



---

---

# VALORACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN CEMENTOS HIBRIDOS ALCALINOS

Mariela Rendón Belmonte  
Miguel Martínez Madrid  
Abraham López Miguel  
José Trinidad Pérez Quiroz  
Jorge Terán Guillén

**Publicación Técnica No. 518**  
**Sanfandila, Qro. 2018**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Valoración del acero de refuerzo embebido en  
cementos híbridos alcalinos**

**Publicación Técnica No. 518**  
**Sanfandila, Qro, 2018**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Mariela Rendón Belmonte, Dr. Miguel Martínez Madrid, M.E. Abraham López Miguel, Dr. José Trinidad Pérez Quiroz y Dr. Jorge Terán Guillén.

Esta investigación, es el producto final del proyecto de investigación interna EI 05/17: Valoración del acero de refuerzo embebido en cementos híbridos alcalinos.



# Contenido

---

Índice de tablas		v
Índice de figuras		vii
Sinopsis		ix
Abstract		xi
Resumen	Ejecutivo	xiii
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	3
Capítulo 2.	Metodología experimental	7
Capítulo 3.	Resultados	13
Capítulo 4.	Conclusiones	25
Bibliografía		27



## Índice de tablas

---

Tabla 2.1	Descripción de los cementos evaluados	8
Tabla 3.1	Criterios de evaluación de potencial de corrosión	19
Tabla 3.2	Criterios de evaluación de densidad de corriente de corrosión	20
Tabla 3.3	Densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) de cada varilla evaluada.	22



## Índice de figuras

---

Figura 2.1	Desarrollo experimental	7
Figura 2.2	Probetas prismáticas aisladas	9
Figura 2.3	Medición de potencial de corrosión	10
Figura 2.4	Prueba de resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ )	11
Figura 3.1	Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero embebido en cemento CPO	13
Figura 3.2	Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero embebido en cemento 70/30	14
Figura 3.3	Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero embebido en cemento 80/20.	15
Figura 3.4	Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero embebido en cemento CPO	16
Figura 3.5	Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero embebido en cemento 70/30	17
Figura 3.6	Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero embebido en cemento 80/20	18



## Sinopsis

---

Esta investigación reporta el comportamiento electroquímico de varillas de acero al carbono embebidas en probetas de pastas de cementos híbridos alcalinos. Tales cementos, se obtuvieron a partir de ceniza volante tipo F (CV) y Cemento Portland Ordinario (CPO) hidratadas con solución alcalina (pH ~11.3). Las proporciones de las mezclas fueron: 70% de ceniza volante + 30% Cemento Portland Ordinario (cemento 70/30) y 80% de ceniza volante + 20% Cemento Portland Ordinario (cemento 80/20). De manera paralela se fabricaron muestras de 100% Cemento Portland Ordinario (cemento CPO) hidratadas con agua de grifo como cemento de referencia. Las mediciones se obtuvieron previo y durante los ciclos de secado a la intemperie y ciclos de inmersión en agua de mar natural. Las técnicas electroquímicas empleadas fueron: Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y Resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ ).

Previo a esta investigación, se determinó la viabilidad de la ceniza volante como material cementicio para obtener cementos híbridos y propiedades físicas y mecánicas en pastas, obteniendo resultados favorables y reportados en las Publicaciones Técnicas IMT 444 y 486 [1-2].

Los resultados indican que el acero de refuerzo embebido en el cemento 70/30 presentó nivel de corrosión menor respecto al Cemento CPO y cemento 80/20.



# Abstract

---

This work details the electrochemical behavior of two mixtures with 70% and 80% portland cement substitution percent hydrated with alkaline solution (pH ~ 11.3) and 100% mixtures of ordinary portland cement hydrated with water. Results of potential and corrosion rate of carbon steel rods obtained from electrochemical potential and polarization resistance techniques respectively are reported. Samples and tests were performed according to ASTM standards. After ~ 400 days of monitoring, the results show less corrosion deterioration in the 70% mixtures than ordinary portland cement.



# Resumen ejecutivo

---

En esta investigación se evaluó el comportamiento del acero de refuerzo en materiales cementicios base ceniza volante activada químicamente, dado que actualmente uno de los principales deterioros del acero de refuerzo en cementos convencionales, es la corrosión.

Con base en los resultados favorables obtenidos en investigaciones anteriores y problemática del fenómeno de la corrosión que sufre el acero de refuerzo en cementos convencionales (CPO), principalmente en ambientes con iones cloruro, en este trabajo se estudió el comportamiento frente a la corrosión del acero de refuerzo en pastas de cementos híbridos y como referencia cemento portland ordinario (CPO). Se determinó que el cemento con proporciones de 70% de ceniza volante activada químicamente con 30% de cemento portland ordinario (CPO) presentó mejores resultados para ambientes con iones cloruro.

Esta información, confirma que la generación de cementos con bajo contenido de cemento portland ordinario (CPO) es una tecnología competitiva y viable para disminuir el consumo del cemento portland ordinario y contribuir al cuidado del medio ambiente.

Este trabajo se compone, además de la introducción, de cuatro capítulos que serán brevemente descritos a continuación:

Capítulo 1: Presenta revisión bibliográfica de trabajos reportados del uso de la ceniza volante y sus beneficios en estructuras de concreto.

Capítulo 2: Describe brevemente la metodología seguida para llevar a cabo el monitoreo electroquímico de pastas con acero de refuerzo de dos cementos híbridos y un cemento convencional. También se explica los pasos para la fabricación de las muestras que se utilizaron, describiendo las dimensiones y ensayos electroquímicos que se realizaron.

Capítulo 3: Se presentan los resultados y la discusión de los mismos haciendo un comparativo de éstos en función del tipo de cemento evaluado.

Capítulo 4: Se presentan las conclusiones del estudio y recomendaciones de mejora para el empleo de cementos híbridos.



# Introducción

---

La ceniza volante como producto deshecho de la combustión en las termoeléctricas, está disponible abundantemente en todo el mundo y sin embargo, su uso a la fecha es limitado. A partir de la estimación de 1998, la producción de ceniza fue de más de 390 millones de toneladas anuales, pero su uso fue menos del 15%. En consecuencia, los esfuerzos por utilizar este subproducto en la fabricación de concreto son importantes para hacer que el concreto sea más ecológico [1].

La contribución del cemento Portland común (CPO) en la producción de las emisiones de gases de efecto invernadero se estima aproximadamente 1.35 billones de toneladas anuales o aproximadamente 7% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero. Por lo general, el concreto ordinario contiene aproximadamente 12% de cemento, 8% de agua de mezcla y 80% de agregado en masa. Esto significa que la industria del concreto utiliza 12,6 billones de toneladas de materias primas cada año, siendo el usuario más grande de recursos naturales en el mundo. Además, del procesamiento de minería y transporte, consume una cantidad considerable de energía afectando negativamente la ecología del planeta [2-4].

También se ha informado que muchas estructuras, especialmente aquellas construidas en ambientes corrosivos, comienzan a deteriorarse después de 20 a 30 años, a pesar de que han sido diseñados para más de 50 años de vida de servicio. La industria del concreto ha reconocido estos problemas. Por ejemplo, la industria del concreto de Estados Unidos ha desarrollado planes para abordar estos problemas en "Visión 2030: una visión para los Estados Unidos Industria del Concreto". En este documento se abordan estrategias para la elección del concreto como material de construcción para el desarrollo de la infraestructura y al mismo tiempo lograr un material amigable con el medio ambiente para el futuro [4].

Para producir concreto ecológico, Mehta sugirió el uso de menos recursos naturales, menos energía y minimizar las emisiones de dióxido de carbono. Categorizó estos esfuerzos a corto plazo como ecología industrial. El objetivo a largo plazo de reducir el impacto de los subproductos no deseados de la industria puede ser alcanzado bajando la tasa de consumo de material. En línea con la vista anterior, uno de los esfuerzos para producir concreto más amigable con el medio ambiente, es reemplazar parcialmente la cantidad de cemento portland ordinario (CPO) en concreto con subproducto materiales, tales como, cenizas volantes [5].

Una alternativa considerada actualmente es el desarrollo de cementos híbridos, opción que se basa en un sistema multicomponente. Considera la adición de un subproducto industrial con contenidos de adiciones minerales (materiales silico-aluminosos que presentan estructuras amorfas o vítreas) incorporados al Cemento Portland Ordinario. La presencia de una cierta cantidad de calcio reactivo (en forma de Cemento Portland) en la mezcla de partida permite que el material endurezca a temperatura ambiente sin necesidad de emplear una activación térmica inicial [6]. Estos materiales al ser mezclados con activadores alcalinos (líquidos o sólidos), fraguan y endurecen para dar lugar a un material con buenas propiedades conglomerantes. Si bien los cementos híbridos alcalinos son una nueva tecnología que se está estudiando ampliamente en el ámbito científico, en este proyecto se aborda el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en pastas de dichos cementos.

## **I.1 Objetivos**

1. Investigar el comportamiento y la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo embebido en pastas de cementos híbridos expuestas en ambientes con iones cloruro.

# 1 Antecedentes

---

A continuación, se mencionan investigaciones reportadas sobre nuevas tecnologías que buscan disminuir el uso de cemento Portland ordinario.

Thomas [7] analizó el impacto de la ceniza volante en las propiedades de concreto con vistas a optimizar el nivel utilizado de cenizas volantes; menciona que la cantidad óptima de cenizas volantes no solo varía con la aplicación, sino también con la composición y proporciones de todos los materiales en la mezcla de concreto, condiciones durante la colocación (especialmente temperatura), construcción (por ejemplo, acabado y curado) y las condiciones de exposición. Reporta que el contenido de ceniza volante de hasta 50% puede ser adecuado para la mayoría de los elementos.

Sagar et. al., menciona que el desarrollo de concreto con ceniza volante de alto volumen (HVFA) que usa aproximadamente el 40% de CPO posee excelentes propiedades mecánicas con mejores rendimientos de durabilidad. Los resultados muestran que concreto con HVFA es más durable que el concreto con 100% CPO [8].

Hardjito et. al., [9] consideran necesario utilizar la ceniza volante en la fabricación de concreto para hacer que el concreto sea más ecológico. Con base en esto, estudiaron un concreto geopolímero basado en ceniza volante, definiendo como geopolímero al aglutinante, en lugar de pasta de cemento, para producir concreto. Estudiaron la influencia de factores, tales como: concentración (en términos de molaridad) de las disoluciones de hidratación (activador), temperatura y tiempo de curado, la adición de aditivo reductor de agua de alto rango, período de descanso entre el vertido de especímenes y el comienzo de la curación en las propiedades del concreto.

Moffatt et. al., [10] reportan estudios de muestras con altos contenidos de ceniza volante (56-58%) y expuestas en ambiente marino severo por 19 a 24 años. Reportan que la profundidad de penetración de ión cloruro fue superior para las muestras de concreto sin cenizas volantes y los resultados de la prueba de permeabilidad al ión cloruro indicaron mayor resistencia a la penetración para el concreto con cenizas volantes.

M.M. Islam y M.S. Islam [11] estudiaron el reemplazo de cemento con ceniza volante y obtuvieron resultados de resistencia mecánica, permeabilidad al agua y la resistencia a la penetración rápida del ión cloruro. Evaluaron tres concretos cada uno con siete diferentes niveles de reemplazo de cenizas volantes, 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70% a diferentes edades. Los resultados de la prueba muestran que la permeabilidad del concreto disminuyó con el aumento del nivel de cenizas

volantes, mientras que la resistencia del concreto es mayor con el incremento de la ceniza. Mencionan que la cantidad óptima de reemplazo de cemento es del 30%.

Saraswathy et al., [12] investigaron diversas técnicas de activación de la ceniza volante, tales como físicas, térmicas y químicas. Reportan que con estos métodos de activación, la hidratación del cemento mezclado con ceniza volante se aceleró y, por lo tanto, mejoró la resistencia a la corrosión y resistencia mecánica del concreto. Los porcentajes de reemplazo del cemento portland ordinario (CPO) por ceniza volante (CV) activada fueron del: 10%, 20%, 30% y 40%. Los ensayos reportados son: resistencia a la corrosión, Resistividad eléctrica y velocidad del pulso ultrasónico. Todos los estudios confirmaron que hasta un nivel crítico de 20-30% de reemplazo del cemento portland por ceniza volante activada mejoró tanto la resistencia a la corrosión como la resistencia del concreto respecto al concreto de 100% CPO. Aunado a esto, reportan que la activación química de la ceniza volante mostró mejores resultados que los otros métodos de activación.

Ismail et. al.,[13] anunciaron que la inclusión de ceniza volante en morteros y concretos alcalinos de escoria activada, modifica la permeabilidad del material y, por lo tanto, también la difusión de agentes agresivos como cloruros. A pesar de observar una mayor porosidad en los materiales alcalinos activados respecto a las muestras de cemento Portland ordinario, los resultados de la prueba de permeabilidad de cloruros muestran que se retarda la penetración del ión cloruro. La sorción de cloruro aumenta con inclusión de cenizas volantes en un aglutinante de escoria activada por álcalis.

Fernández et. al., [14] reportan resultados de pruebas de laboratorio de muestras de mortero y concreto fabricados con ceniza volante activada libre de cemento portland. Los resultados reportados indican alta resistencia mecánica en cortos períodos de tiempo, módulo de elasticidad moderado, mejor enlace con el acero de refuerzo y contracción mucho menor que en el concreto con cemento Portland ordinario (CPO).

Fernández et. al., [15] realizaron un estudio que aborda la durabilidad de las cenizas volantes activadas por álcalis (AAFA) en diferentes condiciones: agua desionizada, agua de mar sintética, sulfato de sodio y soluciones ácidas. Los principales parámetros estudiados fueron: pérdida de peso, resistencia a la compresión, variaciones en el volumen, presencia de los productos de la degradación y cambios microestructurales. Reportan que morteros y pastas de cenizas volantes activadas por álcalis se desempeñan satisfactoriamente en ambientes agresivos y que la degradación en estos materiales, es claramente diferente de los procesos en las pastas y morteros de cemento Portland ordinario.

Ghanmi et. al., [16] realizaron estudios de durabilidad de concretos fabricados a través de activación alcalina de mezclas de ceniza volante y escoria de alto horno utilizando solución de activación de baja concentración (mezclando silicato de sodio comercial e hidróxido de sodio). Efectuaron ensayos de resistencia

mecánica, carbonatación y resistencia a la permeabilidad del ión cloruro. Los resultados indican que la profundidad de carbonatación incrementó a mayor contenido de cenizas volantes en la mezcla. Mencionan también que los protocolos de prueba utilizados para evaluar la durabilidad de cemento Portland no son adecuados para la evaluación de estas mezclas.

Miranda et. al., [17] reportan que morteros de cenizas volantes activadas pasivan al acero de refuerzo de manera similar a los morteros de cemento Portland.

Saraswathy et. al., [18] dan a conocer que el acero embebido en el cemento Portland ordinario (CPO) y en los cementos con ceniza volante sin procesar sufrieron corrosión severa en condiciones de corrosión de macroceldas, sin embargo, las cenizas volantes tratadas con CPO mejoraron las propiedades de resistencia a la corrosión en mayor proporción. Las cenizas volantes tratadas químicamente mostraron un rendimiento superior en comparación con los sistemas tratados térmicamente y físicamente tratados. El límite reportado del nivel de reemplazo para varias cenizas volantes tratadas bajo condiciones agresivas de corrosión de macroceldas fue en un 20%-30%. Con un nivel de reemplazo inferior al 30%, el sistema de cenizas volantes químicamente activadas (CFA) mostró menor velocidad de corrosión y mayor durabilidad.

Palomo A. et. al., [19] señalan que el desarrollo de cementos híbridos alcalinos permite una importante reducción en el factor clinker, con el beneficio tanto económico como medioambiental.

Rivera et. al., [20] reportan estudio de cementos obtenidos a partir de ceniza de fondo de incinerador y cenizas volantes, además de cementos híbridos obtenidos de la mezcla de ceniza de fondo de incinerador y cenizas volantes con cemento Portland en varios porcentajes. En algunos casos se aplicó curado térmico. Mencionan que la adición de CPO contribuye al aumento de la resistencia a la compresión y evita el curado térmico.



## 2 Metodología experimental

El desarrollo experimental seguido en esta investigación, consistió en fabricar y monitorear pastas de cementos híbridos de proporciones 70/30 y 80/20 de ceniza volante/Cemento Portland Ordinario, hidratados con solución alcalina (pH~11). Como referencia se fabricaron pastas de Cemento Portland Ordinario 100% hidratados con agua de grifo. El estudio radicó en obtener el comportamiento electroquímico de acero de refuerzo a través del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) embebido en tales pastas a diferentes edades y expuestas en ambiente con cloruros. La Figura 2.1 describe el desarrollo experimental.

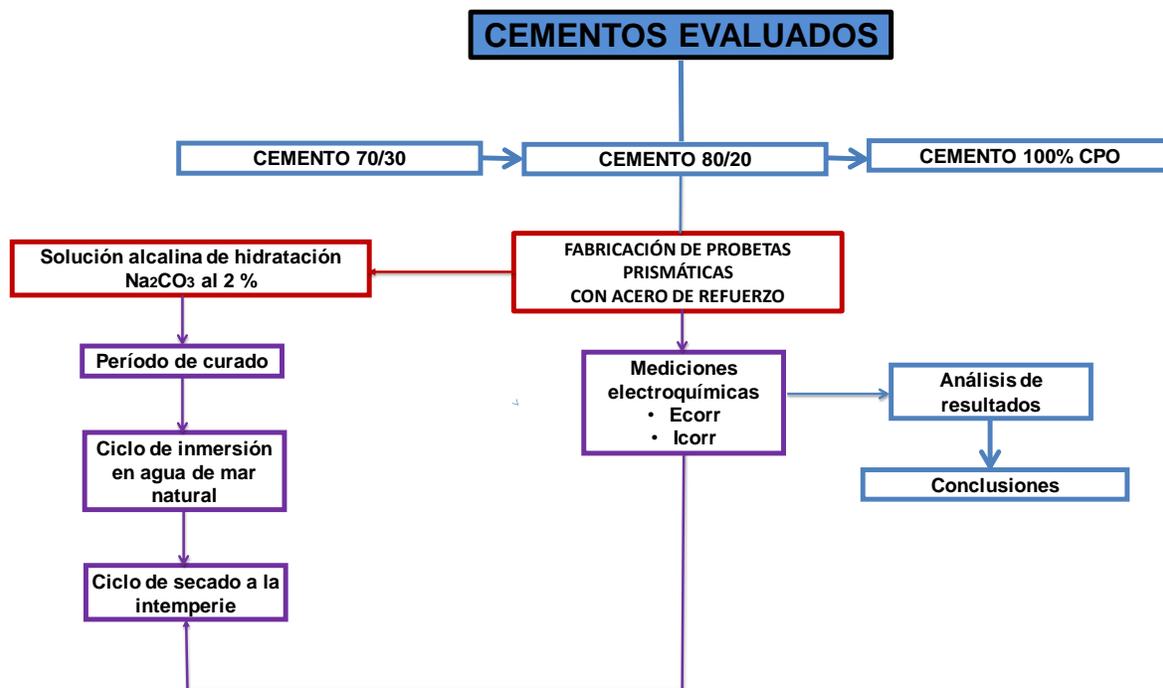


Figura 2.1 Desarrollo experimental

## 2.1 Cementos evaluados

Se evaluaron tres cementos: cemento CPO, cemento 70/30 y cemento 80/20. La Tabla 2.1 describe las características de los cementos evaluados.

**Tabla 2.1. Descripción de las pastas obtenidas a partir de los cementos evaluados.**

<b>NOMBRE</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>SOLUCIÓN DE HIDRATACIÓN</b>	<b>RELACIÓN A/C</b>	<b>CURADO</b>
<b>CEMENTO CPO</b>	100% CPO	Agua de grifo	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
<b>CEMENTO 70/30</b>	CV 70% + CPO 30%	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> al 2% pH=11.3	0,3	20 h a 22 °C 98% HR
<b>CEMENTO 80/20</b>	CV 80% + CPO 20%	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> al 2% pH=11.3	0,3	20 h a 22 °C 98% HR

## 2.2 Fabricación de probetas prismáticas

Para la fabricación de las probetas prismáticas de cemento/CV 70/30 y 80/20 se utilizó solución de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> al 2% en peso para su hidratación, mientras para el cemento CPO se empleó agua de grifo. Cabe mencionar que la selección de la solución de hidratación se realizó considerando los resultados reportados en la publicación técnica 486 [2]. La relación agua/cemento en los tres casos fue 0.3. El procedimiento de obtención de las pastas de cada cemento se hizo de acuerdo con la Norma ASTM C 305 [21] y se describe a continuación:

Se agregó el agua o disolución de hidratación en el recipiente (mezcladora) y después se agregó el cemento.

Se mezcló por 60 segundos, transcurrido este tiempo se detuvo la mezcladora y se limpió la mezcla adherida a las paredes y se llevó hacia el fondo del recipiente.

Se mezcló nuevamente durante 60 segundos.

Después de esto, se procedió al llenado de los moldes. Cabe mencionar que previo al vaciado de las mezclas, se aplicó una capa delgada de un engrasante con un paño en las caras interiores de los moldes de acrílico (en este caso) para facilitar su desmolde.

El vaciado de la mezcla en los moldes se realizó dentro de un tiempo total no mayor de 2 minutos y 30 segundos después de obtener la mezcla. Durante el llenado de los moldes se apisonó ligeramente la mezcla para homogenizar. Finalmente se embebieron dos varillas de acero al carbono de 10.5 x 0.3175 cm (electrodo de trabajo) y una barra de grafito de 10 x 0.3175 cm (electrodo de referencia). Durante 20 horas todas las muestras se mantuvieron cubiertas con plástico y posterior a este tiempo, se desmoldaron y fueron cubiertas totalmente con plástico en condición húmeda por 28 días (período de curado).

Después de 28 días (tiempo curado) [22], todos los prismas se aislaron del medio ambiente (ver Figura 2.2) hasta alcanzar el estado de pasivación del acero determinado con la medición de potenciales de corrosión y considerando la Norma ASTM C876 [23]. Una vez alcanzada la pasivación del acero, las probetas fueron sometidas a ciclos de inmersión en agua de mar natural y secado a la intemperie.



**Figura 2.2 Probetas prismáticas aisladas [24].**

## 2.3 Mediciones electroquímicas

Previo y durante los períodos de inmersión en agua de mar y secado a la intemperie, se realizaron pruebas electroquímicas del acero de refuerzo (varillas) para analizar el comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en los cementos. El monitoreo electroquímico consistió en medición de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y Resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ ) considerando las normas ASTM C876, G59 y Manual de la Red DURAR [23, 25, 26].

Cada prisma contuvo dos varillas de acero al carbono (electrodo de trabajo) una barra de grafito (electrodo de referencia) y una malla de acero inoxidable 316, colocada en el perímetro del prisma en cada medición realizada utilizada como contra electrodo.

### 2.3.1 Medición de potencial

La medición de potencial se realizó siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 876 [23] y se representa en la Figura 2.3. El método consistió en medir el potencial de las varillas embebidas en las pastas de cementos, utilizando como electrodo de referencia un electrodo de Cobre/Sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ). De cada varilla se obtuvieron dos puntos de medición de potencial por repetitividad. Para cada medición se colocó una esponja húmeda entre el punto de medición y electrodo de referencia.



Figura 2.3. Medición de potencial de corrosión

### 2.3.2 Resistencia a la polarización ( $R_{pl}$ )

La prueba de Resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ ) se realizó de manera periódica obteniendo valores de la densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ). Esta prueba se realizó a una velocidad de barrido de  $0.16 \text{ mV/s}$  con intervalo de barrido  $\pm 30 \text{ mV}$  conforme a la Norma G59 [25] y se utilizó un potencióstato marca Gamry modelo interface 1000. Los valores de densidad de corriente de corrosión, se obtuvieron a partir de la fórmula Stern Geary. La colocación de los electrodos para realizar la prueba de resistencia a la polarización se muestra en la Figura 2.4.

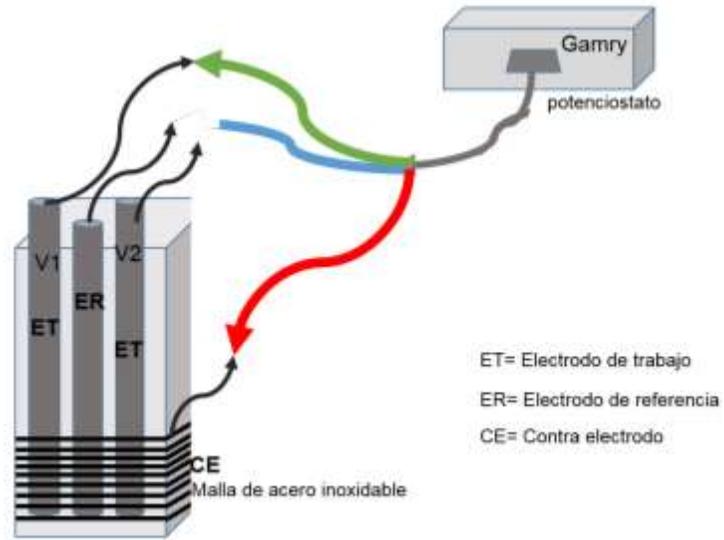


Figura 2.4. Prueba de resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ )



### 3 Resultados

#### 3.1 Resultados de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ).

##### 3.1.1 Cemento CPO

La Figura 3.1 presenta los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) del cemento CPO obtenidos durante el período de curado, período de inmersión en agua de mar natural (fondo en color azul e identificado como inmersión) y período de secado a la intemperie (fondo en color gris e identificado como secado). Cabe mencionar, que durante el período de secado previo a cada medición de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) fue necesario humedecer el prisma conforme a la recomendación de la norma ASTM C876 [23].

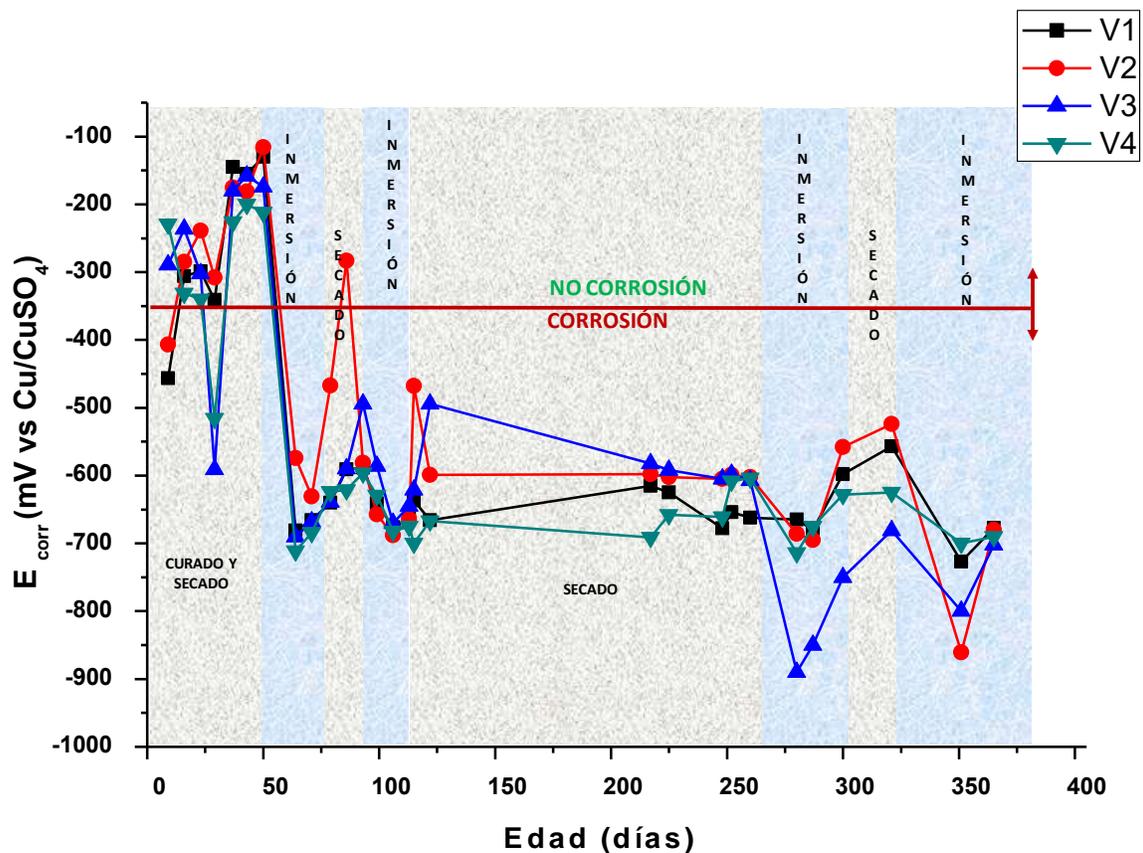


Figura 3.1. Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero embebido en cemento CPO.

### 3.1.2 Cemento 70/30

La Figura 3.2 presenta los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) del cemento 70/30 obtenidos durante el período de curado, período de inmersión en agua de mar natural (fondo en color azul e identificado como inmersión) y período de secado a la intemperie (fondo en color gris e identificado como secado).

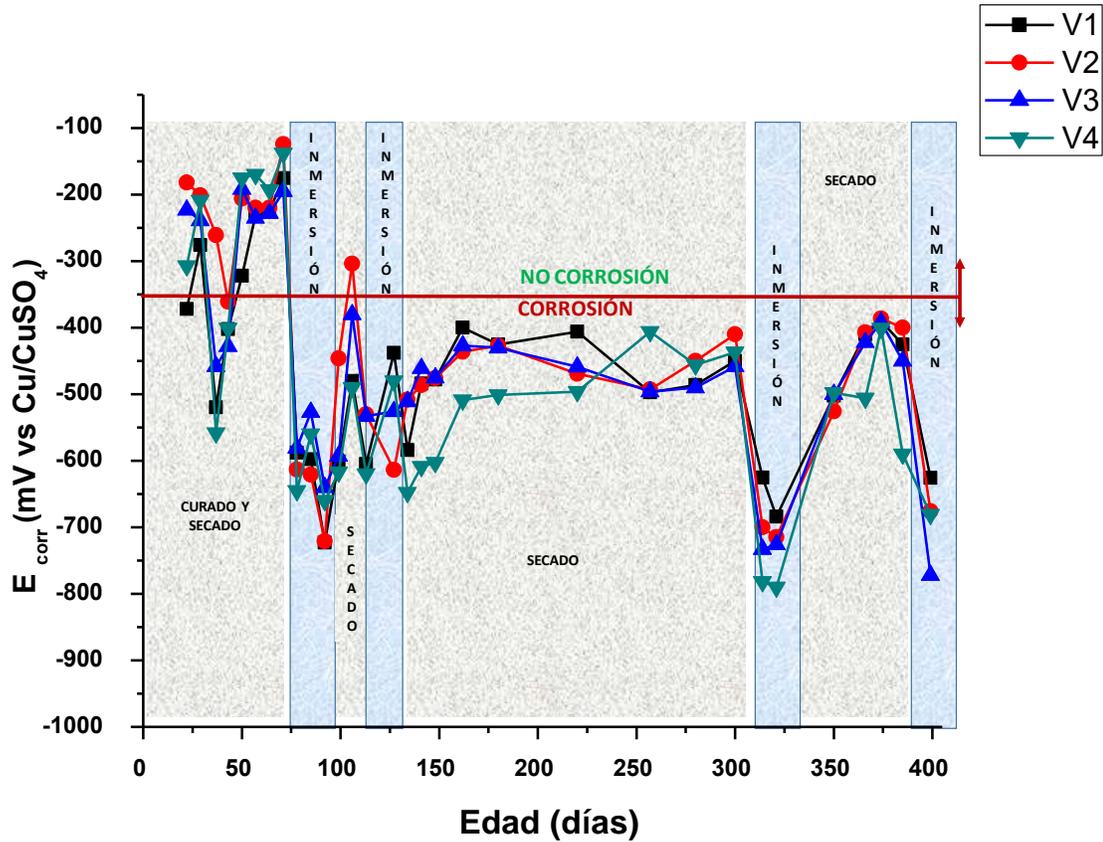


Figura 3.2.- Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero embebido en cemento 70/30.

### 3.1.3 Cemento 80/20

La Figura 3.3 presenta los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) del cemento 80/20 obtenidos durante el período de curado, período de inmersión en agua de mar natural (fondo en color azul e identificado como inmersión) y período de secado a la intemperie (fondo en color gris e identificado como secado).

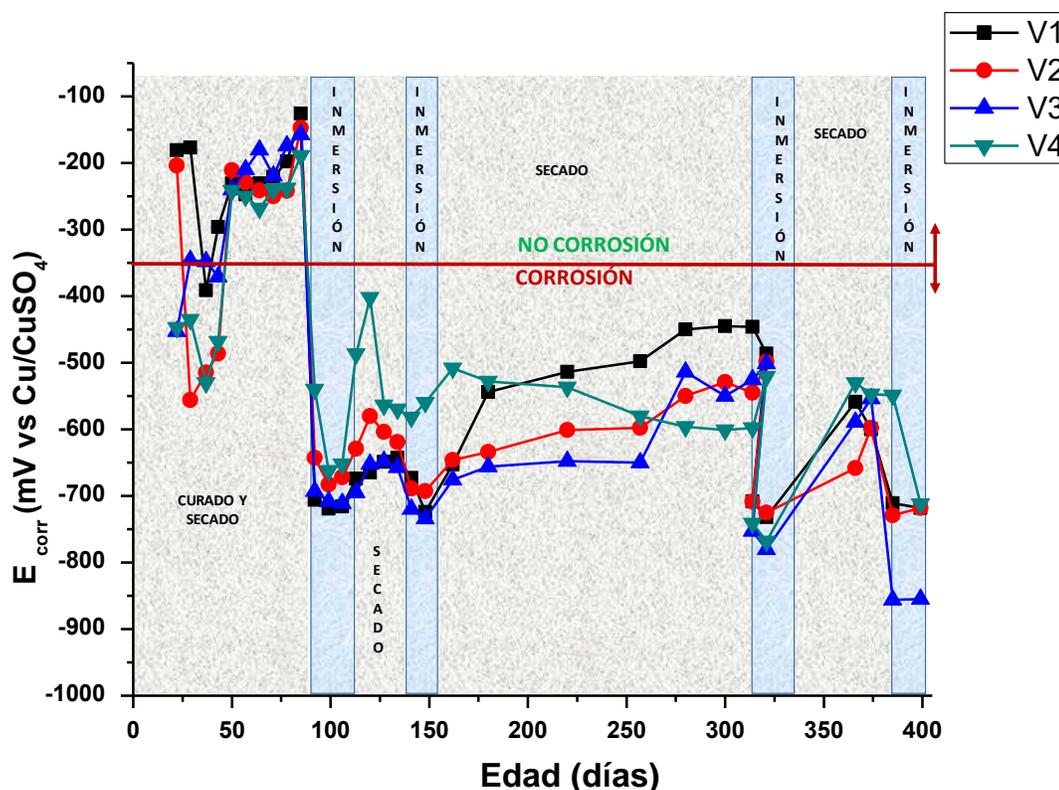


Figura 3.3.- Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) del acero embebido en cemento 80/20.

## 3.2 Resultados de densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ).

### 3.2.1 Cemento CPO

La Figura 3.4, presenta los valores de densidad de corriente de corrosión obtenidos con el cemento CPO durante el período de curado, en período de inmersión en agua de mar natural y en período de secado a la intemperie.

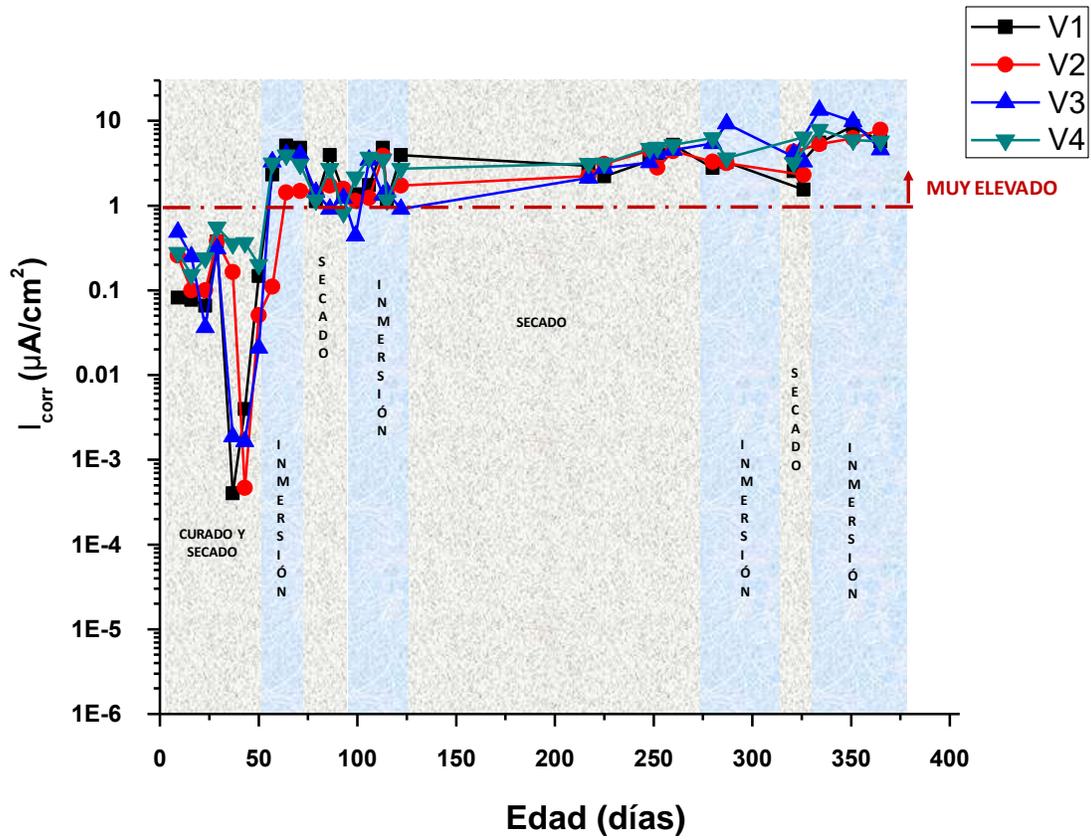


Figura 3.4. Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero embebido en cemento CPO

### 3.2.2 Cemento 70/30

La Figura 3.5, presenta los valores de densidad de corriente de corrosión obtenidos en el cemento 70/30 durante el período de curado, en período de inmersión en agua de mar natural y en período de secado a la intemperie.

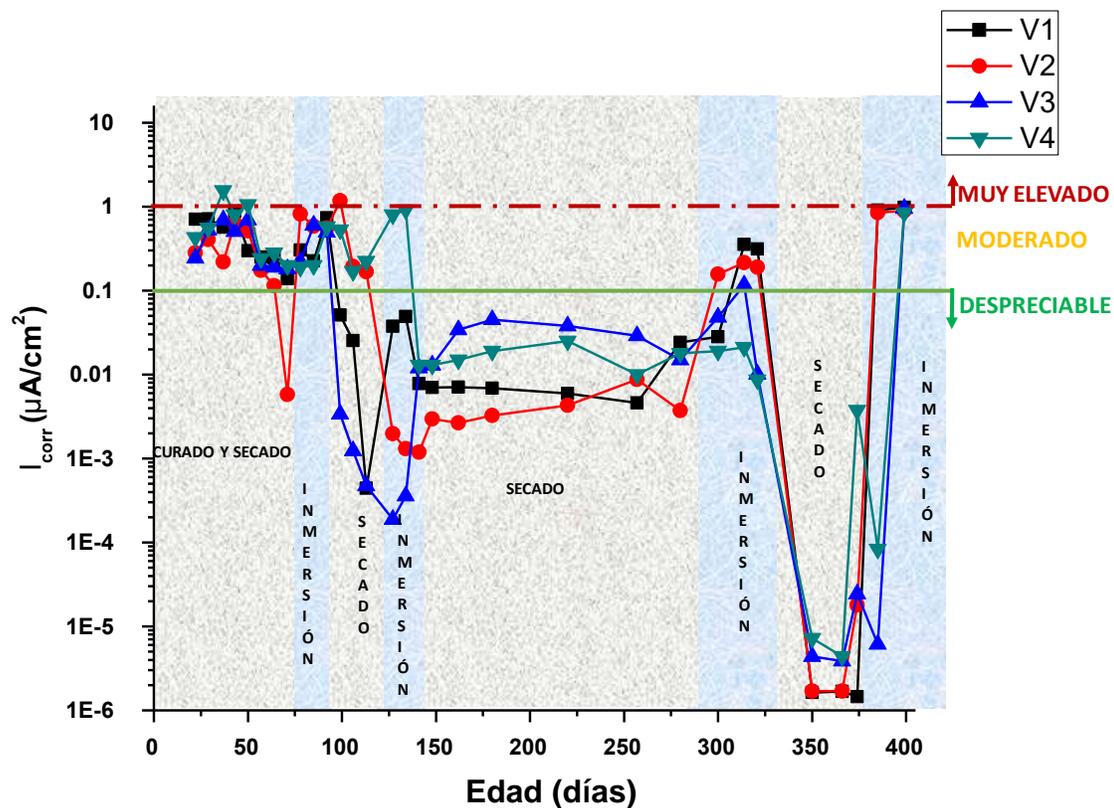


Figura 3.5. Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero embebido en cemento 70/30

### 3.2.3 Cemento 80/20

La Figura 3.6, presenta los valores de densidad de corriente de corrosión obtenidos en el cemento 80/20 durante el período de curado, en período de inmersión en agua de mar natural y en período de secado a la intemperie.

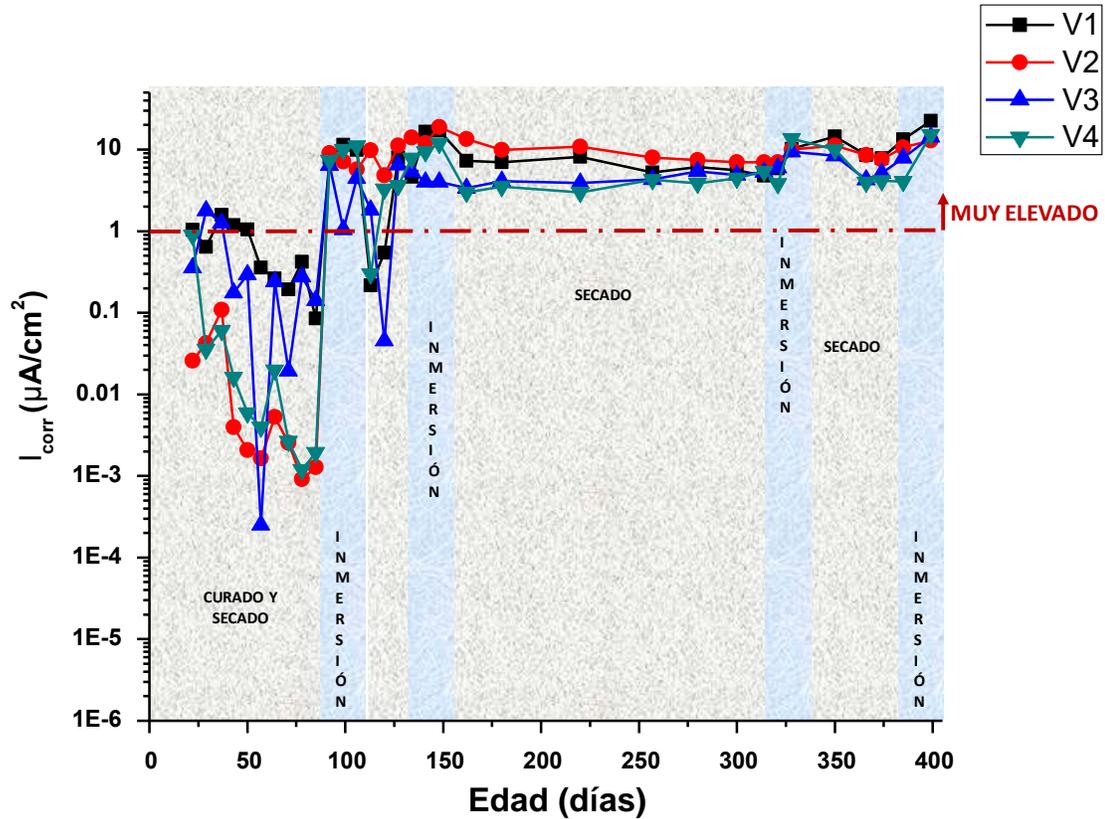


Figura 3.6. Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) del acero embebido en cemento 80/20

### 3.3 Discusión de resultados

#### 3.3.1 Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ).

Los resultados fueron interpretados, según el criterio establecido en la norma ASTM C876 [23] y descritos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Criterios de evaluación de potencial de corrosión [23]

Criterios para la interpretación de potenciales	
Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) Cu/CuSO <sub>4</sub>	Probabilidad de corrosión
Más negativo que -0.350 V	90% que exista corrosión
Más positiva que -0.200 V	90% que no exista corrosión
Valores de -0.200 a -0.350 V	incierto

### 3.3.1.1 Cemento CPO

De acuerdo con la Figura 3.1, durante los primeros 49 días de monitoreo los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) del cemento CPO mostraron valores de potencial de pasivación del acero, más positivos que -300 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>. Una vez alcanzado este estado se dio inicio a los ciclos de inmersión y secado. Al día 50, las muestras se colocaron en agua de mar (primer ciclo de inmersión), siendo evidente el cambio de valores pasivos a activos conforme a los criterios de la Norma ASTM C 876, Tabla 3.1. Durante los ciclos de secado se observaron potenciales de corrosión más positivos respecto a los medidos en los ciclos de inmersión; resultado atribuido a la falta de humedad en la pasta de cemento, sin embargo, todos los potenciales obtenidos a partir del día 50 se mantuvieron en valores de corrosión del acero (más negativos que -500 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>).

### 3.3.1.2 Cemento 70/30

En la Figura 3.2, se aprecia que los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) del cemento 70/30 durante los primeros 75 días de monitoreo alcanzaron valores más positivos que -300 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>, de acuerdo con la norma ASTM C876 y Tabla 3.1 indica pasivación del acero. Una vez alcanzada esta condición las muestras se colocaron en agua de mar (primer ciclo de inmersión), siendo notable el cambio de valores pasivos a activos. Durante el monitoreo y los ciclos de secado se observó que los potenciales de corrosión fueron más positivos respecto a los medidos en los ciclos de inmersión; resultado atribuido a la falta de humedad en la pasta de cemento, sin embargo, todos los potenciales indicaron corrosión del acero (más negativos que -400 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>).

### 3.3.1.3 Cemento 80/20

En la Figura 3.3, se aprecia que los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) del cemento 80/20 durante los primeros 87 días de monitoreo alcanzaron valores más positivos que -300 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>, de acuerdo con los criterios de la norma ASTM C 876 mostrados en la Tabla 3.1 se aprecia la pasivación del acero. Una vez alcanzada esta condición, las muestras se colocaron en agua de mar (primer ciclo de inmersión), siendo notable el cambio de valores pasivos a activos. Durante el monitoreo en los ciclos de secado los potenciales de corrosión resultaron más positivos respecto a los medidos en los ciclos de inmersión; resultado atribuido a la falta de humedad en la pasta de cemento, sin embargo, en todos los ciclos de inmersión y secado los potenciales de corrosión indicaron corrosión del acero (más negativos que -450 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>).

### 3.3.2 Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ).

Para la interpretación de resultados de  $i_{corr}$  se consideraron los criterios establecidos en el Manual Durar [26] y descritos en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Criterios de evaluación de densidad de corriente de corrosión [26]**

$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 - 0.5	Moderado
0.5 – 1	Elevado
> 1	Muy elevado

#### 3.3.2.1 Cemento CPO

Conforme a la Figura 3.4, los valores de densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) previo al primer período de inmersión en agua de mar natural los valores oscilaron en el orden de  $1 \times 10^{-3} \mu A/cm^2$ , valor que de acuerdo con los criterios del Manual Durar y mostrados en la Tabla 3.2 presentaban nivel despreciable de corrosión. Posterior al primer ciclo de inmersión en agua de mar (día 50), la densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) se mantuvo en valores  $>1 \mu A/cm^2$ ; nivel de corrosión muy elevado.

### 3.3.2.2 Cemento 70/30

De acuerdo con la Figura 3.5, los valores de densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) previo al primer período de inmersión (día 75) los valores oscilaron en el orden de  $1 \times 10^{-1} \mu A/cm^2$ , valor que de acuerdo con criterios del Manual Durar y mostrados en la Tabla 3.2 presentaban nivel despreciable de corrosión. Posterior al primer ciclo de inmersión en agua de mar la densidad de corriente de corrosión incrementó a valores  $>1 \mu A/cm^2$ , durante el ciclo de secado (97 días) los valores volvieron al orden de  $1 \times 10^{-1} \mu A/cm^3$ . Aun cuando los valores de densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) incrementaron por el contacto con el agua de mar en los ciclos de inmersión respecto a los medidos en los ciclos de secado, se mantuvieron en un nivel de corrosión moderado y despreciable.

### 3.3.2.3 Cemento 80/20

Según la Figura 3.6, los valores de densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) previo al primer período de inmersión los valores oscilaron en el orden de  $1 \times 10^{-2} \mu A/cm^2$ . Posterior al primer ciclo de inmersión en agua de mar la densidad de corriente de corrosión incrementó a valores  $>1 \mu A/cm^2$ , durante el ciclo de secado (97 días) disminuyó alcanzando valores del orden de  $1 \times 10^{-1} \mu A/cm^3$ . Tanto en los ciclos de inmersión como secado, el orden de la densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) fue  $>1 \mu A/cm^2$  alcanzando valores de  $11 \mu A/cm^2$ . Para este caso, desde la primera inmersión en agua de mar el comportamiento indicó nivel de corrosión muy elevado conforme a los valores mostrados en la Tabla 3.2.

## 3.3.3 Incremento de densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) de cada varilla

Dado que las varillas de acero de refuerzo embebidas en los tres cementos evaluados, previo a la primera inmersión en agua de mar natural presentaron valores de densidad de corrosión ( $I_{corr}$ ) variables entre ellas, variabilidad asociada a la corrosión natural de las mismas; en la Tabla 3.3 se presentan valores de densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) previo al inicio de los ciclos de inmersión y secado y después de 399 días de monitoreo para estimar el porcentaje de incremento de la  $I_{corr}$  de cada varilla.

**Tabla 3.3. Densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) de cada varilla evaluada.**

<b>CEMENTO</b>	<b>VARILLA</b>	<b><math>i_{COR}</math> INICIAL (<math>\mu A/cm^2</math>)</b>	<b><math>i_{COR}</math> DESPUÉS DE 399 DÍAS (<math>\mu A/cm^2</math>)</b>	<b>NIVEL DE CORROSIÓN VS CRITERIOS DE MANUAL DURAR DE <math>i_{corr}</math> después de 399 días</b>	<b>% INCREMENTO DE <math>i_{corr}</math> inicial y después de 399 días</b>	<b><math>V_{corr}</math> estimada con <math>i_{cor}</math> después de 399 días mm/año</b>
<b>CEMENTO 70/30</b>	<b>V1</b>	0.37	0.98	despreciable	62	0.011
	<b>V2</b>	0.28	0.89	despreciable	68	0.010
	<b>V3</b>	0.24	0.95	despreciable	52	0.011
	<b>V4</b>	0.25	0.98	despreciable	74	0.011
<b>CEMENTO 80/20</b>	<b>V1</b>	1.032	22.5	muy elevado	95	0.261
	<b>V2</b>	0.025	12.9	muy elevado	99	0.149
	<b>V3</b>	0.35	14.3	muy elevado	97	0.165
	<b>V4</b>	0.88	15.2	muy elevado	94	0.176
<b>CEMENTO CPO</b>	<b>V1</b>	0.08	5.7	muy elevado	98	0.066
	<b>V2</b>	0.25	7.8	muy elevado	97	0.090
	<b>V3</b>	0.48	7.5	muy elevado	93	0.087
	<b>V4</b>	0.27	5.8	muy elevado	95	0.067

A partir de la Tabla 3.3, se observa que el porcentaje de incremento del valor de densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) menor se obtuvo en el cemento 70/30 (promedio del 64%), mientras las pastas 80/20 y CPO resultó en promedio del 96 %.

Por otro lado, la velocidad de corrosión ( $V_{cor}$ ) promedio calculada a partir de la  $i_{corr}$  de las 4 varillas después de 399 días mostradas en la Tabla 3.3 la pérdida de acero sería de 0.01075, 0.0775 y 0.18775 mm/año del cemento 70-30, CPO y 80-20 respectivamente, aunque es necesario mencionar que esta estimación asume que el deterioro del acero sea constante respecto al paso del tiempo. Aunque lo ideal, es realizar monitoreo de la velocidad de corrosión a tiempos más extensos. Considerando el diámetro de la varilla original, 0.3175 cm y *velocidad de corrosión calculada después de 399 días*, se estima que el tiempo de vida del acero embebido en el cemento bajo las mismas condiciones para el cemento 70-30 sería

~29 años, mientras para el cemento CPO ~4 años y cemento 80-20 ~1.6 años. Indiscutiblemente, el cemento más prometedor para la conservación del acero para esta condición resultó el cemento 70-30.



## **4 Conclusiones**

---

Las mediciones electroquímicas obtenidas después de 400 días de monitoreo, mostraron que el acero de refuerzo que mantuvo un nivel moderado y despreciable de deterioro por corrosión correspondió al acero embebido en la pasta 70-30, mientras el acero de refuerzo embebido en los cementos CPO y 80-20 mantuvieron un nivel de corrosión muy elevado de acuerdo con los criterios descritos en la Tabla 3.2.

Considerando la velocidad de corrosión presentada en la Tabla 3.3, el cemento 70-30 ofrece mayor período de vida al acero de refuerzo.

Esta investigación aporta información que indica que la ceniza volante activada químicamente es un material con capacidad de disminuir el consumo del Cemento Portland Ordinario (CPO) en el sector de la construcción. Sin embargo, es necesario optimizar el activador alcalino y los porcentajes de sustitución de ceniza volante activada en mezclas con cemento portland ordinario (CPO).

### **4.1 Recomendaciones**

Se recomienda diseñar cementos híbridos a partir de ceniza volante activada química y mecánicamente. Además de evaluar las propiedades físicas, mecánicas y electroquímicas en muestras de concreto. Así mismo se sugiere en el caso de la activación química, integrar el activador en la mezcla previo a la hidratación, que en campo permita una hidratación con agua común, como un cemento convencional.



## Bibliografía

---

[1] Djwanto Hardjito, Steenie E. Wallah, Dody M. J. Sumajouw, and B.Vijaya Rangan. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. ACI MAterials Journal, Technical paper, 10-M52. Marzo-Abril (2004).

[2] Rendón Belmonte, M., Fernández Jiménez, A., Palomo Sánchez, A., Martínez Madrid, M., Torres Acosta, a. a., & Pérez Quiroz, J.T. (2015). Desarrollo de nuevos cementos: cementos alcalinos y cementos híbridos. Publicación técnica, 444, Sanfandila, Qro (2015).

[3] Mariela Rendón Belmonte, Miguel Martínez Madrid, Abraham López Miguel Jorge Terán Guillén, José Trinidad Pérez Quiroz, Andrés Torres Acosta. Caracterización física de pastas de cementos híbridos a partir de ceniza volante tipo F y su efecto en las propiedades electroquímicas del acero. Publicación técnica 486 Sanfandila, Qro. (2016).

[4] Djwanto Hardjito, Steenie E. Wallah, Dody M. J. Sumajouw, and B.Vijaya Rangan. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. ACI MAterials Journal, Technical paper, 10-M52. Marzo-Abril (2004).

[5] Kumar Mehta. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. Concrete international, Julio (2002), pp. 23-28.

[6] Palomo, A; Fernández-Jiménez, A; García-Lodeiro, I; Cementos híbridos de bajo impacto ambiental: Reducción del factor clinker. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 1-17, (2015).

[7] Michael Thomas, Ph.D., P.Eng., Professor of Civil Engineering, University of New Brunswick. Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete.

[8] Pruthvi Sagar, Dinesh HT, Bhavana.B. Characterization & Durability Properties of Ultrafine Fly Ash based Geopolymer Concrete. Journal for Research| Volume 02, Issue 05, July 2016. Malhotra, V. M., High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete, Concrete International, V. 24, No. 7, Julio (2002), pp. 1-5.

[9] Djwanto Hardjito, Steenie E. Wallah, Dody M. J. Sumajouw, and B.Vijaya Rangan. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. ACI MAterials Journal, Technical paper, 10-M52. Marzo-Abril (2004).

- [10] Edward G. Moffatt, Michael D.A. Thomas, Andrew Fahim. Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment. *Cement and Concrete Research* 102, 127–135, (2017).
- [11] M. M Islam & M. S. Islam. Strength and Durability Characteristics of Concrete made with Fly-Ash Blended Cement. *Journal Australian Journal of Structural Engineering*.V. 14, Issue 3, (2013).
- [12] V. Saraswathy, S. Muralidharan, K. Thangavel, S. Srinivasan. Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete. *Cement & Concrete Composites* 25, 673–680, (2003).
- [13] Idawati Ismail, Susan A. Bernal, John L. Provis, Rackel San Nicolas, David G. Brice, Adam R. Kilcullen, Sinin Hamdan, Jannie S.J. van Deventer. Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials* 48,1187–1201, (2013).
- [14] Ana Fernández Jiménez, Angel Palomo, Cecilio López Hombrados. Engineering properties of alkali activated fly as concrete. *ACI MAterials Journal*, Technical paper, 103-M12. Marzo-Abril (2006).
- [15] A. Fernández Jiménez, I. García Lodeiro, A. Palomo. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *J Mater Sci*, 42:3055–3065, (2007).
- [16] Arbi Ghanmi, Kamel; Nedeljkovic, Marija; Zuo, Yibing; Ye, Guang. Durability of alkali-activated fly ash and slag concrete. *The 9th international concrete conference* (2016).
- [17] J.M. Miranda, A. Fernández-Jiménez, J.A. González, A. Palomo []. Corrosion resistance in activated fly ash mortars. *Cement and Concrete Research* 35,1210–1217, (2005).
- [18] V. Saraswathy, S. Muralidharan, K. Thangavel y S. Srinivasan. Activated fly ash cements: tolerable limit of replacement for durable steel reinforced concrete. *Advances in Cement Research*. V. 14 Issue 1, pp. 9-16, (2002).
- [19] Palomo A., Fernández-Jiménez A., García-Lodeiro I., Cementos híbridos de bajo impacto ambiental: Reducción del factor clinker. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 1-17, (2015).
- [20] Jhonathan F. Rivera, Ruby Mejia de Gutierrez, Johanna M. Mejia, Marisol Gordillo. Hybrid cement based on the alkali activation of by products of coal. *Revista de la Construcción*, 13(2), 31-39, (2014).
- [21] ASTM C305 (2014). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency

[22] ASTM C 192 (2002) Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

[23] ASTM C876 (2009) Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete

[24] María Isabel Escamilla Moya. Tesis de licenciatura. Evaluación del comportamiento electroquímico del acero de refuerzo embebido en cementos híbridos alcalinos. Instituto Tecnológico Superior de Irapuato extensión San José Iturbide, Diciembre (2016).

[25] ASTM G59 (2014) Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements

[26] Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), subprograma XV "corrosión/impacto ambiental sobre materiales". Red temática "Durabilidad de la armadura". Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. DURAR (2007). 1a Edición



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad certificada bajo la norma ISO 9001:2015