

# Morteros adicionados con metacaolín: efecto de la proporción de agregado

*Mortars added with metakaolin: effect of aggregate proportion*

Gregorio García-López-de-la-Osa, Mariano González-Cortina, Mercedes del-Río-Merino y Fernando Magdalena-Layos  
Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8194>

## 1. INTRODUCCIÓN

La vía tradicional de mejora de morteros y hormigones se ha basado en el uso de materiales puzolánicos. Son materiales con base silíceo o silicoaluminosa, con leves cantidades de hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio. Las adiciones de humo de sílice y de cenizas volantes son las más habituales, incrementando en general la resistencia y la durabilidad. En los últimos años un nuevo producto, de naturaleza artificial, ha venido a sumarse con los mismos objetivos; el metacaolín. Existen múltiples publicaciones sobre su uso como sustituto puzolánico parcial del cemento y sus efectos [1-5]. Estos trabajos anteriores han demostrado que la incorporación de metacaolín a los hormigones y morteros realizados con cemento tipo portland incrementa significativamente varias propiedades de los mismos.

Se mejora la resistencia a compresión debido a la mayor calidad de la microestructura del cemento hidratado. Asimismo se mejora la resistencia al ataque de cloruros y la durabilidad en entornos de sulfato-cloruro. A estas mejoras se les añade una que tiene especial relevancia en el aspecto puramente práctico del uso de las masas, la mejora de la trabajabilidad de la mezcla en fresco. El proceso químico que explica la mejora se fundamenta de la forma siguiente:

- Como es ampliamente conocido, en un mortero normal la tobermorita (silicato dicálcico hidratado), que es la responsable de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la masa, se forma tras la hidratación de la alita (silicato tricálcico) y la belita (silicato bicálcico). En esta reacción se produce también portlandita (hidróxido de calcio).
- Cuando se añade metacaolín a la mezcla, éste reacciona fuertemente

con la portlandita, formando tobermorita y además gehlenita (aluminosilicato cálcico), e hidrogranates. Todos ellos también responsables del buen funcionamiento de las pastas.

El metacaolín es un aluminosilicato ( $2\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) activado térmicamente mediante calcinación controlada, entre 650 y 800° C del caolín, en horno rotatorio, con posterior micronización. Para este trabajo se ha utilizado el metacaolín suministrado por BASF, concretamente el producto MetaMax, adecuadamente caracterizado. Se presenta en forma de material pulverulento, con un diámetro de partícula equivalente de 1,3  $\mu\text{m}$ . Se compone básicamente en un 98 a 99,6% de caolín calcinado ( $2\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) y un 0,4 a 2% de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Su tono es blanco y su estructura amorfa.

En una línea diferente a trabajos mencionados, en este no se sustituye el cemento por el metacaolín sino que se utiliza como una adición a la mezcla. El cemento utilizado es CEM II/B-M (P-L) 32,5N. Las adiciones se han realizado en relación al peso del conglomerante con unos porcentajes del 5%, del 10% y del 15%. Sendas proporciones para dosificaciones con relación cemento/arena de 1:3, 1:4 y 1:5, respetando así la relación de laboratorio y utilizando dos más, que tratan de aproximar el dispositivo experimental a los morteros utilizados habitualmente en obra para fábricas.

La arena utilizada en este trabajo ha sido elegida entre las posibles del mercado, adquirible en los almacenes de ma-

teriales de construcción. Se trata de una arena natural, que se extrae en cantera, en la provincia de Segovia. Previamente a su uso se ha caracterizado convenientemente, estableciendo sus características geométricas; granulometría y contenido de finos (UNE-EN 933-1) y físicas; densidad de las partículas y absorción de agua (UNE-EN 1097-6). Resultando un módulo de finura de 2,99 y un contenido de finos de 0,31%

Para lograr masas homogéneamente comparables, manteniendo los porcentajes citados de adición de metacaolín y las diferentes proporciones de arena, se ha utilizado el factor de la trabajabilidad, dosificando el agua en función de la misma. Buscando en cada caso, que permita obtener diámetros de ciento setenta milímetros en el ensayo de consistencia de la mesa de sacudidas (UNE-EN 1015-3), obteniéndose proporciones entre el 65 y 106% de agua en relación al peso de cemento.

Es de destacar la mejora que se produce de la trabajabilidad de los diferentes morteros, utilizando metacaolín, en comparación con los de referencia.

## 2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Para el presente estudio, en esta primera fase, se han llevado a cabo los ensayos básicos de estudio de los morteros; flexión, compresión (UNE-EN 1015-11), mediante prensa de banco de la casa Iber-test, densidad en fresco (UNE-EN 1015-6), densidad del mortero endurecido (UNE-EN 1015-10) y absorción (UNE-EN 1015-18). Realizando también durabilidad (mediante ciclos de hielo y deshielo) y adherencia (UNE-EN 1015-12).

### 2.1. COMPRESIÓN

Dados los resultados obtenidos para las tres dosificaciones y con las cuatro posibles proporciones de metacaolín (ver Figura nº 1), se pueden hacer las siguientes afirmaciones.

- No existe una relación lineal entre el incremento de la cantidad de metacaolín y el incremento de la resistencia a compresión de los morteros.
- En general el efecto del metacaolín es siempre positivo.

DOSIFICACIÓN			
ADITIVO	REL C:S	% ADITIVO	% AGUA
METACAOLÍN	1:3	5%	0,65
	1:3	10%	0,70
	1:3	15%	0,73
	1:4	5%	0,85
	1:4	10%	0,87
	1:4	15%	0,88
	1:5	5%	1,03
	1:5	10%	1,05
	1:5	15%	1,06

Tabla 1: Dosificaciones utilizadas

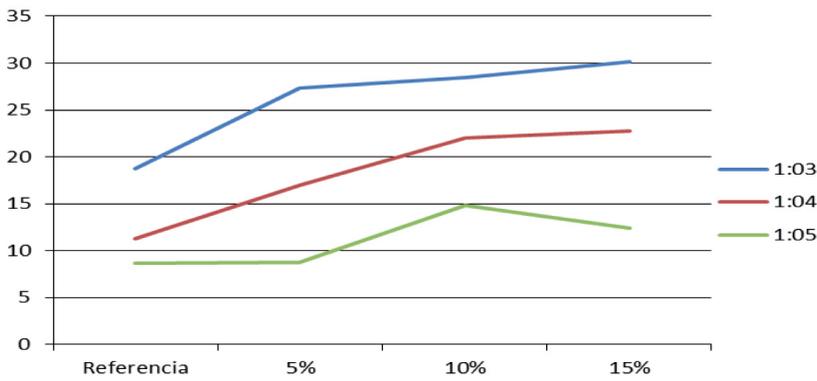


Figura 1: Resultados de compresión

- c. Existen variaciones de comportamiento en las diferentes relaciones cemento/arena.
- d. Para la dosificación 1:3 (c/a) se produce un fuerte incremento inicial de la resistencia con una adición del 5%, llegando a incrementarla un 40%, que se modera posteriormente, al 10% y el 15%, a lo largo de una recta con una pendiente del 4% aproximadamente. El incremento total de resistencia es de casi un 70% sobre la inicial sin adición de metacaolín.
- e. Para la dosificación 1:4 (c/a) el metacaolín logra duplicar la resistencia con el 15% de adición. Se mantiene el incremento de la resistencia, en la misma cantidad, en el primer escalón de aportación de metacaolín, siendo en este caso de menor importancia entre el 10% y el 15% de adición.
- f. Para la dosificación 1:5 (c/a) el efecto inicial del metacaolín es prácticamente nulo, produciéndose el efecto en el 10%, que logra casi la duplicación de la resistencia. Es relevante de este caso, el hecho de que el mayor porcentaje de aportación de metacaolín, no solo no incrementa el escalón anterior, sino que la resistencia se reduce, siendo, en cualquier caso, superior a la de la muestra de referencia.
- g. En sentido transversal se puede afirmar que la adición óptima de metacaolín se encuentra en el entorno del 10%. Coincide paralelamente con los resultados de Restrepo [6], aunque en su caso se procede a la sustitución de cemento por metacaolín.

## 2.2. FLEXIÓN

Dados los resultados obtenidos para las tres dosificaciones y con las cuatro

posibles proporciones de metacaolín (ver Figura nº 2), se pueden hacer las siguientes afirmaciones.

- h. Se mantiene y acentúa el comportamiento no constantemente lineal entre el incremento de la cantidad de metacaolín y el incremento de la resistencia.
- i. También se observa que el efecto del metacaolín es mucho menor en la dosificación con mayor cantidad de cemento.
- j. Para la dosificación 1:3 (c/a) el efecto del metacaolín genera un primer escalón de un 20% de incremento de resistencia.
- k. Para la misma dosificación se produce un valle en el 10% pendiente de comprobación, al no corresponderse con los resultados de otros ensayos.
- l. El mejor comportamiento se corresponde con la dosificación 1:4 (c/a), con un pico en el 10% que duplica la resistencia inicial. Este pico se ve acentuado por el descenso de resistencia que se produce con el nivel de adición del 15%.
- m. Para la dosificación 1:5 (c/a), en el primer escalón de adición, se observa un descenso de las resistencias, que también está siendo objeto de reestudio.

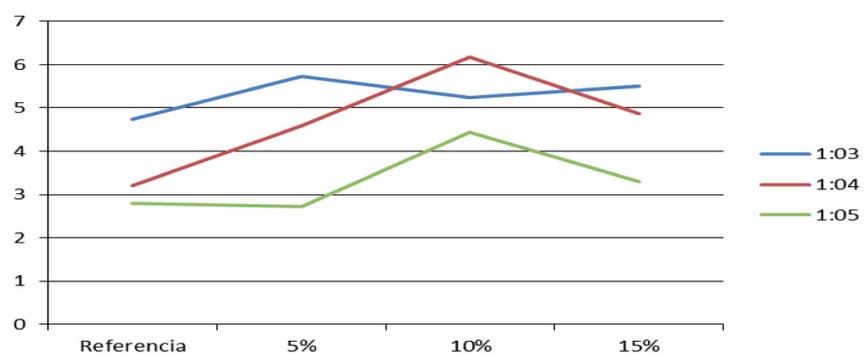


Figura 2: Resultados de flexión

m. Cabe destacar, el comportamiento homogéneo de la adición al 10% en todas las proporciones de arena/cemento.

## 2.3. ADHERENCIA

Los datos preliminares de adherencia indican que, utilizando metacaolín, el mejor comportamiento se produce con la dosificación con mayor contenido de cemento, es decir con la 1:3 (c/a), incrementándose de manera sustantiva en relación a las otras dos, que ofrecen unos resultados muy similares, con una leve deriva hacia la dosificación 1:5 (c/a).

## 2.4. DURABILIDAD

Los datos iniciales de las probetas sometidas a ciclos de hielo-deshielo y posteriormente sometidas a ensayos de compresión y flexión, muestran que el efecto del metacaolín es siempre beneficioso, siendo mejores los resultados de aquellas probetas con un mayor contenido de cemento. Cabe destacar que la compactación de los morteros adicionados con el metacaolín, junto con el mejor funcionamiento mecánico de la pasta, logra que las probetas sometidas a veinticinco ciclos de hielo-deshielo posean resistencias mayores que las logradas con los morteros de referencia.

## 2.5. ASPECTOS ECONÓMICOS Y SOSTENIBLES

El beneficio económico del uso del metacaolín es indirecto, ya que representa un elevado coste directo de la elaboración del mortero, pudiendo establecerse en el entorno de diez a doce veces más que el cemento tipo portland. Sin embargo, estudios previos [7] demuestran la posibilidad de ahorrar hasta un 50% de la masa de Clinker, añadiendo el metacaolín directamente a la mezcla de producción de cemento. Con una segunda y muy importante consecuencia relacionada con la sostenibilidad cual es, la reducción de un 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### 3. CONCLUSIONES

Con los datos disponibles hasta la fecha, es posible realizar las siguientes afirmaciones:

- Primero, la confirmación de que el metacaolín mejora las propiedades de los morteros.
- Se destaca la mejora en dosificaciones mayores que el 1:3 (c/a), pero no de forma lineal continua, ya que dosificaciones, en el entorno del 1:5 (c/a), como la mayor de las utilizadas en este estudio, no son beneficiadas en la misma medida.
- El porcentaje más adecuado, entre los utilizados en este estudio, para el logro del incremento de las propiedades se encuentra en el 10% de adición, coincidiendo con estudios previos en los que, sin embargo, se ha procedido a la sustitución.

### PARA SABER MÁS

- [1] Kostuch, J.A.; Walters, V.; Jones, T.R.: "High performance concretes incorporating metakaolin: a review", Concrete 2000 (1993), E&FN Spon, pp. 1799-1811
- [2] Sabir, B.B.; Wild, S.; Khatib, J.M.: "On the workability and strength development of metakaolin concrete", Concrete for Environmental Enhancement and Protection (1996), E&FN Spon, pp. 651-656.
- [3] Curcio, F.; Deangelis, B.A.; Pagliolico, S.: "Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars", Cem. Concr. Res., vol. 28, nº 6 (1998), pp. 803-809.
- [4] Sabir, B.B.; Wild, S.; Bai, J.: "Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete: a review", Cement and Concrete Composites, vol. 23 (2001), pp. 441-454.
- [5] Siddique, R.; Klaus, J.: "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review", Applied Clay Science, vol. 43, nº 3-4 (2009), pp. 392-400.
- [6] Restrepo, J. C.; Restrepo, O. J.; Tobón, J. I.: "Efectos de la adición de metacaolín en el cemento portland", Revista de la facultad de minas de la Universidad Nacional de Colombia, vol. 73 (2006), nº 150, pp. 131-141.
- [7] Vizcaino, L.M.; Sánchez, S.; Damas, S.; Pérez, A.; Scrivener, K.L.; Martirena, J.F.: "Industrial trial to produce a low Clinker, low carbón cement", Materiales de Construcción, vol. 65, Issue 317, January-March 2015

# AVENTICS<sup>A</sup>

## PNEUMATICS

## IT'S THAT EASY

**Lo más eficaz para su empresa.**

"Aventics" para resultados rápidos, fáciles y fiables.

Gracias a nuestra experiencia y servicio, podemos proporcionarle soluciones de forma continua y productos a medida en aplicaciones neumáticas. Beneficiarse de nuestro *know-how* y experiencia en tecnología neumática.

"Aventics", su *partner* profesional.



**AVENTICS Spain**  
Av. de la Vía Augusta, 15-25  
St. Cugat del Vallés  
08174 Barcelona  
Tel. (+34) 935 001 250  
[www.aventics.com](http://www.aventics.com)  
[info.es@aventics.com](mailto:info.es@aventics.com)

**Rexroth**  
Pneumatics