

## Propiedades y Durabilidad de los Morteros de Cal y Metacaolín



M. Teresa Blanco-Varela  
Dr. Ciencias Químicas  
Instituto de Ciencias de la  
Construcción Eduardo  
Torroja (CSIC)  
Spain  
blancomt@ietcc.csic.es



Sagrario Martínez-  
Ramírez  
Dr. Ciencias Químicas  
Instituto de Ciencias de la  
Construcción Eduardo  
Torroja (CSIC)  
Spain  
sagrario@ietcc.csic.es



Carlos Fortes-Revilla  
Dr. Ciencias Químicas  
EGELCO  
Spain  
laboratorio@egelco.es

**Abstract:** En este trabajo se ha diseñado un nuevo mortero de base cal intentando mejorar algunas de sus propiedades, elevada porosidad, bajas resistencias mecánicas y baja durabilidad frente a ciclos hielo/deshielo y cristalización de sales. El nuevo mortero se obtiene sustituyendo parte de la cal por el metacaolín que es un material puzolánico de elevada superficie específica y elevado contenido de óxidos ácidos. Se estudia la influencia de la composición, condiciones de curado y presencia de aditivos en la porosidad y durabilidad de los morteros, observándose cómo la relación cal/metacaolín es el factor que mas influye en las propiedades seguido de la presencia de aditivo.

**Keywords:** morteros, cal, metacaolín, durabilidad.

### 1. INTRODUCCION

Las aplicaciones de los morteros de cal están directamente relacionadas con sus propiedades, elevada permeabilidad al agua líquida y vapor; bajo módulo de elasticidad, elevada compatibilidad con otros materiales de construcción, etc [1,2]. Por otra parte son morteros muy porosos con bajas resistencias mecánicas y poco durables sobre todo frente a ciclos hielo-deshielo.

Con el fin de mejorar los valores de resistencia y durabilidad se sustituye parcialmente la cal por otros materiales tales como puzolanas, arcillas, etc [3]. En este sentido, cabe hablar de un material puzolánico de futuro prometedor, el metacaolín (MK) que se obtiene por deshidratación del caolín a temperaturas entre 600-700°C. El MK es un material amorfo

de elevada superficie específica y con elevado contenido de óxidos ácidos ( $Al_2O_3 + SiO_2$  superior al 90%) por lo que reacciona rápidamente con la portlandita. Frías y Cabrera [4, 5] estudiaron la hidratación de las mezclas de cal y metacaolín, y vieron que la cal se consumía muy rápidamente en las primeras 50h.

Se ha diseñado un nuevo mortero de cal con metacaolín, estudiándose la influencia de diferentes variables (composición, condiciones de curado, aditivos) en su porosidad resistencia mecánica y durabilidad frente a diferentes agentes agresivos (cristalización de sales, hielo-deshielo y humedad-secado).

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

La Tabla 1 muestra el análisis químico de las materias primas utilizadas en la preparación de los morteros. El metacaolín (MK) se obtuvo por calentamiento a  $750^\circ C$  durante 24 horas del caolín.

En la Tabla 2 se muestran las cantidades de cal (SL), MK, árido, agua y aditivo utilizado en la preparación de los 4 tipos de morteros. La cantidad de agua añadida se determinó de acuerdo a la normativa española [6], para obtener morteros con igual escurrimiento. Se prepararon probetas prismáticas de  $10 \times 10 \times 60$  mm de los morteros que se curaron en cámara a 100% de humedad relativa y  $21^\circ C$  durante 45 días. A continuación se dejaron al aire al 60% de humedad relativa y  $21^\circ C$  durante 10 ó 30 días para producir la carbonatación natural.

En algunas probetas de utilizó un aditivo, el PCP (policarboxilato de polioxoetileno) mezclado con agua en un 2% en peso de ligante [7].

Tabla 1. Análisis químico de los materiales de partida (%wt)

	IR	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> <sup>§</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>‡</sup>
cal	0.03	0.39	0.16	0.24	72.1	--	---	---	5.52	20.94
Árido <sup>n</sup>	0.4	98.92	0.18	0.06	0.00	0.28	---	---	---	--
MK <sup>n</sup>	0.41	55,42	43,32	0.64	0.2	---	0.02	0.06	---	---

<sup>n</sup>Fusión alcalina. <sup>§</sup>Pérdida al fuego entre  $500^\circ C$  y  $1000^\circ C$ .

<sup>‡</sup>Pérdida al fuego entre  $105^\circ C$  y  $500^\circ C$ .

Tabla 2. Dosificación de los morteros.

Mortero	SL/MK	SL+MK/árido	Aditivo	Agua/ SL+MK
I.1	1:1	1:2	SI	0.553
I.2		1:5		0.768
II.1	1:2	1:2		0.509
II.2		1:5		0.80
III.1	1:1	1:2	NO	0.975
III.2		1:5		1.28
IV.1	1:2	1:2		1.00
IV.2		1:5		1.33

## 2.2. Caracterización

La caracterización de las materias primas se realizó a través de difracción de rayos X (DRX) en un intervalo de  $2\theta = 5$  a  $60^\circ$  en un difractómetro Philips PW-1730. El metacaolín se identificó además por FTIR en el intervalo  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  en un ATI Mattson Genesis.

Se prepararon morteros prismáticos de  $10 \times 10 \times 5$  mm y  $10 \times 10 \times 60$  mm sobre los que se midieron las resistencias mecánicas a compresión y la porosidad.

La composición mineralógica de las fases cristalinas se determinó por DRX. Puesto que el principal producto de la reacción puzolánica es el gel C-S-H de naturaleza amorfa, la posible reacción se siguió mediante a) determinación del  $\text{Ca(OH)}_2$  libre (método del etilenglicol [8], b) contenido de  $\text{CaCO}_3$  determinado por la pérdida al fuego entre  $500^\circ\text{C}$  y  $1000^\circ\text{C}$ ; c) residuo insoluble en HCl (diluido) [9].

## 2.3. Ensayo de Cristalización de Sales.

Este ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia de los materiales a los daños causados por los ciclos de cristalización, disolución y recristalización de sales en su interior [10]. Este ensayo se realizó de acuerdo a las normas RILEM [11], sobre probetas cúbicas de mortero ( $30 \times 30 \times 30$  mm), cuya dosificación se muestra en la Tabla 3, curadas durante 7 días a  $40^\circ\text{C}$  y 100% de HR; posteriormente se carbonataron en cámara de  $\text{CO}_2$ , a  $21^\circ\text{C}$  y HR = 50%, hasta consumo de la portlandita restante .

Tabla 3.- Dosificación de los morteros de cal y metacaolín para los ensayos de durabilidad

	Mortero A'	Mortero G'	Mortero A	Mortero G
Relación ligante:árido	1:1	1:3	1:1	1:3
Agua/cal+metacaolín	0.80	0.96	0.68	0.84
% agua	28	19	25	17
Aditivo	No	No	Si	Si

Las probetas se mantuvieron durante 4 horas en una disolución saturada de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (10% en peso). Posteriormente se secaron en estufa a  $95 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 16 horas y se enfriaron a temperatura ambiente durante 4 horas completando así el ciclo de 24 horas. La norma indica que el número de ciclos que se tienen que realizar son 30, pero debido a la naturaleza de los materiales estudiados y a su poca resistencia el número de ciclos completados fue inferior para todos los tipos de morteros.

## 2.4. Ensayo de Hielo-deshielo y Ciclos de Humedad-sequedad.

Se evaluó la durabilidad de probetas de mortero (de las mismas características que las descritas en 2.3), cuando se sometieron a variaciones climáticas de temperatura de acuerdo con la norma UNE 67-034-86 [12], aunque con las modificaciones pertinentes de acuerdo a la naturaleza y las características de los materiales estudiados en el presente trabajo.

El método consistió en someter probetas de mortero a ciclos de hielo-deshielo. Para ello se introdujeron inicialmente las muestras en un recipiente con  $\text{H}_2\text{O}$  a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ), durante 48 horas, asegurando que el agua cubriera completamente las

muestras para que la absorción fuera completa por parte de las mismas (se pretendió, que toda la red porosa interna del material estuviese saturada de agua). Transcurrido este tiempo, las probetas se introdujeron en la cámara frigorífica durante 16 horas a  $-18^{\circ}\text{C}$  y posteriormente durante 8 horas en agua a una temperatura de  $10^{\circ}\text{C}$ , completándose así el ciclo de 24 horas. La norma indica que el número de ciclos que se tienen que realizar son 30, pero debido a la naturaleza de los materiales estudiados y a su poca resistencia; el número de ciclos completados fue inferior para todos los tipos de morteros.

Igualmente se estudió el comportamiento de los mismos morteros (probetas de igual tamaño, composición y curado que las descritas en el apartado 2.3), frente a los ensayos de humedad- sequedad. Se realizaron 30 ciclos, cada uno de ellos de dos etapas: las probetas se sumergen 16 h en aguas desionizada y se secan 8 horas en estufa a  $100^{\circ}\text{C}$  [13].

### 3 RESULTADOS

#### 3.1.- Composición Mineralógica

La caracterización mineralógica de las materias primas y de los morteros se ha realizado a través de DRX, FTIR. El metacaolín se obtiene a partir del caolín por calentamiento a  $750^{\circ}\text{C}$  durante 4 horas y su caracterización se ha publicado en un artículo previo [14, 15]. En la Figura 1 se muestra el espectro FTIR del metacaolín en el que se pueden observar las bandas correspondientes a las moléculas de agua (número 1) en los valores de frecuencia de  $3423$  y  $1630\text{ cm}^{-1}$ . Las bandas correspondientes a las unidades  $\text{SiO}_4$ , (número 2) que aparecen a  $1083$  ( $\nu_4$ ) y  $457$  ( $\nu_2$ )  $\text{cm}^{-1}$ , una banda ancha en  $797\text{ cm}^{-1}$  perteneciente a la vibración de las unidades  $\text{AlO}_4$  (número 3) y por último una banda (número 4) en  $542\text{ cm}^{-1}$  que puede pertenecer a la vibración  $\nu_1$  de las unidades  $\text{SiO}_4$  y/o a la vibración del enlace Si-O-Al. La cal es mayoritariamente portlandita, aunque contiene un 11% en peso de  $\text{CaCO}_3$ . El árido está constituido por cuarzo como única fase cristalina. Los componentes cristalinos mayoritarios de los morteros son cuarzo y calcita, presentando además  $\text{Ca(OH)}_2$  como minoritario. La cantidad de calcita aumenta cuando las muestras se someten a carbonatación.

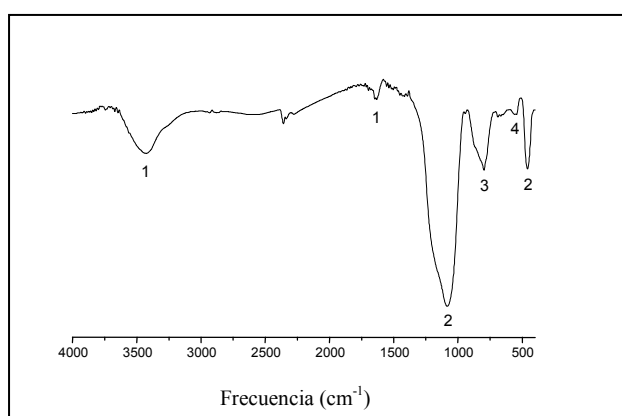


Figura 1.- FTIR del metacaolín inicial

### 3.2. Resistencia Mecánica y Porosidad

En las Figuras 2 y 3 se presentan respectivamente los valores de resistencia a compresión y de porosidad de las muestras después de 45 días en cámara a 21° C y 100% de humedad relativa. Los mayores valores de resistencias a compresión se obtienen en las muestras con aditivo y con mayor contenido de ligante y mayor relación cal + metacaolín/árido (1/2). La notación de las probetas consta de varios números, los dos primeros números indican la dosificación de los morteros de acuerdo a los datos de la Tabla 2 y el tercer número indica el tiempo de carbonatación (10 ó 30 días).

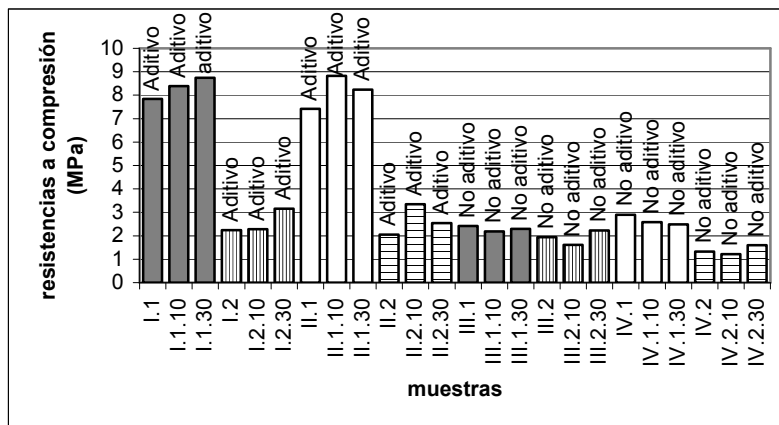


Figura 2.- Resistencias a compresión de los morteros con diferentes relación cal/metacaolín (L/M), ligante(cal +metacaolín)/agua (C/A) y en presencia (Y) y ausencia (N) de aditivo después de 10 y 30 días en laboratorio a 21° C y 60% humedad relativa.

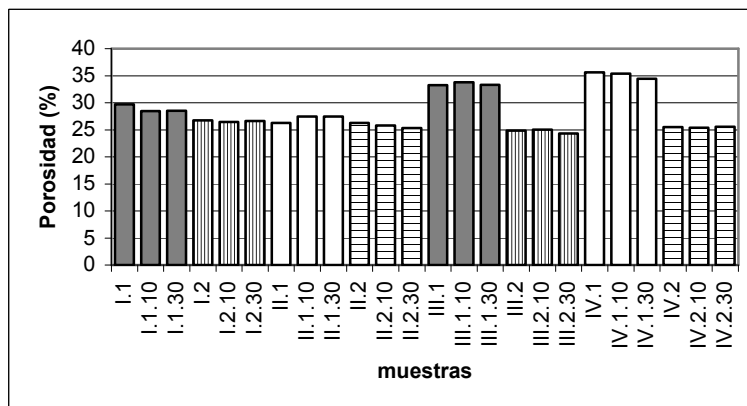


Figura 3.- Porosidad de los morteros con diferentes relación cal/metacaolín (L/M), ligante(cal +metacaolín)/agua (C/A) y en presencia (Y) y ausencia (N) de aditivo después de 10 y 30 días en laboratorio a 21° C y 60% humedad relativa.

En general se obtienen menores valores de porosidad en presencia de aditivo, cuyo efecto se observa mejor en las muestras con mayor cantidad de la mezcla cal+metacaolín.

### 3.3 Composición Química

En la Tabla 4 se presenta los contenidos de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ , residuo insoluble en HCl, y pérdida al fuego a  $1000^\circ\text{C}$  de los diferentes morteros. El contenido de  $\text{CaCO}_3$  es menor en los morteros con elevado contenido de árido y con menor relación cal/metacaolín. La presencia de aditivo hace que aumente la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  presente en los morteros (a igualdad del resto de los parámetros).

La cantidad de árido y de metacaolín sin reaccionar se obtiene a través del residuo insoluble en HCl diluido. Estos valores son prácticamente iguales para los morteros con la misma relación cal/metacaolín I.1 y III.1; I.2 y III.2; II.1 y IV.1; II.2 y IV.2. Estos pares de valores sólo se diferencian en la presencia o ausencia de aditivo.

Tabla 4.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ , I.R. y LOI (% peso) para los morteros con aditivo.

Mortero	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{CaCO}_3$	I.R. <sup>§</sup>	LOI <sup>†</sup>	Mortero	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{CaCO}_3$	I.R.	LOI
Con aditivo									
I.1	0.26	15.0	75	7.55	II.1	0.17	9.7	80	5.28
I.1.10	0.39	15.4	75	7.87	II.1.10	0.09	12.0	82	6.23
I.1.30	0.28	16.2	72	8.50	II.1.30	0.13	8.7	76	4.92
I.2	0.34	6.2	89	3.27	II.2	0.14	4.7	90	2.65
I.2.10	0.67	6.6	89	3.30	II.2.10	0.10	4.6	91	2.50
I.2.30	0.13	7.0	90	3.67	II.2.30	0.12	5.6	89	2.89
Sin aditivo									
III.1	0.12	15.0	74	8.01	IV.1	0.15	9.4	79	5.21
III.1.10	0.94	13.8	78	6.98	IV.1.10	0.12	9.7	78	5.47
III.1.30	0.68	15.7	75	7.87	IV.1.30	0.11	8.6	81	5.05
III.2	0.24	7.2	87	3.90	IV.2	0.08	3.8	91	2.21
III.2.10	0.27	6.0	87	3.37	IV.2.10	0.11	4.7	89	2.69
III.2.30	0.21	6.7	88	3.68	IV.2.30	0.06	4.7	89	2.71

<sup>§</sup>Residuo insoluble en HCl; <sup>†</sup>Pérdida al fuego a  $1000^\circ\text{C}$

En las Figuras 4 y 5 se presentan los datos del porcentaje de CaO presente en la portlandita ( $\alpha$ ), en el  $\text{CaCO}_3$  ( $\beta$ ), el porcentaje de productos formados en la reacción entre la cal y el metacaolín ( $\gamma$ ) y el porcentaje suma del árido y el metacaolín sin reaccionar ( $\omega$ ). Todos los datos se refieren a la muestra calcinada a  $1000^\circ\text{C}$ .

El mayor porcentaje en las muestras es de árido y metacaolín sin reaccionar ( $\omega$ ) (aproximadamente el 79%) valor que prácticamente no se modifica por la presencia de aditivo. El menor porcentaje de  $\omega$  se obtiene en las muestras que presentan mayor contenido de árido.

La cantidad de producto de reacción puzolánica ( $\gamma$ ) parece menor en las muestras con aditivo, mientras que la cantidad de calcita es superior en las muestras con aditivo con respecto a las muestras sin aditivo.

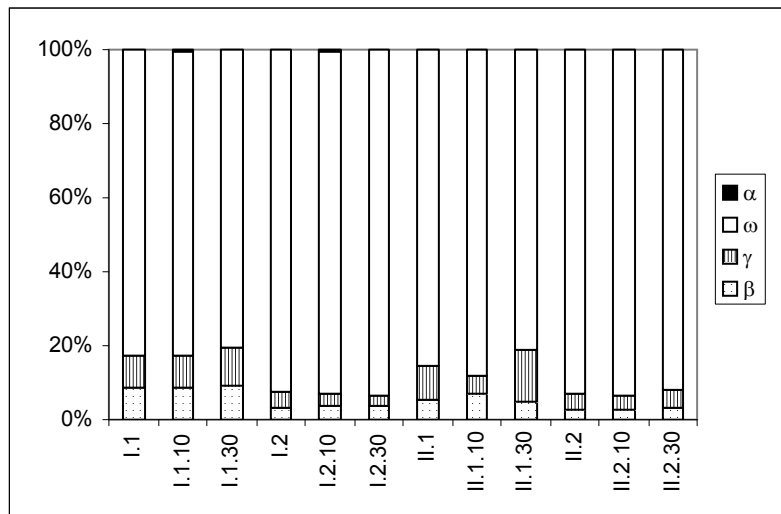


Figura 4.- CaO presente en la portlandita ( $\alpha$ ), en el  $\text{CaCO}_3$  ( $\beta$ ), productos de la reacción la cal y metacaolín ( $\gamma$ ) y suma del árido y el metacaolín sin reaccionar ( $\omega$ ) en las muestras con aditivo.

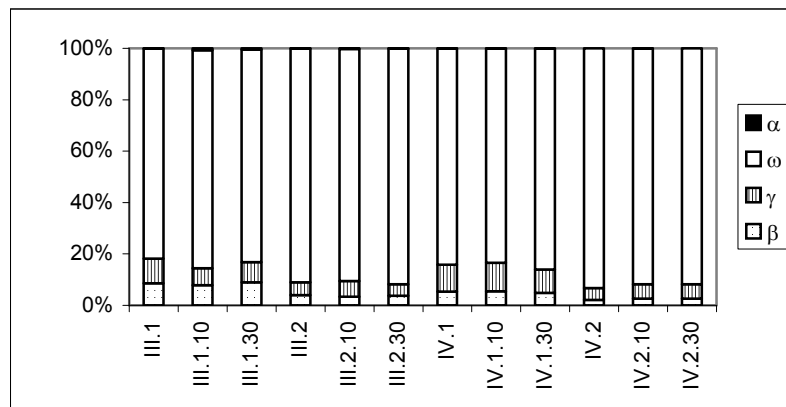


Figura 5.- CaO presente en la portlandita ( $\alpha$ ), en el  $\text{CaCO}_3$  ( $\beta$ ), productos de la reacción la cal y metacaolín ( $\gamma$ ) y suma del árido y el metacaolín sin reaccionar ( $\omega$ ) en las muestras sin aditivo.

### 3.4 Cristalización de Sales

Las probetas experimentaron un elevado deterioro en todos los casos, siendo las pérdidas de peso experimentadas por los morteros las siguientes: -54.2% (mortero A); -49.4% (mortero G); -91.8% (mortero A') y -16.3% (mortero G') (Tabla 5, muestras T0).

### 3.5 Ciclos Hielo/deshielo

Las probetas de los morteros A' y G', es decir las que no tienen aditivo, experimentaron gran deterioro, las muestras del mortero A (con aditivo) presentan un ligero deterioro; y finalmente los morteros G (1:2 con aditivo) no presentaron prácticamente deterioro,

siendo las pérdidas de peso asociadas las siguientes: -49.6%; -15.1%; -3.9% y 0.0% (Tabla 5, muestras T0).

### 3.6 Ciclos Humedad/secado

Las probetas sometidas a los ciclos humedad/secado, no se deterioraron, tal y como se observa atendiendo a los valores medidos de pérdida de peso que oscilan entre -0.05% y -0.07% para las cuatro probetas estudiadas.

Tabla 5.- Pérdidas de peso de las probetas con tratamiento hidrofugante sometidas a ciclos de cristalización de sales y hielo-deshielo.

	A'	G'	A	G
Ciclos cristalización sales				
T0	-91.8	-16.3	-54.2	49.4
T1	-8.5	-22.7	-28.1	0.0
T2	-95.8	-41.3	-20.3	-73.3
Ciclos hielo-deshielo				
T0	-49.6	-15.1	-3.9	0.0
T1	-15.9	-0.21	-65.2	-6.6
T2	-36.5	-32.9	-5.1	-0.7

## 4.- DISCUSIÓN

Los morteros de cal y puzolana mejoran algunas de las propiedades de los morteros de cal tradicionales, poseen mayores resistencias mecánicas, presentan bajo contenido de álcalis, reducen el tiempo de fraguado, además de poseer color blanco. Todo ello les hace idóneos para su utilización como materiales de reparación de edificios antiguos. Sin embargo todavía existen algunas lagunas en el conocimiento de los mismos, recientemente se ha publicado un trabajo [16] en el que se hace un estudio estadístico de cual son las variables que más influyen en las propiedades y características de los citados morteros.

De acuerdo a los resultados de las Figuras 2 y 3, estos morteros no presentan resistencias mecánicas muy elevadas (10-2 MPa), pero si superiores a las de los morteros de cal. Se observa un aumento de la resistencia al aumentar el contenido de ligante frente al contenido de árido, pasando de valores próximos a 3MPa a valores próximos a 8MPa. Con respecto al efecto de la presencia de aditivo, claramente hace que aumenten las resistencias, sin aditivo los valores de las resistencias tiene valores máximos próximos a 3MPa y con aditivo se llegan a valores cercanos a 10MPa. El mayor tiempo de carbonatación (10 ó 30 días) hace que aumente la resistencia de las probetas con mayor relación de cal. Como se vio en las Figuras 4 y 5 los morteros con aditivo presentan un mayor contenido de calcita y un menor contenido de producto de la reacción puzolánica, lo que hace indicar que en estas muestras con todavía baja reacción puzolánica (79% de producto sin reaccionar) influye más en las resistencias la presencia de calcita con respecto a la del gel producto de la reacción puzolánica.

En los morteros de cal y metacaolín estudiados los valores de porosidad total de las muestras estuvieron comprendidos entre 39.2% y 23.4% (Figura 3), valores menores que los observados por Da Silva y Glasser [17] en pastas de cal y metacaolín con la misma dosificación, en las cuales se midieron valores del 54% y 28% después de 3 y 90 días de



curado respectivamente. De acuerdo a los resultados de Fortes [18] la estructura plana de la partícula de metacaolín tiene más peso en la porosidad e influye sobre todo en el volumen de poros más pequeños (1 a 0.1 micras).

Se observa que al aumentar la cantidad de árido en la dosificación de los morteros preparados, se experimenta un descenso de la porosidad total (Figura 3) valores parecidos a los que presentan los morteros de OPC modificados con metacaolín [19]. Esto se explica por la menor cantidad de agua de amasado (Tabla 4) y por el incremento del árido, material más compacto y menos poroso que la pasta de cal + metacaolín hidratada.

Las resistencias mecánicas de los morteros de cal y metacaolín son superiores a las de los morteros de cal [18], aunque los valores de porosidad también sean mayores, debido a que en los morteros de cal y metacaolín se ha sustituido el 50% de la cal por metacaolín, que reacciona con la cal formando gel C-S-H, aluminatos cálcicos hidratados y silicoaluminatos cálcicos hidratados que confieren mayor resistencia al mortero.

Los morteros de cal, metacaolín y arena sufrieron un deterioro apreciable después de realizarse 7 ciclos del ensayo de cristalización de sales. El deterioro se produjo por pérdida de la capa superficial facilitando el acceso de la disolución de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  al interior de las probetas y aumentando la velocidad de deterioro.

Al aumentar la cantidad de árido en los morteros sin aditivo se produjeron menores pérdidas de peso, ya que, presentan unas mayores resistencias mecánicas.

Sobre los morteros de cal y metacaolín se realizaron 12 ciclos de hielo-deshielo, observándose diferente grado de deterioro en los morteros estudiados. El deterioro se produjo formándose grietas en la superficie de las probetas, provocando su desprendimiento lo que aceleró el deterioro final de las probetas.

Con respecto a la durabilidad de los materiales frente a los ciclos de humedad-secado, los morteros no experimentan ningún grado de deterioro.

Debido al hecho de que no se mejoró el comportamiento durable de las muestras frente a los ciclos de cristalización de sales y hielo-deshielo, se utilizaron dos tratamientos hidrofugantes sobre algunas de las probetas: a) silicato de etilo y tercbutilmetoxisiloxano (Hydrophase superficie) (T1) y b) silicato de etilo y polimetilxiloxano (RC-80) (T2). Las probetas se impregnaron por inmersión total durante 5 segundos en los tratamientos líquidos. Las probetas impregnadas con los tratamientos se sometieron a los ciclos de cristalización de sales y hielo-deshielo al final de los cuales se determinó la pérdida de peso de las probetas. En la Tabla 5 se presentan las pérdidas de peso de las probetas con los tratamientos al final de los ciclos.

Se observa que no todos los tratamientos se comportan de la misma manera en las diferentes muestras. Con respecto a la cristalización de sales el tratamiento 1 es totalmente efectivo para el mortero G mejora para los morteros A y A'. Con respecto a los ciclos hielo-deshielo el tratamiento 2 es efectivo para el mortero G, mejora para el mortero A'. Ninguno de los tratamientos estudiados permite mejorar el comportamiento de todos los morteros de manera importante. En este sentido se necesitan más investigaciones.

## 5.- CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del trabajo son:

- 1.- Las resistencias de los morteros de cal y metacaolin son ligeramente superiores a las de los morteros de cal, aumentando en los morteros con mayor relación SL+MK/árido.
- 2.- Los morteros con aditivo en su composición presentan superiores resistencias a compresión y menores porosidades.
- 3.- Los morteros con aditivo presentan un mayor contenido de calcita y un menor contenido de producto de la reacción puzolánica,
- 4.- En las muestras con baja reacción puzolánica (79% de producto sin reaccionar) influye más en las resistencias la presencia de calcita que el gel producto de la reacción puzolánica.
- 5.- Los morteros de cal y metacaolin presentan un comportamiento similar frente a la durabilidad que los morteros de cal. Los tratamientos aplicados mejoran el comportamiento del mortero en función de su composición.

## 6.- AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Comunidad de Madrid y al Ministerio de Educación y Ciencia la concesión de los Proyectos 200660M070 y MAT 2003-08343 respectivamente

## 7.- REFERENCIAS

- [1] Farci, A.; Floris, D.; Meloni, P. *Water permeability vs. porosity in samples of Roman mortars*, J. Cult. Herit. 6/2005, at page 55.
- [2] Biscontin, G.; Birelli, M.P.; Zendri, E. *Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars*, J. Cult. Herit. 3/2002 at page 31.
- [3] Fortes-Revilla, C.; Blanco-Varela, M.T. *Influence of water-repellent treatment on the properties of lime and lime pozzolan mortars*, Mater. Construcc.51/262/2001 at page 39.
- [4] Frías, M.; Cabrera, J. *Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C*. Cem. Concr. Res 31/2001 at page 519.
- [5] Cabrera, J.; Frías, M. *Mechanisms of hydration of metakaolin-lime-water system*. Cem. Concr. Res 31/2001; at page 177.
- [6]. Norma Española UNE 83-811-92. Morteros: Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la consistencia. Mesa de sacudidas.
- [7] Mosquet, M.; Canevet, C.; Guise, L. *A review of the molecules used to formulate plasticizers and superplasticizers, and their interaction with cement*. Non Traditional Cement & Concrete. Ed. Vlastimil Bilek and Zbyněk Keršner, 2002.
- [8] Norma UNE 80-230-1999. Métodos de ensayos de cementos. Análisis químico. Métodos alternativos.
- [9] Granizo, M.L.; Alonso, S.; Blanco-Varela, M.T.; Palomo, A. *Alkaline activation of metakaolin. Effect of calcium hydroxide in the products of reaction*. Journal of American Ceramic Society 85/1/2002; at page 225.
- [10] García-Talegón, J.; Vicente, M.A. *Deterioro de monumentos graníticos por cristalización de sales en ambiente urbano con baja contaminación*. Materiales de Construcción, 49/253/1999 at page 17.
- [11] Commission 25-PEM Protection et Érosion des Monuments. (1990) V DURABILITY TEST. "Cristallisation test by total immersion". Test N° V.1a. (233-235).

- [12] Norma U.N.E. 67-034-86. Tejas de arcilla cocida. Ensayo de heladicidad.
- [13] Atzeni, C.; Grazia Cabiddu, M.; Massidda, L.; Senna, V.; Sistu, G. *Degradation and conservation of sandstone and pyroclastic rocks used in the prehistoric complex Gemma Maria* III. International Symposium of the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Venice. 22-25 June 1994. 533-539.
- [14]. Granizo, M.L.; Blanco-Varela, M.T.; Palomo, A. *Influence of the starting kaolin on alkali-activated materials based on metakaolin. Study of the reaction parameters by isothermal conduction calorimetry*. J. Mat. Science 35/2000, at page 1.
- [15] Granizo, M.L.; Blanco-Varela, M.T. *Alkaline activation of metakaolin. An isothermal conduction calorimetry study*, Journal of Thermal Analysis 52/1998, at page 957.
- [16] Fortes-Revilla, C.; Martinez-Ramirez, S.; Blanco-Varela, M.T. *Modelling of slaked-lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables*. Cement and Concrete Composites 28/2006, at page 458.
- [17] Da Silva, P.S.; Glasser, F.P. *Pozzolanic activation of metakaolin*. Advanced Ceramic Research. 4/16/1992, at page 167.
- [18] Fortes, C. Estudio de las propiedades y durabilidad de morteros de restauración del Patrimonio Cultural impregnados con tratamientos hidrofugantes. Diseño de un nuevo mortero de base cal y metacaolín. Tesis Doctoral, Madrid 2005.
- [19] Courard, L.; Darimont, A.; Schouterden, M.; Ferauche, F.; Willem, X.; Degeimbre, R. *Durability of mortars modified with metakaolin*. Cement and Concrete Research. 33/2003, at page 1473.