

Desempeño de mezclas cementicias binarias y ternarias basadas en metacaolín y humo de sílice

Performance of binary and ternary cement mixtures based in metakaolin and silica fume

Jenny Tróchez^{1*}, Harry Maturana¹, Ruby M. de Gutiérrez¹, Carmen E. Guerrero¹

¹ Grupo Materiales Compuestos (CENM), Universidad del Valle, Cali

* jenny.trochez@hotmail.com,

Fecha de recepción del artículo 18/11/2009; Fecha de aceptación del artículo: 18/12/2009

Resumen

El presente trabajo reporta los resultados del estudio de la acción conjunta que produce la incorporación de adiciones de metacaolín (MK) y humo de sílice (HS) a morteros de cementos portland en las propiedades mecánicas, fisicoquímicas y de corrosión del acero de refuerzo. Para la realización de este estudio se produjeron morteros de OPC con diferentes porcentajes de adición de HS y MK con respecto a la cantidad total de cemento. Se evaluaron las propiedades de resistencia a la compresión y de durabilidad tales como absorción y porosidad, permeabilidad a cloruros y resistencia al ataque de sulfatos. La corrosión de los aceros de refuerzo se estudio mediante las técnicas de potencial de media celda, resistencia a la polarización lineal y pendientes tafel. Mezclas con contenidos del 10% MK y 5% HS presentan una resistencia a la compresión un 40% superior y un excelente desempeño en presencia de cloruros y sulfatos. Desde el punto de vista del análisis de corrosión de los aceros la mezcla óptima, aún a condiciones aceleradas y en presencia de cloruros, es la mezcla de OPC adicionado con 10% de MK y 10% de HS.

Palabras clave

Corrosión, durabilidad, permeación, metacaolín, humo de sílice.

Abstract

The effects of metakaolin and silica fume on various properties of mortars were evaluated and

compared in this study. Mortars were cast with 0, 5 and 10 percent cement replaced by metakaolin (MK) and/or silica fume (SF). The compressive strength and durability properties, such as absorption and porosity, chloride permeability and sulphate attack resistance, were evaluated. Corrosion of steel reinforcement into these mortars was studied using the techniques of half-cell potential, linear polarization resistance and Tafel slopes. Mixtures containing 10% SF and 5% MK reported a compressive strength 40% higher than the mortar without addition and an excellent performance in the presence of chlorides and sulphates. The mixture containing 10% MK and 10% SF presented the best performance to steel corrosion.

Key Words

Corrosión, durability, permeation, metakaolin, silica fume.

Introducción

La corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón armado es una de las patologías más severas que puede experimentar una estructura, ya que esta puede conducir a fallas estructurales. A la fecha, nacional e internacionalmente se han realizado muchos estudios enfocados en conocer el problema, prevenirlo, combatirlo y, en caso de ser necesario revertirlo. Entre los temas evaluados cabe señalar los relacionados a la influencia que puede tener el tipo de cemento en el desarrollo

Tabla 1. Proporción y tipo de mezclas estudiadas

Tipo de Mezcla	Mezcla patrón	M1	M2	M3	M4
Metacaolín, %	0	10	10	0	10
Humo de Sílice, %	0	0	5	10	10

de la corrosión del concreto armado. Marzouch y Langdon [1], establecen que al utilizar los materiales puzolánicos (humo de sílice, cenizas volantes, metacaolín, etc) se produce una disminución significativa de la permeabilidad del concreto, la cual reduce la movilidad de los agentes agresivos a través de la matriz. En la presente investigación se estudia el comportamiento de mezclas binarias y ternarias basadas en humo de sílice y metacaolín como recubrimientos de aceros estructurales en presencia de agentes agresivos.

Materiales y métodos

Se prepararon morteros con una relación cemento: agregado de 1:2.75, para lo cual se utilizó cemento Portland y arena de origen fluvial, procedente del Río Cauca. La Tabla 1 muestra los porcentajes de MK y HS en cada una de las mezclas evaluadas; la relación agua/cemento se mantuvo constante en todas las mezclas, y se utilizó 0.6 para acelerar el proceso de corrosión y así obtener en corto tiempo resultados comparativos. Las características físicas y químicas del cemento y el MK son mostradas en la Tabla 2. El cemento utilizado presentó una composición potencial de 55,04 % SC_3 , 16,25 % SC_2 , 8,33 % AC_3 y 11,23 % de FAC_4 . Se evaluó la resistencia a la compresión (ASTM C109), la absorción y porosidad total (ASTM C 642), la permeabilidad capilar [2], y el comportamiento frente a agentes agresivos como sulfatos (ASTM C 1012) y cloruros (ASTM C 1202). Los morteros con acero de refuerzo, curados durante 28 días, se colocaron inmersos en dos clases de soluciones: una de agua potable a temperatura ambiente y otra conteniendo una solución acuosa al 3.5% de NaCl y se midieron los potenciales de media celda del acero (ASTM C876), la resistencia de polarización lineal (ASTM G59) y se realizaron las curvas de polarización Tafel por un periodo de hasta 5 meses

Tabla 2. Características físico-químicas del cemento y metacaolín utilizado

Propiedades Físicoquímicas	OPC	MK
Pérdida al fuego	1,75%	1,02%
SiO_2	20,15%	50,72%
Al_2O_3	5,50%	44,63%
Fe_2O_3	3,69%	2,69%
CaO	63,29%	-
MgO	2,21%	-
SO_3	2,52%	-
Humedad	0,22%	-
Residuo Insoluble	1,04%	-
Densidad, g/cm ³	3,10	2,51
Tamaño medio de partícula D[4.3]		12,247 μm.

de exposición. Para los ensayos electroquímicos las varillas de acero fueron previamente cubiertas en ambos extremos con pintura anticorrosiva, dejando una superficie desnuda para la exposición de 10 cm².

Resultados y discusión

Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión se determinó a edades de curado de 28 y 90 días. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 1; el índice de desempeño es calculado tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$I_{\text{desempeño}} = \frac{Rc_{\text{adición}} - Rc_{\text{patrón}}}{Rc_{\text{patrón}}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Los resultados reportados corroboran la efectividad de la reacción puzolánica sobre el

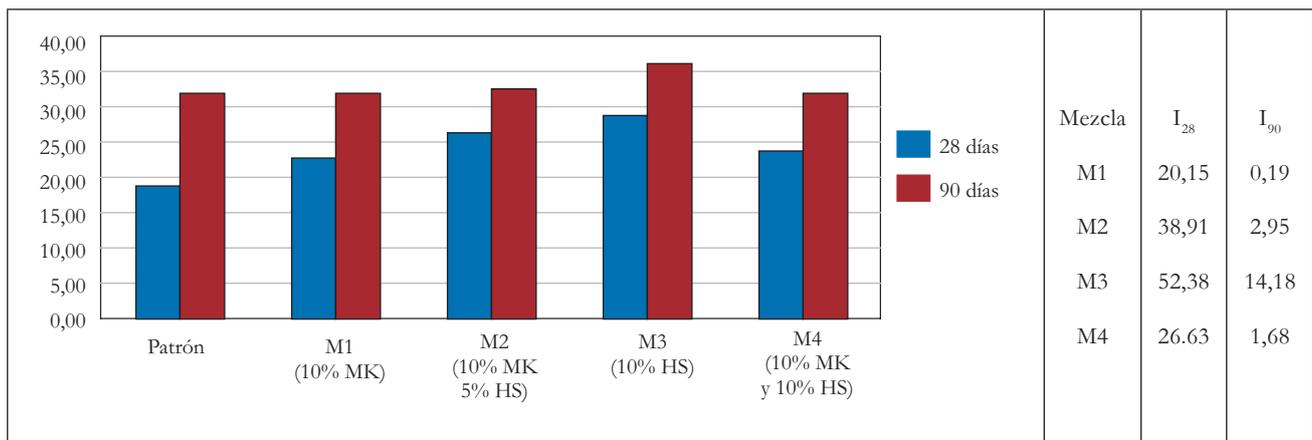


Figura 1. Resistencia a la compresión e Índice de desempeño a 28 y 90 días de curado

incremento resistente, atribuibles a los cambios de fase y transformaciones microestructurales que el metacaolín y el humo de sílice generan en el material. Los iones OH^- que se producen en la hidratación del cemento, se depositan en los poros del hormigón y al entrar en contacto con la sílice amorfa de las puzolanas, se forma un gel extra de silicato de calcio hidratado y se reduce el hidróxido de calcio, otorgándole un aumento de su resistencia mecánica y la disminución de la porosidad, estos productos de la reacción puzolánica actúan como un microrelleno y el material adquiere mayor compacidad. Se destaca el mayor índice de desempeño de la mezcla binaria M3. Esto puede ser debido a que el humo de sílice presenta mayor finura y una gran superficie específica comparado con el metacaolín otorgando una alta reducción de la porosidad de la zona de transición entre la matriz y el agregado para

proveer una fuerte zona de transición. Las mezclas ternarias presentan, en general, mejor desempeño frente a la mezcla patrón, en particular a edad de 28 días. Es claramente observable el efecto sinérgico de incorporar HS a MK. El descenso en el desempeño de las mezclas con adiciones respecto al patrón a una edad más alta confirma resultados de investigaciones anteriores [3, 5, 6] en las cuales se afirma que el mayor efecto de este tipo de adiciones tiene lugar a edades cortas y se relaciona con la menor velocidad de la reacción puzolánica a medida que avanza el tiempo de curado [7].

Ensayos de durabilidad

En la figura 2a se presenta el coeficiente de absorción capilar (k) a 28 días de curado para todas las mezclas evaluadas, aquí se aprecia una

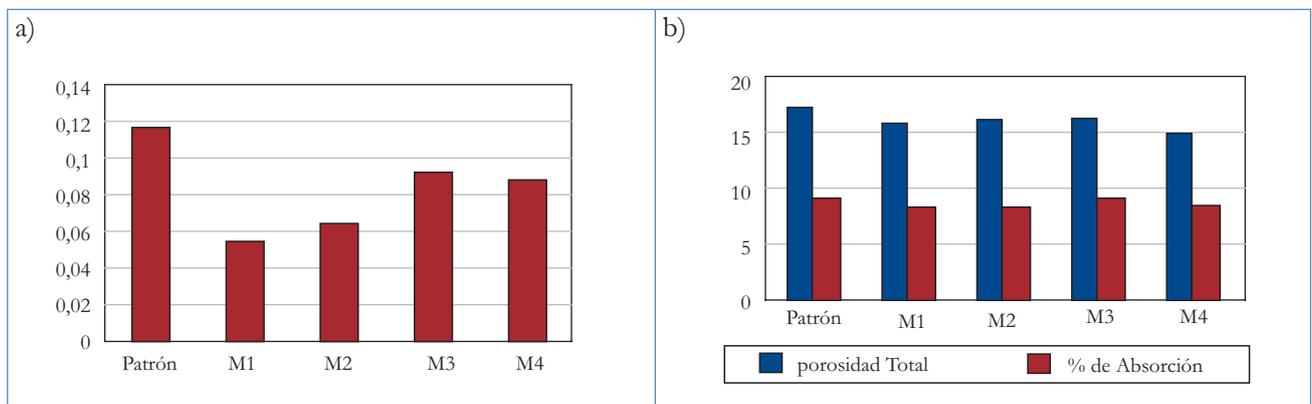


Figura 2. Resultados del ensayo de: a) succión capilar b) absorción y porosidad total

disminución significativa del coeficiente en las mezclas binarias y ternarias, destacándose la que contiene 10% de MK con una reducción de aproximadamente 52% con respecto a la mezcla patrón de referencia, lo cual coincide con resultados de otros investigadores [3]. Entre las mezclas ternarias, M2 reporta un valor inferior con respecto a M4. De los resultados obtenidos se concluye que la adición del HS a la mezcla con MK genera sinergia negativa en esta propiedad.

En los resultados de absorción y porosidad, incluidos en la figura 1b, se observa que no hay una diferencia significativa entre las mezclas adicionadas, aunque estas en general reportan datos inferiores a la mezcla patrón de referencia. Entre estas, M3 presenta el mayor porcentaje de absorción y porosidad total, esto se relaciona con los resultados obtenidos en el ensayo de succión capilar.

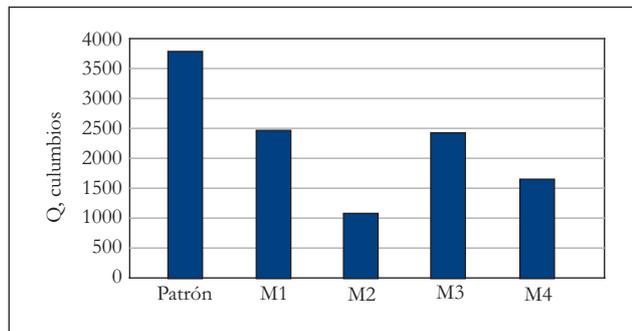


Figura 3. Carga pasada. Norma ASTM C1202

En la Figura 3 se indican los resultados del ensayo de permeabilidad rápida al ión cloruro (ASTM C1202), en la cual se puede apreciar una menor carga para las muestras adicionadas comparadas al patrón. Se observan dos grupos, uno compuesto por mezclas que se encuentran en un rango de permeabilidad moderada (M1 y M3) y al segundo grupo pertenecen las mezclas M2 y M4 que presentan baja permeabilidad a cloruros, corresponden estas a las mezclas ternarias conteniendo MK y HS, de las cuales la de mejor desempeño es M2 (10% MK + 5% HS). Este comportamiento es atribuible al elevado contenido de alúmina que posee el metacaolín, componente capaz de enlazar los aniones cloruros para formar la sal de Friedel, así como a la modificación de la microestructura y disminución significativa de la permeabilidad del mortero, efecto que se pudo apreciar en los ensayos de capilaridad. Esta reducción de la permeabilidad se debe a la formación de silicato de calcio hidratado, producto de la reacción puzolánica [1].

La resistencia al ataque por sulfatos se determinó mediante observación visual y midiendo el cambio de diámetro de los especímenes al estar inmersos en una solución del 5% de Na_2SO_4 acorde a la norma ASTM C1012. La Figura 4a muestra el porcentaje de expansión con respecto al tiempo de exposición de cada una de las muestras, donde se observa que el espécimen conteniendo 10% de MK y 10% de HS presenta una expansión del 18% menor con respecto a la muestra patrón; las mezclas restantes, a excepción de M1, presentan

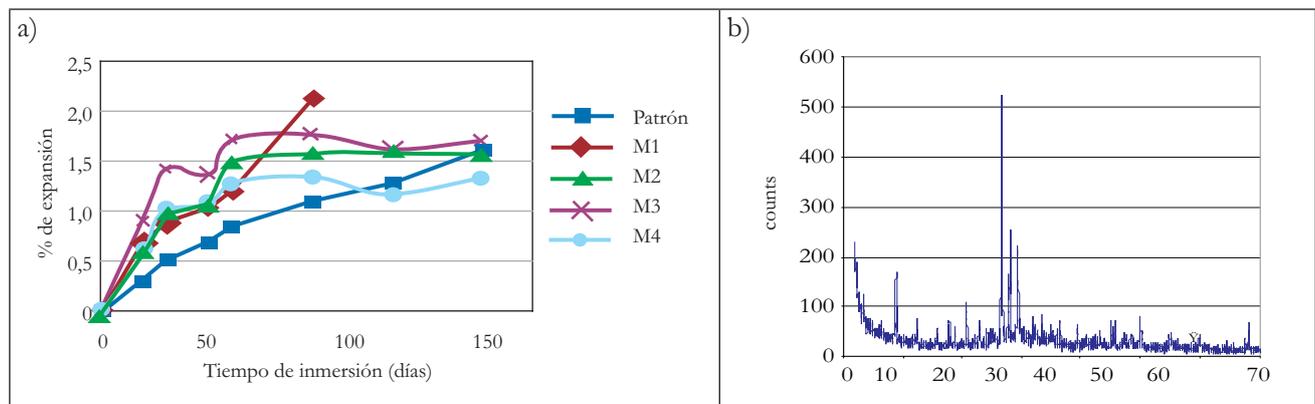


Figura 4. a) Expansión de los morteros en presencia de sulfatos. b) DRX muestra M1 después de 102 días de inmersión en sulfato de sodio

porcentajes de expansión similares incluyendo la mezcla patrón, los cuales van desde 1.58% y 1.72%.

El mortero con adición del 10% de MK sufrió un excesivo deterioro físico en un tiempo de inmersión menor a 102 días, inicialmente el efecto se desarrolló en la superficie del espécimen a nivel de bordes y estos iniciaron un proceso de descascaramiento en la parte superior e inferior de la probeta. Una muestra de este material fue analizado por DRX, resultado que se presenta en la Figura 4b. Se destaca en esta los picos ubicados en la región 2 θ de 9 y 30°, atribuibles a la presencia de ettringita y yeso, compuestos a los que se atribuye el excesivo deterioro observado [4]. La acción sinérgica positiva frente a los sulfatos es la de adicionar HS al MK, contrario a lo observado en la permeabilidad capilar, lo que permite afirmar que en este caso de agresividad a sulfatos el efecto mas determinante es la diferencia en composición de las adiciones utilizadas, al ser el MK una puzolana alumínica y el humo de sílice una puzolana silíce.

2.3 Analisis electroquímico

Los resultados del potencial de media celda se presentan en la Figura 5, donde también se observan los límites para definir la probabilidad de corrosión según la norma ASTM C876. Las muestras sumergidas en agua potable (lado Izquierdo) se ubican en la zona de probabilidad de corrosión inferior al 5%; siendo M4 la mezcla que reporta los valores de E_{corr} más positivos. En presencia de NaCl, en las primeras edades la probabilidad de corrosión es inferior al 5%, y a medida que aumenta el tiempo de inmersión las muestras ingresan a la zona de probabilidad de corrosión mayor al 95%, excepto la mezcla con 10% HS y 10% MK (M4). Es de anotar, que igualmente M3 presenta un comportamiento bastante aceptable.

Los resultados obtenidos de I_{corr} para las muestras en agua potable (figura 6a) son en general inferiores a $0.4 \mu A/cm^2$ durante todo el tiempo de exposición, lo que indica que se encuentran en un nivel de

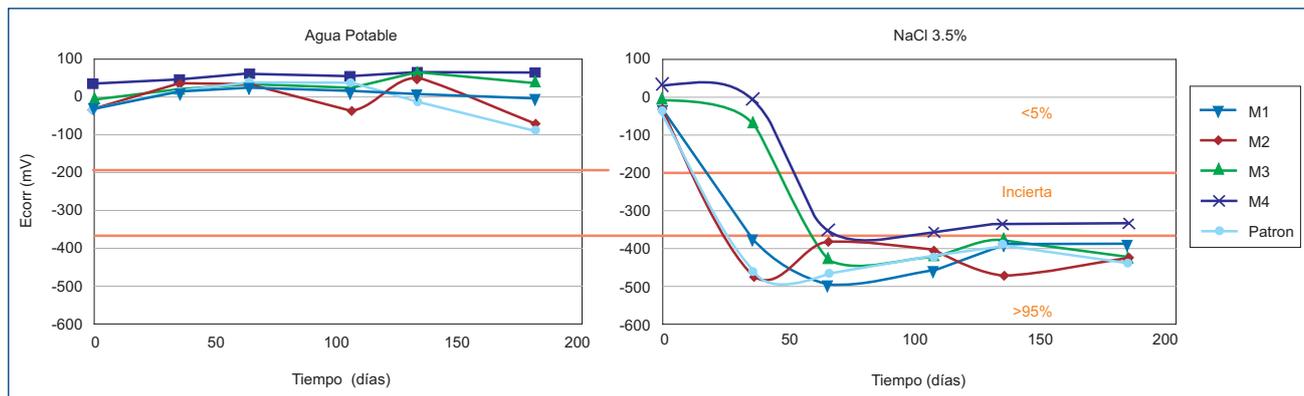


Figura 5. Valores de potencial de media celda en los dos medios de inmersión.

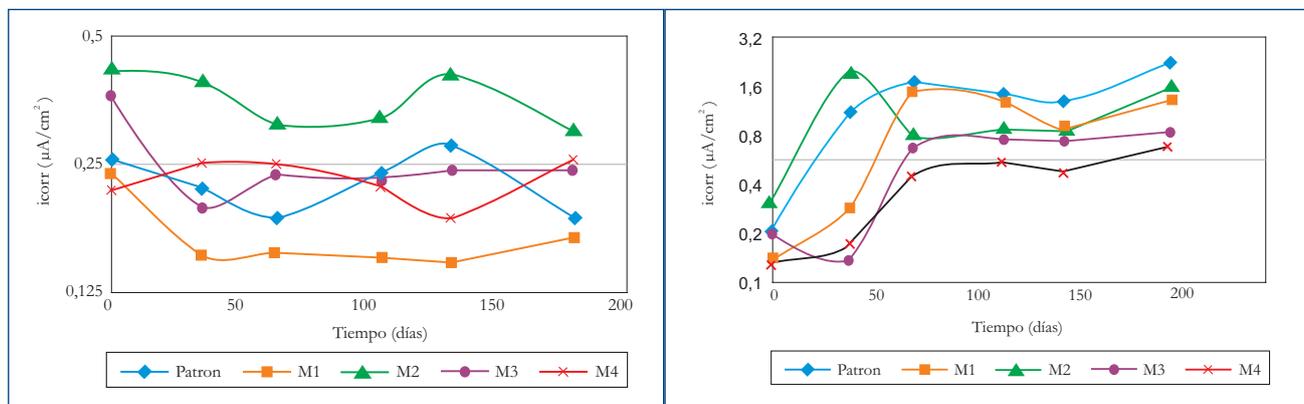


Figura 6. Curva de I_{corr} vs. Tiempo a) agua, b) solución de NaCl al 3.5%

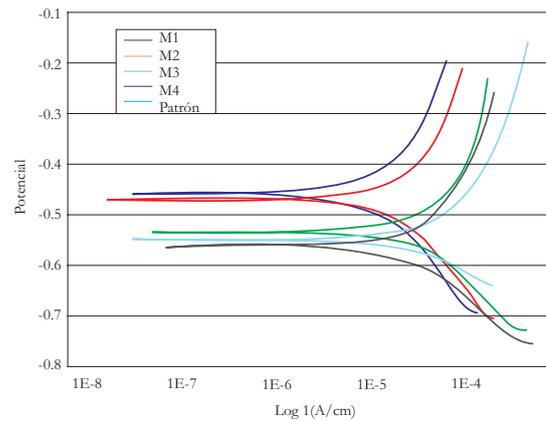
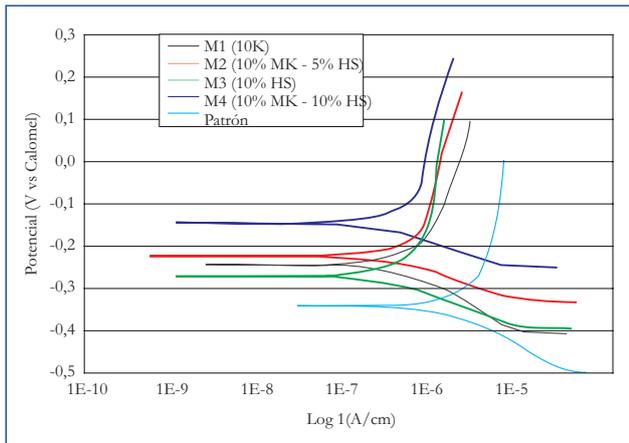


Figura 7. Curvas pendientes tafel: a) agua potable b) NaCl - 150 días de inmersión

corrosión de bajo a moderado [8]; es de anotar que la mezcla M1 (10 % de MK) presenta una densidad de corriente más baja, lo cual concuerda con lo reportado por otros investigadores. [9]

En las muestras sumergidas en NaCl al 3.5% sobresale el buen comportamiento frente al medio agresivo de la mezcla con adición ternaria M4, seguida de M3 lo cual concuerda con los resultados obtenidos en las pruebas de potencial de media celda. La Figura 7 muestra las curvas de pendientes Tafel después de 150 días de inmersión, en estas se corrobora el buen desempeño que

presentó M4. El índice de desempeño, calculado como la reducción de la densidad de corriente de corrosión con respecto al patrón, fluctuó entre 73,58 y 90,97% en agua potable y del 13.64 a 69.87% en NaCl. Se destaca la mezcla M4 como la de mayor índice en presencia de NaCl. La figura 8 muestra el estado final del acero luego de 5 meses de exposición, en la cual se puede apreciar que este no presenta corrosión en ninguno de los medios de estudio.

Conclusiones

En general, las mezclas evaluadas, binarias y ternarias, superan la resistencia mecánica del mortero de referencia sin adición, aunque es de anotar que se destaca, entre estas, aquellas que contienen HS.

El desempeño de las mezclas binarias y ternarias en ambientes conteniendo sulfatos o cloruros es superior, demostrando que existe sinergia entre los efectos propios de cada adición individual. Mezclas con contenidos del 10% MK y 5% HS presentan una resistencia a la compresión un 40% superior y un excelente desempeño en presencia de cloruros y sulfatos.

Desde el punto de vista del análisis de corrosión de los aceros, la mezcla óptima, aún a condiciones aceleradas y en presencia de cloruros, es la mezcla de OPC adicionado con 10% de MK y 10% de HS.



Figura 8. Estado de las barras después de 5 meses de inmersión.

Referencias

- [1] Marzouch, H. Y Langdon, S. El efecto de la reacción alcali – agregado en las propiedades mecánicas de concretos de alta y moderada resistencia. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad de New Foundland, Canadá. Cementa and Concrete Research, 2002. [9]. Talero, r., Bollati, m. R. Y hernández, f. Preparación de morteros y hormigones no tradicionales a base de cemento Pórtland, metacaolín y yeso (15.5%) Instituto Eduardo Torroja, Madrid, España. Octubre de 1999.
- [2] EMPA – SIA 162/1. Test No. 5 – Water Conductivity, Suiza, 1989.
- [3] C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials* 20 (2006) 858–865.
- [4] Mejía de Gutiérrez, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Seminario Internacional. Costa Rica: CYTED, 1999. 185p.
- [5] Restrepo, J, Restrepo, O y Tobon, J. Efectos de la adición de Metacaolín en el cemento Pórtland. Grupo del Cemento y Materiales de Construcción. Universidad Nacional de Colombia- Medellín. 2006
- [6] Mejía de Gutiérrez, R., Torres, J., Silva, J. Desempeño de morteros y concretos adicionados con Metacaolín. Escuela de Ingeniería de Materiales, Grupo de Materiales Compuestos, Universidad del Valle.
- [7] Batis, G.; Pantazopoulou, P.; Tsivilis, S. y Badogiannis, E.: “The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 27 (2005), pp. 125-130.
- [8] CYTED: “Manual for inspecting, evaluating and diagnosing corrosion in reinforced concrete structures- DURAR”, (2002).
- [9] Torres, J.; Mejía de Gutiérrez; Gutierrez, C.: “Desempeño de morteros adicionados con metacaolín frente a la acción de sulfatos”, *Revista ingeniería e investigación*, Vol 28., (2008).