



Universidad  
de Navarra



**VI Jornadas**



**FICAL**

Fórum Ibérico de la Cal

**Pamplona | 28-30 | Mayo | 2018**

# **Tradición, versatilidad e innovación en la cal: un material de excelencia**

VI Jornadas FICAL

Pamplona, 28-30 de mayo de 2018

**Libro de Actas**





Universidad  
de Navarra



# **Tradición, versatilidad e innovación en la cal: un material de excelencia**

VI Jornadas FICAL

Fórum Ibérico de la Cal

**Libro de Actas**

**Livro de Atas**

Editores:

José Ignacio Álvarez Galindo

José María Fernández Álvarez

Íñigo Navarro Blasco

Adrián Durán Benito

Rafael Sirera Bejarano

## VI Jornadas FICAL – Fórum Ibérico de la Cal

Pamplona, 28-30 de mayo de 2018

La Organización de estas Jornadas se enmarca dentro de las actividades del Proyecto “Optimización de nuevos morteros de restauración de cal mediante combinaciones de aditivos y adiciones minerales puzolánicas” financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) con la signatura MAT2015-70728-P, y han contado con el patrocinio de Grupo Puma, Heidelberg Cement, Saint-Astier, Lhoist, Ancade, Gordillos y Unicmall.

Grupo de investigación MIMED

Departamento de Química

Facultad de Ciencias

<https://www.unav.edu/en/web/heritage-materials-environment/home>

[mimed@unav.edu](mailto:mimed@unav.edu)



© Servicio de Publicaciones

Universidad de Navarra

[www.unav.edu](http://www.unav.edu)

ISBN: 978-84-8081-604-5

URL: <http://hdl.handle.net/10171/52333>

Cubierta: Castillo de Marcilla, Navarra, restaurado por Institución Príncipe de Viana, que ha cedido la foto ©.

# ÍNDICE

<b>Presentación.....</b>	<b>1</b>
<b>La cal en arquitectura.....</b>	<b>5</b>
Cal y arquitectura tradicional gallega.....	7
La cal en el patio tradicional canario.....	19
Revestimientos com base em cal em monumentos de interesse histórico e patrimonial: Exemplos do repositório DB-HERITAGE.....	27
La cal como elemento bioclimático en la arquitectura tradicional canaria.....	39
<b>Aplicaciones diversas de la cal.....</b>	<b>51</b>
Cales aéreas especiales para morteros: el ejemplo de morteros de relleno para túneles.....	53
Propiedades de la cal en pasta obtenida a partir del tratamiento de fosfoyesos de la industria de fertilizantes.....	64
Hormigones de cal: nuevos “viejos” materiales.....	76
Aplicaciones de la cal en la ingeniería civil.....	87
<b>Características de los morteros de cal.....</b>	<b>97</b>
Comportamiento de fábricas de piedra tomada con mortero de cal.....	99
A avaliação do comportamento hídrico de argamassas com base em cal: O efeito dos agregados na capacidade de proteção.....	106
Incidencia de los valores de consistencia de los morteros de cal de elaboración artesanal en su comportamiento en estado endurecido.....	118
Análise experimental do fluxo de humidade em argamassas de cal aérea.....	129
<b>Características de materiales con base cal.....</b>	<b>141</b>
Estudo de revestimentos à base de cal: uma abordagem integrada.....	143
Caracterización de los morteros históricos del puente de Trillo (Guadalajara) ...	166
Estuques Maneiristas de uma Igreja de Lisboa: Caracterização Material e Técnica.....	177
Metodología simplificada de identificación mediante MOP de las cales hidráulicas y los cementos naturales.....	188

Desafios atuais na análise e na replicabilidade de argamassas históricas à base de cal aérea .....	200
<b>Cal en restauración / Nanocales y aditivos .....</b>	<b>213</b>
Aditivos de origen natural: su influencia en la reactividad y propiedades de morteros de cal aérea e hidráulica .....	215
Estudio del comportamiento en estado endurecido de morteros de cal aérea con metacaolín y superplastificantes .....	228
Protocolos de intervención en la restauración del Edificio catalogado del Puerto de Barcelona .....	241
<b>Morteros de relleno con base cal con adición puzolánica y diversos aditivos.....</b>	<b>251</b>
Efecto del disolvente en la síntesis de nanocal .....	263
Cal como sustrato para incorporación de agentes fotocatalíticos .....	268
<b>Hornos de cal.....</b>	<b>281</b>
Tres hornos de cal en la isla de Gran Canaria. Tipologías y funcionamiento .....	283

## Morteros de relleno con base cal con adición puzolánica y diversos aditivos

Jesús Fidel González-Sánchez, Íñigo Navarro-Blasco, Adrián Durán, Rafael Sirera,

José M. Fernández, José I. Álvarez

*Grupo de investigación MIMED (Heritage, materials and environment), Departamento de Química, Universidad de Navarra, mimed@unav.es*

### Resumen

Los morteros de relleno o inyección, especialmente destinados a reparación de cavidades y defectos de albañilería, deben fluir adecuadamente en estado fresco y combinar resistencia y durabilidad. Para conseguir algunas de estas características pueden utilizarse aditivos químicos: superplastificantes, para mejorar la fluidez; adiciones puzolánicas, para conseguir resistencias adecuadas en ambientes con limitado acceso de CO<sub>2</sub> y una mejora de la durabilidad; e hidrofugantes, de manera que, sin perjudicar la permeabilidad de estos materiales al vapor de agua, se evite la penetración de agua por capilaridad mejorando la durabilidad.

Sin embargo, en la mayor parte de los casos, toda la información disponible se circunscribe al efecto de un único aditivo, sin contemplar el posible efecto conjunto o incluso sinérgico de las combinaciones más interesantes de dos o más aditivos y/o adiciones puzolánicas. El estudio de las sinergias entre estos componentes ofrece posibilidades muy interesantes de avance científico-técnico. Precisamente este es el objetivo del trabajo: diseño de nuevos morteros de inyección de cal que puedan ser utilizados para la restauración del Patrimonio Edificado mediante combinación adecuada de aditivos superplastificantes (éteres de policarboxilato, condensados de naftaleno-formaldehído, sulfonato de melamina y ácido poliacrílico), hidrofugante (oleato sódico) y adiciones minerales puzolánicas (microsílice y metacaolín).

Palabras clave: Cal; Superplastificantes; Microsílice; Metacaolín; Hidrofugante

### Introducción

Los morteros de relleno o inyección, especialmente destinados a reparación de cavidades y defectos de albañilería, deben fluir adecuadamente en estado fresco y combinar resistencia y durabilidad [1-5]. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, toda la información disponible se circunscribe al efecto de un único aditivo, sin contemplar el posible efecto conjunto o incluso sinérgico de las combinaciones más interesantes de dos o más aditivos y/o adiciones puzolánicas [6,7]. Sólo de forma reciente se ha publicado algún trabajo que plantea la combinación de una adición puzolánica con algún aditivo superplastificante, con muy buenos y esperanzadores resultados [8]. Las combinaciones simultáneas de dos o más aditivos y/o adiciones en morteros de cal no han sido investigadas previamente por la comunidad científica y el estudio de estas sinergias ofrece posibilidades muy interesantes de avance científico-técnico.

Para la preparación de morteros de cal, la bibliografía ha detallado la posibilidad de incrementar resistencias, acortar tiempos de fraguado y permitir el endurecimiento - aun cuando el acceso del CO<sub>2</sub> esté dificultado - mediante la inclusión de adiciones puzolánicas a las mezclas. El metacaolín ha sido uno de los aditivos más clásicamente estudiados, aunque también la nanosílice ha sido objeto de algunas investigaciones [9-12]. Existen trabajos que estudian la compatibilidad de algunas de las combinaciones entre nanosílice y metacaolín con superplastificantes de tipo éteres de policarboxilato. Prácticamente no se han hecho estudios de compatibilidad con otros superplastificantes del mismo tipo y diferente peso molecular ni con otros habituales en la química de los conglomerantes – cemento principalmente – como son los lignosulfonatos, condensados de naftaleno, sulfonato de melamina o ácido poliacrílico. Todos estos compuestos químicos son reductores de la cantidad de agua de amasado y mejoradores de la trabajabilidad, y presentan grandes ventajas para su uso en morteros de inyección y de relleno. Tampoco se conoce la actividad ni compatibilidad entre ellos con agentes hidrofugantes, reductores de la absorción de agua por capilaridad (entre los que cabe mencionar a los oleatos y estearatos). El empleo de estos hidrofugantes o repelentes de agua es muy importante para minimizar las vías de entrada de agua a los morteros, y estas combinaciones entre cal + adición puzolánica + superplastificantes + hidrofugantes pueden dar lugar a una gama de morteros de enorme utilidad en la restauración del Patrimonio Edificado, muy particularmente para morteros de inyección o de relleno (grouts, en el término inglés).

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es determinar el comportamiento y la compatibilidad en morteros de cal de diversas combinaciones de aditivos y adiciones minerales puzolánicas, con el fin de optimizar las mezclas y así obtener nuevos morteros que sirvan para la restauración del Patrimonio Arquitectónico. Se estudiarán desde el punto de vista científico y técnico las combinaciones de cal aérea cálcica con adiciones puzolánicas (metacaolín o microsílice), superplastificantes (éteres de policarboxilato, condensados de naftaleno-formaldehído, sulfonato de melamina y ácido poliacrílico) y un hidrofugante (oleato).

## **Materiales y métodos**

### **Preparación del mortero. Proporciones de mezcla**

Las proporciones de los morteros de cal fueron: 25% cal apagada y ensacada suministrada por Cal Industrial S.A. (Calinsa Navarra), clasificada como CL-90 por la normativa española y europea, 75% árido calizo (arena de clase AF-T-0/1-C, suministrada por Caleras de Liskar, grupo HORMASA). Además, cuando fue necesario, se agregaron con respecto a la cal los siguientes componentes: 20% de aditivo mineral puzolánico (metacaolín, producto comercial Metaver de NEWCHEM o microsílice, suministrada por ULMEN Europa), 0,5% de hidrofugante (oleato sódico, proporcionado por ADI-CENTER) y 1% de superplastificante (PCE1, producto comercial Melflux de BASF; sulfonato de melamina, Melment F10 de BASF; sulfonato de naftaleno, comercializado como Conplast SP340 FA de FOSROC International y ácido poliacrílico, de Sigma-Aldrich). El agua de amasado se estableció en un 31%, cifra resultante de ajustar la demanda de agua al mortero control (sin aditivos ni adiciones) para conseguir una fluidez – medida en mesa de sacudidas – en torno a 185 mm.



En primer lugar, se pesaron todos los componentes por separado y se mezclaron en seco en una mezcladora de sólidos BL.8-CA de Lleal S.A. girando el tambor principal y el intensificador durante cinco minutos para asegurar la buena homogeneización del material. Posteriormente se pesó el agua necesaria en cada caso y se incorporó a la mezcla anterior, introduciéndola en la amasadora planetaria IBERTEST IB32-040E durante 90 segundos a velocidad lenta y ajustada según UNE-EN 196-1 [13].

### **Ensayos en Fresco**

Posteriormente se realizaron los ensayos en fresco comenzado por el ensayo de mesa de sacudidas [14], siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 1015-3. El ensayo consistió en rellenar un molde troncocónico con el mortero fresco en dos capas, compactando cada una de ellas con 10 golpes de un pisón. Posteriormente, se enrasó, se desmoldó y se efectuaron 15 sacudidas con una frecuencia de un golpe por segundo. Por último, se midió el diámetro de la masa en dos direcciones perpendiculares entre sí, con un calibre.

Posteriormente se determinó el período de trabajabilidad del material según la norma UNE-EN 1015-9 [15]. Cada 15 minutos se introdujo lentamente una sonda de penetración, anotando el peso. Cuando dicho peso fue superior a 1500 g, el ensayo se dio por finalizado.

### **Ensayos en Endurecido**

Se obtuvieron probetas prismáticas de 40x40x160 mm en moldes triples de acero PROETI C0090 lubricados con aceite mineral. Para el llenado y compactación se siguió la norma UNE-EN 196-1 realizándose el llenado en dos capas y empleando para compactar cada capa una compactadora automática (IBERTEST IB32-045E-1), que proporcionó 60 golpes por capa con una frecuencia de un golpe por segundo, eliminando así las burbujas de aire presentes en la mezcla. Finalmente se eliminó el exceso de masa y se enrasó con una regla, desmoldándose a las 24 horas. Se dejaron fraguar en una zona donde la temperatura y la humedad es constante.

Las resistencias mecánicas se midieron a 28, 91, 182 y 365 días, para observar las posibles modificaciones con el tiempo. Para todas estas medidas se rompieron 3 probetas, con el fin de conseguir valores representativos. Para los ensayos de resistencia a compresión se empleó una prensa con un dispositivo de rotura a compresión Proeti ETI 26.0052 a una velocidad de rotura 5-50 kp·s<sup>-1</sup> con un intervalo de tiempo entre 30 y 90 segundos.

La estructura porosa del material se estudió por porosimetría de intrusión de mercurio (MIP), usando un equipo Micromeritics AutoPore IV 9500 con un intervalo de presiones de 0,0015-207 MPa, que registró automáticamente la presión, el diámetro de poro y el volumen de intrusión de mercurio.

La evaluación de la hidrofiliidad de la muestra fue llevada a cabo con un instrumento de medición del ángulo de contacto OCA 15EC Dataphysics. De esta manera se pudo determinar el ángulo de contacto de la gota de agua depositada sobre la superficie de la muestra, y el tiempo para la absorción de la misma por el material.

## Resultados y discusión

### Propiedades del mortero en fresco

#### Densidad de la pasta

La pasta sin reductor de agua más densa resultó ser la combinación de cal-metacaolín-oleato, como se muestra en el siguiente gráfico, lo que supondría hacer uso de mayor cantidad de esta mezcla si se desea emplear en la restauración. Sin embargo al agregar los diferentes superplastificantes, como se muestra en la Figura 1, hay cambios en la densidad de todas las pastas.

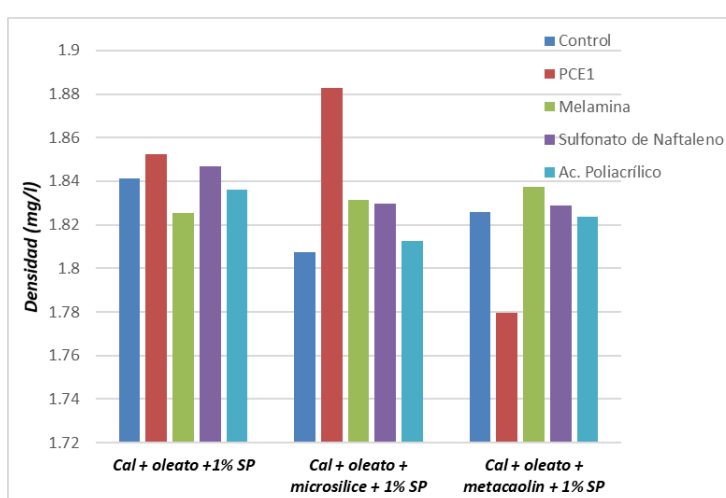


Figura 1. Densidad de las diferentes mezclas de pasta

Para el caso del PCE1 en la mezcla cal-oleato y cal-oleato-microsílíce aumenta, siendo esta última la mezcla más densa de todas. La mezcla cal-oleato-metacaolín resulta tener una densidad menor respecto al control y es la menos densa de todas las mezclas hechas en este estudio. Al hacer uso de la melamina en la mezcla cal – oleato la densidad disminuye, mientras que para las otras dos mezclas aumenta. Cuando se emplea el sulfonato de naftaleno en todas las mezclas hay un aumento de la densidad de la pasta. Y cuando se añade el ácido poliacrílico aumenta la densidad en la mezcla cal-oleato-microsílíce, mientras que en las otras dos mezclas disminuye.

#### Valor de escurrimiento y trabajabilidad (tiempo abierto)

La consistencia de la pasta se estudió tanto para la mezcla de cal + oleato + agente puzolánico con y sin la presencia de aditivo superplastificante. En la Figura 2 se muestra cómo es afectado el escurrimiento de la cal cuando se mezcla con un hidrofugante y el agente puzolánico. Como se puede observar la mezcla de cal con oleato disminuye el escurrimiento, mientras los dos agentes puzolánicos (tanto el metacaolín como la microsílíce) la aumentan. En mayor medida la microsílíce, con forma esférica, incrementa el escurrimiento por permitir la lubricación de la pasta en fresco. Cuando se mezclan la cal, el oleato y el metacaolín la trabajabilidad es muy

semejante a la de la mezcla cal + oleato, sin embargo es mayor el valor de escurrimiento de la mezcla de cal, oleato y microsíllice.

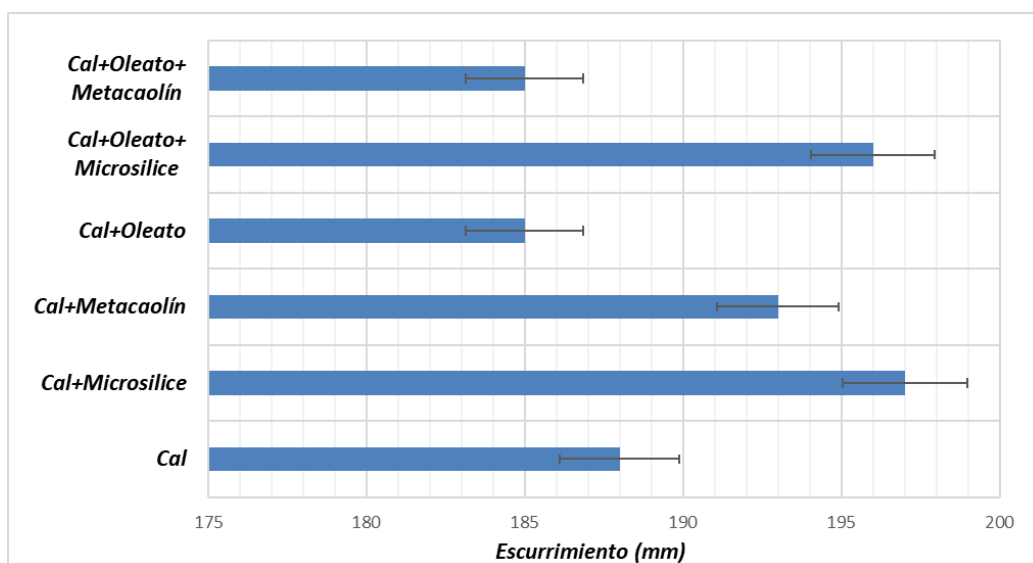


Figura 2. Consistencia de las pastas sin plastificante

En la Figura 3 se representa la consistencia de las mezclas en fresco cuando se hace uso de un superplastificante. El ácido poliacrílico disminuye el escurrimiento respecto al valor de la mezcla control. Al emplear el sulfonato de naftaleno el escurrimiento aumenta en todos los casos, al igual que cuando se hace uso de la melamina. Al añadir PCE1, la trabajabilidad de la mezcla aumenta considerablemente, sobrepasando el valor de 300 mm, con una mezcla de elevada fluidez. La eficacia de los derivados de éteres de policarboxilato se ha mencionado en la literatura en sistemas de cal y de cemento, y se fundamenta en la importancia de los impedimentos estéricos (más eficaces) de estos aditivos frente a los electrostáticos (de peor rendimiento).

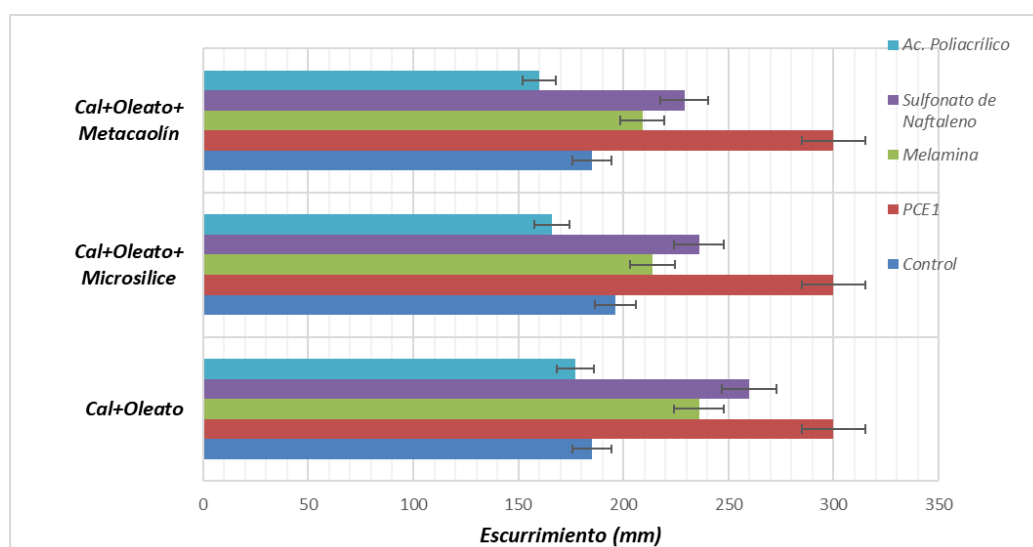


Figura 3. Consistencia de las pastas con plastificante

La trabajabilidad de las diferentes mezclas de cal, hidrofugante y agente puzolánico se describe en la Figura 4. Se puede observar que la adición del oleato sódico acelera el endurecimiento de la muestra, mientras que los dos agentes puzolánicos – sorprendentemente - lo retrasan. Cuando se efectúa la mezcla entre estos componentes aumenta la trabajabilidad, pudiendo destacar que la mezcla de cal, oleato y microsílíce es la que más aumenta la trabajabilidad en comparación con las otras.

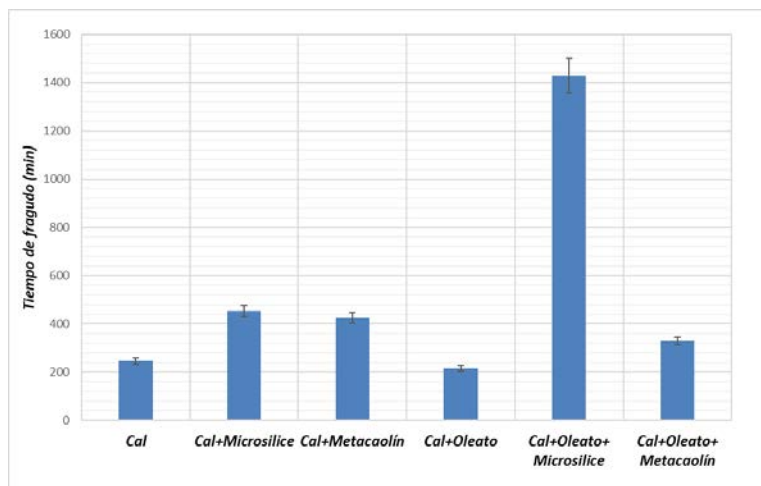


Figura 4. Trabajabilidad de las pastas sin plastificante

La trabajabilidad experimenta cambios sustanciales cuando a las mezclas anteriores se les agrega un superplastificante, como se puede observar en la Figura 5, resultando la mezcla con PCE1 la de mayor trabajabilidad. Es tan elevado que resulta un tiempo abierto excesivamente alto como para poder emplear esa mezcla. Para las mezclas de cal, oleato y microsílíce la adición de un superplastificante (excepto el PCE1) acorta considerablemente el tiempo de fragado, lo cual también podría ser de gran ayuda para mejorar la trabajabilidad sin tener un tiempo de fragado tan largo en esa mezcla.

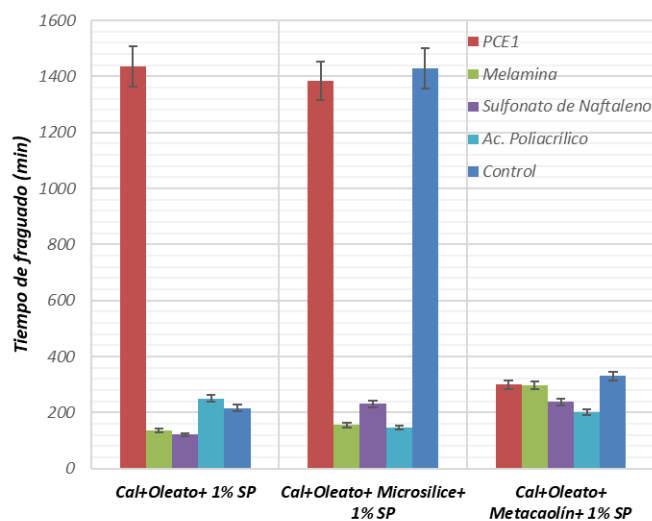


Figura 5. Trabajabilidad de las pastas sin plastificante

## Propiedades del mortero endurecido

### Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión, para las muestras sin adición de superplastificante, se representa en la Figura 6.

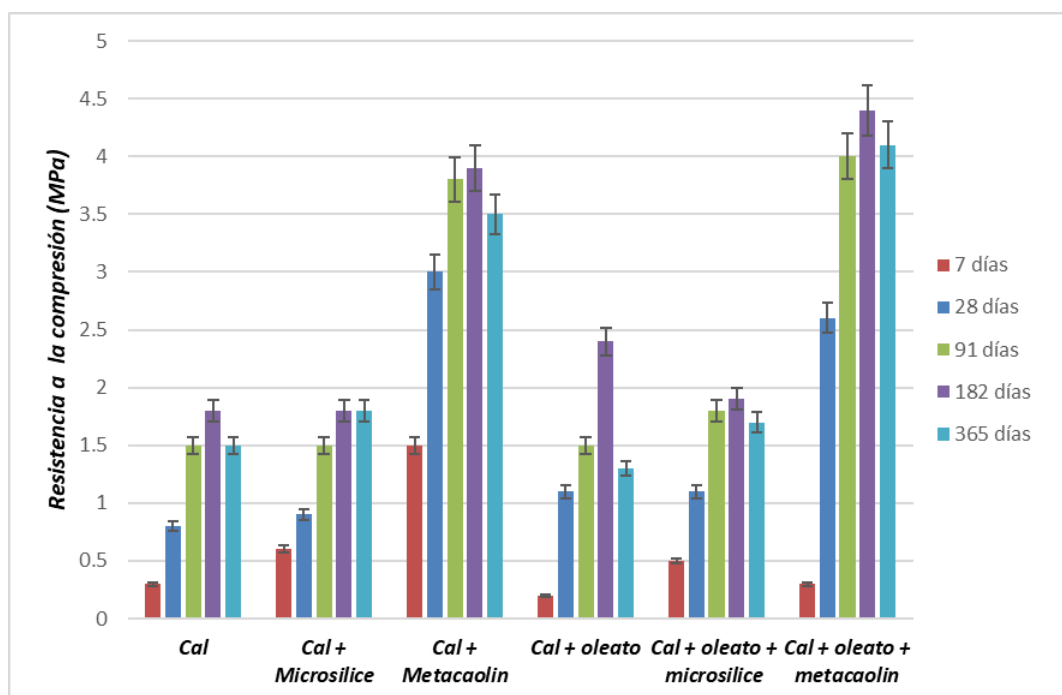


Figura 6. Resistencia a la compresión en los morteros endurecidos a diferentes tiempos sin plastificante

La mezcla y el tiempo en el cual se encuentra el mayor valor de resistencia es cuando la cal se mezcla con el metacaolín testada a los 182 días. Cabe destacar que en todos los casos la resistencia a la compresión aumenta al hacer uso de la mezcla de la cal con cualquier otro componente, ya sea el el hidrofugante (oleato sódico) y/o alguno de los agentes puzolánicos (metacaolín y microsílíce).

Cuando se agregó el 1% de los plastificantes la resistencia a la compresión cambio en todas las mezclas como se muestra en la Figura 7. Para el PCE1 en la muestra de cal-oleato y cal-oleato-microsilíce la resistencia a la compresión aumentó y para la mezcla de cal-oleato-metacaolín la resistencia disminuyó ligeramente. Puede advertirse que para esta última mezcla la resistencia disminuyó al agregar cualquier superplastificante. En el caso de emplear la melamina y el sulfonato de naftaleno en las mezclas de cal-oleato y la mezcla de cal-oleato-microsilíce la resistencia a la compresión aumentó. En la primera mezcla, al usar la melamina, el aumento llevó la cifra hasta el doble de su valor inicial, aproximadamente. Con respecto al ácido poliacrílico en todos los casos la resistencia a la compresión disminuyó y el uso de este superplastificante hace que la mezcla tenga la menor fuerza de compresión en este estudio.

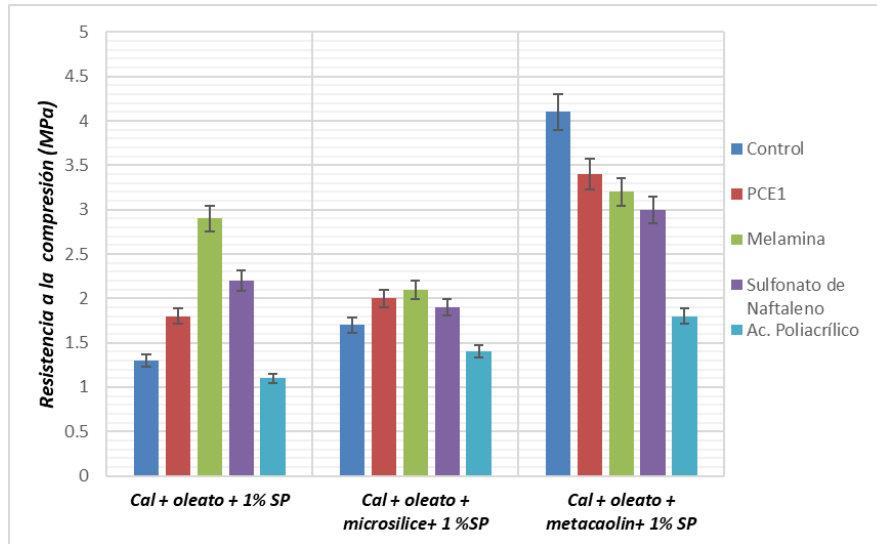


Figura 7. Resistencia a la compresión en los morteros endurecidos a 365 días con plastificante

**Porosimetría**

Las mediciones de distribución de tamaño de poro (ver Figura 8 A para algunos ejemplos) llevadas a cabo por MIP mostraron que la adición del aditivo puzolánico y del hidrofugante redujo la porosidad relacionada con poros de alrededor de 1 μm de diámetro debido a: (i) el efecto de relleno de la microsíllice y del metacaolín (siendo este último quien redujo más la cantidad); y (ii) a la reacción puzolánica.

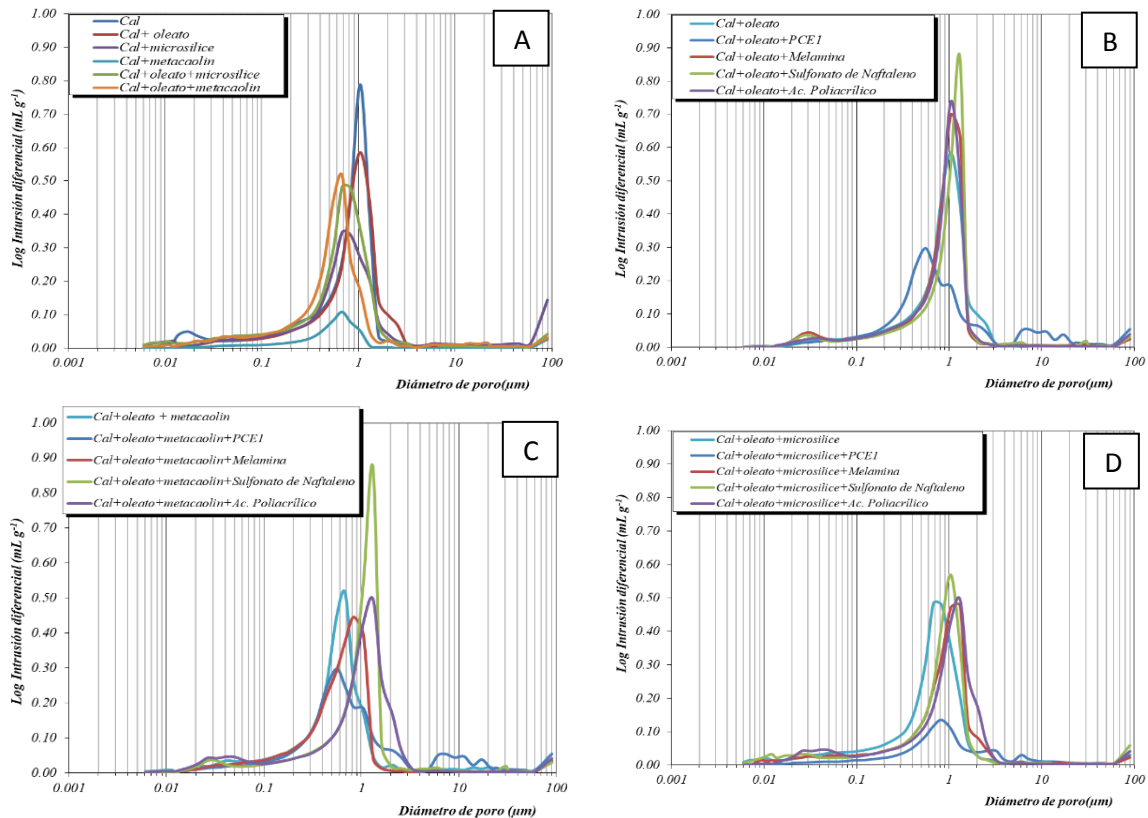


Figura 8. Distribuciones de tamaño de poro de diferentes muestras de pasta después de 365 días de curado.

Además, los pequeños poros capilares atribuidos a la formación de C-S-H experimentaron una clara disminución (ver el rango de poros entre 0,1 y 0,01  $\mu\text{m}$ ). La reducción de poros más grandes explica el aumento de las resistencias mecánicas como consecuencia de la presencia de microsílíce y metacaolín.

En el caso de la mezcla del cal-oleato (Figura 8B) y superplastificante, la presencia de PCE1 disminuye la presencia de poros alrededor de 1  $\mu\text{m}$ , sin embargo, dio lugar a la aparición de poros en el rango de 6 a 11  $\mu\text{m}$ . En el caso de la mezcla cal-oleato-metacaolín y superplastificante (Figura 8C), se advierte una disminución considerable en los poros de tamaño alrededor de 1  $\mu\text{m}$  con todos los superplastificantes. Sin embargo, cuando se emplea el sulfonato de naftaleno la cantidad se mantiene casi constante, por lo que se puede decir que el PNS obstaculizó la formación de CSH, debido a que no hay disminución de los poros en la zona de 1  $\mu\text{m}$  de, en cambio, el PCE1 favoreció la formación de estas fases. Cuando se sustituyó el metacaolín por la microsílíce en las mezclas con superplastificantes (Figura 8D) disminuyeron los poros de tamaño alrededor de 1  $\mu\text{m}$ , incluso al agregar el PNS observándose la mayor reducción al agregar el PCE1.

### Ángulo de contacto

Se utilizó un instrumento de medición de ángulo de contacto óptico (OCA 15EC Dataphysics) para determinar el ángulo de contacto de agua estático (WCA) y el tiempo de absorción de agua (es decir, el tiempo de desaparición de la gota de agua después de su deposición, vida útil de la gota de agua, parámetro juzgado de interés para sustratos muy porosos). El ángulo de contacto se determinó usando gotas de 5  $\mu\text{L}$  y se realizaron dos mediciones consecutivas para cada muestra fraguada a 365 días, con el fin de obtener resultados confiables. Los resultados de esta medición se muestran en la Tabla 1, donde además se describe si hubo absorción completa de la gota de agua depositada, ya que en algunas de las mezclas no fue posible la medida en un plazo razonable del ángulo, por la porosidad e hidrofiliidad que tienen los morteros de cal.

Tabla 1: Resultados de la medida del ángulo de contacto

Mezcla	Ángulo de contacto	Absorción completa de la gota de agua y desaparición en corto intervalo de tiempo
Cal+Oleato	75,0	No
Cal+Oleato+Microsilice	59,2	No
Cal+Oleato+Metacaolín	28,8	Si
Cal+Oleato+PCE1	66,8	No
Cal+Oleato+Melamina	53,5	No
Cal+Oleato+PNS	29,4	Si
Cal+Oleato+Ac. Poliacrílico	58,2	No
Cal+Oleato+Microsilice+PCE1	95,1	No
Cal+Oleato+Microsilice+Melamina	30,2	Si
Cal+Oleato+Microsilice+PNS	29,6	Si
Cal+Oleato+Microsilice+Ac. Poliacrílico	13,7	Si
Cal+Oleato+Metacaolín+PCE1	123,6	No
Cal+Oleato+Metacaolín+Melamina	30,4	Si
Cal+Oleato+Metacaolín+PNS	40,1	Si
Cal+Oleato+Metacaolín+Ac. Poliacrílico	11,9	Si

La mezcla que resultó ser más hidrorrepelente fue la mezcla Cal-Oleato-Metacaolín-PCE1, debido a: (i) como se pudo observar anteriormente, esta mezcla fue la de menor porosidad total entre las testadas; (ii) el PCE1 no interfiere con la actividad hidrofugante del oleato, resultando dos aditivos altamente compatibles. La mezcla más hidrofílica es la mezcla Cal-Oleato-Metacaolín-Poliacrílico, lo que plantea la hipótesis – que deberá resolverse - de una interacción química entre el ácido poliacrílico y el oleato, de tal manera que la capacidad hidrofóbica de este último disminuye, permitiendo que la mezcla de libre paso a la absorción de agua. Cabe destacar que la hidrorrepelencia en todas las mezclas ocurre, fundamentalmente, en la superficie de las mismas, debido por el carácter tensioactivo del oleato sódico. La parte hidrofóbica es la que queda expuesta en la superficie durante el proceso de mezcla con dispersión acuosa. Sin embargo, cuando se intenta estudiar el efecto hidrorrepelente en la parte interna de alguna probeta, habitualmente no es posible medir el ángulo de contacto ya que la hidrorrepelencia es mucho menor en esta zona y debido a la porosidad del mortero la gota desaparece absorbida, se puede decir que es debido a que la mezcla esta poco hidrofugada pese al 0.5% de oleato.

## Resumen de resultados

En la Tabla 2 se resumen todos los resultados de este trabajo experimental, enumerando en cada ensayo a las muestras del 1 al 4, donde el número 1 se refiere a la muestra que tiene un resultado parecido a la de un mortero de cal común y el número 4 representa una mejora en la prueba en la que se está evaluando.

Tabla 2: Resumen de los resultados de los ensayos realizados, tanto en fresco como en endurecido a los morteros estudiados

Mezcla	Propiedad					
	Trabajabilidad	Tiempo de Fraguado	Resistencia a la compresión	Porosidad	Ángulo de contacto	Calificación cualitativa global
Cal	1	1	1	1	1	5
Cal+Oleato	1	3	1	1	4	10
Cal+ Microsilice	4	1	2	3	1	11
Cal+ Metacaolín	2	1	3	4	1	11
Cal+Oleato+Microsilice	3	1	2	2	2	10
Cal+Oleato+Metacaolín	1	1	4	2	1	9
Cal+Oleato+PCE1	4	1	2	4	3	14
Cal+Oleato+Melamina	2	3	4	3	3	15
Cal+Oleato+PNS	3	4	3	1	2	13
Cal+Oleato+Ac. Poliacrílico	1	1	1	2	3	8
Cal+Oleato+Microsilice+PCE1	4	1	3	4	4	16
Cal+Oleato+Microsilice+Melamina	2	3	3	3	2	13
Cal+Oleato+Microsilice+PNS	3	2	2	1	2	10
Cal+Oleato+Microsilice+Ac. Poliacrílico	1	4	1	2	2	10
Cal+Oleato+Metacaolín+PCE1	4	2	4	4	4	18
Cal+Oleato+Metacaolín+Melamina	2	2	3	2	2	11
Cal+Oleato+Metacaolín+PNS	3	3	2	1	2	11
Cal+Oleato+Metacaolín+Ac. Poliacrílico	1	4	1	2	1	9



Se ha considerado mejora, para los morteros de inyección estudiados, y siempre dentro de unos límites razonables, una mejora en la fluidez (trabajabilidad), un acortamiento del tiempo de fraguado (generalmente elevado para los morteros de cal), un incremento en las resistencias a compresión desarrolladas, una reducción de porosidad y una superficie hidrofóbica que genere repelencia al agua para minimizar la absorción de la misma y prevenir el deterioro.

Como se puede observar en la tabla anterior, la mezcla entre cal-oleato-metacaolín/microsilíce-Ac. Poliacrílico es la mezcla que menos cambios tiene comparándola con un mortero de cal normal, mientras que la mezcla Cal-Oleato-Metacaolín-PCE1 es la que más cambios favorables en todos los aspectos estudiados tiene, al ser la mezcla con mayor resistencia a la compresión, mejor fluidez, menor porosidad y mayor hidrorrepelencia. Además la trabajabilidad de esta mezcla mejora con respecto al control sin superplastificante.

## Conclusión

A través de este estudio con un punto de vista científico y técnico se logró determinar el comportamiento y la compatibilidad existente en morteros de cal con diversas combinaciones de aditivos y adiciones minerales. Este trabajo describe las propiedades de las diferentes mezclas entre cal aérea cálcica, adiciones puzolánicas y un hidrofugante. Los resultados son favorables si se desea usar alguna de estas mezclas en la restauración del Patrimonio Arquitectónico, resultando como mejor la mezcla de cal-oleato-metacaolín-PCE1 que mejora las propiedades de un mortero ordinario de cal, para este uso.

## Agradecimientos

Trabajo financiado por el Proyecto MAT2015-70728-P del Ministerio de Economía y Competitividad. J.F. González-Sánchez agradece a la Asociación de Amigos de la Universidad de Navarra por una beca pre-doctoral.

## Referencias

1. S. Andrejkovičová, C. Alves, A. Velosa, F. Rocha, *Bentonite as a natural additive for lime and lime-metakaolin mortars used for restoration of adobe buildings*, Cement and Concrete Composites, 60 (2015): 99-110
2. J.S. Pozo-Antonio, *Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate*, Construction and Building Materials, 77 (2015): 472-478
3. B.A. Silva, A.P. Ferreira Pinto, Augusto Gomes, *Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars*, Construction and Building Materials, 72 (2014): 208-218
4. Rodríguez-Navarro, C., Hansen E., Ginell W. S., *Calcium hydroxide crystal evolution upon aging of lime putty*, J. Am. Ceram. Soc., 81 (1998): 3032-3034
5. Conclusions of the Symposium "Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings", Rome, Materials and Structures, 23 (1990): 235
6. I. Navarro-Blasco, M. Pérez-Nicolás, J.M. Fernández, A. Duran, R. Sirera, J.I. Alvarez, *Assessment of the interaction of polycarboxylate superplasticizers in hydrated lime pastes*

*modified with nanosilica or metakaolin as pozzolanic reactives*, Construction and Building Materials, 73 (2014): 1-12

7. J.M. Fernández, A. Duran, I. Navarro-Blasco, J. Lanas, R. Sirera, J.I. Alvarez, *Influence of nanosilica and a polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars*, Cement and Concrete Research, 43 (2013): 12-24
8. I. Karatasios et al., *Photo-induced carbonation of lime-TiO<sub>2</sub> mortars*, Applied Catalysis B: Environmental, 95 (2010): 78-86
9. B.A. Silva, A.P. Ferreira Pinto, Augusto Gomes, *Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars*, Construction and Building Materials, 72 (2014): 208-218
10. V. Nežerka, Z. Slížková, P. Tesárek, T. Plachý, D. Frankeová, V. Petrářová, *Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust*, Cement and Concrete Research, 64 (2014): 17-29
11. A. Arizzi, G. Cultrone, *Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: a mineralogical, textural and physical-mechanical study*, Constr. Build. Mater., 31 (2012): 135-143
12. A. Duran, I. Navarro-Blasco, J.M. Fernández, J.I. Alvarez, *Long-term mechanical resistance and durability of air lime mortars with large additions of nanosilica*, Construction and Building Materials 58 (2014): 147-158
13. UNE-EN 196-1, Método de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas, 2005.
14. UNE-EN 1015-3, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas), 2000.
15. UNE-EN 1015-9, Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco, 2000.



Universidad  
de Navarra



**FICAL**  
Fórum Ibérico de la Cal