

# Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad a corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros

## Accelerated techniques to evaluate the corrosion susceptibility of steel in blended mortars exposed to chloride environment

Recibido: 22- 09 - 2015 Aceptado: 27-11-2015

Einner Peralta Muñoz<sup>1</sup>  
Ana María Aguirre<sup>2</sup>  
Ruby Mejía de Gutiérrez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Colombiano, Ingeniero de Materiales. Grupo de Investigación Materiales Compuestos (CENM). Calle 13 No. 100-00. Edif. 349. 2° piso. Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia. e-mail: einner.peralta@correounivalle.edu.co.

<sup>2</sup> Colombiana, Ingeniera Electrónica, estudiante de doctorado, Grupo de Investigación Materiales Compuestos (CENM). Calle 13 No. 100-00. Edif. 349. 2° piso. Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. Cali, Colombia. Teléfono: (+57) 2-321 2270 Fax: (+57) 2-3392450. e-mail: ana.aguirre@correounivalle.edu.co.

<sup>3</sup> Colombiana, Doctor en Ciencias Químicas, profesor titular, Grupo de Investigación Materiales Compuestos (CENM). Calle 13No. 100-00. Edif. 349. 2° piso. Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. Cali, Colombia. e-mail: ruby.mejia@correounivalle.edu.co.

### Resumen

Este artículo estudia el comportamiento a la corrosión de morteros reforzados de cemento portland, sin adiciones y con adiciones de metacaolín (MK) y humo de sílice (SF), en presencia de cloruros. La proporción de la adición utilizada en las mezclas fue del 10% en peso como reemplazo del cemento. Se prepararon prototipos sin y con acero de refuerzo. En los primeros se determinó la resistencia a la compresión, absorción, porosidad, y permeabilidad a los cloruros. Las probetas de mortero reforzado se expusieron a cloruros (NaCl 3,5%) y se aplicaron dos técnicas aceleradas de corrosión: ciclos de humectación-secado y voltaje impreso; en ambos casos se utilizó como ambiente de referencia agua potable. El avance del proceso de corrosión en el acero se evaluó mediante la técnica electroquímica de resistencia a la polarización lineal (LPR). Los resultados mostraron que tanto a 28 como a 90 días de curado, las adiciones aumentan la resistencia a la compresión del mortero y contribuyen positivamente a reducir la susceptibilidad del material cementicio a la permeabilidad de cloruros. De las adiciones evaluadas, se destaca el desempeño mecánico de la mezcla con 10% de MK, representado en un incremento del 51,9% respecto a cemento Portland ordinario (OPC). Los coeficientes de absorción capilar de los morteros adicionados fueron hasta un 31% menores que los correspondientes de OPC, lo cual coincide con la reducida permeabilidad a cloruros ( $\leq 1000$  coulombios) evaluada con base en la Norma ASTM C1202. Respecto a los resultados de corrosión se aprecia la misma tendencia de comportamiento en las mezclas, independientemente de la técnica acelerada utilizada. El mejor desempeño corresponde a la mezcla que contiene MK, seguido de SF y OPC. Cabe anotar, que la corriente de corrosión en los prototipos OPC es reducida hasta

en un 90% al incorporar MK. De las técnicas aceleradas empleadas en el presente estudio se sugiere utilizar la de voltaje impuesto debido al corto tiempo de obtención de los resultados.

**Palabras clave:** Metacaolín; humo de sílice; morteros adicionados; ataque por cloruros; corrosión.

## Abstract

This paper studies the corrosion behavior of reinforced Portland cement mortars without addition and with additions of metakaolin (MK) and silica fume (SF). The proportion of the addition was 10% as cement replacement. Specimens with and without reinforcement were prepared. First, the compressive strength, absorption, porosity, and chloride permeability were determined. The reinforced mortar specimens were exposed to chloride (NaCl 3.5%). Two techniques of accelerated corrosion, wetting-drying cycles and impressed voltage were applied. In both cases was used water as reference. The progress of the corrosion process in the steel was accomplished by using electrochemical linear polarization resistance (LPR). The results showed that the additions increased the compressive strength of OPC mortar and contributed positively to reduce the chloride permeability. The results of corrosion show the same tendency regardless of the techniques used. The best performance corresponds to the mixture containing MK, followed by SF and OPC. The corrosion of the specimens OPC is reduced up to 90% when MK is used as addition. In this study, we suggest to use the impressed voltage technique due to the short time to obtain corrosion results.

**Keywords:** Metakaolin; silica fume; blended mortars; chloride attack; corrosion.

## Introducción

El concreto armado es uno de los materiales más importantes en el sector de la construcción; mientras el concreto es un material cerámico que soporta esfuerzos a compresión, su combinación con el acero estructural le aporta resistencia a la tracción, torsión, corte y flexión. El principal problema de este material compuesto es la corrosión de las armaduras de acero, que acorde a su avance ocasiona pérdidas en las propiedades mecánicas y puede

conducir a la falla estructural. En general, la corrosión es causada por la interacción con ambientes agresivos, en su mayoría en presencia de iones cloruros y/o carbonatación.

El ataque por cloruros al concreto puede provenir de dos fuentes principales: en la primera, los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la mezcla del concreto (p.e. áridos contaminados, agua de mar o contaminada, cemento y/o aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda, los cloruros ingresan desde el exterior. Los iones cloruros una vez penetran el concreto se distribuyen como cloruros enlazados y cloruros libres. Los primeros corresponden a aquellos que se enlazan químicamente al reaccionar con el aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) presente en la pasta para así formar cloroaluminatos cálcicos, compuesto conocido como "Sal de Friedel" ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ); por el contrario, los cloruros libres se difunden hasta alcanzar el acero de refuerzo donde se acumulan hasta lograr una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de destruir la capa pasiva del acero e iniciar el proceso corrosivo (Aguirre y Mejía, 2013).

En este sentido, las normas de durabilidad de concretos especifican las clases de exposición a las cuales una estructura en servicio puede ser afectada por la presencia de cloruros (NTC5551; EN206-1), e incluyen la corrosión inducida por cloruros procedentes del agua de mar (estructuras expuestas al ambiente o a inmersión en agua salada), y la corrosión inducida por cloruros de origen distinto al marino (ciclos de humectación-secado, específicamente estructuras de puentes, pavimentos y zonas de parqueaderos). En general la movilidad de los iones cloruro dentro del concreto está relacionada con su permeabilidad; por ello algunos factores importantes a tener en cuenta en el diseño y colocación del concreto son: la relación agua/cemento, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado (Song *et al.*, 2008; Güneysi *et al.*, 2007). Además, la presencia de adiciones (puzolánicas y siderúrgicas) en el concreto, tales como metacaolín (MK) y humo de sílice (SF), modifican la porosidad y reducen la permeabilidad, mejorando por tanto la resistencia a la penetración de los cloruros en el concreto, aunque existen porcentajes límites de adición por encima del cual el incremento en la demanda de agua podría afectar los resultados (Angst *et al.*, 2009; Aguirre y Mejía, 2013; Song *et al.*, 2010).

MK es una puzolana de tipo aluminosilicato altamente reactiva obtenida de la calcinación de la arcilla caolínica a temperaturas entre 500°C a 800°C (Mejía de Gutiérrez *et al.*,

2000; Mejía de Gutiérrez *et al.*, 2004; Shi *et al.*, 2012; Kannan y Ganesan, 2014). La adición de MK al concreto, en órdenes del 10% al 15%, incrementó la resistencia a la compresión y flexión, y contribuyó positivamente a la durabilidad (Sabir *et al.*, 2001; Courard *et al.*, 2003; Ramezani-pour y Jovein, 2012; Poon *et al.*, 2006; Siddique y Klaus, 2009; Parande *et al.*, 2008, Kim *et al.*, 2007, Güneyisi *et al.*, 2013; Keleştemur y Demirel, 2015). El humo de sílice es un subproducto de la industria del silicio y ferrosilicio; la reducción de cuarzo de alta pureza a temperaturas superiores a 2000 °C produce vapores de sílice los cuales se oxidan y se condensan para formar pequeñas partículas de sílice amorfas. SF tiene un contenido de sílice de 85% y 95 %, tamaño de partícula fino (0,1 hasta 0,5 µm) y una gran superficie específica (Siddique, 2011, Shi *et al.*, 2012). Saojeng y Weiting (2013), afirman que al utilizar SF como reemplazo del cemento se reduce la permeabilidad del concreto y la probabilidad de corrosión del acero de refuerzo, particularmente en presencia de cloruros (Khan y Siddique, 2011). Para alcanzar altas resistencias a compresión y bajos coeficientes de difusión de cloruros se sugiere el uso de porcentajes entre 5% y 10% de la masa del cemento (Zhang y Ba, 2013; Shekarchi *et al.*, 2009; Farahani *et al.*, 2015).

La presente investigación se enfocó en evaluar la susceptibilidad a la corrosión por ataque de cloruros en morteros armados de cemento portland, sin adición y con adición de MK y SF en proporción del 10%, utilizando técnicas aceleradas de corrosión para la inclusión de cloruros y la técnica de resistencia de polarización lineal como método de análisis. El objetivo fue, además de comparar el desempeño de las dos adiciones en presencia de cloruros, verificar la efectividad de las técnicas aceleradas de inclusión del agente agresivo como método de caracterización de cementos adicionados.

## Procedimiento experimental

### Materiales

Para el presente estudio se utilizó un cemento portland (OPC) y dos adiciones puzolánicas, una de tipo aluminico, MK y otra de tipo silíceo, SF. Se tomaron en consideración los porcentajes óptimos de MK y SF propuestos por diferentes investigadores (Aguirre y Mejía, 2013; Torres-Agredo *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2010; Siddique *et al.*, 2009); se escogió en este trabajo un porcentaje único del 10% en reemplazo del cemento para cada una de las puzolanas mencionadas. La caracterización química de estos materiales, determinada por fluorescencia de rayos X (FRX), se presenta en la Tabla

1. Cabe anotar, que el cemento utilizado contiene adición caliza en su formulación, debido a esto se aprecia un alto porcentaje en la pérdida por ignición (LOI); este cemento se distribuye comercialmente como cemento gris para uso general (OPC).

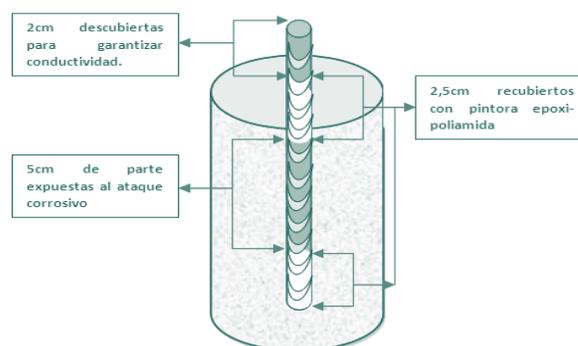
**Tabla 1.** Composición química de los materiales utilizados

Mate- rial	LOI (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)
OPC	8,57	21,26	4,43	5,52	54,38	4,46	1,85
MK	1,10	49,55	0,39	47,14	0,17	1,21	0,0
HS	1,95	93,85	1,32	2,40	0,0	0,0	0,0

Fuente: los autores

### Preparación de especímenes y técnicas de ensayo

Para el presente estudio, se prepararon morteros de cemento portland (OPC) en proporción cemento:arena de 1:2,75, con una relación agua/cementante de 0,55. En total se produjeron tres mezclas: de referencia (OPC), y con sustitución de 10% de cada adición (10MK, 10SF). Los prototipos se elaboraron sin y con acero corrugado de 6 mm de diámetro, de tal manera que las probetas sin acero se utilizaron para evaluar las características mecánicas y de durabilidad del mortero y las probetas con acero embebido se utilizaron para el seguimiento corrosivo (Figura 1). La resistencia mecánica de los morteros se evaluó a 28 y 90 días de curado y las propiedades de durabilidad tales como absorción y porosidad (ASTM C642), succión capilar (ASTM C1585) y permeabilidad a cloruros (ASTM C1202) se determinaron en prototipos con 28 días de curado. Los prototipos armados a la misma edad de curado se sometieron a exposición a cloruros (solución acusa al 3,5% de NaCl) utilizando dos técnicas aceleradas, humectación-secado y voltaje impreso; estas técnicas son equivalentes a difusión natural y difusión acelerada de cloruros (Andrade y Buják, 2013).



**Figura 1.** Esquema de los morteros armados  
Fuente: Los autores

El seguimiento del avance de la corrosión se llevó a cabo con la técnica electroquímica conocida como resistencia a la polarización lineal, LPR o Rp (ASTM G 59), la cual es una técnica no destructiva. El ensayo se realizó en un equipo *Potenciostat/Galvanostat GAMRY PC14* a 0.167 mV/s, que aplicó sobrepotenciales de -20 a +20 mV; como electrodo de referencia se utilizó Ag/AgCl. En el cálculo de la corriente de corrosión se aplicó la fórmula de Stern-Geary ( $I_{corr} = B/R_p$ ), donde B es una constante dependiente de las pendientes tafel, cuyo valor estimado es 26 mV o 52 mV dependiendo del estado activo o pasivo del acero. En este estudio el valor "B" utilizado fue de 0,026V que simula la condición activa de corrosión (Andrade y González, 1978; Andrade y Alonso, 1996).

## Resultados y discusión

### Propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 28 y 90 días de curado (Figura 2) evidenciaron que los morteros con adiciones puzolánicas presentan mayor resistencia que los morteros sin adición (OPC); se calculó el índice de resistencia definido como la relación entre el mortero adicionado y el concreto sin adición OPC. A 28 días de curado se destaca el desempeño mecánico de la mezcla con 10% de MK, representado en un 51,9% respecto a OPC. El volumen total de poros permeables presenta valores que fluctúan entre 19,60% y 21,08%, siendo los prototipos adicionados los menos permeables, aunque la disminución es apenas de 1,48% para el SF y de 0,87 % para el MK con respecto a la probeta OPC. Los resultados obtenidos por succión capilar mostraron que al adicionar un 10% MK en reemplazo del cemento portland, la porosidad efectiva disminuyó en 12,3% en comparación con la probeta OPC; de igual manera la probeta adicionada con 10% de SF logro disminuir la porosidad efectiva en 35%. Los coeficientes de absorción capilar de los morteros adicionados fueron hasta un 31% menores que los correspondientes de OPC. El ensayo de permeabilidad a cloruros realizado a los morteros con MK y SF reportó valores considerados de permeabilidad muy baja ( $\leq 1000$  coulombios) frente a la Norma ASTM C1202. La probeta con 10% SF presentó una disminución en la carga del 19,6% y la probeta con 10% MK una reducción del 31,4%; este mejor desempeño del MK se puede atribuir, además del

refinamiento de poro y la densificación de la matriz, a la formación de la sal de Friedel que enlaza los iones cloruros impidiéndoles su difusión hacia la barra de refuerzo. En general, estos resultados muestran las mismas tendencias de lo reportado en anteriores investigaciones (M. de Gutiérrez *et al.*, 2000; Torres-Agredo *et al.*, 2011; Rao, 2001; Siddique y Klaus, 2009; Kim *et al.*, 2007; Ramezani pour y Jovein, 2012; Hassan *et al.*, 2012; Badogiannis *et al.*, 2015a).

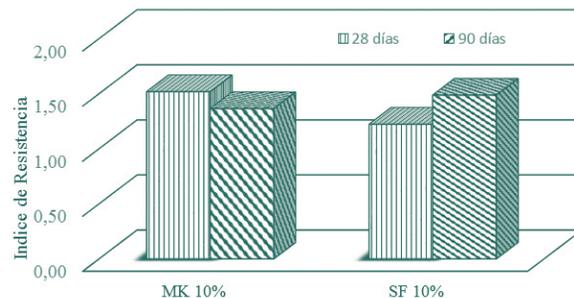


Figura 2. Resistencia a la compresión a 28 y 90 días  
Fuente: Los autores

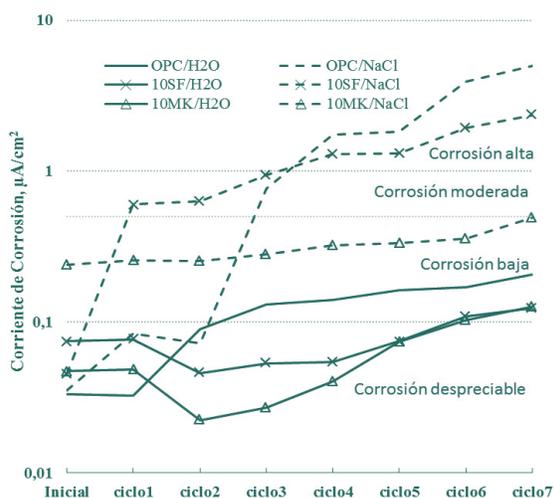
### Ensayos de corrosión

#### • Técnica acelerada de ciclos de humectación-secado (H-S).

En la técnica humectación/secado (H-S), los prototipos se colocaron completamente inmersos en una solución acuosa de NaCl al 3,5% por una semana y posteriormente se expusieron a un secado al aire libre a temperatura ambiente durante otra semana; de esta manera cada ciclo H-S fue de dos semanas. Todos los prototipos fueron sometidos a 7 ciclos H-S, equivalentes en total a 98 días de exposición. Al final de cada ciclo H-S se aplicó la técnica electroquímica LPR, con base en la cual se calculó la corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ); este ensayo se realizó igualmente a las probetas expuestas al ambiente de referencia, el cual fue agua potable. En la Figura 3 se reporta el valor de  $I_{corr}$  al final de cada ciclo de exposición; el ciclo 0 representa el estado inicial en donde las probetas no habían sido expuestas al ensayo H-S.

Se observa que en los dos medios de exposición, agua y NaCl 3,5%, se presenta una tendencia al incremento de la corrosión con el transcurrir de los ciclos, sin embargo en el medio corrosivo que simula el marino (solución de NaCl 3,5%), el incremento de la corriente es superior comparado con el ambiente de referencia. Cabe anotar que en las probetas adicionadas con puzolanas el efecto negativo en los dos ambientes es menos pronunciado, lo cual indica

el aporte de las adiciones utilizadas al mejor desempeño del material en presencia de cloruros. Las probetas que contienen 10% de MK en remplazo de cemento reportan valores inferiores a  $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  al final del ciclo 7, mientras 10% de SF y OPC reportan valores de  $2,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  y  $5,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  respectivamente. El desempeño del MK es atribuible, además de la densificación de la estructura, a su elevado contenido de alúmina de carácter amorfo lo que le permite formar la sal de Friedel y de esta manera evitar la penetración de iones cloruro reduciendo así la velocidad de corrosión (M. de Gutiérrez *et al.*, 2000; Vejmelková *et al.*, 2010; Badogiannis *et al.*, 2015b). Considerando los valores límites de la corriente de corrosión incluidos en la Tabla 2, se puede afirmar que el nivel de corrosión al final del ensayo H-S para los prototipos inmersos en agua es despreciable y en los adicionados con 10% de MK e inmersos en NaCl es bajo; en los restantes el nivel de corrosión es alto.



**Figura 3.** Corriente de corrosión de especímenes sometidos a H-S  
Fuente: Los autores

**Tabla 2.** Criterio de Corriente de Corrosión

Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Nivel de Corrosión
$\leq 0,1$	Despreciable
0,1 – 0,5	Bajo
0,5 – 1	Moderado
$> 1$	Alto

Fuente: Los autores

### • Técnica con voltaje impreso (VI)

La técnica denominada de voltaje impreso (VI), es una técnica acelerada de corrosión que indirectamente da información de las características de permeabilidad de

un concreto (Topçu y Bogă, 2010). El ingreso de los iones cloruros al material se acelera a través de la aplicación de un voltaje desde una fuente externa DC; la barra de acero del prototipo reforzado se constituye en el electrodo de trabajo y se conecta al terminal positivo de la fuente, mientras un contraelectrodo, que puede ser una placa de acero, es conectado al terminal negativo. En este circuito el acero actúa como ánodo y la lámina de acero inoxidable como cátodo, a su vez la solución de NaCl es el electrolito. Aunque los diferentes autores utilizan un voltaje que puede variar entre 2 V y 55 V (Ha *et al.*, 2007; Diab *et al.*, 2011; Horsakulthai *et al.*, 2011; Topçu y Bogă, 2010), este estudio se basó en la norma NT BUILD 356 en la cual se recomienda un voltaje constante de 5 V. A lo largo del ensayo se registró el cambio en la corriente y se identificó el tiempo necesario para evidenciar la fractura del prototipo (Figura 4). Se obtuvo un tiempo máximo en la probeta OPC de 2270 minutos (aproximadamente 38 horas) y para la probeta con 10% de SF fue de 3625 minutos (aproximadamente 60.5 horas) es decir 60% superior, lo cual confirma el mejor desempeño del mortero con adición.

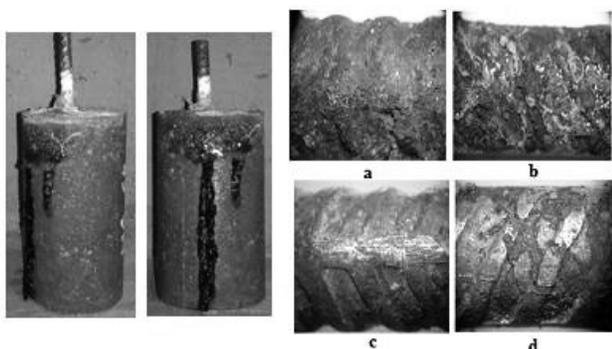
Tanto la corriente inicial como el tiempo de aparición de la grieta son factores considerados en la técnica para definir la mayor resistencia a la penetración de cloruros y la susceptibilidad a la corrosión del acero, ya que como consecuencia del volumen de los productos de corrosión, que puede estar entre 2,5 y 6 veces el del acero, se produce la grieta y al mismo tiempo se aprecia el incremento en la corriente. Cuando el inicio de la fisura vertical se produce a valores inferiores de corriente, se considera que la velocidad de la propagación de la corrosión es muy lenta; de la misma manera una corriente pequeña al inicio del ensayo es indicativo de la resistencia que ofrece la muestra al ingreso de los iones cloruro provenientes del medio exterior. En ambos casos estos factores coinciden con lo reportado para los cementos adicionados. Esta técnica ha sido aplicada al estudio de adiciones tales como cenizas volantes, escorias siderúrgicas, ceniza de cascarilla de arroz, entre otros (Ha *et al.*, 2007; Horsakulthai *et al.*, 2011; Topçu y Bogă, 2010; Bogă y Topçu, 2012; Ferraro *et al.*, 2012).

Diab *et al.* (2011) aplicaron la técnica VI a concretos sin y con adición de MK y SF en porcentajes hasta de 25% de reemplazo del cemento, utilizando voltajes variables en el rango de 15 V a 55 V y reportan una mayor resistencia a la corrosión para los adicionados con 15% de MK; respecto al voltaje aplicado afirman que un incremento se traduce en un menor tiempo de aparición de la grieta. Basunbul *et al.* (1994) y Saraswathy y Song H-W (2008) comparan esta técnica con la de permeabilidad a los iones cloruros (ASTM

C1202) en morteros, con y sin adición, y afirman que las dos técnicas presentan adecuada sensibilidad para evaluar materiales de recubrimiento.

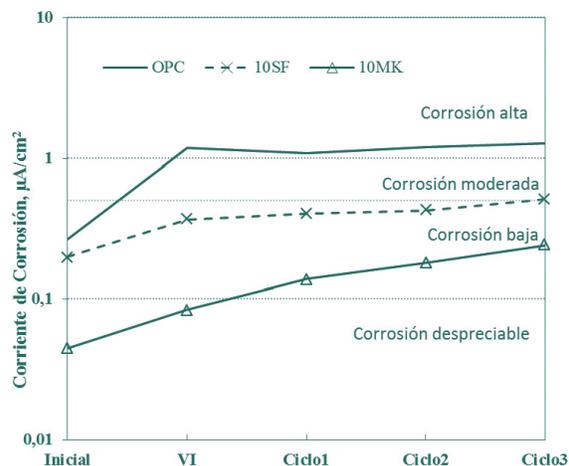
• **Técnica combinada**

Para la aplicación de la técnica combinada (VI + H-S), a partir de los resultados anteriores se definió el tiempo requerido para la exposición de todas las probetas a VI, este fue de 1580 minutos (26 horas aproximadamente). Finalizado este proceso se sometieron los prototipos a 3 ciclos de H-S. En la Figura 4 se observa el estado de las armaduras al final del ensayo en dos de los morteros evaluados, OPC (Figura 4a y 4b) y 10% de MK (Figura 4c y 4d), tal como se pudo apreciar en un esteromicroscopio MODEL GX41F. Aquí se evidencia el mayor grado de deterioro en OPC.



**Figura 4.** Prototipos con acero de refuerzo luego de exposición a cloruros (Voltaje Impreso)  
Fuente: Los autores

En la Figura 5 se muestran los valores de la corriente de corrosión luego de la aplicación de la técnica de voltaje impreso (VI), en todos los casos hay un incremento significativo de la corriente respecto a la inicial. Para OPC este incremento es de 4,5 veces mientras para 10% de SF y 10% de MK es de 1,8 veces. Al comparar el desempeño de las diferentes mezclas se aprecia que MK se ubica en el nivel de corrosión despreciable. En los especímenes expuestos posteriormente a ciclos de H-S, se observa al final del tercer ciclo que la Icorr de 10% de MK y 10% de SF es un 20% y 40% respectivamente de lo reportado por OPC. Esto muestra en el primer caso, que la técnica aplicada responde positivamente a evidenciar la mayor o menor susceptibilidad de la mezcla al proceso corrosivo (Güneyisi *et al.*, 2013), a la par que confirma el mejor desempeño de las mezclas adicionadas, en especial la adicionada con MK.



**Figura 5.** Icorr (µA/cm<sup>2</sup>) en solución de NaCl. Técnica voltaje Impreso (VI) y VI+H-S  
Fuente: Los autores

**Conclusiones**

- Basados en los resultados obtenidos en este proyecto, se demuestra que el uso de adiciones puzolánicas en el cemento mejora de manera relevante las propiedades mecánicas y de durabilidad y por ende la resistencia al desempeño a los cloruros en los morteros armados.
- De las adiciones evaluadas, se destaca el desempeño mecánico de la mezcla con 10% de MK, representado en un incremento del 51,9% respecto a OPC. Esta misma mezcla presenta el mejor desempeño en el estudio de corrosión, superando incluso el comportamiento de las mezclas con adición de SF.
- De las técnicas aceleradas aplicadas para el estudio de corrosión en presencia de cloruros se puede concluir que tanto el ensayo acelerado de humectación-secado (H-S) como el de voltaje impreso (VI), permiten evidenciar la susceptibilidad al proceso corrosivo de los especímenes; sin embargo la técnica de voltaje impreso (VI) presenta la ventaja de arrojar resultados en un menor tiempo. La combinación de la técnica VI con el proceso H-S fue igualmente efectiva para evidenciar la susceptibilidad de cada material evaluado en presencia de cloruros.

**Agradecimientos**

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad del Valle (Cali, Colombia), al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM), y a Colciencias por el apoyo en el desarrollo del presente estudio.

## Referencias bibliográficas

- Aguirre, A.M., Mejía, R. (2013) Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas, *Materiales de Construcción*, 63(309), 7-38. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2013.00313>
- Andrade, C., González, J.A. (1978) Quantitative measurements of corrosion measurements, *Werkstoffe und Korrosion*, 29, 515-519.
- Andrade, C., Alonso, C. (1996) Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site, *Construction and Building*, 10(5), 315-328. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00044-5](http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5)
- Andrade, C., Buják, R. (2013) Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion, *Cement and Concrete Research*, 53, 59-67. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.004>
- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., Vennesland, Ø. (2009) Critical chloride content in reinforced concrete - A review, *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1122-1138. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>
- ASTM C642-13 *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Recuperado de <http://www.astm.org/Standards/C642.htm>.
- ASTM C1585-13 *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of water by Hydraulic-Cement Concretes*. Recuperado de <http://www.astm.org/Standards/C1585.htm>.
- ASTM C1202-12 *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Recuperado de <http://www.astm.org/Standards/C1202.htm>.
- Badogiannis, E., Sfikas, I., Voukia, D., Trezos, K., Tsivilis, S. (2015a) Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, 85, 133-141. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.023
- Badogiannis, E., Aggeli, E., Papadakis, V.G., Tsivilis S. (2015b) Evaluation of chloride-penetration resistance of metakaolin concrete by means of a diffusion – Binding model and of the k-value concept, *Cement and Concrete Composites*, 63,1-7. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.07.012
- Basunful, I.A., Dehwah, H.A., Maslehuddin, M. (1994) *Durability evaluation of repair materials in hot air environments*, SP-145 Proceedings Third Cammet ACI International Conference on Durability of Concrete, 835-850, Nice, France.
- Bogă, A. R., Topçu, I. B. (2012) Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete, *Construction and Building Materials*, 31, 258-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.106>
- Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X., Degeimbre, R. (2003) Durability of mortars modified with metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 33(9), 1473-1479. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00090-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00090-5)
- Diab, A. M., Elyamany, H. E., Elmoty, A. (2011) Effect of mix proportions, seawater curing medium and applied voltages on corrosion resistance of concrete incorporating mineral admixtures, *Alexandria Engineering Journal*, 50, 65-78. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2011.01.013>
- EN206-1 (2008). *Hormigón - Parte 1: Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad*.
- Farahani, A., Taghaddos, H., Shekarchi, M. (2015) Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment, *Cement and Concrete Composites*, 59, 10-17. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.03.006
- Ferraro, R. M., Nanni, A. (2012) Effect of off-white rice husk ash on strength, porosity, conductivity and corrosion resistance of white concrete, *Construction and Building Materials*, 31, 220-225. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.010>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaboğa, F., Mermerdaş, K. (2013) Corrosion behavior of reinforcing

- steel embedded in chloride contaminated concretes with and without metakaolin, *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1288-1295. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.085>.
- Güneyisi, E., Özturan, T., Gesog˘lu, M. (2007) Effect of initial curing on chloride ingress and corrosion resistance characteristics of concretes made with plain and blended cements, *Building and Environment*, 42(7), 2676-2685. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.008>
- Ha, T-H., Muralidharan, S., Bae, J-H., Ha, Y-Ch., Lee, H-G., Park, K-W., Kim, D-K. (2007) Accelerated short-term techniques to evaluate the corrosion performance of steel in fly ash blended concrete, *Building and Environment*, 42, 78-85. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.019>
- Hassan, A.A.A., Lachemi, M., Hossain, K. (2012) Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete, *Cement and Concrete Composites*, 34(6), 801-807.
- Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013>
- Horsakulthai, V., Phiuvanna, S., Kaenbud, W. (2011) Investigation on the corrosion resistance of bagasse-rice husk-wood ash blended cement concrete by impressed voltage, *Construction and Building Materials*, 25(1), 54-60. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.057>
- Kannan V., Ganesan K. (2014) Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin, *Construction and Building Materials*, 51(31), 225-234. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.050>
- Keleştemur, O., Demirel, B. (2015) Effect of metakaolin on the corrosion resistance of structural lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 81, 172-178. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.049
- Khan, M. I., Siddique, R. (2011) Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties, *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.016>
- Kim, H-S., Lee, S-H., Moon, H-Y. (2007) Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin, *Construction and Building Materials*, 21(6), 1229-1237. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.007>
- M. de Gutiérrez, R., Delvasto, S., Talero, R. (2000) Una nueva puzolana para materiales cementicios de elevadas prestaciones, *Materiales de Construcción*, 50(260), 5-13. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2000.v50.i260.386>
- Mejía de Gutiérrez, R., Torres J., Guerrero, C.E. (2004) Análisis del proceso térmico de producción de una puzolana, *Materiales de Construcción*, 54(274), 65-72. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2004.v54.i274.233>
- NT BUILD 356 (1989) *Nordtest method. Concrete, repairing materials and protective coating: Embedded steel method, chloride permeability.*
- NTC 5551 (2007), *Durabilidad de Estructuras de Concreto, Colombia*
- Parande, A. K., Babu, R. B., Karthik, M. A., Kumar, K. K., Palaniswamy, N. (2008) Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/ mortar, *Construction and Building Materials*, 22(3), 127-134. Recuperado de <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.003>
- Poon, C.S., Kou, S.C., Lam, L. (2006) Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, *Construction and Building Materials*, 20(10), 858-865. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.001>
- Ramezani-pour, A.A., Jovein, H.B. (2012) Influence of metakaolin as supplementary cementing

- material on strength and durability of concretes, *Construction and Building Materials*, 30, 470-479. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.050>
- Rao, G.A. (2001) Influence of silica fume on long-term strength of mortars containing different aggregate fractions, *Cement and Concrete Research*, 31(1), 7-12. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00346-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00346-X)
- Sabir, B. B., Wild, S., Bai, J. (2001) Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 441-454. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Saojeng C., Weiting L. (2013) Effects of silica fume and steel fiber on chloride ion penetration and corrosion behavior of cement-based composites, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 28(2), 279-284, Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-013-0679-4>
- Saraswathy, V., Song, H-W. (2008) Evaluation of Cementitious Repair Mortars for Corrosion Resistance., *Portugaliae Electrochimica Acta*, 26(5), 417-432. <http://www.scielo.oces.mctes.pt/pdf/pea/v26n5/v26n5a04.pdf>
- Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H. (2009) Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates, *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 769-775. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.005>
- Shi, X., Xie, N., Fortune, K., Gong, J. (2012) Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview, *Construction and Building Materials*, 30, 125-138. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038>
- Siddique, R., Klaus, J. (2009) Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Applied Clay Science*, 43(3-4), 392-400. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>
- Siddique, R. (2011), Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties, Resources, *Conservation and Recycling*, 55(11), 923-932. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>
- Song, H-W., Lee, C-H., Ann, K-Y. (2008) Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments, *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 113-121. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.005>
- Song, H-W., Pack, S-W., Nam, S-H., Jang, J-C., Saraswathy, V. (2010) Estimation of the permeability of silica fume cement concrete, *Construction and Building Materials*, 24(3), 315-321. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.033>
- Topçu, I. B., Bogă, A. R. (2010) Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete, *Materials and Design*, 31, 3358-3365. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.057>
- Torres-Agredo, J., Mejía, R., Delvasto, S. (2011) Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado, *Ingeniería y Universidad*, 15(1), 77-90. Recuperado de <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/1130>
- Vejmelková, E., Pavlíková, M., Keppert, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P., Ondráček, M., Sedlmajer, M., Černý, R. (2010) High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics, *Construction and Building Materials*, 24(8), 1404-1411. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.017>
- Zhang, W-M., Ba, H-J. (2013) Effect of silica fume addition and repeated loading on chloride diffusion coefficient of concrete, *Materials and Structures*, 46(7), 1183-1191. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-012-9963-6>