

**Evaluación de la corrosión de un acero
embebido en morteros adicionados
con catalizador de craqueo
catalítico usado (FCC)**

Evaluation of steel corrosion in cement
mortars containing catalytic cracking
catalyst residue (FCC)

Silvia Izquierdo García*

Felipe Jaime Dávila**

Juan Gabriel Arenas***

Ruby Mejía de Gutiérrez****

Escuela de Ingeniería de Materiales (GMC, CENM)

Universidad del Valle (Colombia)

Janneth Torres Agredo*****

Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira

* silvia.izquierdo@correounivalle.edu.co

** material@univalle.edu.co

*** material@univalle.edu.co

**** ruby.mejia@correounivalle.edu.co

***** jtorresa@unal.edu.co

Correspondencia: Ruby Mejía de Gutiérrez, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Calle 13 N° 100-00, Cali, Colombia. Teléfono 57(2)3302436. Email: ruby.mejia@correounivalle.edu.co

Resumen

En el presente artículo se analiza el desempeño frente a la corrosión de morteros de cemento adicionados con un residuo de la industria petroquímica en ambientes contaminados con cloruros (Cloruro de Sodio, NaCl 3.5%) y/o Anhídrido Carbónico, CO₂ (3% CO₂, 65% HR y 25°C). Se utilizó un residuo denominado catalizador usado de craqueo catalítico (FCC), procedente de una refinería colombiana; este material tiene un alto contenido de sílice y alúmina, morfología parcialmente amorfa y posee una alta reactividad. Para el estudio, se prepararon morteros de cemento Portland ordinario con el 12% de FCC como reemplazo de cemento, tanto simples como reforzados. Se evaluó el potencial y la corriente de corrosión y complementariamente, en los especímenes no reforzados, se determinó la absorción total, penetración de cloruros, resistividad y frente de carbonatación. A partir de los resultados, se concluye que la adición del 12% de FCC al cemento reduce la permeabilidad a cloruros y la susceptibilidad a la carbonatación del mortero en órdenes hasta del 50%, así mismo genera un incremento del 128% en la resistividad del mortero. Los aceros embebidos en los morteros adicionados presentaron velocidades de corrosión más bajas, particularmente en presencia de iones cloruros.

Palabras Clave: carbonatación, catalizador usado de craqueo catalítico, cloruros, corrosión, morteros adicionados, puzolanas.

Abstract

In this article, the performance to the corrosion of cement mortars added with a petrochemical industry waste, in environments contaminated with chlorides (sodium chloride, NaCl 3.5%) and/or carbonic anhydride, CO₂ (3% CO₂, 65% RH and 25 ° C), is analyzed. A waste, named catalyst catalytic cracking residue (FCC), from a refinery Colombian was used. This material has a high content of silica and alumina, partially amorphous morphology and a high reactivity. For the study, were prepared mortars from cement ordinary Portland with 12% of FCC as cement replacement, both simple and reinforced. The potential and corrosion current were evaluated. Additionally, in the unreinforced specimens, it was determined the total absorption, penetration of chlorides, carbonation front and resistivity. From the results, it concludes that the addition of FCC in mortars has a positive effect on the performance of these materials against the attack of chlorides and CO₂, specifically a reduction of around 50% in chloride permeability and penetration CO₂ and a 128% increase in the resistivity of the mortar. The corrosion values reported by blended mortars are lower than the reference sample, especially in presence of chlorides.

Keywords: blended mortars, catalyst catalytic cracking residue, carbonation, chlorides, corrosion, pozzolan.

Fecha de recepción: 23 de marzo de 2012
Fecha de aceptación: 20 de marzo de 2013

INTRODUCCIÓN

La norma NACE/ASTM G193 - 12b [1] define el proceso de corrosión como el deterioro de un material, usualmente un metal, que resulta de la reacción química o electroquímica con su medio ambiente. En el caso particular de los concretos, considerado como recubrimiento de los aceros estructurales, se afirma que una buena calidad del concreto contribuye a proveer una excelente protección al refuerzo, al dar origen a la formación espontánea de una capa protectora de óxidos de hierro sobre el acero conocida como capa pasivante [2], [3]. Aunque esta capa es inmune al daño mecánico de la superficie del acero, su ruptura puede ser causada por el ataque del ión cloruro, lo cual, debido a la reducción de la alcalinidad en el acero como consecuencia de procesos de carbonatación y a la presencia de grietas en la superficie del concreto por diversas causas, se constituye en el principal causante de la corrosión en los aceros estructurales [2], [4] - [5].

Este proceso de corrosión en las estructuras de concreto con refuerzo se ve reflejado en la pérdida de resistencia del material así como en la tensión interna generada por los productos de corrosión del acero, la cual no logra ser soportada por la deformación plástica limitada del concreto y conduce al agrietamiento [6]. Lo anterior, genera el debilitamiento de la unión entre el acero de refuerzo y el concreto. Por estas razones, los estudios se han centrado en la investigación de metodologías que incrementen la vida útil de las armaduras en presencia de agentes agresivos como los cloruros y el CO_2 . Estudios recientes se han orientado a evaluar los efectos del cambio climático en los procesos corrosivos del acero, tales como el efecto de los niveles de concentración de CO_2 en la atmósfera y los incrementos de temperatura y humedad relativa, con el fin de introducir recomendaciones en los parámetros de diseño relacionados a incrementos en espesores de recubrimiento, mejoramiento de la calidad del concreto, uso de recubrimientos, entre otros [7]. Una de las alternativas para reducir la velocidad de corrosión en el concreto armado es el uso en la mezcla de reductores de permeabilidad que impidan el ingreso de cloruros y/o CO_2 , entre estas la incorporación de adiciones de tipo puzolánico son una opción importante, considerando que su utilización se constituye también en una solución económica, ecológica y técnica [5], [8].

Desde los años 70, ha venido estudiándose la incorporación de adiciones al cemento procedentes de diversas fuentes, ya sean naturales (puzolanas, piedra caliza), activadas por temperatura (arcilla, metacaolín) o subproductos industriales (ceniza volante, escoria de alto horno, cascarilla de arroz) [9], siendo hoy en día estos cementantes reconocidos en las especificaciones y normas con el nombre de Cementos Adicionados (del inglés *Blended Cements*). Recientemente un material con características similares al metacaolín ha venido siendo investigado, el catalizador usado del proceso de craqueo catalítico, FCC (del inglés *Fluid Catalytic Cracking*), el cual es utilizado en el proceso de ruptura catalítica en lecho fluido [10]. Este catalizador toma su nombre debido a que al ser aireado con gas, adquiere la propiedad de parecer un fluido, lo que le permite comportarse como líquido [11].

El catalizador gastado del craqueo catalítico es un material de carácter cristalino con algunas fases amorfas en su estructura [12]. Se caracteriza por estar formado de partículas con formas esféricas o esferoidales, altamente porosas, lo que le otorga una elevada superficie específica, que a su vez es característico de una alta reactividad; el tamaño promedio de sus partículas oscila entre 60 - 70 μm [12], [13], [16]. Su composición química está formada principalmente por óxido de aluminio (Al_2O_3) en un rango de 37 - 46% y óxido de sílice (SiO_2) en un rango de 47 - 58% [15], [17], [19]. Estos óxidos ácidos se encuentran en total en el rango de 92 - 94%. En este residuo también se ha encontrado la presencia de elementos de la familia de los lantánidos, óxidos típicos que se usan para formular las zeolitas existentes en los catalizadores.

El FCC actúa como una puzolana muy activa desde las primeras edades de curado [20], [22]; diferentes estudios muestran que porcentajes de adición entre el 10% y 15% han logrado incrementar la resistencia a la compresión del cemento en órdenes de hasta un 26% [12], [16]. En cuanto a la durabilidad se afirma que el material presenta un buen desempeño en diferentes condiciones de exposición [23], [26].

En la presente investigación se analiza comparativamente el efecto que tiene la sustitución parcial (12%) del cemento por un catalizador gastado del craqueo catalítico (FCC), proveniente de una industria colombiana, en los fenómenos corrosivos del acero embebido en morteros, para definir la potencial aplicación del material en ambientes contaminados con cloruros y/o carbonatación.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Materiales

Para el presente estudio se utilizó un FCC, proveniente de una industria petrolera colombiana, y un cemento Portland Ordinario (OPC). Las características químicas de estos materiales, evaluadas utilizando fluorescencia de rayos X, se incluyen en la tabla 1; aquí se puede apreciar que el FCC está compuesto en gran parte por alúmina y sílice, en un orden cercano al 90%. En la misma tabla se incluye el tamaño medio de partícula evaluado por granulometría láser.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICAS DE FCC Y OPC

Características	FCC	OPC
Composición química, %		
Óxido de Sílice, SiO ₂	48,09	19,43
Óxido de Aluminio, Al ₂ O ₃	41,57	4,00
Óxido de Hierro, Fe ₂ O ₃	0,91	3,61
Óxido de Calcio, CaO	0,22	64,46
Óxido de Magnesio, MgO	0,13	1,52
Óxido de Potasio, K ₂ O	0,09	0,39
Óxido de Titanio, TiO ₂	0,85	0,34
Pérdidas por ignición	2,19	2,58
Propiedades Físicas		
Densidad (kg/m ³)	2,63	3,15
Tamaño medio de partícula (µm)	41,20	23,00

La figura 1 presenta el difractograma de Rayos X (DRX) del material, para el cual se utilizó un equipo RX Rigaku RINT 2200; se observa que el FCC posee tanto material amorfo como cristalino, identificándose en mayor grado un patrón cristalino similar al de un aluminosilicato sódico hidratado de carácter zeolítico, tipo faujasita (Na₂[Al₂Si₁₀O₂₄].nH₂O) (2q = 6,19°, 15,6°, 23,58°), conjuntamente con caolinita y cuarzo, identificados con los símbolos F, K y Q respectivamente [16]. El tamaño promedio de partícula del FCC, evaluado por la técnica de granulometría láser, reportó 76,47 µm; para reducir este tamaño, el material se sometió a un proceso de molienda en un molino de bolas, obteniéndose un tamaño medio de partícula de 41,20 µm (figura 2).

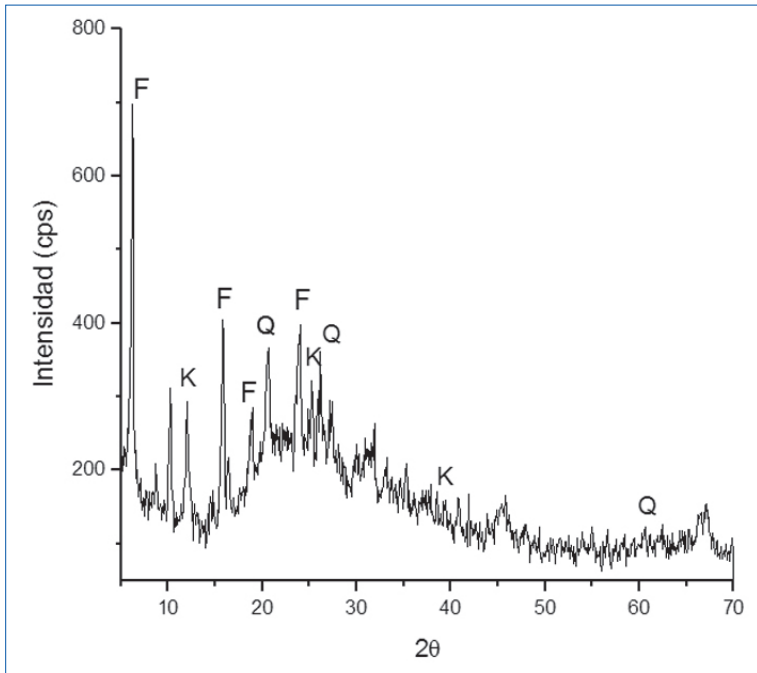


FIGURA 1. DIFRACTOGRAMA DEL FCC: F: FAUJASITA, K: CAOLINITA, Q: CUARZO

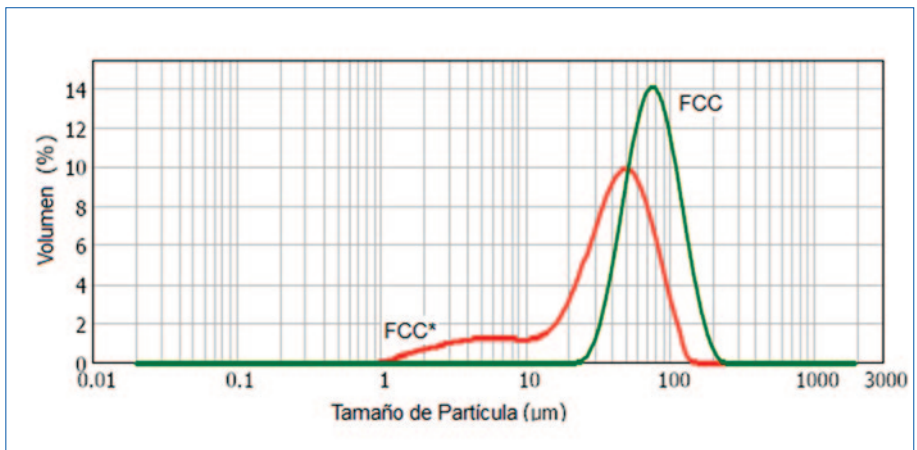


FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DE FCC, VIRGEN Y MOLIDO

Para la elaboración de las muestras de mortero se utilizó arena de Ottawa en proporción Cemento:Arena de 1:2.75, con una relación agua/cementante (a/C) de 0.5 y una sustitución de cemento por FCC en proporción del 12%.

El curado de las probetas se realizó por un período de 28 días a temperatura ambiente en agua saturada con hidróxido de Calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La Figura 3 muestra el diseño de la probeta para los ensayos de corrosión, donde los electrodos de los extremos corresponden al acero corrugado de diámetro 6,35 mm y el electrodo central es de grafito, este último actúa como contraelectrodo.

Ensayos realizados

El ensayo de corrosión se realizó en diferentes medios, agua potable como referencia, cloruro de sodio (NaCl) 3,5% para simular el efecto de los cloruros, y exposición acelerada a anhídrido carbónico (CO_2), este último en cámara de carbonatación bajo condiciones controladas (CO_2 3% y 65% HR y 25°C).

Simultáneamente se expusieron, a iguales condiciones, especímenes no-armados para evaluar la permeabilidad a cloruros (ASTM C1202) y el avance del proceso de carbonatación; esta última mediante la medida del avance de la carbonatación utilizando indicador fenolftaleína.

En cada caso, las muestras fueron colocadas en el medio luego de 28 días de curado. Con el fin de acelerar el proceso corrosivo, al cabo de un tiempo en la cámara, los especímenes se colocaron en un medio con 100% CO_2 .

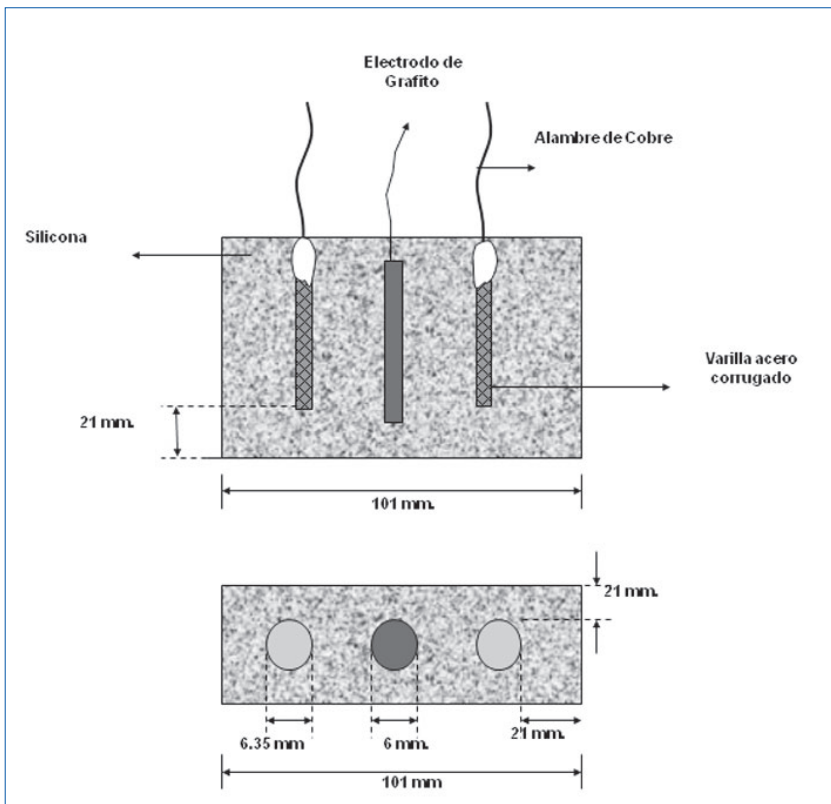


FIGURA 3. GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS DE CORROSIÓN

Como medidas electroquímicas se utilizaron, la medida del potencial de media celda (ASTM C 876) con electrodo de referencia Plata/Cloruro de Plata ($Ag/AgCl$) y la medida de la resistencia de polarización lineal, R_p (ASTM G 59), la cual es una técnica no destructiva; estos ensayos se realizaron en un equipo *Potenciostat/Galvanostat GAMRY PC14*. Complementariamente se determinó la absorción total y el volumen de poros permeables (ASTM C642). Los criterios utilizados para la evaluación del potencial de corrosión y la corriente de corrosión se pueden apreciar en las tablas 2 y 3, respectivamente. Para el cálculo de la corriente de corrosión (I_{corr}) se aplicó la fórmula de Stern-Geary, expresada en la ecuación 1; donde B representa la constante dependiente de las pendientes tafel del sistema, en este caso se utilizó $B=0,026$ V, valor que simula condición activa de corrosión.

$$I_{corr} = \frac{B}{Rp} \quad (1)$$

TABLA 2. CRITERIO DE PROBABILIDAD DE CORROSIÓN [26]

<i>E_{corr} vs Ag/AgCl (mV)</i>	<i>Probabilidad de Corrosión</i>
>-0,100 V	Baja (10% de riesgo)
-0,100 a -0,250 V	Intermedia (Zona incierta)
<-0,250 V <-0,400 V	Alta (90% de riesgo) Severa

TABLA 3. CRITERIO DE CORRIENTE DE CORROSIÓN

<i>I_{corr} (µA/cm²)</i>	<i>Nivel de Corrosión</i>
≤ 0,1	Despreciable (pasivo)
0,1 – 0,5	Bajo
0,5 – 1 >1	Moderado Alto

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las mezclas de mortero

En la tabla 4 se presentan los resultados de los ensayos de porosidad, absorción de agua, permeabilidad a cloruros y resistividad de las mezclas evaluadas. En general, se destaca el mejor desempeño de los morteros adicionados con 12% FCC, con una reducción del 58% en la permeabilidad a cloruros y un incremento del 128% en la resistividad del mortero, comparado a lo reportado por el mortero de referencia. Los resultados del ensayo ASTM C1202 permite clasificar los morteros adicionados con FCC como materiales de baja permeabilidad al ion cloruro. Se atribuye este comportamiento a las excelentes propiedades puzolánicas de la adición, las cuales han sido demostradas en anteriores estudios [17], donde se afirma que el FCC incrementa la cantidad de productos de hidratación tales como silicatos y aluminatos cálcicos; adicionalmente puede atribuirse a la capacidad de enlace del FCC

por el cloruro para formar la sal de Friedel, lo cual ha sido expresado por diferentes investigadores [23], [26], [28], [29]. La mayor resistividad del mortero adicionado (12% FCC) es un indicativo de un potencial de mejor desempeño protector del material como recubrimiento del acero frente a la corrosión, aunque cabe anotar que algunos investigadores han reportado que resistividades en el rango de 100 - 500 Ω .m indican riesgo de corrosión moderado [30]; por el contrario, otros investigadores manifiestan que valores superiores a 100 Ω .m son de muy bajo riesgo de corrosión aun en casos de encontrarse en ambientes contaminados con cloruros o CO_2 [31]. Zornosa et al [25] reporta valores similares de resistividad para morteros con 12% FCC y relación a/C de 0,5.

TABLA 4. PROPIEDADES DE LOS MORTEROS A LOS 28 DÍAS DE CURADO

Propiedad	Mortero OPC	Mortero 12% FCC
Porosidad (%)	10,43	10,38
Absorción total (%)	5,46	5,07
Carga Total (Coulombs)	3775	1597
Resistividad (Ω .m)	47	107

Comportamiento frente a la corrosión

Medio Cloruro de Sodio, NaCl 3.5%

La medición del potencial de corrosión y la correspondiente corriente de corrosión (I_{corr}) en medio de agua potable y en presencia de NaCl 3.5% se pueden apreciar en la figura 4. Se observa que el potencial de corrosión (E_{corr}) de las muestras de OPC inmersas en agua potable se ubica en la zona de menor probabilidad de corrosión (tabla 2) [32]; mientras los morteros adicionados con FCC presentaron valores inferiores de potencial, en el rango entre -0,175 y -0,114 V. En presencia de NaCl 3.5%, se aprecia a los 20 días de exposición una disminución en el potencial de corrosión (E_{corr}) del acero embebido en el mortero de referencia a valores del orden de -0,500 V ubicándose en la zona de mayor probabilidad de corrosión, por el contrario el espécimen correspondiente a OPC+12%FCC permanece a lo largo del ensayo en la región de incertidumbre, cabe anotar que el mínimo valor de E_{corr} en este caso fue de -0,200 V.

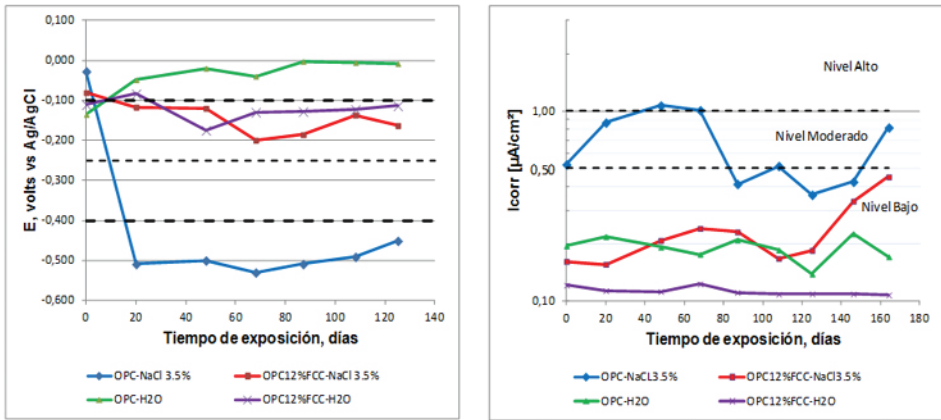


FIGURA 4. POTENCIAL Y VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE ACEROS EN AGUA Y NaCl 3.5%

Los resultados de la corriente de corrosión (I_{corr}) corroboran lo anterior, en general para OPC en agua y los morteros adicionados con 12%FCC, tanto en agua como en NaCl 3,5%, la corriente de corrosión se corresponde con valores entre 0,1 y 0,5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ que indican una velocidad de corrosión baja, por el contrario, los especímenes de OPC en presencia de NaCl 3,5% se ubican en el nivel moderado. Concuenda este comportamiento con la menor permeabilidad a cloruros y la mayor resistividad del mortero adicionado incluidos en la tabla 4, y con los resultados reportados por Zornoza et al [23], [25]. Cabe anotar que, si se considera lo expresado por Otieno [32], los valores obtenidos de I_{corr} para FCC (máximo 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ hasta edades de exposición de 120 días) pueden considerarse de riesgo corrosivo despreciable.

Exposición a carbonatación (3% CO_2)

Los ensayos de susceptibilidad a la carbonatación fueron realizados a especímenes de mortero curados previamente 28 días bajo agua, mediante la exposición en el interior de una cámara climática a concentración del 3% de CO_2 y bajo condiciones atmosféricas controladas de 65% HR y 25°C, este ensayo se realizó hasta 114 días de exposición. El avance del frente de carbonatación se midió mediante el corte transversal de los morteros y posterior aspersion de una solución alcohólica de fenolftaleína sobre la superficie, en donde se genera un revelado a través de la coloración rojo

magenta del área no carbonatada e incolora ($\text{pH} < 9$) en el área donde el concreto ha sufrido carbonatación. Los especímenes adicionados con FCC (12%) presentan una menor penetración de CO_2 , aproximadamente en un orden del 50% de la penetración reportada por el OPC; así al final del ensayo (114 días) la zona carbonatada fue de 10,3 mm en el mortero OPC+12%FCC y de 19,54 mm para el mortero de referencia. El coeficiente de carbonatación K_c puede ser evaluado a partir de la ecuación 2, donde X representa la profundidad de penetración del CO_2 (mm) y t , el tiempo de exposición [33] - [35]. Los coeficientes de carbonatación K_c global fueron 20,06 mm/año^{1/2} para OPC y 12,95 mm/año^{1/2} para OPC+12%FCC. Cabe anotar que estos ensayos en condiciones aceleradas (K_c) dan valores muy superiores a los coeficientes de carbonatación normalmente obtenidos en condición de ambiente atmosférico (K_n). Estas dos velocidades de carbonatación K_c y K_n pueden relacionarse con la raíz cuadrada de la relación entre las concentraciones de CO_2 correspondientes a cada condición, tal como se ilustra en la ecuación 3, donde C es la concentración de CO_2 en el ensayo acelerado y N la concentración de CO_2 en el ambiente natural [36]. Teniendo en consideración que la concentración de CO_2 usada en el presente estudio para el ensayo de carbonatación acelerada fue de 3% y asumiendo que la concentración bajo condiciones ambientales normales es de 0,035% se pueden calcular los valores de K_n ; obteniéndose: 0,11 mm/día^{1/2} para OPC y 0,07 mm/día^{1/2} para OPC+12%FCC equivalente a 2,16 mm/año^{1/2} para OPC y 1,40 mm/año^{1/2} para OPC+12%FCC. Esto muestra una menor susceptibilidad para los especímenes adicionados con FCC.

$$X = K_c \times \sqrt{t} \quad (2)$$

$$\frac{K_c}{K_n} = \sqrt{\frac{C}{N}} \quad (3)$$

La evaluación de la corrosión de los aceros en este medio se realizó a las mismas condiciones de exposición, registrando la variación en los potenciales de corrosión y la correspondiente corriente de corrosión. Los morteros sin adición presentan una disminución en su potencial a edades tempranas hasta los 20 días de exposición, donde después de alcanzar -0,190 V y ubicarse en la zona incierta de corrosión, presentan un incremento continuo en sus

potenciales hasta ubicarse nuevamente en la zona de menor probabilidad de corrosión. Los morteros reforzados con adición de FCC por su parte, presentan inicialmente un potencial de $-0,305$ V indicando un estado de alta probabilidad de corrosión, seguido de un incremento a potenciales cada vez más nobles a medida que avanza el tiempo de exposición.

Este comportamiento se puede atribuir al taponamiento de la estructura de poros por los productos de carbonatación generados durante la primera etapa de exposición. Después de 114 días de exposición los morteros con y sin adición reportan potenciales de $-0,015$ V y $-0,054$ V respectivamente, indicando que el acero se encuentra en estado no-activo.

Respecto a la densidad de corriente, presentada en la Figura 5 se observa un comportamiento similar entre los morteros con y sin adición ubicándose en un nivel bajo de corrosión a lo largo de todo el período de exposición.

A los 109 días de ensayo, se reportan valores de corriente de corrosión, I_{corr} , de $0,19 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $0,34 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para OPC y OPC+12%FCC, respectivamente, confirmando así los resultados del ensayo de potencial de media celda. Posterior a la exposición de los especímenes al ambiente con 100% de CO_2 se pudo apreciar un comportamiento similar en los dos morteros, con potenciales del orden de $-0,030$ V para OPC y $-0,017$ V para OPC+12%FCC.

Resultados similares al rango de corrientes de corrosión reportadas en este estudio ($0,2 - 0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) fueron obtenidos por Zornosa et al [23], para morteros adicionados con 15% FCC, aunque cabe anotar que el mortero utilizado por el investigador incluyó un plastificante para reducir los contenidos de agua en la mezcla.

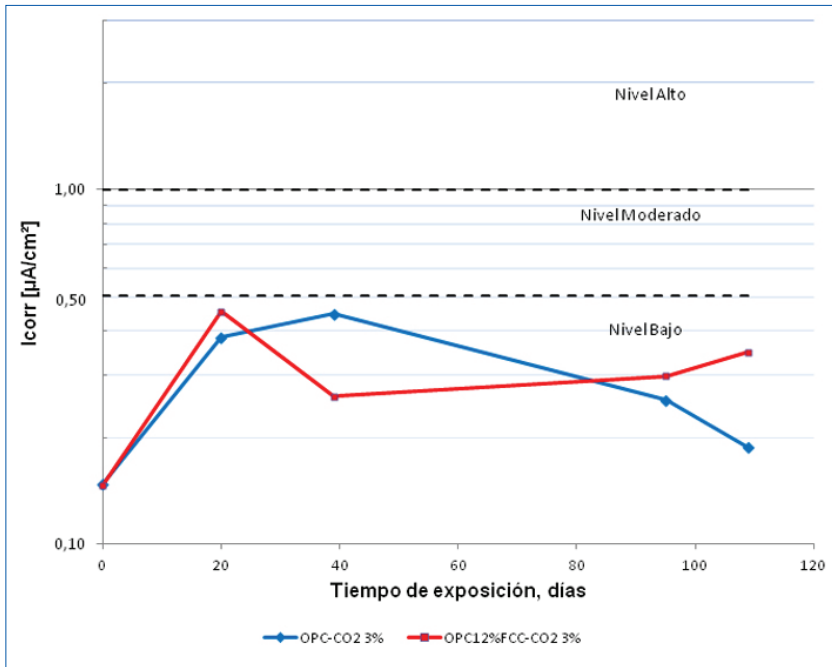


FIGURA 5. VELOCIDAD DE CORROSIÓN DE ACEROS EXPUESTOS A CARBONATACIÓN (3% CO₂)

CONCLUSIONES

El residuo de catalizador de craqueo catalítico evaluado en la presente investigación es un material que incorporado al cemento contribuye a la mayor durabilidad del mortero adicionado, aportando una menor permeabilidad a cloruros, menor susceptibilidad a la carbonatación y mayor resistividad eléctrica. Específicamente un 12% de adición de FCC al cemento Portland dio lugar a una reducción del orden del 50% en la permeabilidad a cloruros y la penetración del CO₂, y un incremento del 128% en la resistividad del mortero. Respecto al comportamiento a corrosión, los resultados del estudio comprueban el mejor desempeño de los morteros con adición del 12% FCC como recubrimiento de los aceros estructurales, expuestos a ataque por cloruros y carbonatación.

Lo anterior, indica que el FCC en proporciones del 12%, puede ser utilizado como adición para mejorar el desempeño de morteros y concretos en ambientes marinos y en presencia de CO₂; contribuyendo así al aprovechamiento de un residuo, al menor consumo de cemento y en general a la sostenibilidad tanto técnica como ambiental.

REFERENCIAS

- [1] Standard Terminology and Acronyms Relating to Corrosion. NACE/ASTM G193, 2012.
- [2] P. Castro, R. Catillo, J. Carpio, J. Genescá, P. Helene, W. López, E. Pazini. *Corrosión en estructuras de concreto armado, teorías, inspección, diagnóstico, vida útil y reparación*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., 1998.
- [3] A. Rossi, G. Puddu, B. Elsener. "The surface of iron and Fe10Cr alloys in alkaline media", in *Proc. Eurocorr*, Associazione Italiana di Metallurgia, Riva del Garda, Milán, 2001.
- [4] B. Bary and A. Sellier. "Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, pp.1859-1872, 2004.
- [5] X. Shi, N. Xie, K. Fortune, J. Gong, "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview," *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 125-138, 2012.
- [6] H.F.W. Taylor, *Cement Chemistry*, Academic Press Inc., Londres, 1990.
- [7] M.G. Stewart, X. Wang, M.N. Nguyen, "Climate change adaptation for corrosion control of concrete infrastructure," *Structural Safety*, vol. 35, pp. 29-39, 2012.
- [8] M.F. Carrasco, G. Menendez, V. Bonavetti, E.F. Irassar, "Strength optimization of "tailor - made cement" with limestone filler and blast furnace slag," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1324-1331, 2005.
- [9] P. Kumar and P. Monteiro, *Concrete Structure, Properties and Materials*". Prentice Hall, New Jersey, 2006.
- [10] R. Siddique and J. Klaus, "Influence of Metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review," *App. Clay Sci.*, vol. 43, pp. 392-400, 2009.
- [11] E. Shahneen, *Catalytic Processing in Petroleum Refining*. Pennwell Publishing Company, Oklahoma, 1982
- [12] H.L. Chen, Y.S. Tseng, K.C. Hsu, "Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, pp. 657-664, 2004.

- [13] J. Paya, M.V. Borrachero, J. Monzó, L. Soriano, "Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland," *Materiales de Construcción*, vol. 59, no. 296, pp. 37-52, 2009.
- [14] J. Paya, J. Monzó, M.V. Borrachero, "Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) an excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 1773-1779, 1999.
- [15] J. Paya, J. Monzó, M.V. Borrachero, S. Velásquez, "Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, pp. 603-609, 2003.
- [16] Y.S. Tseng, C.L. Huang, K.C. Hsu, "The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials". *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 782-787, 2005
- [17] J. Torres, E.A. Baquero, A.R. Silva, "Evaluación de la actividad puzolánica de un residuo de la industria del petróleo," *Dyna*, vol. 76, no. 158, pp. 49-53, 2009.
- [18] C.A. Pinto, P.M. Büchler, J. Dweck, "Pozzolanic Properties of a Residual FCC Catalyst during the Early Stages of Cement Hydration Evaluation by thermal analysis," *J. Ther. Anal. and Calorim.*, vol. 87, no. 3, pp. 715-720, 2007
- [19] N. Su, H.Y. Fang, Z.H. Chen, F.S. Liu, "Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, pp. 1773-1783, 2000
- [20] M.L. Soriano, M. L., "Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC)", Ph.D. Tesis Universidad Politécnica de Valencia, España, 2008.
- [21] J. Paya, J. Monzo, M.V. Borrachero, "Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements%20CHEMICAL%20AND%20MECHANICAL%20PROPERTIES%20OF%20FLUID%20CATALYTIC%20CRACKING%20CATALYST%20RESIDUE%20(FC3R," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, pp. 57-61, 2001.
- [22] S.K. Antiohos, E. Chouliar, S. Tsimas, "Re-use of spent catalyst from oil-cracking refineries as supplementary cementing material," *J. China Particuology*, vol. 4, no. 2, pp. 73-76, 2006.
- [23] E Zornoza, J. Payá, P. Garcés, "Chloride-induced corrosion of steel embedded in mortars containing fly ash and spent cracking catalyst," *Corr. Sci.*, vol. 50, pp. 1567-1575, 2008.
- [24] E Zornoza, J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero, P. Garcés, "The carbonation of OPC mortars partially substituted with spent fluid catalytic catalyst (FC3R) and its influence on their mechanical properties," *Constr. Build. Mater.* vol. 23, no. 3, pp. 1323-1328, 2009.

- [25] E. Zornoza, P. Garces, J. Paya, M.A. Climent, "Improvement of the chloride ingress resistance of OPC mortars by using spent cracking catalyst," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, pp. 126-139, 2009.
- [26] B. Pacewska, M. Bukowska, I. Wilinska, "Influence of Some Aggressive Media on Corrosion Resistance of Mortars with Spent Cracking Catalyst," *J. Ther. Anal. and Calorim.*, vol. 60, pp. 257-264, 2000.
- [27] Norma ASTM C876, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Pennsylvania (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2011.
- [28] M. Bukowska, B. Pacewska, I. Wilinska, "Corrosion resistance of cement mortars containing spent catalyst of fluidized bed cracking (FBCC) as an additive," *J. Ther. Anal. and Calorim.*, vol. 74, pp. 931-942, 2003
- [29] E. Zornoza, P. Garcés, J. Monzó, M.V. Borrachero, J. Payá, "Accelerated carbonation of cement pastes partially substituted with fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R)," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, pp. 134-138, 2009
- [30] R. B. Polder, "Test methods for onsite measurement of resistivity of concrete: A RILEM TC-154 technical recommendation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 15, pp. 125-131, 2001
- [31] M.C. Andrade and C. Alonso, "Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site," *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 5, pp. 315-328, 1996.
- [32] M. Otieno, M. Alexander, H. Beushausen, "Research Report: Transport mechanisms in Concrete", Corrosion of steel in Concrete, CSIRG, 78 p., 2010.
- [33] A. Steffens, D. Dinkler, H. Ahrens, "Modeling carbonation for corrosion risk prediction of Concrete Structures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, pp. 935-941, 2002.
- [34] Y. F. Houst and F. H. Wittmann, "Depth Profiles of Carbonates formed during natural Carbonation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, pp. 1923-1930, 2002.
- [35] J. Khunthongkeaw, S. Tangtermsirikul, T. Leelawat, "A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, pp. 744-753, 2006
- [36] A. Castro, R. Ferreira, A. M. Lopes, O. Cascudo, H. Carasek. "Relationship between Results of Accelerated and Natural Carbonation in various Concretes," in *Proc. International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, Barcelona, España. pp. 988-997. 2004.