

## CARACTERIZACIÓN DE LA CORROSIÓN DE CONCRETOS CON MEZCLAS TERNARIAS

### RESUMEN

Se estudiaron concretos adicionando ceniza volante, micro-sílice y escoria de alto horno, el objetivo fue determinar cual de las mezclas presenta mejor comportamiento como protección contra la corrosión del acero. Se prepararon seis mezclas y se construyeron celdas de concreto donde se le adicionó el 20% con respecto al peso de aditivos, con dos varillas embebidas en la mezcla como electrodos y fueron expuestas a una solución de NaCl (3.5% en peso), durante ocho meses se monitorearon con técnicas electroquímicas. La mezcla que mejores características obtuvo fue la que contenía 10% ceniza volante y 10% escoria de alto horno.

**PALABRAS CLAVE:** Concreto, corrosión, técnicas electroquímicas

### ABSTRACT

*In the present paper were studied concretes added with fly ash, micro-silica and ground granulated blast furnace, with the objective to determine as it is the mixture that better protection presents against the corrosion of the reinforcement. Were prepared concretes add 20% of weight with additives, two iron rod were immerse in concrete, and before were exposed a NaCl solution (3.5% in weight), during eight months were monitoring the behavior by electrochemical techniques. It is observe that the combination which one best protected is the mixed with 10% of fly ash and 10% of ground granulated blast furnace substituid.*

**KEYWORDS:** Concrete, corrosion, electrochemical techniques

### ERICK MALDONADO

Ingeniero Civil, M. Sc.  
Estudiante de doctorado  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados S. C.  
[erick.maldonado@cimav.edu.mx](mailto:erick.maldonado@cimav.edu.mx)

### FACUNDO ALMERAYA

Ingeniero Metalurgico, Ph.D.  
Investigador Titular "C"  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados S. C.  
[facundo.almeraya@cimav.edu.mx](mailto:facundo.almeraya@cimav.edu.mx)

### CITLALI GAONA

Ingeniero Metalurgico, Ph.D.  
Investigador Titular "B"  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados S. C.  
[citlali.gaona@cimav.edu.mx](mailto:citlali.gaona@cimav.edu.mx)

### ALBERTO MARTINEZ VILLAFANE

Fisico Matemático, Ph.D.  
Investigador Titular "D"  
Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados S. C.  
[martinez.villafane@cimav.edu.mx](mailto:martinez.villafane@cimav.edu.mx)

### MIGUEL BALTAZAR

Ingeniero Civil, Ph.D.  
Profesor Investigador  
Universidad Veracruzana  
[mbaltazar@uv.mx](mailto:mbaltazar@uv.mx)

## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto es un material al cual se le ha dado gran importancia en la construcción de ciudades desde las primeras civilizaciones por sus excelentes características de trabajabilidad, economía, facilidad de adquisición y por sus excelentes propiedades mecánicas. Hasta la fecha se han realizado varias investigaciones en las cuales se ha tomado gran importancia al tema de la resistencia mecánica, [1]; donde solo estudiaron el efecto que tenían las mezclas endurecidas bajo esfuerzos de tensión y compresión. Sin embargo, es sabido que en el las varillas del concreto reforzado expuesto a condiciones ambientales agresivas son atacadas por los iones cloruro en ambientes marinos [2], lo cual reduce el ciclo de vida para el cual fueron diseñadas las estructuras; es por esta razón es que se ha tomado el interés por tener en cuenta los factores de durabilidad.

Con respecto a este problema, las investigaciones que generalmente se han realizado en los últimos años, después de identificar el agente que lo genera y la forma en como se produce el mecanismo, se han enfocado a la búsqueda de métodos de prevención y protección [3].

Dentro de las formas de protección en contra de la corrosión existen las que son directas al acero de refuerzo y las indirectas, dentro de las directas están la protección catódica y recubrimientos, las indirectas son parcheos, revestimientos, extracción electroquímica de cloruros, realcalinización y añadir aditivos.

Haciendo referencia a la adición de aditivos, en ésta investigación se propone el uso de materiales que son resultado de desecho industrial, como son: ceniza volante, humo de sílice y escoria de alto horno para disminuir la velocidad de corrosión añadiéndolos al concreto fresco, pero solo se han hecho combinaciones

binarias haciendo uso sólo un aditivo sólido de los antes mencionados con la mezcla del cemento[4], pero aún no se han realizado estudios detallados en los que se presenten mezclas ternarias que sean económica y técnicamente factibles para su uso como protección en concretos resistentes a la corrosión aumentando la durabilidad de los mismos y que a su vez no disminuya la resistencia mecánica para los fines que fue diseñado.

**2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

**2.1 Propiedades de los materiales**

El cemento utilizado en esta investigación, fue Pórtland Tipo I, de acuerdo a la norma ASTM C150-02 [5], la ceniza volante clase F es producida a partir de antracita o carbones bituminosos usados en plantas de producción energética y posee un contenido bajo en calcio, y está en conformidad dentro de la norma ASTM C618-99 [6], la micro sílice, o humo de sílice es un material puzolánico de alta reactividad, es un polvo sumamente fino, con granos aproximadamente 100 veces menores al del cemento ASTM C 1240 [7].

**2.2 Diseño de las mezclas y especímenes de concreto**

Se diseñaron cinco mezclas de concretos con un proporcionamiento para que cumplieran resistencias de 250 Kg/cm<sup>2</sup>, con una relación agua cemento (A/C) de 0.45, con respecto a 402 kg/m<sup>3</sup> de cemento y las cuales se encuentran listadas en la Tabla 1, donde se observan los porcentajes de aditivos sólidos que se sustituyeron con respecto al peso del cemento.

Nomenclatura de la Mezcla	Ceniza Volante (CV) %	Escoria de Alto Horno (EH) %	Micro sílice (MS) %	Cemento Pórtland (C  PO) %
CONTROL	-	-	-	100
A <sub>R</sub> RP	5	10	-	85
B <sub>R</sub> RP	10	5	-	85
C <sub>R</sub> RP	5	-	15	80
D <sub>R</sub> RP	-	5	15	80
E <sub>R</sub> RP	10	-	10	80

Tabla 1. Características de las mezclas de concreto diseñados para el estudio.

Con estas mezclas se construyeron especímenes de concreto como se muestra en la Figura 1.

**2.3 Técnicas electroquímicas**

Estas celdas se colocaron en una solución agua-NaCl al 3.5%, durante un periodo de 8 meses, en este periodo se sometieron a pruebas de Ruido electroquímico [8] tomando 1024 puntos con una lectura de un punto por segundo y Resistencia a la Polarización Lineal [9], con un potencial de inicio de -20 mV hasta un potencial final de 20 mV, y una velocidad de barrido de 10 mV/min. Estas pruebas se realizaron con un potenciostato-

galvanostato ACM Gill 8, haciendo uso de un electrodo de referencia de Cobre-Sulfato de Cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>).

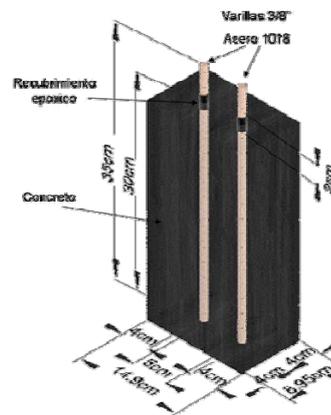


Figura 1. Dimensiones de la celda de corrosión.

**3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**3.1 Resultados de la prueba mecánica de compresión**

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión axial sin confinamiento de acuerdo con ASTM C39-03 [10], a los 91 días, después de curados con una membrana plástica como se hace constar en ASTM C156-98 [11]. El desempeño de éstos concretos a la prueba de compresión depende de la variación de los porcentajes de aditivos como se muestra en la Figura 2. Tomando como referencia la mezcla control (100CPO) cuyo diseño fue de f'c=250 kg/cm<sup>2</sup>, se observó que el incremento a la resistencia a la compresión fue directamente proporcional a la cantidad de ceniza volante, en mezclas donde el contenido fue (CV-EH-CPO), ya que se alcanzaron valores muy próximos a los 300 kg/cm<sup>2</sup>, siendo éste un 16.5% mayor al previamente diseñado, sin embargo, las mezclas con un 20% de aditivos sustituidos en peso de CPO, donde la base de los aditivos fue micro sílice, obtuvieron valores muy por debajo de lo diseñado, en un 20% con respecto a la mezcla control.

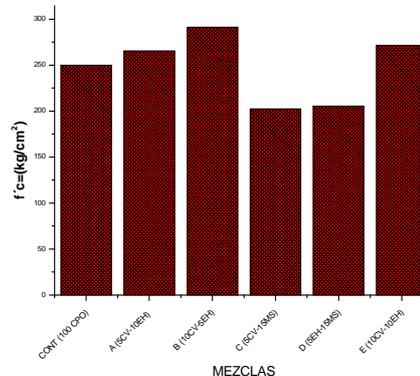


Figura 2. Resistencia a la compresión a los 91 días de curado y porcentajes de resistencia ganada o perdida para las diferentes mezclas de concreto

### 3.2 Potenciales de media celda

De acuerdo a ASTM C876-91 [12], durante el tiempo que permanecieron las celdas en salmuera todas las mezclas han mostrado potenciales muy activos desde los -550 mV a los -650 mV (ESC) con un 90% de probabilidad de corrosión, sin embargo la mezcla A (5CV-10EH) entre los 100 y 130 días de exposición, presentaron potenciales con un porcentaje de incertidumbre, ya que entraron en el rango de los -200 mV a los -350 mV (ESC), pero al termino de los 5 meses nuevamente se observaron potenciales dentro de rangos de actividad (figura 3).

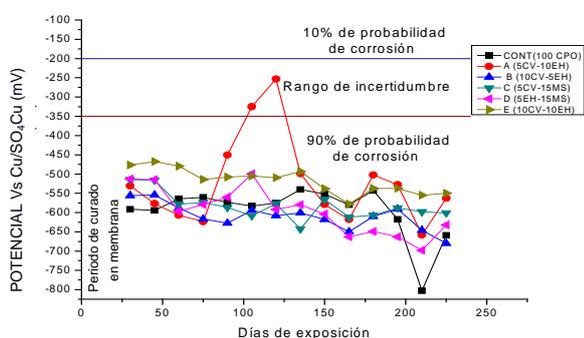


Figura 3. Mediciones de potenciales de media celda.

### 3.3 Resistencia a la Polarización Lineal.

Esta técnica es de gran ayuda ya que se realiza en un tiempo muy corto (4 min. con los parámetros elegidos). La polarización lineal es un método no destructivo de estimar la velocidad de corrosión instantánea de un metal. En caso del concreto reforzado, el método es restringido principalmente debido al medio altamente resistivo, el área desconocida del refuerzo polarizado y la corrosión no uniforme. A pesar de esto, gracias a esta técnica es posible estimar si el refuerzo se corroe en la actividad o la pasividad [13]

La mezcla control (100% CPO), obtuvo velocidades de corrosión mas elevadas que las cuatro restantes, ya que a los 30 días presentó una velocidad de  $1.78E-03$  mm/año y al termino de los ocho meses de exposición  $2.20E-03$  mm/año, la mezcla A (5CV-10EH) inició en  $1.28E-03$  mm/año y terminó con  $7.49E-04$  mm/año, la mezcla B (10CV-5EH) comenzó con una velocidad menor a la anterior  $1.01E-03$  mm/año y concluyó con  $8.59E-04$  mm/año, sin embargo las mezclas C (5CV-15MS) y la D (5EH-15MS) tuvieron comportamientos semejantes, ya que en el primer mes se observaron velocidades de corrosión muy cercanas a los  $4.5E-04$  mm/año y finalizaron en  $3.70E-04$  y  $4.06E-04$  mm/año respectivamente. Pero la mezcla E(10CV-10EH) que no contenía micro sílice obtuvo resultados muy parecidos a C y D comenzando con una velocidad de corrosión

$4.93E-04$  mm/año y al cabo del monitoreo  $3.93E-04$ , gráficamente se pueden apreciar éstos valores (Figura 4).

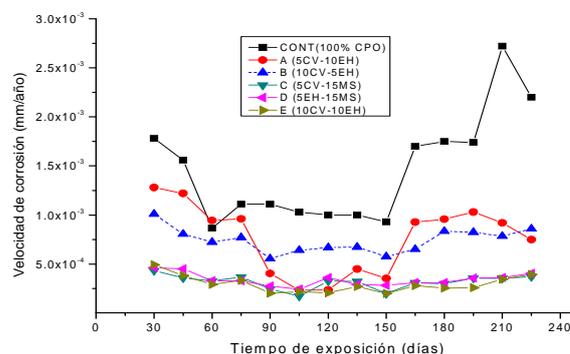


Figura 4. Comportamiento de la velocidad de corrosión con Resistencia a la Polarización Lineal, durante el tiempo de exposición para las diferentes mezclas.

### 3.4 Ruido Electroquímico

Realizando el análisis visual de las series de tiempo arrojadas por la prueba, observamos que la mezcla control (100CPO), a los 30 días de exposición presentó potenciales de -591 mV tendiendo a potenciales más nobles, la frecuencia de la señal es alta y la amplitud baja, además tiende a demandar menos corriente; eliminando la tendencia observamos que no existen transitorios y demuestran una corrosión generalizada. A los 225 días un comportamiento se observa semejante que al de los 30 días, solo que con potenciales de -800 mV, eliminando la tendencia por métodos estadísticos observamos que existen algunos transitorios en la corriente pudiéndose observar corrosión generalizada (Figura 5). Para la mezcla A(5CV-10EH) los potenciales en la serie de tiempo sin eliminar la tendencia se encontraron en -531 mV tendiendo a ser más activos mientras aumenta el tiempo de medición mientras que al eliminar la tendencia observamos transitorios de la corriente, pudiendo observar una corrosión localizada, a los 225 días de exposición en sal el potencial tiende a valores más nobles y eliminando la tendencia se presentó una corrosión generalizada. En la mezcla B(10CV-5EH) se presentaron corrosiones generalizadas, el potencial al final de la experimentación tendió a ser más positivo y disminuyó la demanda de corriente. Tanto en la mezcla C(5CV-15MS) como en la D(5EH-15MS), se observa que ambas presentan corrosión generalizada, desde el inicio del monitoreo, hasta el final, presentando mejores propiedades la primera, ya que el potencial tiende a valores más nobles y disminuye la demanda de corriente. Para finalizar con el análisis visual de las series de tiempo de la técnica de ruido electroquímico, se nota que la mezcla E(10CV-10EH) a los 30 días de exposición obtuvo un potencial de -473 mV, tendiendo a potenciales mas nobles, y la corriente se mostró estable en  $-3.8E-10$  mA, con fluctuaciones aleatorias, lo que no puede definir precisamente el tipo de corrosión. A los 225 días, se observa que tanto el potencial como la corriente tienden a

valores mas positivos, mas no una estabilización del sistema, al eliminar la tendencia, podemos observar que los transitorios se encuentran en valores menores a 1 mV,

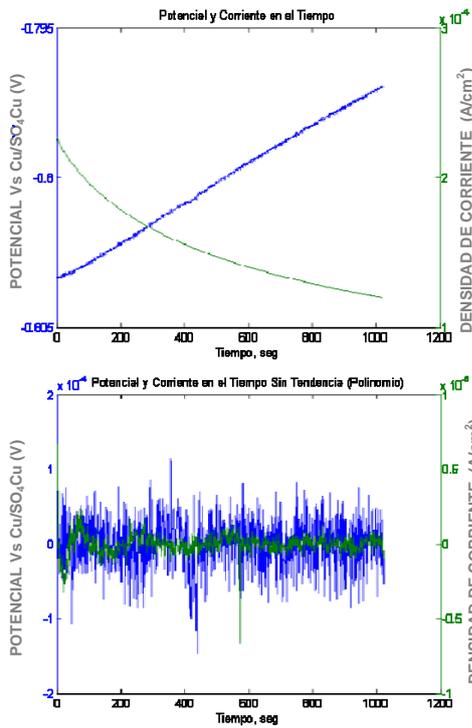


Figura 5. Series de tiempote la mezcla control (100 CPO) tendencia (arriba) y sin tendencia (abajo) a los 30 días, b) a los 225 días.

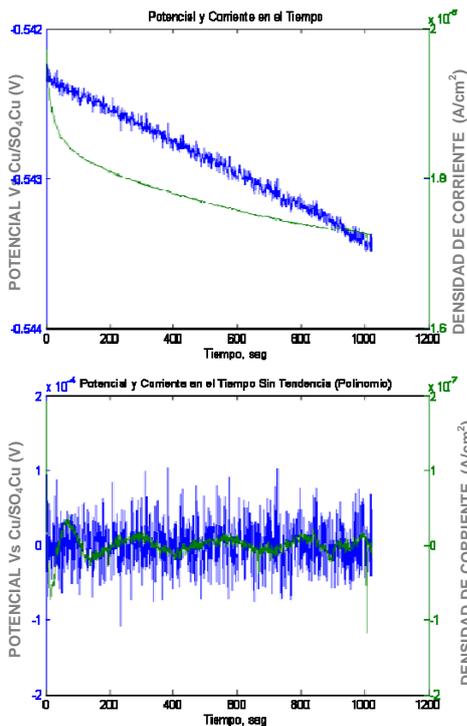


Figura 6. Series de tiempote la mezcla E(10CV-10EH) tendencia (arriba) y sin tendencia (abajo) a los 30 días, b) a los 225 días

y 1 mA, en potencial y corriente respectivamente a lo que amplitud se refiere, y de igual manera la frecuencia es pequeña, para los registrados en el sistema acero concreto, lo cual podemos determinar como una morfología de corrosión generalizada (Figura 6).

En la Tabla 2 se muestran los valores más representativos, obtenidos durante la experimentación, y obtenidos mediante análisis estadístico, para finalmente obtener el índice de localización (I.L.), el cual nos dará información del tipo de corrosión que se está presentando.

Muestra	Vel corr (mm/año) 10 <sup>-4</sup>	I.L.	Tipo de corrosión
CONTROL (100CPO) 30	0.653	0.0047	GRAL
CONTROL(100CPO)150	1.34	0.0280	MIXTA
CONTROL(100CPO) 225	0.28	0.0049	GRAL
A (5CV-10EH) 30	0.567	0.0086	GRAL
A (5CV-10EH) 150	0.684	0.0740	MIXTA
A (5CV-10EH) 225	0.21	0.0160	MIXTA
B (5EH-10CV) 30	0.371	0.0130	MIXTA
B (5EH-10CV) 150	0.360	0.0130	MIXTA
B (5EH-10CV) 225	0.22	0.01040	MIXTA
C (5CV-15MS) 30	0.168	0.00075	GRAL
C (5CV-15MS) 150	0.0368	0.00010	GRAL
C (5CV-15MS) 225	0.04	0.0013	GRAL
D (5EH-15MS) 30	0.0822	0.0023	GRAL
D (5EH-15MS) 150	0.348	0.0021	GRAL
D (5EH-15MS) 225	0.11	0.0030	GRAL
E (10CV-10EH) 30	0.44	0.00150	GRAL
E (10CV-10EH) 150	0.25	0.00510	GRAL
E (10CV-10EH) 225	0.15	0.0091	GRAL

Tabla 2 Resultados obtenidos del análisis estadístico para las 5 muestras a 30, 90 y 150 días

Los valores del I.L. para identificar el tipo de corrosión generada se presenta en la Tabla 3.

Índice de Localización	Tipo de Corrosión
0.001 – 0.01	Generalizada
0.01 – 0.1	Mixta
0.1 – 1	Localizada
> 1	Iniciación de Picado

Tabla 3. Valores de Índice de Localización [14]

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la prueba de resistencia a la compresión se obtuvieron mejores resultados con la sustitución de cemento con el 10% de ceniza volante y 5% de escoria de alto horno ya que obtuvo 291.30 kg/cm<sup>2</sup>, representando así un 16% más de resistencia para el que fue diseñado, mientras que

las mezclas con micro sílice reducen la resistencia mecánica.

En Resistencia a la Polarización lineal las mezclas con micro sílice presentaron velocidades de corrosión menores a las que tuvo el concreto con el 100% de cemento Pórtland.

En las series de tiempo las mezclas con micro sílice son las que presentan mejor comportamiento, ya su corrosión es generalizada, en cambio las demás mezclas tienden a tener transitorios que posiblemente se interpreten como corrosión localizada.

Del análisis estadístico de los datos obtenidos en ruido electroquímico, se obtiene que el fenómeno de corrosión presente sea del tipo generalizado para las mezclas con micro sílice.

La mezcla en las que se recomienda para usar en elementos estructurales es la que contiene un 10% de ceniza volante y 10% de escoria de alto horno ya que eleva su resistencia mecánica y reduce la velocidad de corrosión.

Las mezclas con el 15% de micro sílice presentan mejor comportamiento como protección para la corrosión, pero deficiente comportamiento mecánico, por lo cual se recomienda su uso para parcheos, y recubrimientos en la zona de “splash” en estructuras marinas.

## REFERENCIAS

1. Halit YazVcV\*, Serdar AydVn, Hqseyin Yig`iter, Bqlent Baradan “Effect of steam curing on class C high-volume fly ash concrete mixtures” Received 11 May 2004; accepted 19 August 2004 Cement and Concrete Research 35 (2005) 1122–1127
2. W. Chalee, M. Teekavanit, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn, C. Jaturapitakkul. “Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine environment” Construction and Building Materials 21 (2007) 965–971
- 3.- R. E. Núñez, E. Maldonado., C. Gaona T, J. Uruchurtu, J. Chacón Nava, F. Almeraya Calderón, C. Barrios D, A. Martínez Villafañe. “Ruido electroquímico en concretos con mezclas ternarias” Congreso Iberoamericano de metalurgia y Materiales 2006 Habana Cuba.
4. Ketil Videm “Electrochemical studies of steel in cement mortar containing chloride and micro-silica” Received 4 January 2005; accepted 8 October 2006 Available online 23 January 2007 Corrosion Science 49 (2007) 1702–1717
5. ASTM C150-02 Standard Specification for Poland Cement Test, vol. 4.01.
6. ASTM C618-99 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete
7. ASTM C 1240 Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures
8. Cottis, R., Turgoose, S. 1999. “Electrochemical Impedance and Noise”. Syrett Series Editor. Manchester
9. ASTM G5 Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.
10. ASTM Standard C39/C39M-04, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, vol. 4.02
11. ASTM C156-98 Standard Test Method for Water Retention by Concrete Curing Materials
12. ASTM C876-91 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
13. Kelly, Inman y Hudson. “Electrochemical Noise Measurement for Corrosion applications”, ASTM SP-1277. ASTM. 1996
14. Milan Kou\_ril \*, Pavel Nova`k, Martin Bojko “Limitations of the linear polarization method to determine stainless steel corrosion rate in concrete environment “ Available online 17 February 2006 Cement & Concrete Composites 28 (2006) 220–225