiga, 2009). Otro factor relevante es el tipo de metacaolín, el cual puede influir en las propiedades de los morteros, como en el caso de Velosa et al. (2009), quienes encontraron que los metacaolines ricos en caolinita y alúmina pueden dar lugar a mezclas con resistencias superiores.

Otro material que se ha utilizado en morteros de cal es el polvo de ladrillo, el cual puede traer beneficios económicos y ambientales, considerando que éste tiene alta resistencia a la degradación, dificultando las actividades de acondicionamiento de desperdicios industriales (Matias, Faria & Torres, 2008). Adicionalmente, en algunos morteros históricos se han identificado partículas de ladrillo triturado. Incluso el arquitecto romano Vitruvio, en su obra *Diez libros de arquitectura*, recomendaba añadir

una porción de ladrillos triturados en los morteros, con el objetivo de aumentar su durabilidad y resistencia (Nežerka et al., 2016). Autores como Navrátilová Rovnaníková (2016), Matias et al. (2008) y Nežerka et al. (2016) observaron que la adición de polvo de ladrillo en las mezclas mejoraba las propiedades mecánicas, lo cual puede atribuirse a la reducción de fisuras por efectos de retracción, debido a la presencia de los granos de ladrillo (Nežerka et al., 2016), por lo que este tipo de aglomerantes puede ser aceptable para morteros de reparación (Matias et al., 2008).

### Carbonatación en morteros de cal

El proceso de carbonatación de los morteros incide en su tasa de endurecimiento, durabilidad y la resistencia de éstos (Pavlik et al., 2012). Adicionalmente, durante este fenómeno, en general se presentan cinco etapas (Arandigoyen & Álvarez, 2006; Papadakis et al., 1991, citados por Cazalla, 2002; Pavlik et al., 2012): difusión del  $\text{CO}_2$  en la mezcla, condensación de agua en los poros, disolución del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , disolución del  $\text{CO}_2$  en la solución de poros, finalizando con la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ . En resumen, la carbonatación se representa como la transformación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en  $\text{CaCO}_3$ , debido a la presencia de  $\text{CO}_2$ . La ecuación que describe el proceso completo es la siguiente:



### Reacciones que se producen entre el metacaolín y la cal

Dado que el metacaolín es un producto a base de sílice y alúmina, al mezclarlo con la cal y agua se presenta una reacción entre los componentes de la puzolana y el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de la cal. De esta forma, se producen silicatos cálcicos hidratados (CSH) y productos cristalinos que incluyen aluminato cálcico hidratado (CAH) y aluminosilicatos hidratados (Siddique, 2008).

### Reacciones que se producen entre el polvo de ladrillo y la cal

La reactividad de la puzolana puede verse afectada por diferentes factores: cantidad de sílice y alúmina, temperatura de cocción de los materiales cerámicos,

cantidad y tipo de arcilla que conforman las piezas cerámicas, granulometría de la adición y la finura del material triturado. Por consiguiente, cuando se mezcla el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de la cal con agua y los componentes silico-aluminosos de los elementos cerámicos, se presenta una reacción que da origen a silicatos de calcio y aluminatos de calcio. Sin embargo, algunas investigaciones indican que la reacción puzolánica depende de la reacción del sílice y la alúmina con el  $\text{CaO}$  de la cal (Matias, Faria & Torres, 2014). Lo anterior resulta análogo con el fenómeno químico que se presenta entre el metacaolín y la cal, al ser hidratados con agua.

En este artículo se presenta un estudio realizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito sobre la evolución de la resistencia a compresión, en morteros de cal, sometidos a tres ambientes de curado: cámara de humedad y temperatura, cámara de carbonatación acelerada y condiciones atmosféricas. También se evalúa el comportamiento mecánico de mezclas adicionadas con metacaolín (MK) y polvo de ladrillo (PL).

### MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el estudio se adquirieron la cal (hidráulica) y la arena de peña en la ferretería La Concordia, ubicada en el centro histórico de Bogotá. El metacaolín (Fortacret) usado como adición lo suministró la empresa colombiana Insumos Industriales Corona, mientras que el polvo de ladrillo (tamaño máximo de 300 mm) provenía de bloques número cinco, no estructurales, correspondientes a residuos de ensayos prestados por el servicio externo de los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Éstos se fragmentaron inicialmente utilizando una trituradora (figura 1), y después los trozos resultantes se pulverizaron en la máquina de Los Ángeles. El polvo obtenido se tamizó empleando el tamiz de 300 mm. La composición química de los materiales se determinó mediante fluorescencia de rayos X, utilizando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW-2440 (WDXRF). Este ensayo lo realizó el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Además, en la arena y en el polvo de ladrillo se efectuaron análisis granulométricos.

A continuación se indican las proporciones en peso utilizadas para la elaboración de las mezclas. Adicionalmente, para determinar la cantidad de agua, se



**Figura 1.** Triturado de ladrillos.  
Fuente: Los autores.

buscó obtener una fluidez cercana al 100 %. Para esto, se efectuaron ensayos de fluidez de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NTC 111, debido a que no existe una normativa nacional que se aplique para la tipología de morteros de estudio (tabla 1). Así mismo, se presentan las cantidades de materiales para un metro cúbico de cada mortero (tabla 2).

**Tabla 1**  
Proporciones de los morteros

Mortero	Denominación	Proporción
Cal : Arena	MCA	1:3
Cal : Arena : Metacaolín	MMK	1:3:0,2
Cal : Arena : Polvo de Ladrillo	MPL	1:3:1

Fuente: Los autores.

**Tabla 2**  
Dosificación de los morteros por metro cúbico

Mortero	Cal (kg)	Arena (kg)	MK (kg)	PL (kg)	Agua (kg)	Fluidez (%)
MCA	450	1350	-	-	405	101
MMK	430	1290	86	-	452	97
MPL	360	1080	-	360	454	100

Fuente: Los autores.

Los especímenes de ensayo consistieron en cubos de mortero de 50 mm de arista. Para su fabricación, se tomó como referencia el procedimiento descrito en la NTC 220, para lo cual se mezclaron los materiales y se colocaron las mezclas en moldes cúbicos. Éstos se dejaron por tres días en una cámara de humedad y temperatura, en las siguientes condiciones controladas: temperatura de  $25 \pm 2$  °C y humedad relativa de  $55 \pm 5$  %.



Posteriormente, se retiraron las muestras de los moldes y se procedió a su curado. Para esto, se utilizaron tres ambientes de curado: el primero consistió en la cámara de humedad y temperatura; el segundo correspondió a una cámara de carbonatación acelerada (figura 2), con los siguientes parámetros controlados: temperatura de 23 °C, humedad relativa de 65 % y concentración de CO<sub>2</sub> de 5 %. Este proceso se desarrolló para acelerar el proceso de envejecimiento de las mezclas y de ganancia de resistencia. El tercer ambiente de curado fue en condiciones atmosféricas, para lo cual las probetas se dejaron bajo una carpa al aire libre. De este modo, se buscaba simular las condiciones ambientales a las que pueden verse sometidos los morteros, dado que no pueden asegurarse las condiciones de laboratorio durante las actividades de rehabilitación de una edificación. Para este último ambiente de curado se fabricaron tres morteros adicionados con metacaolín y uno de cal y arena, con las mismas dosificaciones de sus homólogos.

Los ensayos de resistencia a compresión se desarrollaron en una máquina Universal Shimadzu de mil kilonewtons de capacidad. Para esto, se ensayaron tres cubos para las siguientes edades: 7, 28, 60 y 90 días para los especímenes curados en las cámaras de humedad y temperatura y de carbonatación acelerada. Con respecto a las probetas curadas en condiciones atmosféricas, las edades de ensayo fueron: 7, 28, 60 y 165 días.



**Figura 2.** Cámara de carbonatación acelerada.

Fuente: Los autores.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades químicas y físicas de los materiales

A renglón seguido se presenta la composición química de la cal, el metacaolín (MK) y el polvo de ladrillo (PL) (tabla 3). Adicionalmente, se muestran la curva granulométrica de la arena y la del polvo (figuras 3 y 4).

**Tabla 3**  
Composición química de los materiales

Cal		MK		PL	
Elemento	%	Elemento	%	Elemento	%
CaO	86,834	SiO <sub>2</sub>	58,040	SiO <sub>2</sub>	67,270
SiO <sub>2</sub>	6,666	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38,140	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,130
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,355	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,360	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,560
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,876	TiO <sub>2</sub>	1,230	K <sub>2</sub> O	1,590
MgO	0,877	K <sub>2</sub> O	0,590	TiO <sub>2</sub>	1,080
SO <sub>3</sub>	0,600	MgO	0,200	MgO	0,430
K <sub>2</sub> O	0,240	CaO	0,140	Na <sub>2</sub> O	0,350
TiO <sub>2</sub>	0,215	Na <sub>2</sub> O	0,070	CaO	0,170
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,156	SO <sub>3</sub>	0,050	Ba	0,140
SrO	0,086	Ba	0,050	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,080
MnO	0,057	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,040	SO <sub>3</sub>	0,060
ZnO	0,025	Zr	0,040	V	0,030
				Zr	0,030
				Cr	0,020
				Zn	0,020
				Sr	0,020
				Cl	0,010
				MnO	0,010

Fuente: Informes XRF-148-16, XRF-024-17 y XRF-228-17 del Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Modificado: Los autores.

Se observa que la cal tiene un alto contenido de CaO, el cual se espera que al hidratarse se transforme en Ca(OH)<sub>2</sub>, y que a su vez se precipite en CaCO<sub>3</sub> durante el proceso de carbonatación. De igual manera, se aprecia que el material presenta cierto contenido de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, compuestos que intervienen en la formación de CSH y CAH al hidratar la cal.

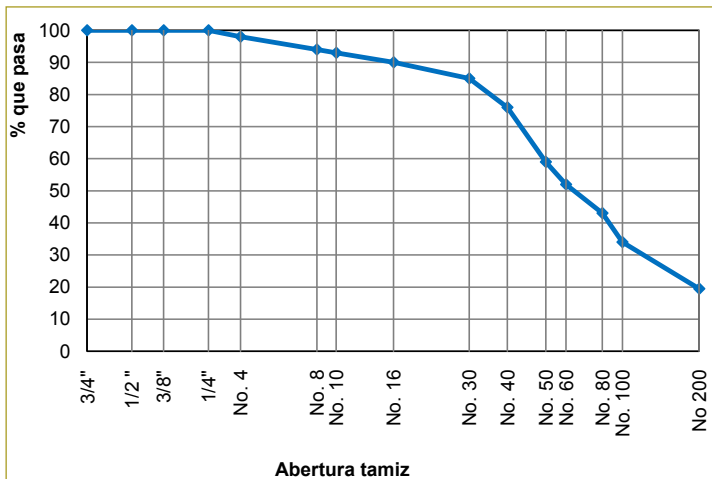
En relación con el metacaolín, se aprecia que se compone principalmente por SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, en un orden de 96,18 %. De este modo, al mezclar la adición con cal y agua, los componentes de la puzolana intervienen en la formación de CSH, CAH y aluminosilicatos hidratados. La composición química del metacaolín resultó similar

a la registrada por autores como Aggelakopoulou et al. (2011), Velosa et al. (2009) y Vejmelková et al. (2012).

Con respecto al polvo de ladrillo, se observa que en mayor grado se encuentra compuesto por  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , del orden de 90,40 %. Estos compuestos, al mezclarse con la cal y agua, intervendrán en la formación de silicatos de calcio y aluminatos de calcio.

### Resistencia a compresión

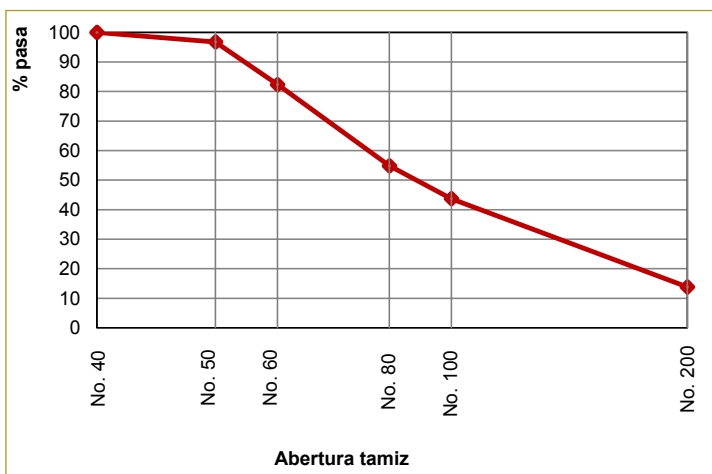
A renglón seguido se presentan los resultados de resistencia a compresión de las muestras curadas en la cámara de humedad (NC) y en la cámara de carbonatación acelerada (C), a 7, 28, 60 y 90 días. El ensayo se desarrolló en tres especímenes para cada edad.



**Figura 3.** Curva granulométrica de la arena.

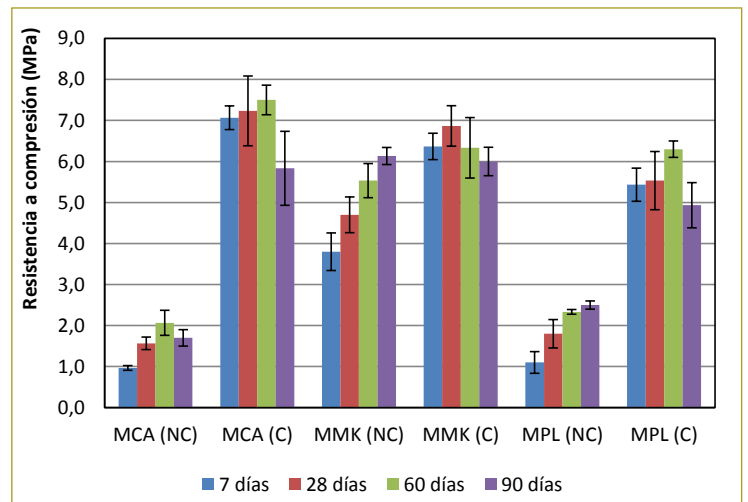
Fuente: Informe IG-024-16 del Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Modificado: Los autores.



**Figura 4.** Curva granulométrica del polvo de ladrillo.

Fuente: Los autores.



**Figura 5.** Evolución de la resistencia a compresión en morteros curados en cámara de humedad y cámara de carbonatación acelerada.

Fuente: Los autores.

Al evaluarse los resultados, se observa un incremento considerable de resistencia en la mezcla MCA (C) con respecto al mortero MCA (NC). A 7, 28, 60 y 90 días, dicho aumento fue de 631, 362, 263 y 243 %, respectivamente. Este fenómeno ratifica la tasa baja de endurecimiento de este tipo de mortero, tal como afirmaron Moropoulou et al. (2005). De igual manera, en los cubos carbonatados se observó una caída de resistencia del 22 %, autores como Velosa et al. (2009) y Aggelakopoulou (2011) atribuyen tal decremento a la aparición de microfisuras por la retracción del mortero. En las probetas sin carbonatar la baja de resistencia fue de 18 %, lo cual puede deberse a la presencia de portlandita sin carbonatar, según lo evidenciado por Lanas y Álvarez (2003).

En el mortero MMK (C), al comparar las resistencias con las de la mezcla MMK (NC), resultaron superiores en 68, 46 y 14 % a 7, 28 y 60 días; a 90 días resultó menor en 2%. Igualmente, la resistencia de las muestras carbonatadas registró un descenso de 13 %, fenómeno que también se observó en las investigaciones de Velosa et al. (2009) y Aggelakopoulou (2011), debido a la aparición de microfisuras por retracción.

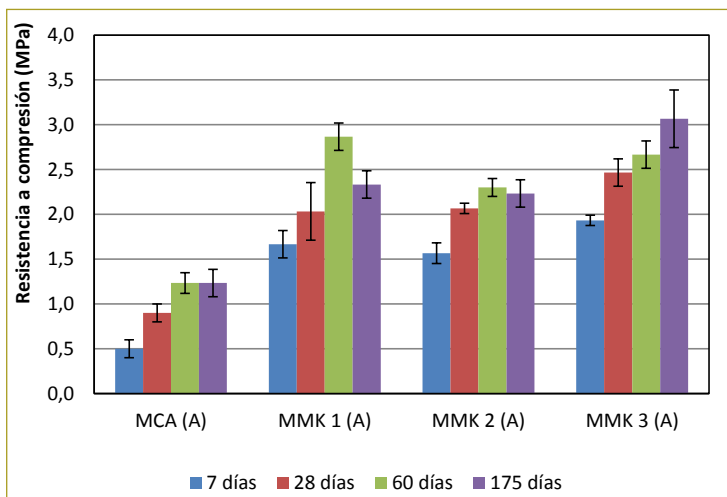
Por otro lado, las resistencias de los morteros MMK (NC) resultaron superiores entre 168 y 293 %, con respecto a las registradas en los elementos con mortero MCA (NC). Así mismo, en la mezcla MMK (C) las resistencias fueron menores que las presentadas en el mortero MCA (C), entre 5 y 16 % durante los

primeros 60 días. A 90 días, dicho valor resultó superior un 3 %.

Las resistencias del mortero MPL (C) resultaron mayores en 394, 207, 170 y 97 % a 7, 28, 60 y 90 días, respectivamente, con respecto a las evidenciadas en la mezcla MPL (NC). Para el caso de las muestras carbonatadas, se observó un decremento de 22 % en la resistencia, paralelo al apreciado en el mortero MCA (C). Fuera de lo anterior, las resistencias de los especímenes MMK (NC) resultaron mayores entre 14 y 47 % en relación con la de los ejemplares MCA (NC). En la mezcla MMK (NC), las resistencias fueron menores entre 16 y 24 %, con respecto al mortero MCA (C).

En lo referente a la evolución de la resistencia de los morteros, se evidencia que las mezclas MMK (C) y MPL (C) presentaron resistencias similares a las obtenidas en el mortero MCA (C). Esto puede atribuirse al proceso de envejecimiento acelerado en la cámara de carbonatación, puesto que los componentes de las adiciones pudieron reaccionar rápidamente con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente en la cal, formando otros compuestos como silicatos de calcio y aluminatos de calcio, lo que indica que pudo precipitarse una cantidad inferior de  $\text{CaCO}_3$  en las mezclas adicionadas. En el caso de las mezclas curadas en la cámara de humedad, las adiciones mejoraron la resistencia a compresión.

Para evaluar la resistencia a compresión en morteros curados en condiciones atmosféricas (A), se elaboraron cuatro mezclas: una de cal y arena (MCA) y tres adicionadas con metacaolín (MMK). En la figura siguiente se



**Figura 6.** Evolución de la resistencia a compresión en morteros curados en condiciones atmosféricas.

Fuente: Los autores.

indican las resistencias a compresión registradas a 7, 28, 60 y 175 días (figura 6).

Se observa que el mortero MCA (A) presentó una resistencia aproximadamente un 50 % menor que la registrada en la mezcla MCA (NC). Adicionalmente, las resistencias de los morteros MMK (A) resultaron inferiores en un 60 %, en promedio, a las obtenidas en las muestras MMK (NC). Este fenómeno puede atribuirse a las variaciones de temperatura y humedad relativa del ambiente natural, lo cual pudo generar microfisuras que afectaron las propiedades mecánicas de los morteros. Adicionalmente, dichos cambios pudieron alterar de cierta manera las reacciones químicas que influyen en el desarrollo de las propiedades mecánicas.

## CONCLUSIONES

1. Las resistencias determinadas en los morteros adicionados con metacaolín, curados en cámara de humedad y temperatura, en general triplicaron las registradas en las mezclas de cal y arena, curadas en las mismas condiciones. Además, estas últimas presentaron una tasa de endurecimiento menor, lo cual se reflejó en el desarrollo de la resistencia.
2. Los morteros adicionados con polvo de ladrillo, curados en cámara de humedad y temperatura, presentaron resistencias ligeramente superiores a las encontradas en la mezcla de cal y arena, en las mismas condiciones de curado.
3. Los morteros adicionados, curados en cámara de carbonatación, presentaron resistencias menores en relación con la mezcla de cal y arena. Esto puede deberse a que los componentes de las adiciones reaccionaron con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , presente en la cal, generando así silicatos y aluminatos de calcio. En consecuencia, no todo el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de la cal reaccionó con el  $\text{CO}_2$  para formar  $\text{CaCO}_3$ .
4. En los morteros adicionados, curados en la cámara de humedad y temperatura, no se registraron caídas de resistencia, como la observada en las muestras de cal y arena. Esto podría indicar que las adiciones ayudaron a reducir microfisuras internas por retracción.
5. En los morteros curados en el ambiente, las resistencias registradas se encontraron alrededor de la mitad de las evaluadas en las mezclas curadas en la cámara de humedad y temperatura. Posiblemente, esto se atribuye a las variaciones de la temperatu-

ra y la humedad relativa del ambiente, por lo que puede presentarse pérdida de agua en los morteros, afectando así la hidratación de la matriz cementicia. De esta manera, la resistencia a compresión se ve reducida. Adicionalmente, por dichas variaciones también pueden presentarse microfisuras internas que también afectan la resistencia. Así, las diferencias encontradas en las propiedades mecánicas de los morteros resultan importantes al momento de utilizar estos materiales en la reparación o reforzamiento de edificaciones históricas, puesto que resultaría complejo y costoso mantener condiciones controladas durante dichas actividades.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda evaluar el desarrollo de la resistencia de morteros curados bajo el agua, dado que hay varios tipos de cales hidráulicas.
2. Se aconseja evaluar la actividad puzolánica del polvo de ladrillo y verificar si se requiere algún tratamiento mecánico o térmico adicional.
3. Se recomienda realizar lecturas de retracción en las muestras, para conocer más sobre el comportamiento de los morteros.

## Agradecimientos

El autor desea manifestar su agradecimiento a la empresa Insumos Industriales Corona, por la donación del metacaolín.

## REFERENCIAS

- Aggelakopoulou, E., Bakolas, A. & Moropoulou, A. (2011). Properties of lime-metakolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*, 53(1), 15-19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.005>.
- Arandigoyen, M. & Álvarez, J. I. (2006). Carbonation process in lime pastes with different water/binder ratio. *Materiales de Construcción*, 56 (February), 5-18.
- Arizzi, A., Martínez Martínez, J., Cultrone, G. & Benavente, D. (2011). Mechanical Evolution of Lime Mortars during the Carbonation Process. *Key Engineering Materials*, 465 (January 2011), 483-486. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.465.483>.
- Ball, R. J., El-Turki, A. & Allen, G. C. (2011). Influence of carbonation on the load dependent deformation of hydraulic lime mortars. *Materials Science and Engineering A*, 528 (7-8), 3193-3199. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.12.070>.
- Cazalla, O. (2002). *Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico*. Universidad de Granada. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/10481/28626>.
- El-Turki, A., Ball, R. & Geoffrey, A. (2009). The effect of carbonation on the mechanical and microstructural properties of lime and cement mortars. En *11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (Nocmat 2009)* (p. 8). Bath: University of Bath. Recuperado a partir de [http://opus.bath.ac.uk/21017/1/2009\\_NOCMAT\\_El\\_Turki\\_et\\_al\\_Paper\\_39.pdf](http://opus.bath.ac.uk/21017/1/2009_NOCMAT_El_Turki_et_al_Paper_39.pdf)
- Forster, A. (2012). Masonry Repair Options and Their Philosophical Ramifications. En J. Weber, K. Bayer & F. Pintér (eds.), *Historic Mortars* (vol. 7, pp. 197-206). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0>.
- Gleize, P. J. P., Motta, E. V., Silva, D. A. & Roman, H. R. (2009). Characterization of historical mortars from Santa Catarina (Brazil). *Cement and Concrete Composites*, 31(5), 342-346. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.013>.
- Iucolano, F., Liguori, B. & Colella, C. (2013). Fibre-reinforced lime-based mortars: A possible resource for ancient masonry restoration. *Construction and Building Materials*, 38, 785-789. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.050>.
- Lanas, J. & Álvarez, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1867-1876. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2).
- Lanas, J., Pérez Bernal, J. L., Bello, M. A. & Álvarez, J. I. (2006). Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 951-960. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.10.004>.
- Lourenço, P. B., Van Hees, R., Fernandes, F. & Lubelli, B. (2014). Characterization and Damage of Brick. En A. Costa, J. Miranda, & H. Varum (eds.), *Structural Rehabilitation of Old Buildings* (vol. 2, pp. 109-130). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39686-1>.
- Luque, A., Cultrone, G. & Sebastián, E. (2010). The use of lime mortars in restoration work on architectural heritage. En M. Bos-ternaru, R. Prikryl & Á. Török (eds.), *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures* (pp. 197-207). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2684-2_11).
- Maldonado, N., Martín, P. & Maldonado, I. (2011). Seismic Mitigation of a Historic Masonry Building. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 5(1), 61-70. <https://doi.org/10.2174/1874836801105010061>.
- Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I. & Kilikoglou, V. (2005). Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1577-1586. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.001>.
- Matias, G., Faria, P. & Torres, I. (2008). Lime mortars with brick dust and grounded particles for ancient masonry: development and evaluation. En *HMC08-Historical Mortars Conference* (p. CD). LNEC.
- Matias, G., Faria, P. & Torres, I. (2014). Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. *Construction & Building Materials*, 73, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028>.
- Mercado, E. (2007). Patrimonio edificado de propiedad privada: relación compleja y contradictoria entre lo público y lo privado en el Centro Histórico de Morelia. *Intervención (México, D.F.)*, (4), 27-34. Recuperado a partir de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-249X2011000200006&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-249X2011000200006&script=sci_arttext).
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Aggelakopoulou, E. & Anagnostopoulou, S. (2005). Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries. *Cement and*



- Concrete Composites*, 27(2), 289-294. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.017>.
- Navrátilová, E. & Rovnaníková, P. (2016). Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. *Construction and Building Materials*, 120, 530-539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.062>.
- Nežerka, V., Antoš, J., Litoš, J., Tesárek, P. & Zeman, J. (2016). An integrated experimental-numerical study of the performance of lime-based mortars in masonry piers under eccentric loading. *Construction and Building Materials*, 114, 913-924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.013>.
- Pavlík, Z., Benešová, H., Matiašovský, P. & Pavlíková, M. (2012). Study on Carbonation Process of Several Types of Advanced Lime-Based Plasters. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 70(2), 1005-1009. Recuperado a partir de <http://waset.org/journals/waset/v70/v70-187.pdf>.
- Peñaranda, L. (2011). *Manual para la conservación del patrimonio arquitectónico habitacional de Sucre*. Sucre. Recuperado a partir de [http://www.aecid.es/Centro-Documentacion/Docu-mentos/Publicaciones\\_coeditadas\\_por\\_AECID/Manual\\_de\\_Intervencixn\\_PRAHS.pdf](http://www.aecid.es/Centro-Documentacion/Documentos/Publicaciones_coeditadas_por_AECID/Manual_de_Intervencixn_PRAHS.pdf).
- Pozo-Antonio, J. S. (2015). Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials*, 77, 472-478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115>.
- Siddique, R. (2008). Metakaolin. En *Waste Materials and By-Products in Concrete* (pp. 41-92). Punjab: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74294-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74294-4_2).
- Vejmelková, E., Keppert, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P. & Černý, R. (2012). Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials*, 31, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.084>.
- Velosa, A. L., Rocha, F. & Veiga, R. (2009). Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 6(1), 121-126.