

Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado¹

Effects of Metakaolin Percentages in the Final Properties of Blended Concrete²

Efeito da porcentagem de adição de metacaulim nas propriedades finais do concreto adicionado³

Janneth Torres-Agredo⁴
Ruby Mejía-de-Gutiérrez⁵
Silvio Delvasto-Arjona⁶

¹ Fecha de recepción: 17 de marzo de 2010. Fecha de aceptación: 6 de diciembre de 2010. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado *ACTICLAY: una pozolana aluminica de elevado desempeño*, código 1106-06-10941, desarrollado por el grupo de investigación de Materiales Compuestos de la Universidad del Valle, Cali, Colombia y financiado por Colciencias.

² Submitted on: March 17, 2010. Accepted on December 6, 2010. This article is the result of the research project *ACTICLAY: A High-Performance Aluminic Pozzolan*, registration number 1106-06-10941, developed by the research group on Composite Materials of the Universidad del Valle, Cali, Colombia and financed by Colciencias.

³ Data de recepção: 17 de março de 2010. Data de aceitação: 6 de dezembro de 2010. Este artigo deriva-se de um projeto de pesquisa denominado *ACTICLAY: uma pozolana aluminica de elevado desempenho*, código 1106-06-10941, desenvolvido pelo grupo de pesquisa de Materiais Compostos da Universidad del Valle, Cali, Colômbia e financiado por Colciencias.

⁴ Ingeniera de Materiales. Magíster en Ingeniería. Doctora en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Profesora asociada, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Colombia. Correo electrónico: jtorresa@unal.edu.co.

⁵ Ingeniera química. Magíster en Ciencias Químicas. Doctora en Ciencias Químicas, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Profesora titular, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. Correo electrónico: rudeguti@hotmail.com.

⁶ Ingeniero químico, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Magíster en Civil Engineering and Management Materials, University of Illinois, Estados Unidos. Doctor en Nuevos Materiales y sus Tecnologías de Fabricación, Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor titular, Universidad del Valle. Correo electrónico: silviodelvasto@hotmail.com.

Resumen

Este estudio forma parte de los resultados de un proyecto de investigación, cuyo objetivo fue producir metacaolín (MK) a partir de materias primas colombianas, para uso como adición puzolánica en morteros y concretos de cemento Portland. En estudios anteriores se ha reportado un buen desempeño de concretos adicionados con MK, en resistencias mecánicas y de durabilidad; por lo tanto, se estudia el efecto del porcentaje de adición del MK y se compara dicho desempeño frente al humo de sílice (HS). Hubo ensayos de resistencia a la compresión y de durabilidad (como absorción total y absorción capilar) y se midió el desempeño frente a los cloruros. Para la resistencia a la compresión se reportó el mejor comportamiento para los concretos adicionados con MK al 20%; en porcentajes superiores la resistencia disminuyó. Adicionalmente, la resistencia a la compresión fue un poco menor para los concretos adicionados con MK en comparación con el HS; pero el MK mostró ser superior en cuanto a las propiedades durables respecto a la muestra patrón y a la adicionada con HS.

Palabras clave

Resistencia de materiales, hormigón-pruebas, puzolanas-pruebas, metacaolín-pruebas.

Abstract

The present paper is part of a research project whose main objective was to obtain metakaolin (MK) from raw materials obtained in Colombia. MK is to be used as a pozzolan in Portland cement manufacturing. In previous studies, the performance shown by concrete blended with MK, in terms of mechanical strengths and durability, proved to be adequate. As a result, the effect of the percentage of added MK on the properties of concrete was studied. For purposes of comparison, MK was substituted with silica fume (SF). Compressive strength and durability tests, such as total absorption, capillary absorption, and chloride permeability, were used. For compressive strength, concrete showed better performance when mixed up with a 20% MK. Higher MK percentages generated a decrease in resistance. Additionally, when compared to concrete mixed with SF, compressive strength was slightly lower for MK-mixed concrete. Nevertheless, MK proved to be better in terms of durability with respect to the pattern sample and the one added with SF.

Key words

Strength of materials, concrete-testing, pozzuolanas-testing, metakaolin-testing.

Resumo

Este estudo faz parte dos resultados de um projeto de pesquisa, cujo objetivo foi produzir metacaulim (MK) a partir de matérias primas colombianas, para uso como aditivo pozolânico em argamassas e concretos de cimento Portland. Em estudos anteriores observou-se um bom desempenho de concretos adicionados com MK, em resistências mecânicas e de durabilidade; portanto, estuda-se o efeito da porcentagem de adição do MK e compara-se tal desempenho com a sílica de fumo (SF). Houve ensaios de resistência à compressão e de durabilidade (como absorção total e absorção capilar) e mediu-se o desempenho diante dos cloretos. Para a resistência à compressão observou-se um melhor comportamento para os concretos adicionados com 20% de MK; em porcentagens superiores a resistência diminuiu. Adicionalmente, a resistência à compressão foi um pouco menor para os concretos adicionados com MK em comparação com a SF; mas o MK mostrou ser superior com respeito às propriedades duráveis em comparação com a amostra padrão e à adicionada com SF.

Palavras chave

Resistência de materiais, concreto-testes, pozolanas-testes, metacaulim-testes.

Introducción

Las puzolanas están formadas por *fases activas* capaces de reaccionar con la cal proveniente de la hidratación del cemento Portland. Esto lleva a que la puzolana se integre a dicho proceso de hidratación y dé como resultado más bajo contenido de portlandita e incremento en los silicatos cálcicos hidratados. Todas estas fases activas son termodinámicamente inestables y, en general, están constituidas por materiales amorfos (Massazza, 1993). La reacción puzolánica favorece los concretos adicionados, pues incrementa las resistencias mecánicas (compresión y flexión), reduce la permeabilidad y la porosidad capilar, aumenta resistencias frente al ataque químico y la posibilidad de prevenir la reacción árido-álcali, entre otras (Mehta, 1989).

Entre los materiales puzolánicos más utilizados en la industria de la construcción —sobre todo para la producción de concretos de alto desempeño— se tiene el humo de sílice (HS) y el metacaolín (MK), considerados puzolanas de alta reactividad. El HS es un polvo gris muy fino, compuesto principalmente de dióxido de sílice (SiO_2) amorfo en una proporción mayor del 85%. Este material se obtiene en el horno de arco de las industrias de aleaciones de ferrosilicio, al condensarse los vapores de óxido de silicio a baja temperatura; de ahí su carácter altamente amorfo (Hewlett, 1989). Por otro lado, el MK es un aluminosilicato producido por la calcinación de la caolinita pura ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), en un rango de temperatura controlado que permite su deshidroxilación y, por lo tanto, la obtención de un producto con una alta amorficidad (Moya, 1998).

Algunos autores (Caldarone, 1994; Barata y Dal Molin, 2002) afirman que el MK puede reemplazar el HS, ya que presenta gran variedad de ventajas respecto a este. Posee propiedades mecánicas y de durabilidad muy similar o mejor que el HS; le confiere una mayor manejabilidad a la mezcla, y su color blanco lo hace más interesante para aplicaciones arquitectónicas que el HS con su color negro.

En consecuencia, el objetivo del presente artículo es comparar las propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos adicionados con un MK de origen

colombiano y un HS disponible comercialmente. Cabe anotar que en estudios anteriores se ha reportado un buen comportamiento para los concretos adicionados con este MK de procedencia nacional (Mejía de Gutiérrez et al., 2006 y 2009; Mejía de Gutiérrez, Torres y Guerrero, 2004).

1. Materiales y procedimiento experimental

El MK se obtuvo utilizando como materia prima un caolín procedente de la región de Antioquia, sometido a un tratamiento térmico durante dos horas a 700 °C, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en un horno eléctrico. Estos parámetros se determinaron en estudios anteriores (Mejía de Gutiérrez, Torres y Guerrero, 2004). El HS seleccionado corresponde a un producto de importación disponible comercialmente en el país. En la Tabla 1 se presentan las características fisicoquímicas del MK y del HS; los datos para HS corresponden a los reportados en la ficha técnica del distribuidor.

Tabla 1. Características de los materiales utilizados

Componente	OPC	MK	HS
SiO ₂ (%)	20,27	52,57	94,28
Al ₂ O ₃ (%)	5,34	44,95	1,06
Fe ₂ O ₃ (%)	3,91	1,50	0,29
CaO (%)	61,70	-	1,37
MgO (%)	1,44	-	0,00
Pérdida al fuego (%)	3,57	0,52	2,91
Gravedad específica (%)	3,10	2,48	2,20
Finura Blaine (m ² /kg)	420,00	-	15.000-30.000

OPC: Cemento Portland Ordinario; MK: metacaolín; HS: humo de sílice.

Fuente: presentación propia de los autores.

Para el estudio se prepararon concretos utilizando un Cemento Portland Ordinario (OPC), cuyas características se presentan en la Tabla 1. En todas las mezclas se utilizó un total de 450 kg de cementante (cemento portland + adición), donde la proporción de HS incorporada en el concreto fue del 10%, mientras que el MK se incorporó en valores hasta de un 30%. Los agregados utilizados fueron de

tipo silicio con las siguientes características: el agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19,1 mm; gravedad específica de 2,72; peso unitario de 1350 kg/m³, y absorción de 1,2%. El agregado fino (arena) con gravedad específica de 2,56; peso unitario de 1560 kg/m³; absorción de 3,7%, y un módulo de finura de 2,8. Para mantener una relación agua-cementante constante (a/C 0,4) se utilizó un aditivo superplastificante, calculado respecto a la cantidad de cementante. En la Tabla 2 se presentan las proporciones utilizadas en las mezclas.

Tabla 2. Proporciones de las mezclas de concreto

Mezcla	Cementante		Agregados (kg)		Agua (kg)	Aditivo (%)	a/C	Asentamiento (cm)	
	Cemento (kg)	Adición (kg)							
			HS	MK					Grava
Patrón	450,0	0	0,0	891	790	180	2,0	0,4	5
HS 10%	405,0	45	0,0	891	790	180	2,0	0,4	10
MK 10%	405,0	0	45,0	891	790	180	2,5	0,4	9
MK 15%	362,5	0	67,5	891	790	180	2,5	0,4	10
MK 20%	360,0	0	90,0	891	790	180	3,0	0,4	15
MK 30%	315,0	0	135,0	891	790	180	4,3	0,4	20

a/C: relación agua-cementante; MK: metacaolín; HS: humo de sílice.

Fuente: presentación propia de los autores.

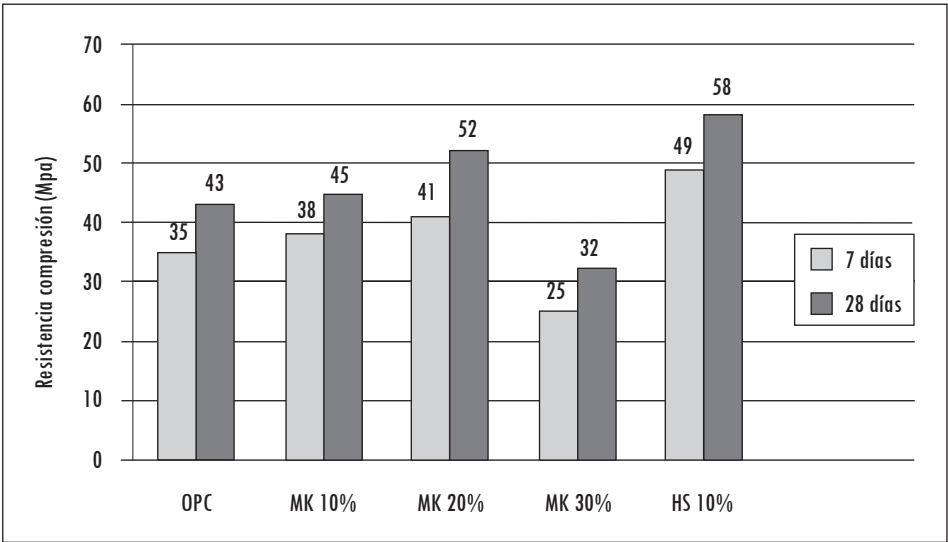
Todas las muestras se sometieron a compactación manual mediante la técnica de apisonado; posteriormente, a vibración, utilizando una mesa vibradora de laboratorio. Esto con el fin de garantizar una adecuada consolidación. Posterior al moldeo, las probetas de concreto se curaron en agua saturada con Ca(OH)₂ a temperatura ambiente hasta la edad de ensayo. La resistencia a la compresión se evaluó según la norma ASTM C39. Para caracterizar el comportamiento durable de los concretos producidos se realizaron ensayos de absorción según la norma ASTM C642, de resistencia a la penetración de agua y coeficiente de absorción capilar según la metodología de Fagerlund (Mejía de Gutiérrez, Torres y Guerrero, 2004) y la norma ASTM C1585; además, se determinó la permeabilidad a cloruros aplicando la norma ASTM C1202. Estos ensayos se realizaron a especímenes curados a 28 días. Los resultados de los ensayos que se presentan a continuación corresponden a los promedios de tres réplicas.

2. Resultados y discusión

2.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó en probetas cilíndricas de 76,2 mm de diámetro a edades de 7 y 28 días de curado. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 1; se aclara que el coeficiente de variación en la resistencia a la compresión de los especímenes ensayados fue inferior al 6%. En esta se aprecia que la resistencia mecánica a compresión de los concretos adicionados, tanto con HS como con MK, supera la resistencia de la muestra patrón de referencia (OPC). De las mezclas con MK, el mayor desarrollo resistente corresponde al 20% MK. Para las dos edades evaluadas se observa que la resistencia de los concretos adicionados con HS supera en un 19% y 11% respectivamente a los concretos con un 20% de MK.

Figura 1. Resistencia a la compresión a 7 y 28 días de curado



OPC: Cemento Portland Ordinario; MK: metacaolín; HS: humo de sílice.

Fuente: presentación propia de los autores.

Estos resultados coinciden con los reportados por otros investigadores (Curcio, Deangelis y Pagliolico, 1998; Hong et al., 2007). De igual manera, son comparables con los obtenidos en anteriores estudios (Mejía de Gutiérrez et al., 2009), para concretos adicionados con MK y HS a edades de curado de 28 días y 10%

de adición. Cabe anotar que estos resultados evidencian la elevada reactividad de los materiales evaluados.

En la Figura 1 también se observa que a partir del 20% de adición de MK, la resistencia a la compresión disminuye considerablemente para las dos edades de curado. Similares resultados fueron reportados por (Wild et al., 1996), quienes igualmente recomiendan, como porcentaje óptimo de reemplazo en concretos adicionados, un 20% de MK.

Es de anotar que las mezclas con MK demandaron mayor cantidad de agua, por ello para mantener una relación a/C constante del orden de 0,4 fue necesario incrementar la dosis del aditivo superplastificante, tal como se aprecia en la Tabla 2. Al respecto, existen resultados controvertidos. Para algunos autores los requerimientos de agua en mezclas de concreto adicionadas con MK son inferiores comparados con lo requerido por adiciones como el HS; por el contrario, otros han reportado que la fluidez de concretos con MK no es del todo óptima y que además del aditivo es necesario utilizar mezclas con otras adiciones para mejorar este comportamiento. Así, se recomienda la adición, por ejemplo, de pequeñas cantidades de escoria siderúrgica de alto horno (Sabir et al., 2001; Li y Ding, 2003).

2.2 Desempeño frente a la durabilidad

Los ensayos de absorción y porosidad total se realizaron sobre muestras cilíndricas de 76 mm de diámetro y 10 mm de espesor, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C642. Los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 3. Se observa que de los concretos evaluados, el menor valor se obtiene para la mezcla con un 20% de MK; es de resaltar que al incorporar un 30% de adición, el desempeño frente a esta propiedad se reduce. Para el 20% de MK, los valores obtenidos de porcentaje de absorción (3,59%) y porosidad (8,10%) corresponden a concretos de reducida permeabilidad. Estos resultados aquí presentados contradicen lo encontrado por (Razak, Chai y Wong, 2004) quienes, al comparar concretos adicionados con MK y HS, afirmaron un mejor desempeño para concretos con HS.

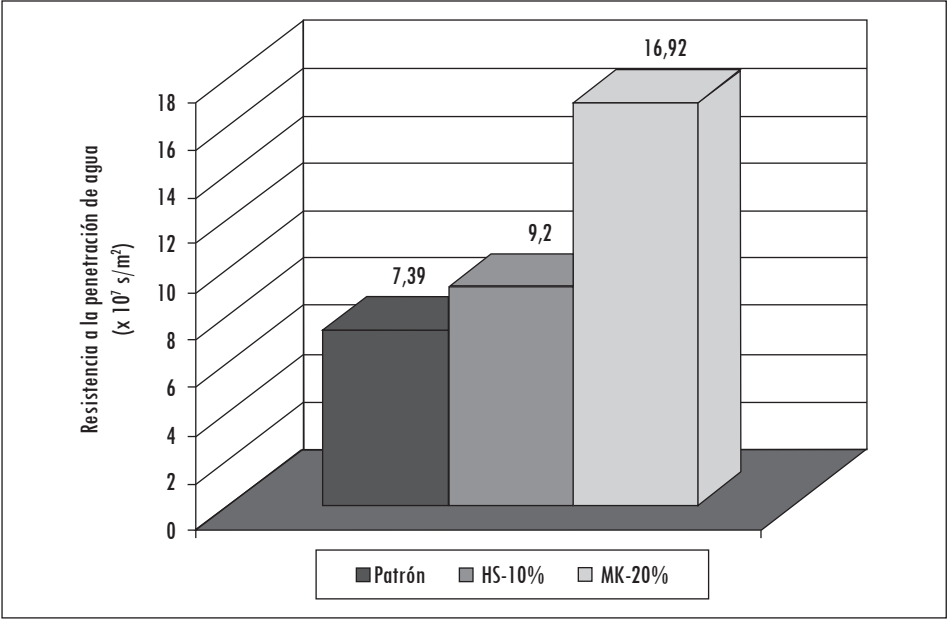
Tabla 3. Resultados de absorción (norma ASTM C642)

Muestra	Absorción total (%)	Densidad aparente (mg/m³)	Volumen de poros permeables (%)
Patrón	6,62	2,70	15,20
HS 10%	8,75	2,69	19,03
MK 10%	6,11	2,71	14,24
MK 20%	3,59	2,46	8,10
MK 30%	4,73	2,40	10,23

Fuente: presentación propia de los autores.

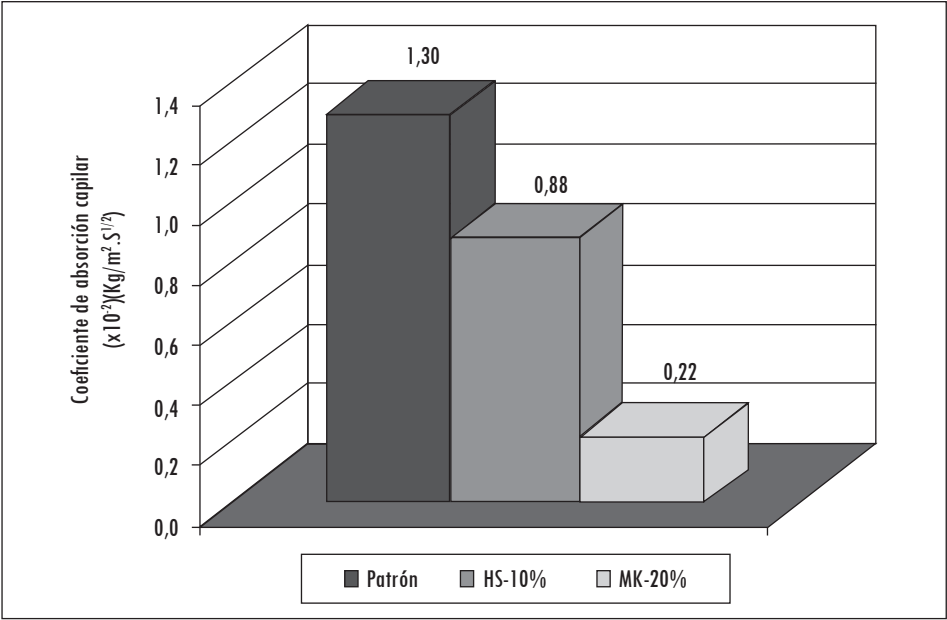
El ensayo de succión capilar se realizó sobre especímenes cilíndricos de diámetro de 76 mm y 50 mm de espesor. Parámetros como la resistencia a la penetración de agua m ($\times 10^7$ s/m²) y el coeficiente de absorción capilar K ($\times 10^{-2}$) (Kg/m².s^{1/2}) se presentan en la Figura 2 (a y b), respectivamente. Como se observa, la muestra adicionada con el 20% de MK supera ampliamente el comportamiento de los concretos adicionados con HS al 10% y del patrón (0% de adición). Se encontró, además, que el coeficiente de absorción capilar es un 83% menor para la muestra con el 20% de MK comparado al de referencia, y un 75% menor respecto al concreto adicionado con HS. De la misma manera, la resistencia a la penetración de agua se incrementó en un 228% en relación con la mezcla patrón.

Figura 2a. Resultados ensayo de succión capilar: resistencia a la penetración de agua



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 2b. Resultados ensayo de succión capilar: coeficiente de absorción capilar

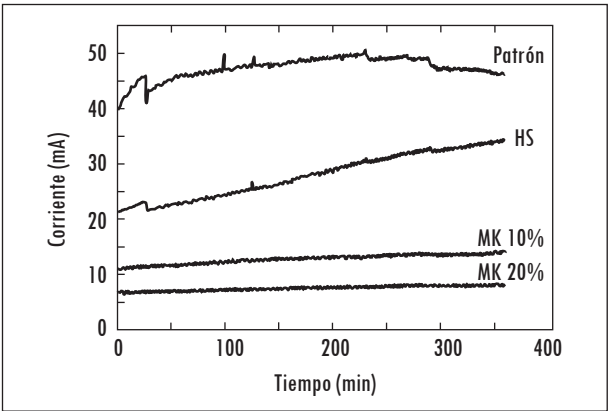


Fuente: presentación propia de los autores.

Lo anterior es un indicativo del refinamiento de poros más efectivo por parte de la adición de MK. Esto se debe a que el hidróxido de calcio producido en la reacción de hidratación del cemento reacciona con la puzolana y produce geles adicionales, que provocan un efecto de microrrelleno y, por lo tanto, alteran la estructura porosa (Khatib y Wild, 1996).

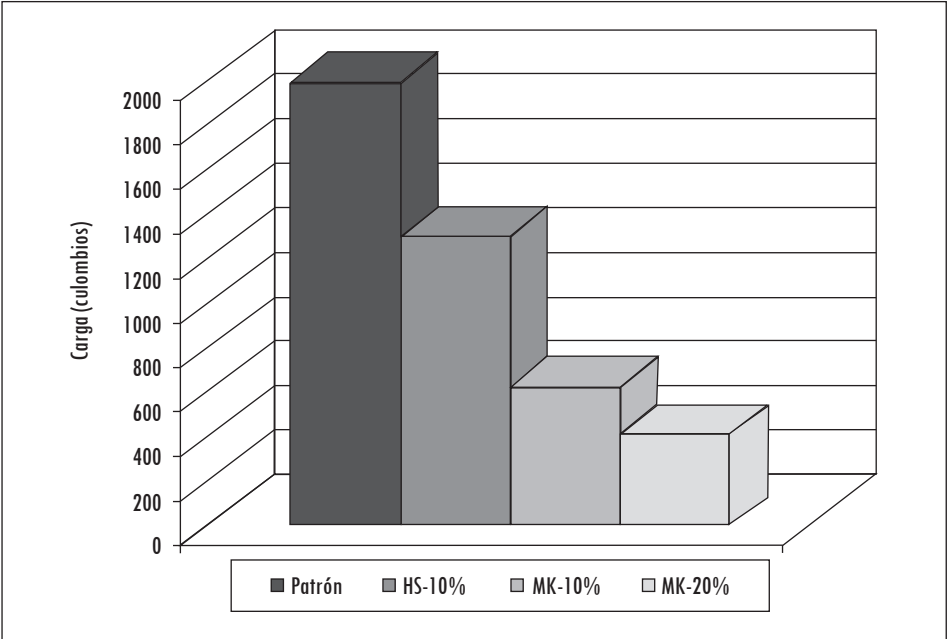
El ensayo de permeabilidad a cloruros fue realizado con base en la norma ASTM C1202 en especímenes de 76 mm de diámetro y 50 mm de espesor. En la Figura 3 (a y b) se muestran las gráficas resultantes del ensayo; se aclara que los resultados expresados en la Figura 3b han sido corregidos acorde con los parámetros geométricos de la probeta (específicamente el diámetro), tal como lo expresa la norma. Los valores obtenidos están en concordancia con los ensayos de absorción de agua, tanto por inmersión como por acción capilar, pues la menor permeabilidad se obtiene para la mezcla del 20% de MK. Esta mezcla, al igual que la del 10% MK, se considera de muy baja permeabilidad; mientras la de HS 10% corresponde a baja permeabilidad, según los valores recomendados en la norma (Tabla 4).

Figura 3a. Permeabilidad a cloruros de los concretos adicionados:
corriente vs. tiempo



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 3b. Permeabilidad a cloruros de los concretos adicionados: área bajo la curva (carga total)



Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 4. Norma ASTM C1202

Mezcla	Carga (culombios)	Permeabilidad a cloruro
Patrón	2007	Moderada
HS 10%	1295	Baja
MK 10%	622	Muy baja
MK 20%	410	Muy baja

Fuente: presentación propia de los autores.

De los resultados del ensayo de permeabilidad a cloruros también se observa que la carga total para la probeta adicionada con MK 20% fue un 80% inferior en comparación con el patrón. Esto coincide con otros autores (Badogiannis, 2009; Mejía de Gutiérrez et al., 2009). En comparación con el HS, la carga total para el MK 20% fue un 68% inferior. En dicho caso, se puede afirmar que el MK presentó el mejor comportamiento frente al ataque de cloruros. Esto puede deberse al refinamiento de la red de poros de la matriz, y adicionalmente a la

formación de la sal de Friedel, causada por la presencia de la alúmina reactiva del MK, como se demostró en estudios anteriores (Torres et al., 2007).

En consecuencia, con la aplicación del MK se demostró que esta puzolana supera ligeramente las propiedades de resistencia a la compresión respecto al concreto de control, y mejora notablemente su desempeño frente a la durabilidad en cuanto a la muestra patrón y a la adicionada con HS. Esto se debe a que este MK producido a partir de materias primas colombianas es una puzolana de alta reactividad que produce la refinación del tamaño de poros y, por lo tanto, una baja absorción y baja permeabilidad a los iones agresivos como los cloruros. De allí que este MK producido podría llegar a competir favorablemente en el mercado con el HS, pues tiene la ventaja del color blanco y que las materias primas son procedentes de Colombia y de una excelente calidad.

3. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

- El porcentaje de adición influye notoriamente en las propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos adicionados con MK, pues se encontró que hasta el 20%, las propiedades mecánicas aumentan con el porcentaje de adición. Sin embargo, en proporciones mayores, esta propiedad se ve disminuida, y puede deberse a que queda material sin reaccionar, que actúa como un relleno dentro de la mezcla.
- El uso del MK aumenta ligeramente la resistencia a la compresión en concretos, en comparación con un patrón de referencia. Sin embargo, el desempeño frente a la durabilidad es muy superior. Por ejemplo, para el desempeño frente a cloruros como la carga total se reportó un mejoramiento de esta propiedad, con índices hasta del 80% inferior al patrón.
- Al comparar el MK con el HS, se encontró que la resistencia a la compresión del MK fue más baja en comparación a la de los concretos con HS, mientras que el desempeño frente a la absorción total y superficial, además de la permeabilidad a los cloruros, fue superior en el MK. Esto podría estar relacionado con la formación de la sal de Friedel, debido a la presencia de la alúmina reactiva del MK.
- Con base en lo anterior, se afirma que el MK producido a partir de materias primas colombianas constituye una puzolana de alta reactividad que puede llegar a competir en el mercado con el humo de sílice importado, con la ventaja de su color blanco.

Referencias

- BADOGIANNIS, E. y TSIVILIS, S. Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2009, núm. 31, pp. 128-133.
- BALOGH, A. High Reactivity Metakaolin. *Concrete Construction*. 1995, vol. 40, núm. 7, pp. 1-3.
- BARATA, M. y DAL MOLIN, D. *The production of high performance concrete with additions of silica fume and metakaolin in the Amazon region*. s. d., 1999.
- BARATA, M. y DAL MOLIN, D. Avaliacao preliminar do residuo caulínítico das industrias de beneficiamento de caulim como materia-prima na producao de uma metacaulinita altamente reactiva. *Antac*. 2002, vol. 2, núm. 1, pp. 69-78.
- CALDARONE, M. A. y GRUBER, K. A. *High Reactivity Metakaolin (HRM) for high performance concrete*. Proceedings 5th Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. 1995, núm. 2, pp. 815-827.
- CALDARONE, A.; GRUBER, A. y BURG, G. High-reactivity metakaolin: a new generation mineral mixture. *Concrete International*. 1994, pp. 37-41.
- CURCIO, F.; DEANGELIS B. A. y PAGLIOLICO, S. Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high performance mortars. *Cement and Concrete Research*. 1998, vol. 28, núm. 6, pp. 803-809.
- DE GUTIÉRREZ, R.; DELVASTO, S. y TALERO, R. Una nueva puzolana para materiales cementicios de elevadas prestaciones. *Materiales de Construcción*. 2000, vol. 50, núm. 260, pp. 5-12.
- DING, J. y LI, Z. Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete. *ACI Materials Journal*. 2002, vol. 99, núm. 4, pp. 393-398.
- FAGERLUND, G. *On the Capillarity of Concrete*. Oslo: Nordic Concrete Research, 1982.
- HEWLETT, P. *Chemistry of cement and concrete*. 4th Ed. New York: Butterworth Heinemann, 1998.
- HONG-SAM, K. A.; SANG-HO, L. B. y HAN-YOUNG, M. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Materials*. 2007, núm. 21, pp. 1229-1237.
- KHATIB, J. M. y WILD, S. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*. 1996, vol. 26, núm. 10, pp. 1545-1553.
- LI, Z. y DING, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. *Cement and Concrete Research*. 2003, núm. 33, pp. 579-584.
- MASSAZZA, F. Pozzolanic cements. *Cement and Concrete composites*. 1993, núm. 15, pp. 185-214.
- MEHTA, P. K. *Pozzolanic and Cementitious by-product*. Proceedings 3rd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, 1989.
- MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. et al. Concreto adicionado con metacaolín: comportamiento a carbonatación y cloruros. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 2009, núm. 48, pp. 55-64.

- MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. et al. Influencia de la adición de metacaolín a morteros y hormigones. *Boletín Geológico y Minero*. 2006, vol. 117, núm. 4, pp. 715-722.
- MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.; TORRES, J. y GUERRERO, C. E. Análisis del proceso térmico de producción de una puzolana. *Materiales de Construcción*. 2004, núm. 54, pp. 65-72.
- MOYA, J. S. Últimos avances sobre el tratamiento térmico del caolín: formación o no de puzolanas artificiales. Puzolanas naturales, cenizas volantes y similares en la construcción. *Cemento y Hormigón*. 1998, pp. 71-75.
- RAZAK, H.; CHAI, H. K. y WONG, H. S. Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials. *Cement and Concrete Composites*. 2004, núm. 26, pp. 883-889.
- SABIR, B. B. et al. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. 2001, núm. 23, pp. 441-454.
- TORRES, J.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. y PUERTAS, F. Efecto de la temperatura de tratamiento de un caolín en la permeabilidad a cloruros en morteros. *Materiales de Construcción*. 2007, vol. 57, núm. 285, pp. 61-69.
- WILD, S.; KHATIB, J. M. y JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*. 1996, vol. 26, núm. 10, pp. 1537-1544.
- ZHANG, M. H. y MALHOTRA, V. M. Characteristics of thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. *Cement and Concrete Research*. 1995, vol. 25, núm. 8, pp. 1713-1725.