

SOBRE LA ELECCIÓN DE ARENAS Y CALES EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS Y SUS PROPIEDADES

¹ Alejandro Sánchez, F.J.; ¹ Martín del Río, J.J.; ² Espinosa Gaitán, J. y ² Ontiveros Ortega, E.*

¹ Dpto. Construcciones Arquitectónicas II, E. U. Arquitectura Técnica. Avda. Reina Mercedes nº4A, 41012 Sevilla, España.

² Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Centro de Investigación y Análisis. Camino de los Descubrimientos s/n, 41071 Sevilla, España.

falejan@us.es

ABSTRACT

En el presente trabajo se expone la investigación que se ha desarrollado para determinar la influencia que tienen en las propiedades de los morteros de cal el empleo de arenas de distinta naturaleza: silíceas, calizas y marmolinas, en combinación con el empleo de cales aéreas hidratadas en polvo y cales en pasta con dos edades de envejecimiento. Se han fabricado distintas familias de morteros de cal de dosificación 1:3 en peso, determinándose de acuerdo a normas UNE-EN la consistencia en estado fresco, el contenido de carbonato de calcio (velocidad de carbonatación), las porosidades abiertas y las resistencias mecánicas a las edades de 28 días, 6 meses, 12 meses, 18 meses y 24 meses. Los resultados obtenidos indican que las mayores resistencias se obtienen con el árido calizo y la cal en pasta añeja, las menores porosidades con el árido silíceo y la mayor velocidad de carbonatación se produce habitualmente en los morteros elaborados con cales en pasta y arenas carbonatadas.

1. Introducción

Desde el momento en que se toma conciencia de la importancia que tienen los morteros aplicados en las intervenciones de restauración sobre edificios y monumentos patrimoniales, se empiezan a desarrollar las primeras investigaciones sobre las propiedades de los distintos morteros empleados en conservación, sobre todo los basados en cal [1]. Una vez alcanzado el consenso sobre la idoneidad de los morteros de cal en la reparación/sustitución de juntas de fábricas, revestimientos continuos, frescos, etc., muchos investigadores empiezan estar de acuerdo en la necesidad de mantener la cal apagada por un amplio periodo de tiempo bajo agua antes de su empleo con el objetivo de mejorar sus propiedades [2-6]. Los estudios más recientes llevados a cabo [7-10] demuestran como amplios periodos de reposo de la cal en pasta (envejecimiento o añejado > 1 año y hasta 14 años) producen cambios en la morfología y tamaño de los cristales de la cal, que se traducen en un aumento de la superficie específica de la cal, generando en el mortero una mayor plasticidad y trabajabilidad, capacidad de retención de agua, mayor velocidad de carbonatación y mejores resistencias mecánicas, en comparación con los resultados procedentes de la cal hidratada en polvo comerciales.

En el presente trabajo se investigan como aspectos novedosos: el empleo de cales en pasta con envejecimientos intermedios (1 mes y 3 años) respecto a investigaciones previas [8,9], la influencia de proceso de secado de la cal en pasta sobre las propiedades del mortero, y finalmente la importancia de la naturaleza del árido en las propiedades del mortero [1,7], pero con la particularidad de la utilización de una granulometría similar en todas las arenas que se han empleado.

2. Componentes y dosificación de los morteros

2.1. Componentes

Los componentes seleccionados para la confección de los morteros han sido:

- **Cal cálcica hidratada en polvo de 1 mes**, suministrada por la empresa Gordillo's de Morón de la Frontera (Sevilla).
- **Cal cálcica en pasta de 1 mes**, sin tamizar, apagado manual en balsa, suministrada por la empresa Gordillo's de Morón de la Frontera (Sevilla).
- **Cal cálcica en pasta envejecida (3 años)**, tamizada (< 1mm), apagado manual en balsa, suministrada por la empresa Gordillo's de Morón de la Frontera (Sevilla).
- **Arena normalizada silíceas** según norma UNE-EN 196-1 [11].
- **Marmolina** de machaqueo procedente de la zona de Macael (Almería).
- **Arena caliza** obtenida por machaqueo procedente de la zona de Estepa (Sevilla).

2.2. Dosificación de los morteros

La dosificación elegida para desarrollar la investigación ha sido la 1:3 (en peso), que es una de las que más habitualmente se emplea en los morteros de cal. Se ha decidido realizarla en peso para conseguir mayor precisión, sobre todo en la dosificación de la cal. Cuando se trataba de cal en pasta, se procedió previamente al secado de la misma para evitar imprecisiones derivadas de la falta de homogeneidad de la pasta, también de esta forma se conseguía estudiar la

influencia que tiene el secado de la pasta envejecida en las propiedades del mortero. Se consideró oportuno trabajar con una relación a/cal constante y similar para todos los tipos de morteros, intentando que la mayoría de ellos estuvieran dentro del intervalo de consistencia plástica (140mm-200mm) según norma UNE-EN 1015-6 [12]. La designación, dosificación, relación a/cal y consistencia de los distintos tipos de morteros se exponen en la Tabla 1.

3. Metodología

3.1. Caracterización de los componentes

Se han analizado las materias primas con las que se han elaborado las probetas de mortero para establecer su composición química y mineralógica, empleando las siguientes técnicas:

- **Análisis químico** de elementos mayoritarios y trazas por Fluorescencia de Rayos X (FRX). Se ha usado un equipo marca Panalytical modelo AXIOS que permite el análisis químico elemental cualitativo y cuantitativo desde el O al U en un amplio rango de concentraciones, desde componentes mayoritarios a trazas, del Laboratorio de Rayos X del Centro de Investigación, Tecnología e Innovación de la Universidad de Sevilla (CITIUS).
- **Composición mineralógica** mediante Difracción de Rayos X (DRX), con un Difractómetro BRUKER perteneciente también al Laboratorio de Rayos X.
- **Estudio granulométrico** del árido, tomando como referencia la arena normalizada de naturaleza silícea definida en la UNE-EN 196-1 (utilizada para la determinación de resistencias mecánicas de los cementos). Se ha estudiado su granulometría mediante la serie de tamices normalizada de 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2 y 4mm, y la curva obtenida que ha servido para reelaborar la granulometría de las arenas calizas y marmóreas (marmolina).

Designación, Tipo Mortero	Dosificación 1:3 peso	Humedad % relación a/cal	Consistencia mm
M1, arena silícea Cal pasta añeja 3 años tamizada	1350gr arena 450gr cal-410gr agua	18,55 / 0.91	165
M2, arena silícea Cal pasta (1 mes)	1350gr arena 450gr cal-410gr agua	18,55 / 0.91	181
M3, arena silícea Cal polvo (1 mes)	1350gr arena 450gr cal-410gr agua	18,55 / 0.91	206
M4, marmolina Cal pasta añeja 3 años tamizada	1350gr arena 450gr cal-410gr agua	18,55 / 0.91	161
M5, marmolina Cal pasta (1 mes)	1350gr arena 450gr cal-410gr agua	18,55 / 0.91	180
M6, marmolina Cal polvo (1 mes)	1350gr arena 450gr cal-410gr agua	18,55 / 0.91	215
M7, arena caliza Cal pasta añeja 3 años tamizada	1350gr arena 450gr cal-410gr agua	18,55 / 0.91	145
M8, arena caliza Cal pasta (1 mes)	1350gr arena 450gr cal-410gr agua	18,55 / 0.91	160
M9, arena caliza Cal polvo (1 mes)	1350gr arena 450gr cal-410gr agua	18,55 / 0.91	177

Tabla 1. Designación, dosificaciones y consistencia de los morteros

3.2. Determinación de las propiedades de los morteros

Se han realizado diversos ensayos sobre los morteros, tanto durante el proceso de elaboración, sobre el mortero fresco, como durante el endurecimiento de los mismos, seguimiento de la evolución de la carbonatación, resistencias mecánicas, porosidad y densidades. Los estudios realizados son los que siguen:

- Determinaciones sobre el mortero fresco:

Consistencia. Según la norma UNE-EN 1015-3 [13] mediante la mesa de sacudidas.

Contenido en agua (% humedad). Se ha calculado a través de la dosificación y los pesos.

- Determinaciones sobre el Mortero Endurecido.

Evolución de la carbonatación. Se ha determinado el contenido en CaCO_3 mediante el calcímetro de Bernard según la norma UNE 103200 [14] a los 28 días, 6, 12 y 18 meses.

Densidad real, aparente y porosidad. La porosidad abierta a 28 días, 6, 12, 18 y 24 meses se determina por el método de la absorción de agua a vacío, siguiendo el procedimiento propuesto en la norma UNE-EN 1936 [15]. En el mismo ensayo se obtiene la densidad aparente y la real.

Resistencias mecánicas. Se ha medido la resistencia a la flexión y a compresión a 28 días, 6, 12, 18 y 24 meses, siguiendo la norma UNE EN-1015-11 [16]. Se ha empleado una prensa electromecánica marca TCCSL modelo PCI-30tn de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Sevilla.

4. Resultados

4.1. Caracterización de los componentes

4.1.1. Composición química

Los resultados obtenidos para la composición química de los componentes empleados se muestran en la Tabla 2. Se puede observar como la composición de las arenas era la que cabría esperar teniendo en cuenta su naturaleza, solo se ha de destacar que la marmolina es de tipo dolomítico debido a su alto contenido de MgO . Respecto a las cales se puede observar que existen una gran similitud en la composición de las cales en pasta, son cales aéreas de tipo cálcico. La cal en polvo tiene un mayor contenido de MgO , pero está por debajo del 5% indicado en la norma UNE-EN 459-1 [17] para las cales cálcicas.

MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	PC	TOTAL
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
árido calizo	0,06	0,05	0,13	0	0,06	55,22	N.D.	0,02	N.D.	0,03	0,01	43,25	98,83
árido marmolina	0,01	0,03	0,07	0	21,8	30,87	0,06	0,01	0,01	0,01	N.D.	46,14	99,01
árido silíceo	98,38	0,39	0,13	0	0,01	0,05	N.D.	0,05	0,09	0,01	0	0,25	99,38
cal pasta seca	0,07	0,05	0,06	0,01	0,14	73,45	0,01	0,02	N.D.	0,02	N.D.	24,14	97,95
cal pasta seca añeja	0,14	0,06	0,08	0,01	0,14	73,17	0,01	0,02	N.D.	0,03	N.D.	24,35	98
cal polvo	0,62	0,26	0,15	0	3,5	65,82	N.D.	0,08	N.D.	0,05	0,3	26,96	97,69

Tabla 2. Composición química de los áridos y de las cales

4.1.2. Composición mineralógica

El estudio mineralógico de los áridos confirma que el árido calizo está compuesto mayoritariamente por calcita CaCO_3 (>98%), la marmolina está compuesta por mayoritariamente por dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (>97%) y trazas de albita, y finalmente la arena silícea por cuarzo (>97%).

Las cales están formadas principalmente por portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y minoritariamente por CaCO_3 (fig.1). La semicuantificación indica que los contenidos de calcita son del 16%, 5% y 5% para cal en polvo, en pasta joven y en pasta añeja, respectivamente. Si se consideran los $\% \text{CO}_2$ establecidos por la UNE-EN 459-1, la cal en polvo se puede clasificar como una CL 80 y las dos cales en pasta como CL90.

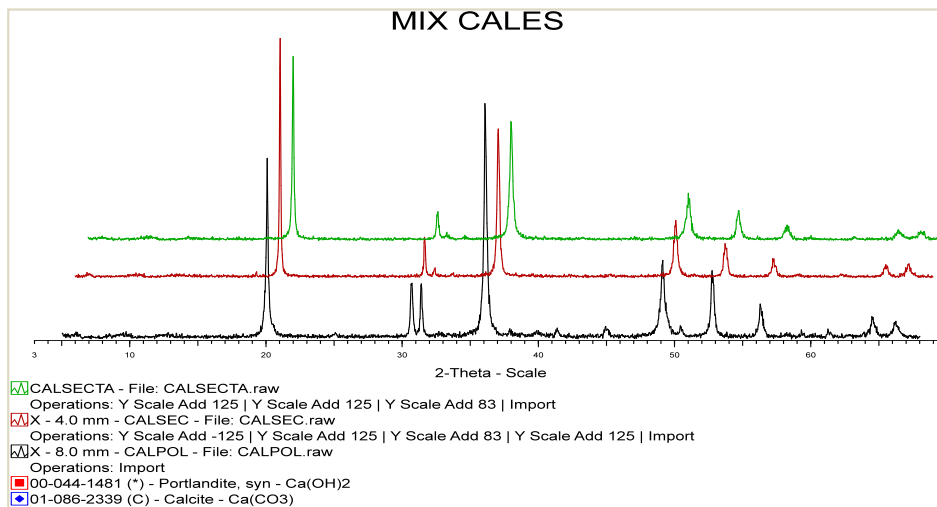


Fig. 1 Diffractogramas de la cal en polvo, en pasta de 1 mes y en pasta añeja.

4.1.3. Estudio granulométrico

En la arena normalizada UNE-EN 196-1 se ha elaborado su curva granulométrica, comparándola con los límites máximo y mínimo de máxima compacidad (fig.2). Su tamaño máximo ha sido de 2mm y su contenido de finos < 0,063mm ha sido del 0,67%. Esta distribución granulométrica ha servido como referencia para corregir la granulometría de la arena caliza y de la marmolina, para que sea exactamente igual a la de la silícea normalizada, evitando de esta forma la influencia de este factor en las propiedades de los morteros.

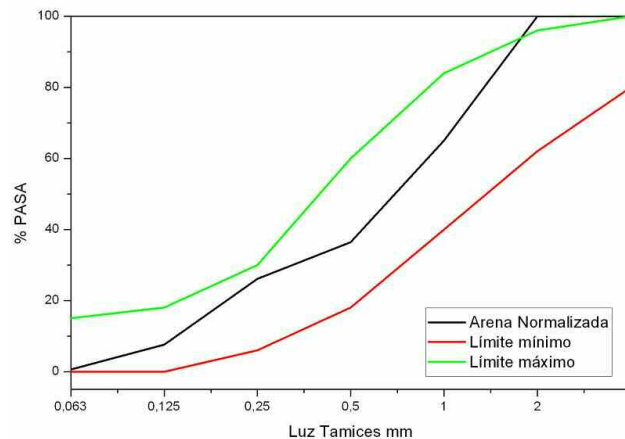


Fig. 2 Curva granulométrica de la arena normalizada UNE-EN 196-1

4.2. Determinación de las propiedades de los morteros

4.2.1. Consistencia

Los resultados obtenidos para la consistencia permiten extraer dos conclusiones: la primera es que para los 3 tipos de arena y empleando la misma a/cal se puede observar como la consistencia es menor siguiendo el orden cal pasta añeja > cal pasta joven > cal hidratada en polvo, y la segunda, es que a igualdad de tipo de cal y empleando la misma a/cal la consistencia es menor siguiendo el orden arena caliza > marmolina > arena sílicea. El primer efecto se puede justificar debido al tamaño más pequeño que tienen los cristales de cal en pasta añeja que hace que tenga más superficie específica y mayor capacidad de retención de agua [8,9] frente a la cal hidratada en polvo. El segundo efecto se debe a la porosidad y capacidad de absorción de agua de las arenas, siendo el orden arena caliza > marmolina > arena sílicea, lo que limita el agua libre de amasado en el mortero fresco.

4.2.2. Evolución de la carbonatación

La evolución de la carbonatación se ha estimado mediante la realización del análisis químico de los carbonatos presentes en el mortero a las edades de 28 días, 6, 12 y 18 meses. En el caso de los morteros de arena sílicea 1:3 en peso, se parte únicamente del contenido de CaCO_3 que tenía inicialmente la cal y se ha estimado mediante estequiometría química que el 100% de carbonatación correspondería a un 31% de CaCO_3 , y para los confeccionados con marmolina del 98% de CaCO_3 y del 99% de CaCO_3 para los de arena caliza.

Los resultados se han representado en tres gráficas correspondientes a los tres tipos de arenas y cales empleadas (fig.3). En su interpretación parece que a priori los morteros elaborados con cal en polvo son los que se han carbonatado más rápidamente, pero se ha de tener en cuenta que la cal hidratada en polvo era una CL80 que contenía un 16% de CaCO_3 y con la relación 1:3 en peso, inicialmente todos estos morteros partían con un 4% CaCO_3 adicional, por lo que se sitúan entre cal en pasta añeja y joven en el caso del árido síliceo, los más lentos en carbonatarse para la marmolina, y nuevamente entre cal en pasta añeja y cal joven para el árido calizo. Los morteros elaborados con cal en pasta añeja son los que se han carbonatado más rápidamente en la mayoría de los casos. Este efecto se ha justificado por la mayor superficie específica de los cristales de portlandita que son más pequeños en las cales en pasta añejas y tienen mayor reactividad [8,9]. También se ha de destacar que de las tres arenas, las de naturaleza sílicea son las que han tenido un menor nivel de carbonatación, sobre todo en el rango de tiempo que va desde 6 meses a 18 meses. Este efecto puede justificarse debido a que la presencia mayoritaria de CaCO_3 tanto en la marmolina como en el árido calizo actúe como acelerador del proceso de carbonatación.

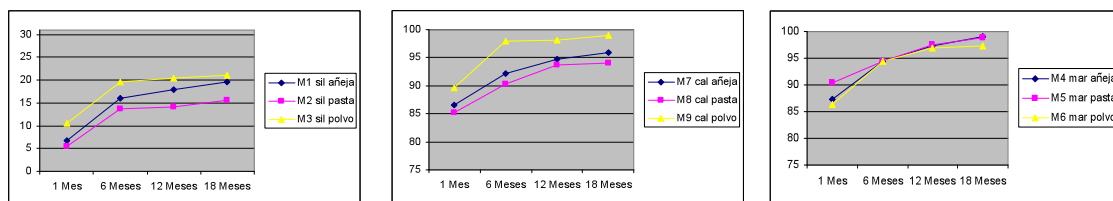


Fig. 3 Evolución de la carbonatación frente al tiempo para los morteros elaborados con distintas cales y arenas

4.2.3. Densidad aparente y porosidad

Los resultados correspondientes a la densidad real (D_r) y aparente (D_a) se exponen en la fig. 4, y los de la porosidad en la fig. 5. Se puede observar como la D_r ha estado dentro del rango de 2,5-3 gr/cm³ habitual para este tipo de morteros [9] compuestos por cuarzo ($d_r=2,65$ gr/cm³), calcita ($d_r=2,71$ gr/cm³) y portlandita ($d_r=2,26$ gr/cm³), siendo mayor para los elaborados con arenas carbonatadas. En general, se puede observar como el proceso de carbonatación genera un aumento de la D_r por la transformación de la $Ca(OH)_2$ en $CaCO_3$.

Los valores de D_a han oscilado dentro del intervalo de 1,7- 1,9 gr/cm³ que también puede considerarse como normal [1,8], y un ligero incremento durante el proceso de carbonatación que se debe tanto a la disminución de la porosidad (fig.5) como al aumento de la D_r .

Finalmente, la porosidad abierta ha oscilado entre el 29% al 32% que también puede considerarse como habitual para estos materiales [1,8,9]. En la fig.5 se puede apreciar como a medida que los morteros se carbonatan se produce un ligera disminución de la porosidad ($\approx 1\%$), hecho justificado por el aumento de un 11,8% de volumen de sólido cuando la portlandita se transforma en calcita [8].

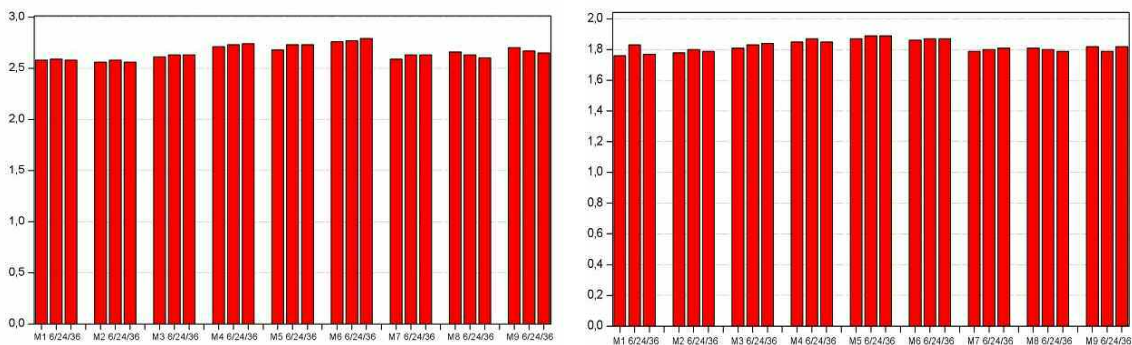


Fig. 4 Evolución de la densidad real (izda.) y aparente (dcha.) frente al tiempo para los morteros elaborados con distintas cales y arenas

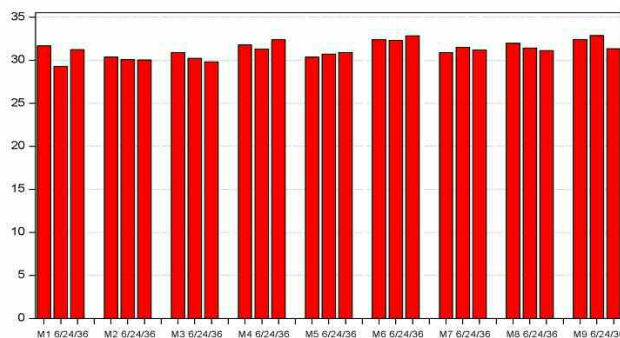


Fig. 5 Evolución de la porosidad frente al tiempo para los morteros elaborados con distintas cales y arenas

4.2.4. Resistencias mecánicas

Los resultados de la Resistencia a flexión (R_f) y la Resistencia a compresión (R_c) a la edad de 28 días, 6, 12 18 y 24 meses se han representado en la fig.5. Lamentablemente para la R_f no se han podido obtener datos para los morteros elaborados con marmolina y arena caliza debido a la escasez de probetas, si se

han podido completar para los de arena silíceas, de los que no se pueden obtener resultados concluyentes sobre que tipo de cal ofrece mejores resultados, ya que están todas muy próximas al final.

Respecto a la Rc, se puede observar claramente como el mortero elaborado con cal en pasta añeja y arena caliza ha sido el de mayor resistencia a 2 años de edad, y como el de cal en pasta joven y cal en polvo e igual arena son los 3º y 4º, respectivamente. El 2º en resistencia ha sido nuevamente elaborado con cal en pasta añeja y marmolina. Por el contrario, el árido elaborado con arena silíceas y cal en polvo ha sido el de menor resistencia, y los confeccionados con la misma arena pero con cal en pasta joven y añeja son los 3º y 4º, respectivamente, con menor resistencia.

El efecto de la naturaleza del árido se puede explicar por la mayor afinidad y similitud de los áridos carbonatados con la matriz conglomerante de la cal, una vez carbonatada. Cazalla et al. [7] también encontraron mayores resistencias empleando marmolinas frente a arenas silíceas, justificando que se debía a su mayor reactividad con la cal y a su morfología angulosa. En este caso también se observa como a igualdad de composición (CaCO_3), las arenas calizas se han comportado mejor frente a marmolinas, este hecho se debe probablemente al mayor parecido entre la estructura cristalina de la caliza y la matriz de cal, y a la mayor porosidad que hace que mejore la adherencia en la interfase árido-pasta de cal.

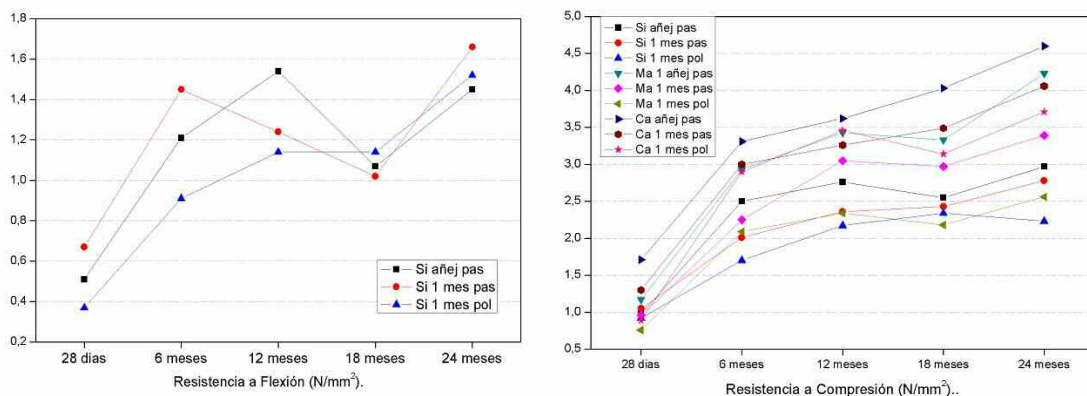


Fig. 5 Resistencias a flexión (izda.) y a compresión (dcha.) frente al tiempo para los morteros elaborados con distintas cales y arenas

5. Conclusiones

Las principales conclusiones que se pueden extraer la investigación son:

- El empleo de cales en pasta en morteros elaborados con arenas silíceas, calizas o marmolinas incrementa la velocidad de carbonatación y las resistencias mecánicas de los mismos. Estos efectos se han apreciado con la cal joven (1 mes) y en mayor medida en la añeja (envejecida 3 años) sobre la cal hidratada en polvo, y parecen no estar influidos por el proceso de secado que han sufrido las pastas previo a la dosificación de los morteros.

- A igualdad de relación a/cal de amasado, los morteros elaborados con cales en pasta alcanzan un menor nivel de consistencia debido a la mayor superficie específica de la cal y a su mayor capacidad de retención de agua, que deja menos agua libre en el mortero.
- Las arenas de naturaleza carbonatada, en especial las calizas en mayor medida que las marmolinas, incrementan las resistencias a compresión de los morteros a igualdad de dosificación y de relación a/cal. Por el contrario, los peores resultados mecánicos y lenta carbonatación se obtienen con las arenas silíceas.
- El proceso de carbonatación incrementa ligeramente la densidad real y aparente de los morteros, mientras que disminuye ligeramente su porosidad abierta.

REFERENCIAS

- [1] Peroni, S.; Tersigni, G.; Torraca, G.; Cerea, S.; Forti, M.; Guidobaldi, F.; Rossi-Doria, P.; De Rege, A.; Picchi, F.J.; Pietrafitta, G.; Benedetti, G. (1981). Lime based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes. En *Mortars, Cements and Grouts used in Conservation of Historic Building*, 63-99, Roma, Italia.
- [2] Ashurst, J. (1990). Mortars for Stone Buildings. En *Conservation of Building and Decorative Arts*, Vol. 2. pp. 78–96, Ashurst and Dimes (Eds). Butterworths, London , U.K.
- [3] Mazzocchi, L. (1946). *Cementos y Cales*. G. Gili, Barcelona, España.
- [4] Orus-Asso, F. (1981). *Materiales de Construcción*. Dossat, Madrid, España.
- [5] Gomá, F (1979). *El Cemento, Portland y otros Aglomerantes*. Editores Técnicos Asociados, Barcelona , España.
- [6] Lynch, G. (1998). Lime Mortars for Brickwork: Traditional Practice and Modern Misconceptions—Part One. *J. Archit. Conserv.*, 1, 7–20.
- [7] Cazalla Vázquez, O.; Sebastián Pardo, E.M.; De La Torre López, M.J.; Rodríguez-Navarro, C.; Valverde Espinosa, I.; Zezza, U. (1998). El rol de la evolución de la carbonatación en morteros de cal. En *IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*, pag. 227-229, La Habana, Cuba.
- [8] Cazalla-Vázquez, O. Rodríguez-Navarro, C.; Sebastián, E.; Cultrone, G.; De la Torre, M.J. (2000). Aging of lime putty: effects on traditional lime mortars carbonation. *Journal of the American Ceramic Society*, 83, 1070-76.
- [9] Cazalla, O.; Rodríguez-Navarro, C.; Cultrone, G.; Sebastián, E.M.; Eler, K. (2002). The carbonation of lime mortars: the influence of aging lime putty. En *Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities*, Galán and Zezza (Eds), pag 139-144, Sevilla, España.
- [10] Cazalla-Vázquez, O. (2002). *Morteros de cal. Aplicación en patrimonio histórico*. Tesis Doctoral. Univ. Granada.
- [11] UNE-EN 196-1. (2005). *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*.

[12] UNE-EN 1015-6. (1999). Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.

[13] UNE-EN 1015-3. (2000). Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).

[14] UNE 103200.(1993).Determinación del contenido de carbonatos en los suelos.

[15] UNE-EN-1936.(2007). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total

[16] UNE-EN-1015-11.(2000). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.

[17] UNE-EN-459-1. (2002). Cales para la construcción. Parte 1. Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer al Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico (IAPH) el apoyo y asesoramiento técnico realizado, así como la financiación del Contrato de Investigación "Caracterización de materiales tradicionales empleados en el patrimonio inmueble: morteros y materiales cerámicos (OG-106/05)".