



INVESTIGACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO LOCALIZADOS EN LA REPARACIÓN DE LOSAS DE CONCRETO

Mariela Rendón Belmonte
Miguel Martínez Madrid
Didier Perea Rodríguez
José Trinidad Pérez Quiroz

**Publicación Técnica No. 564
Sanfandila, Qro, 2019**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Investigación del desempeño de ánodos de sacrificio
localizados en la reparación de losas de concreto**

Publicación Técnica No. 564
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, Ing. Didier Perea Rodríguez y Dr. José Trinidad Pérez Quiroz.

Los resultados presentados en esta publicación corresponden al proyecto EE 11/18: Investigación del desempeño de ánodos de sacrificio localizados en la rehabilitación de estructuras de concreto, patrocinado por la empresa Eucomex S.A de C.V.

Contenido

Índice de tablas		v
Índice de figuras		vii
Sinopsis		xi
Abstract		xiii
Resumen	Ejecutivo	xv
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	3
Capítulo 2.	Metodología experimental	9
Capítulo 3.	Resultados y discusión	23
Capítulo 4.	Conclusiones	47
Bibliografía		49

Índice de tablas

Tabla 1.1	Distribución de los ánodos en las losas	18
Tabla 3.1	Criterios de evaluación de potencial de corrosión	24
Tabla 3.2	Potenciales de depolarización de losa 1	39
Tabla 3.3	Potenciales de depolarización de losa 4	40
Tabla 3.4	Potenciales de depolarización de losa 2	41
Tabla 3.5	Potenciales de depolarización de losa 5	41
Tabla 3.6	Potenciales de depolarización de losa 3	42
Tabla 3.7	Potenciales de depolarización de losa 6	43
Tabla 3.8	Potenciales de depolarización de losa 8	44
Tabla 3.9	Resultados de resistividad eléctrica de las losas y morteros de reparación A y D.	46

Índice de figuras

Figura 2.1	Diseño de losa	9
Figura 2.2	Preparación de varillas de acero al carbono y conexión eléctrica para pruebas electroquímicas	10
Figura 2.3	Malla de acero de refuerzo	11
Figura 2.4	Barras de acero inoxidable tipo 316	11
Figura 2.5	Fabricación de moldes	12
Figura 2.6	Colocación de las barras de acero	12
Figura 2.7	Mezclado de agregados	12
Figura 2.8	Colado de losas	12
Figura 2.9	Muestras cilíndricas para pruebas de laboratorio	13
Figura 2.10	Acabado final de las losas antes del periodo de curado	13
Figura 2.11	Moldes de madera	14
Figura 2.12	Conexión de las losas y protección de los cables	14
Figura 2.13	Panel de conexión	15
Figura 2.14	Procedimiento de colocación y colado de los ánodos en las losas	16

Figura 2.15	Conexión eléctrica de ánodo	17
Figura 2.16	Curva típica de depolarización	20
Figura 2.17	Condición en la que se mantuvieron las losas fabricadas con adición de iones cloruro durante el monitoreo electroquímico	21
Figura 3.1	Potencial de corrosión de las varillas embebidas en la losa 10, fabricada con adición de iones cloruro	24
Figura 3.2	Potencial de corrosión de las varillas embebidas en la losa 9, fabricada sin adición de iones cloruro	25
Figura 3.3	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 1, fabricada con adición de iones cloruro	26
Figura 3.4	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 4, fabricada con adición de iones cloruro	27
Figura 3.5	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 7, fabricada con adición de iones cloruro	28
Figura 3.6	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 2, fabricada con adición de iones cloruro	29
Figura 3.7	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 5, fabricada con adición de iones cloruro	30
Figura 3.8	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 3, fabricada con adición de iones cloruro	31
Figura 3.9	Potencial de polarización de las varillas V5 y V6 embebidas en la losa 3, fabricada con adición de iones cloruro	32

Figura 3.10	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 6, fabricada con adición de iones cloruro	33
Figura 3.11	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 6, fabricada con adición de iones cloruro	34
Figura 3.12	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 8, fabricada sin adición de cloruros	35
Figura 3.13	Potencial de corrosión de los ánodos galvánicos	36
Figura 3.14	Corriente galvánica de las losas	37
Figura 3.15	Corriente galvánica durante los primeros y últimos 100 días de monitoreo	38
Figura 3.16	Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 5, fabricada con adición de iones cloruro	30
Figura 3.17	Potenciales de corrosión de la Losa 8 y Losa 9 fabricadas sin adición de cloruros	45

Sinopsis

Esta investigación contiene el estudio electroquímico del sistema de protección catódica LINEA SENTINEL que consistió en tres ánodos galvánicos de zinc. Tales ánodos fueron incorporados en losas de concreto reforzado fabricadas de acuerdo con la metodología del “Protocol to Evaluate the Performance of Corrosion Mitigation Technologies in Concrete Repairs”. Se fabricaron losas de concreto reforzado con adición del 2% de ión cloruro a partir de cloruro de sodio (NaCl) y losas sin adición del mismo ión para evaluar este sistema como sistema de control y prevención de la corrosión.

El monitoreo electroquímico consistió en medición de potencial de corrosión del acero de refuerzo (E_{corr}) durante y posterior al período de curado, potencial de corrosión del ánodo (E_{corr}), potencial de polarización (E_{pol}), corriente galvánica (I_{galv}) y potenciales de depolarización obtenidos después 1s ($E_{inst\ off}$), 4 horas (E_4) y 24 horas (E_{24}) de interrumpir la corriente entre el ánodo y acero de manera periódica y de acuerdo con la normativa ASTM y NACE. Los resultados indicaron que los ánodos galvánicos de la línea Sentinel, son una tecnología adecuada para la reparación de estructuras de concreto reforzado con problemas de corrosión y como sistema preventivo.

Abstract

This investigation contains the electrochemical study of the LINEA SENTINEL cathodic protection system, which consisted of three galvanic zinc anodes called: GL anode, Silver anode and Gold anode.

These anodes were incorporated into reinforced concrete slabs manufactured according to the methodology of the "Protocol to Evaluate the Performance of Corrosion Mitigation Technologies in Concrete Repairs". Reinforced concrete slabs were manufactured with the addition of 2% chloride ion from sodium chloride (NaCl) and slabs without addition of the same ion; each slab contained eight reinforcing steel rods of 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ inch) placed independently and enabled with their electrical connection.

Four repair mortars were used: A, B, C y D. All the anodes were electrically connected to the reinforcing steel. After the connection of the anodes, the slabs were subjected to spraying cycles with 3.5% by weight sodium chloride (NaCl) solution, spraying cycles with tap water and outdoor drying cycles. In the case of slabs manufactured without the addition of chloride ions, the spraying cycles were with tap water

The measurements consisted in measuring corrosion potential of the reinforcing steel (E_{corr}) during and after the curing period, corrosion potential of the anode (E_{corr}), polarized potential (E_{pol}), galvanic current (I_{galv}) and depolarization potentials obtained after 1s ($E_{inst\ off}$), 4 hours (E_4) and 24 hours (E_{24}) to interrupt the current between the anode and steel. These measurements was during 650 days in accordance with ASTM and NACE standards.

The results indicated that the galvanic anodes of the Sentinel line are a suitable technology for the repair of reinforced concrete structures with corrosion problems and as a preventive system, as long as the area to be protected is adequate and calculated by design, as well as the Repair mortar is selected and applied correctly.

Resumen ejecutivo

En esta investigación se evaluó el comportamiento electroquímico del sistema de protección catódica LINEA SENTINEL que consistió en tres ánodos galvánicos de zinc denominados: Ánodo GL, Ánodo Silver y Ánodo Gold, dado que actualmente existe controversia en el desempeño de ánodos galvánicos como sistema de protección de estructuras de concreto reforzado, por un lado, se asegura el buen funcionamiento de los ánodos y, por otro, existe información que sugiere evitar su aplicación.

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

Capítulo 1: Presenta el estado del arte del uso de ánodos galvánicos y los resultados obtenidos en estructuras de concreto.

Capítulo 2: Describe brevemente la metodología seguida para llevar a cabo el monitoreo electroquímico de los ánodos galvánicos. También se detalla el diseño de las losas que se utilizaron y los ensayos electroquímicos que se realizaron.

Capítulo 3: Presenta los resultados y la discusión de los mismos, haciendo un comparativo de estos en función de losas que no contuvieron ánodo galvánico.

Capítulo 4: Se presentan las conclusiones del estudio y recomendaciones del uso de los ánodos galvánicos evaluados.

Introducción

Esta investigación inició en abril de 2016 por petición de la empresa **Eucomex SA de CV**, quien sustentó su solicitud en el interés que el Instituto evaluara el sistema de protección catódica LINEA SENTINEL, que consiste en tres ánodos galvánicos de zinc denominados: Ánodo GL, Ánodo Silver y Ánodo Gold bajo sus criterios y experiencia, para determinar si su tecnología podría ser empleada en estructuras portuarias de México.

Actualmente existen estudios que reportan que factores como el espesor del recubrimiento de concreto, la relación agua cemento, el contenido de ion cloruro, los tiempos de ciclos de rociado o mojado y humedad del ambiente, influyen en el comportamiento de un sistema de protección catódica. Se ha referido que los ánodos de sacrificio solo son eficientes en ambientes donde el concreto se mantiene con una humedad alta como las zonas marinas, pero difícilmente son efectivos en zonas donde no se puede asegurar que la resistividad del concreto sea lo suficientemente baja para permitir el paso de la corriente de protección. También se ha explorado también el uso de activadores y compuestos con la finalidad de optimizar el comportamiento de los ánodos, pero estos pueden causar lixiviación y perjudicar el comportamiento de los ánodos en periodos largos de protección. Sin embargo, en general, los estudios reportados han seguido diferentes metodologías de evaluación de esta tecnología, generando diversidad de puntos de vista, resultados y conclusiones.

Con base en esto, fue necesario referir y seguir una metodología estandarizada para la evaluación de ánodos galvánicos de zinc que permita obtener información confiable y comparable para determinar el alcance efectivo de esta tecnología. En la solicitud de esta investigación el cliente Eucomex SA de CV pidió que la evaluación del sistema de protección catódica LINEA SENTINEL se realizara de acuerdo con el **“Protocol to Evaluate the Performance of Corrosion Mitigation Technologies in Concrete Repairs”** [1], documento que es una propuesta de protocolo estándar para evaluar el rendimiento de las tecnologías de mitigación de la corrosión en reparaciones de concreto, dada la importancia de contar con un programa de prueba flexible que evalúe adecuadamente el desempeño de las opciones actuales de atenuación de la corrosión.

Con base en la solicitud del cliente, esta investigación determinó el comportamiento del sistema de protección catódica LINEA SENTINEL en escenarios sugeridos por el protocolo mencionado, para que en un futuro la información adquirida sea una referencia y contribuya a la adopción final del mismo.

Cabe mencionar que esta investigación se desarrolló en tres fases.

Fase 1: Del período abril a diciembre de 2016. En esta fase se fabricaron las losas y se inició el monitoreo electroquímico, obteniendo resultados por 145 días, esta información fue reportada en el informe final del PROYECTO EE 04/16: INVESTIGACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ANODOS DE SACRIFICIO LOCALIZADOS EN LA REHABILITACION DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO con fecha del 20 de diciembre de 2016 [2].

Fase 2: De marzo a diciembre de 2017. Durante esta fase, se continuó con las mediciones y se obtuvieron resultados por 498 días, obteniendo el informe final del PROYECTO EE 09/17: INVESTIGACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ANODOS DE SACRIFICIO LOCALIZADOS EN LA REHABILITACION DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO FASE B con fecha 28 de diciembre de 2017 [3]. A esta fecha los resultados indicaron que el beneficio de la colocación del ánodo galvánico de zinc, como sistema preventivo, era exitoso. Mientras para el caso de los ánodos evaluados en losas con cloruros y con problemas de corrosión se determinó que los ánodos galvánicos mostraron capacidad de protección, aunque la protección que brindó cada ánodo fue en función de su tamaño y área de acero de refuerzo conectada eléctricamente al mismo.

Fase 3: De febrero a julio de 2018. Con la finalidad de determinar el comportamiento de los ánodos de sacrificio, después de dos años de su instalación, se continuó con el monitoreo y los resultados son reportados en esta publicación.

I.1 Objetivo

1. Determinar el comportamiento de los ánodos de sacrificio denominados puntuales instalados en reparaciones localizadas de losas de concreto reforzado en ambientes con iones cloruro y sin iones cloruro después de dos años de su instalación.

1 Antecedentes

A continuación, se mencionan investigaciones reportadas sobre sistemas de protección catódica.

Christodoulou et. al., [4] evaluaron el desempeño de los ánodos galvánicos instalados en concreto original de la estructura. Reportan que los ánodos polarizan el acero a una distancia significativa, a cierta distancia del parche de reparación hasta 60 cm en algunos casos. Reportan también que el desempeño del ánodo (distancia que alcanzó a polarizar) depende de la densidad del acero, el ambiente en el que se encuentra y la edad del mismo. *Consideran que el criterio de depolarización de 100 mV no es adecuado para evaluar sistemas de protección catódica por ánodos galvánicos.*

Mahasiripan et. al., [5] determinaron la eficiencia de diferentes tipos de ánodos de sacrificio: Zinc, Zinc activado alcalinamente y aluminio en prismas de concreto con un contenido de NaCl de 0.4%. La eficiencia se determinó midiendo la distribución de densidad de corriente y el potencial eléctrico de la superficie del acero a diferentes distancias de la localización del ánodo y las depolarizaciones >100mV. Los resultados mostraron que la relación a/c no afecta significativamente la eficiencia de los ánodos debido a la humedad y al contenido de iones cloruro. De acuerdo con las mediciones del potencial de protección y de densidad de corriente, el ánodo de aluminio polarizó mejor al acero en condición húmeda, alcanzando una distancia de hasta 85 cm. La eficiencia del ánodo de zinc mejoró significativamente con el mortero activado alcalinamente que cubrió el ánodo. El ánodo de zinc sin activador alcanzó a polarizar hasta una distancia de 85 cm con una relación a/c de 0.6 únicamente. La resistividad se mantuvo de 4 a 4.5 $\Omega \cdot \text{cm}$. En las otras relaciones a/c se observó que no influye significativamente en el desempeño del ánodo, esto debido a que tienen niveles similares de resistividad eléctrica.

Whitmore et. al., [6] recomiendan el uso de los ánodos galvánicos para mitigar la corrosión en áreas puntuales como los parches. Mencionan que la resistividad del concreto es un parámetro importante a considerar al emplear estos ánodos, la cual no debe ser mayor a 15,000 $\text{ohm} \cdot \text{cm}$.

Moe M.S. et. al., [7] investigaron la aplicación de protección catódica en estructuras de concreto por corriente impresa y por ánodos galvánicos para controlar la corrosión en macroceldas contaminadas con iones cloruro. Mediante un modelo numérico simularon las condiciones electroquímicas de corrosión en acero. Reportan que la corriente por protección catódica con corriente impresa fluye hacia el acero corroído, solo cuando la corriente aplicada es suficientemente grande desprecia la corriente generada por la macrocelda. Los resultados de

modelado muestran que la corriente catódica proporcionada por los ánodos fue capaz de detener la corrosión en la macrocelda que se genera de la incompatibilidad electroquímica entre el parche y el sustrato. Demostrando que las reparaciones de parche con ánodo galvánico son bastantes eficaces para inhibir el daño por corrosión localizado.

Wilson, et. al., [8] evaluaron en campo los sistemas de protección catódica por corriente impresa y por ánodos galvánicos. Reportan las ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica, por corriente impresa (CPCI) y por ánodos galvánicos (PCAS). Mencionan que la decisión de instalar un sistema, u otro, depende de varios factores, entre ellos: la condición de la estructura (nivel y extensión de la degradación), el presupuesto del cliente y la esperanza de vida de la estructura. Por experiencia recomiendan utilizar PCAS en áreas pequeñas y puntuales, también en las reparaciones donde el presupuesto del cliente es limitado y en las reparaciones en donde la esperanza de vida se prevé que estará alrededor de 10 años. Por otro lado, para sistemas de CPCI lo recomiendan para problemas de corrosión significativos en superficies grandes, en donde se espera una expectativa de vida superior a los 25 años y donde el acceso y tráfico son desafiantes y muy costosos.

Glass et. al., [9] analizaron los tratamientos electroquímicos de ánodos galvánicos e híbridos (ánodo discreto con una conexión de corriente directa), instalados en un estacionamiento que presentaba problemas de corrosión por cloruros provenientes del deshielo. Los resultados encontrados muestran que en ambos casos los ánodos tienen una influencia en el cambio de potencial hasta una distancia de 60 cm, con una velocidad de corrosión de 1 mA/m².

Redaelli et. al., [10] estudiaron las ventajas de los sistemas de protección catódica (ánodos puntuales y corriente impresa) para la protección del acero embebido en una estructura de concreto carbonatado (Torre Velasca de Milán, construida a finales de 1950) en condiciones atmosféricas. La eficiencia del sistema de protección catódica por corriente impresa (CPCI) en condición seca incrementó de 0.05 a 0.35 metros con el incremento de la corriente aplicada de 10 a 100 μ A, en esta condición el criterio de depolarización de los 100 mV fue solo una indicación de la distancia que alcanzó la corriente, ya que el acero no se corroyó por falta de humedad. En condición húmeda, donde el acero estaba oxidándose activamente, la aplicación de 10 a 100 μ A no fue suficiente para lograr la depolarización de 100 mV, por lo cual la aplicación de 1150 μ A permitió el cumplimiento de los 100 mV a una distancia de 0.8 m.

En el caso del sistema de protección catódica por ánodos galvánicos (PCAG) la corriente suministrada de 500 μ A (en condición húmeda) y 80 μ A (en condición seca) cumplió con el criterio de los 100 mV hasta una distancia de 0.3 m. Recomiendan tomar en cuenta que los ánodos galvánicos suministran alta corriente y los valores de potencial son bajos, por lo que se debería tener cuidado de presentar acidificación en los ánodos y la vida útil de estos sería reducida.

Redaelli et. al., [11] realizaron una investigación en simulación numérica (elementos finitos) y experimental (expuesto a condiciones atmosféricas) para determinar si los ánodos galvánicos localizados podrían proteger el acero de refuerzo en estructuras delgadas de concreto reforzado. Reportan que, a pesar de la alta resistividad eléctrica del concreto carbonatado, los ánodos con una separación de 45 cm fueron suficientes para proteger el acero de refuerzo de la corrosión en la mayoría de las condiciones de exposición, incluso en partes delgadas del concreto. La vida útil de los ánodos fue estimada en el orden de varios años o incluso décadas; sin embargo, se demostró, que también el acero de refuerzo en concretos seco (carbonatado o alcalino) que **no necesita protección**, contribuye al consumo del ánodo. No fue posible alcanzar una polarización catódica superior a los 100 mV en todas las condiciones. La vida útil del ánodo es del orden de varias decenas o incluso cientos de años, a excepción cuando el concreto está saturado de agua, donde la vida útil es inferior a 20 años. Cuando se pretende evitar costos adicionales recomiendan la instalación de ánodos únicamente en áreas en donde se ha iniciado y propagado la corrosión debido a la carbonatación, ya que otras áreas de la estructura también demandarán corriente del ánodo.

Sergi, et. al., [12] monitorearon la eficiencia de ánodos galvánicos de zinc instalados en parches de reparación (puente en Leicester, Reino Unido), en las zonas con daños más severos por corrosión (contaminación por iones Cl^- de 2%) instalaron un sistema de protección catódica por corriente impresa. Reportan que un ánodo de 60 g de zinc podría generar de 400 a 600 μA durante periodos calientes y menos de 100 μA en periodos fríos, con un tiempo de vida útil de 24 a 37 años de servicio. Después de 10 años de servicio se extrajeron, y se apreció una pérdida de zinc del 25% aproximadamente, por lo cual se obtuvo una eficiencia del 85%. En los alrededores del ánodo instalado se apreciaron óxidos de zinc en los poros del concreto, permitiendo así mantener la alcalinidad del concreto y estos óxidos no generaron ningún tipo de fuerza en el concreto, los óxidos pueden salir libremente por los poros del concreto.

Holmes et. al., [13] estudiaron el comportamiento del ánodo de sacrificio de zinc a fluctuaciones de temperatura y lluvia. Reportan que la corriente del ánodo incrementa con el aumento de la agresividad del medio (esto al rociar la muestra con agua), mostrando que la corriente de protección requerida depende del nivel de riesgo por corrosión que exista y *no necesariamente tiene que cumplir el criterio de los 100 mV, ya que esta está influenciada por diversos factores.*

Trocónis de Rincón et. al., [14] estudiaron la eficiencia de ánodos comerciales de zinc embebidos en estructuras de concreto. El estudio se realizó en Venezuela (Corrosion Studies Center – University of Zulia, Luz) y en México (Instituto Mexicano del Transporte, IMT). Reportan que las varillas embebidas en concreto fueron protegidas por los ánodos, alcanzando valores de potencial de -550 mV CSE a los 360 días, pero a los 400 días reportan un desplazamiento de potencial a valores más positivos alcanzando valores de -300 y -400 mV. Estos valores de

potencial reportados a 400 días indican el tiempo de polarización que provee el ánodo y, después de este periodo, podría no ser suficiente para proteger al acero.

Malik et. al., [15] estudiaron el efecto del pH (ácido y neutro) y la temperatura (24, 35 y 50°C) en la integridad de un sistema protegido por ánodos galvánicos de zinc. Reportan que el cambio de pH y la temperatura influyen en el potencial del zinc, en la corriente galvánica y en el potencial galvánico del zinc unido al acero. Sus resultados indican que, a pH constante, a medida que disminuye la temperatura aumenta el valor de potencial del zinc, también reportan que, como consecuencia de los cambios en pH y temperatura, la estructura a proteger se puede poner en riesgo.

Wang et. al., [16] investigaron las causas y mecanismos de corrosión en especímenes con y sin sistemas de reparación de concreto, así como la efectividad del zinc como ánodo. Reportan que el zinc impide la corrosión del acero en la zona que se cubrió, pero no parecen proteger el acero después de la zona de reparación, entre los ánodos y cátodos después del área localizada. La efectividad del zinc en la prevención de la corrosión puede estar influenciada por varios factores, tales como la fuga en la interfaz concreto nuevo/concreto viejo, el área de contacto del zinc-acero y la alcalinidad de la solución poro de concreto.

Hassanein et. al., [17] modelaron la distribución de corriente en un sistema de protección catódica de concreto reforzado en función de las condiciones del acero (velocidad de corrosión y polarización), la resistividad del concreto y la geometría del acero reforzado. Reportan que la distribución de corriente es más uniforme cuando la velocidad de corrosión es baja debido a que la alta polarización no es requerida. La superficie de una barra de acero orientada hacia el ánodo puede recibir 1.5 veces más de corriente que la superficie opuesta. Cuando la capa de concreto reforzado sobre el acero es muy gruesa, se requerirá mayor flujo de corriente para polarizar el acero por corriente impresa a lo cual se recomienda emplear ánodos puntuales para proteger al acero y mejorar la distribución de corriente.

Bertonilli et. al., [18] estudiaron la efectividad de los ánodos de sacrificio (aleación Al-Zinc) sumergidos en agua de mar, mediante la medición de potencial, densidad de corriente y depolarización. La prueba de depolarización se realizó de dos formas, desconectando cada varilla y desconectando solo el ánodo. Los valores de potencial después de 24 h de desconexión fueron más positivos a -50 mV vs SCE en la barra libre de Cl⁻, mientras que en la contaminada con cloruro alcanzó valores de -250 y -150 mV vs SCE. En la prueba con la desconexión de únicamente el ánodo se observó un desplazamiento de potencial mientras más cerca de la disolución se realizaba la medición, alcanzando alrededor de 550 mV a 4 h en la barra sin iones Cl⁻ mientras en la barra contaminada con iones Cl⁻ se alcanzó un desplazamiento de potencial de 100 mV hasta los 30 cm de altura a 24 h.

Bertolini et. al., [19] estudiaron la distribución de potencial y corriente en losas de concreto nuevo y simularon la aplicación de un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio como método preventivo. Sus resultados muestran alto alcance de protección y profundidad en concreto no contaminado, incluso una varilla relativamente alejada del ánodo puede ser polarizada, mientras que la protección se limita al acero cerca del ánodo en losas contaminadas. Concluyen que el alcance de protección catódica en estructuras nuevas es mayor que en estructuras con problemas de corrosión y la protección catódica por ánodos de sacrificio puede ser propuesta como un método de prevención incluso para estructuras pretensadas.

2 Metodología experimental

2.1 Losas de concreto

2.1.1 Diseño de losas de concreto

El diseño de las losas de concreto se realizó de acuerdo al “Protocol to Evaluate the Performance of Corrosion Mitigation Technologies in Concrete Repairs” [1] sugerido por el cliente (Eucomex) y mostrado en la Figura 2.1. La relación a/c fue 0,52 y un área total de acero de refuerzo embebido de $0,26 \text{ m}^2$. Se obtuvieron un total de 10 losas, ocho fabricadas con adición de iones cloruro y dos sin adición de iones cloruro. Cada losa contuvo ocho varillas de acero de refuerzo de 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ pulgada) colocadas de manera independiente y habilitadas con su conexión eléctrica.

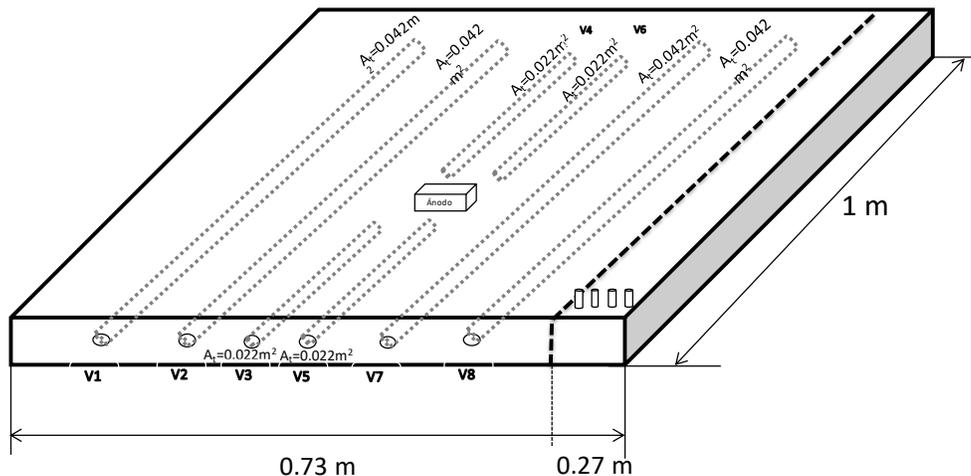


Figura 2.1. Diseño de losa [1]

Para lograr la fabricación de las losas fue necesario seleccionar y preparar los materiales.

2.1.2 Fabricación de losas de concreto

Los materiales empleados para la fabricación de las losas conforme a la Figura 2.1. fueron los siguientes:

- Malla de refuerzo
- Cable de cobre, calibre 16 multi-hilo con aislamiento.
- Cloruro de sodio.
- Barras de Acero inoxidable 316.
- Resina epóxica.
- Plasti loka.
- Cemento tipo II Cruz Azul.
- Grava.
- Arena.
- Alambre recocido.
- Barras de acero de refuerzo de ½”.

Una vez seleccionados y adquiridos los materiales, fue forzosa la adecuación de los mismos.

Se cortaron 40 tramos de varilla de acero al carbono con una longitud de 54 cm y 20 de 110 cm, se prepararon sus conexiones eléctricas para posteriormente realizar las mediciones electroquímicas. Ver Figura 2.2.



Figura 2.2 Preparación de varillas de acero al carbono y conexión eléctrica para pruebas electroquímicas

Para detectar la presencia de macroceldas y proporcionar una mayor rigidez a las losas, fue necesario cortar 10 trozos de 101x101 cm de malla de refuerzo y preparar su conexión eléctrica, ver Figura 2.3.

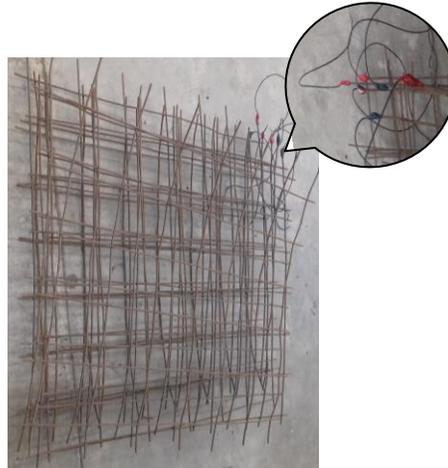


Figura 2.3. Malla de acero de refuerzo

Para cuantificar la resistividad eléctrica de las losas, se seccionaron tramos de acero inoxidable tipo 316 de 5 cm de longitud, embebiendo 4 barras en cada losa. Ver Figura 2.4.

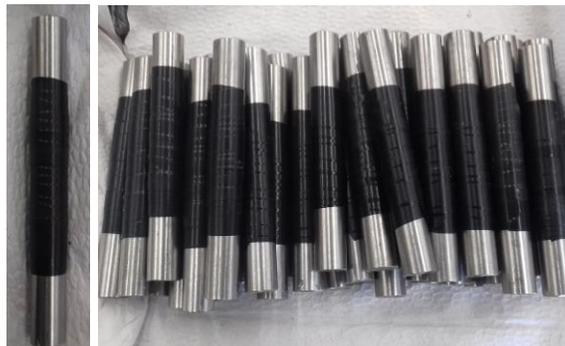


Figura 1.4. Barras de acero inoxidable tipo 316

Posterior a la preparación de los materiales, se procedió a la fabricación de las losas.

Se fabricaron moldes de madera de 1 x 1 x 0.14 m mostrados en las Figuras 2.5 y 2.6, las varillas de acero al carbono fueron colocadas conforme al diseño mostrado en la Figura 2.1.



Figura 2.5. Fabricación de moldes



Figura 2.6. Colocación de las barras de acero de acero

Una vez dispuestos los moldes con las varillas, se procedió al colado como se observa en las Figuras 2.7 y 2.8. Ocho losas fueron fabricadas con 2% de contenido del ión cloruro en peso de cemento (a partir de cloruro de sodio (NaCl)) y dos losas sin adición de cloruros. El ión cloruro fue disuelto en el agua de hidratación de la mezcla.



Figura 2.7. Mezclado de agregados



Figura 2.8. Colado de losas

Durante el vaciado de la mezcla, se obtuvieron cilindros de 20 x 40 cm para pruebas de resistencia mecánica y cilindros de 10 x 20 cm para mediciones de resistividad eléctrica a diferentes edades [20]. Figura 2.9.



Figura 2.9. Muestras cilíndricas para pruebas de laboratorio

El período de curado de todas las muestras (cilindros y losas) fue durante 28 días y consistió en rociado diario con agua de grifo y aislamiento para conservar la humedad. En la Figura 2.10 se aprecia el acabado final de las losas y el espacio que se consideró para la instalación posterior del ánodo galvánico de zinc conforme al diseño mostrado en la Figura 2.1.



Figura 2.10. Acabado final de las losas antes del periodo de curado

Posterior al período de curado de las losas, se realizaron ciclos de mojado con agua de grifo, secado a la intemperie, ciclos de mojado con agua salina (disolución al 3.5% de cloruro de sodio) y ciclos de secado a la intemperie por un período de duración de 15 días cada ciclo. Para la conservación de los ciclos de mojado, se fabricaron y colocaron “contenedores” de madera en la periferia de las losas como se muestra en la Figura 2.11.



Figura 2.11. Moldes de madera

Durante el período de curado de las losas, se diseñó y adecuó un panel de conexiones para facilitar el monitoreo electroquímico. De todas las varillas de acero de refuerzo embebidas en las losas de concreto se obtuvo un contacto eléctrico que se mantuvo protegido y aislado con ayuda de epóxico y mangueras de plástico como se observa en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Conexión de las losas y protección de los cables

Una vez obtenido el contacto eléctrico de cada varilla, se situaron en el panel de conexiones, fabricado de acrílico y adecuado a la cantidad de varillas requeridas en el proyecto (Figura 2.13). Cabe mencionar que, durante la fabricación del panel de conexiones, se incluyeron “interruptores de corriente (switch)” para abrir y cerrar el circuito eléctrico de las varillas con el ánodo, una vez conectados eléctricamente. Estos accesorios se consideraron para facilitar las mediciones de potencial de corrosión de cada varilla, potencial de polarización (potencial de las varillas con la conexión del ánodo), potencial de depolarización (potenciales obtenidos durante el período de interrupción de la conexión del ánodo a las varillas (24 horas)) y corriente galvánica (corriente medida entre el ánodo y varilla).



Figura 2.13. Panel de conexión

A la edad de 53 días de las losas, se instalaron los ánodos galvánicos. La Figura 2.14 muestra el procedimiento de colocación de los ánodos en las losas.



a) Mezclado del mortero



b) Vaciado del mortero



c) Colocación de ánodo **d)** Ánodo embebido

Figura 2.14. Procedimiento de colocación y colado de los ánodos en las losas

El tiempo de fraguado de cada mortero de reparación fue de 24 horas. Posterior a este tiempo se realizó la conexión eléctrica de cada ánodo y se conectó eléctricamente con las varillas correspondientes (ver Figura 2.15).



Figura 2.15. Conexión eléctrica de ánodo

2.2 Distribución de ánodos en losas de concreto

Es importante mencionar que durante la Fase 1, posterior a 53 días de edad de las losas, se instalaron los ánodos y conectaron el día 58 de acuerdo con las condiciones descritas en la Tabla 1.1. Durante la fase 2, en la losa 6 se sustituyó el ánodo GL L6 después de 215 días de funcionamiento, con la finalidad de mantener desde un inicio un área de acero de 0.043 m^2 conectada al ánodo y mejorar su desempeño como sistema de protección catódica. El ánodo utilizado fue del mismo tipo y fue denominado como GL L6-1, aplicado con **mortero D**. Después de mantener por 525 días conectado el ánodo GL L3 en la losa 3 se sustituyó por un ánodo GL L3-1 con la finalidad de mantener mejorar su desempeño como sistema de protección catódica. El mortero de reparación utilizado fue **mortero B** y el área de acero conectada de 0.043 m^2 . Con la finalidad de evaluar otro mortero de reparación se instaló un ánodo de tipo Gold en la losa 7, empleando como mortero de reparación **mortero C** y conectando un área de acero 0.064 m^2 .

Tabla 1.1. Distribución de los ánodos en las losas

Losa #	Categoría	Ánodo instalado	Peso inicial del ánodo (g)	Mortero empleado	Sustitución de ánodo en fase 2 y 3
1	Con Cl ⁻	Gold L1	516.4	A	NA
2	Con Cl ⁻	Silver L2	408.1	A	NA
3	Con Cl ⁻	GL L3	254.9	A	Después de 525 días se sustituyó el ánodo GL L-3 por ánodo GL L3-1 con mortero B
4	Con Cl ⁻	Gold L4	516.4	D	NA
5	Con Cl ⁻	Silver L5	408.1	D	NA
6	Con Cl ⁻	GL L6	254.9	D	Después de 215 días se sustituyó ánodo GL L6 por ánodo GL L6-1
7	Con Cl ⁻	Gold L7	516.4	C	Instalación de ánodo Gold L7 en la fase 3 del proyecto
8	Sin Cl ⁻	Gold L8	516.4	A	NA
9	Sin Cl ⁻	Testigo	NA	NA	NA
10	Con Cl ⁻	Testigo	NA	NA	NA

*NA= No aplica

2.3 Mediciones electroquímicas

Las mediciones realizadas fueron: Potencial de corrosión (E_{corr}), Potencial de polarización (E_{pol}), Potencial de depolarización (E_{dep}) y Corriente galvánica (I_{galv}) de acuerdo con las normas ASTM C876 y SP0290 [21, 22]. El criterio considerado para la evaluación de protección de los ánodos galvánicos fue de 100 mV, aunque este criterio específicamente no es para la evaluación de ánodos galvánicos, se utilizó como referencia [22].

2.3.1 Potencial de corrosión

El potencial de una superficie corroída en un electrolito relativo respecto a un electrodo de referencia bajo condiciones de circuito abierto (conocido también como potencial de circuito abierto).

El procedimiento de medición para obtener los potenciales de corrosión de las varillas y criterios para su interpretación fueron referentes a la norma ASTM C876 [21] presentados en la Tabla 3.1.

2.3.2 Potencial de circuito abierto del ánodo galvánico

Este valor se refiere al potencial de un electrodo medido respecto a un electrodo de referencia en ausencia de corriente. En esta investigación se obtuvieron valores de potencial de los ánodos galvánicos con el objetivo de monitorear su comportamiento respecto al tiempo. Para el caso específico de los ánodos, el electrolito fue el mortero de reparación Euco repair y sobre este se colocó el electrodo de referencia en cada medición.

2.3.3 Potencial de polarización

Este valor corresponde al cambio del potencial de circuito abierto como resultado del paso de corriente a través de la interfase electrodo/electrolito, producida por la conexión del ánodo.

Este potencial se obtuvo durante el período que las varillas y ánodos se mantuvieron conectados eléctricamente entre sí.

2.3.4 Corriente galvánica

En este trabajo se obtuvo la corriente galvánica entre el ánodo galvánico y varillas, conectando en la terminal negativa del multímetro la conexión eléctrica del ánodo y en la terminal positiva la conexión de las varillas. Cabe mencionar que para obtener esta medición se interrumpió desde el panel de mediciones el paso de la corriente del ánodo a las varillas.

2.3.5 Potencial de depolarización

Corresponde al potencial medido durante el período de interrupción de la corriente suministrada por el ánodo a las varillas. En esta investigación se obtuvieron potenciales de depolarización después de 1s, 4 y 24 horas de interrumpir la corriente, considerando la Norma NACE SP0290 [22].

2.3.6 Criterio para la evaluación de los ánodos galvánicos

El criterio considerado para la evaluación de protección de los ánodos galvánicos fue de 100 mV [21]. Este criterio es el más utilizado para evaluar sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio en estructuras de concreto. Consiste en alcanzar al menos una diferencia de potencial de 100 mV entre el potencial estático de la varilla (previo a la conexión del sistema de protección catódica) o potencial obtenido después de 1 s de la interrupción de la corriente (entre el ánodo y varilla) denominado "instant off" y potenciales obtenidos durante el período de depolarización (4 y 24 horas). La Figura 2.16 presenta la curva típica de depolarización. Cuando la diferencia de los 100 mV no se alcanza, puede atribuir a diversos factores como por ejemplo, la cantidad de corriente requerida para alcanzar la protección es superior, existe alta resistencia por parte del electrolito, o bien, cuando una estructura ha sido protegida catódicamente por un lapso largo (meses o años) la depolarización puede requerir más tiempo (> 24 horas) para obtener la diferencia de los 100 mV.

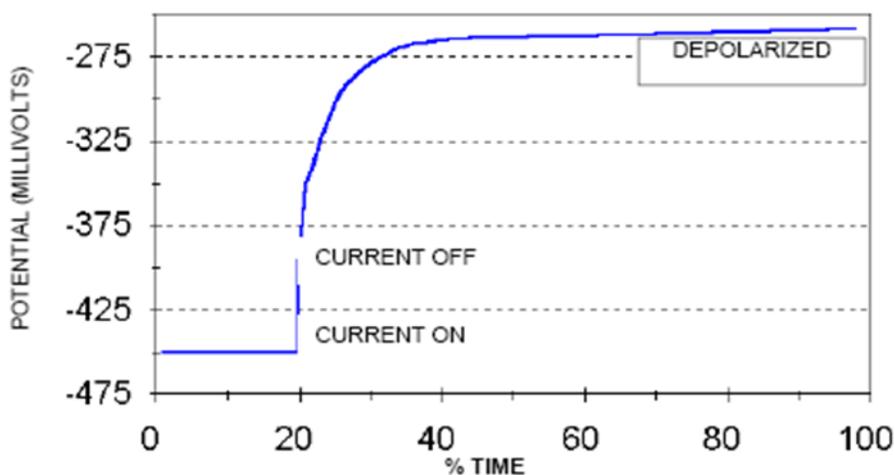


Figura 2.16. Curva típica de depolarización [22]

2.4 Ciclos de evaluación

Posterior a la conexión eléctrica de los ánodos galvánicos en las losas correspondientes, las losas fabricadas con adición de cloruros se sometieron a ciclos de rociado con solución de NaCl al 3.5% y secado a la intemperie; mientras las losas fabricadas sin adición de cloruros, en los períodos de rociado, se humedecieron solo con agua de grifo. Para una mejor interpretación de los resultados la Figura 2.17 presenta las condiciones en las que se mantuvieron las losas durante el monitoreo electroquímico.

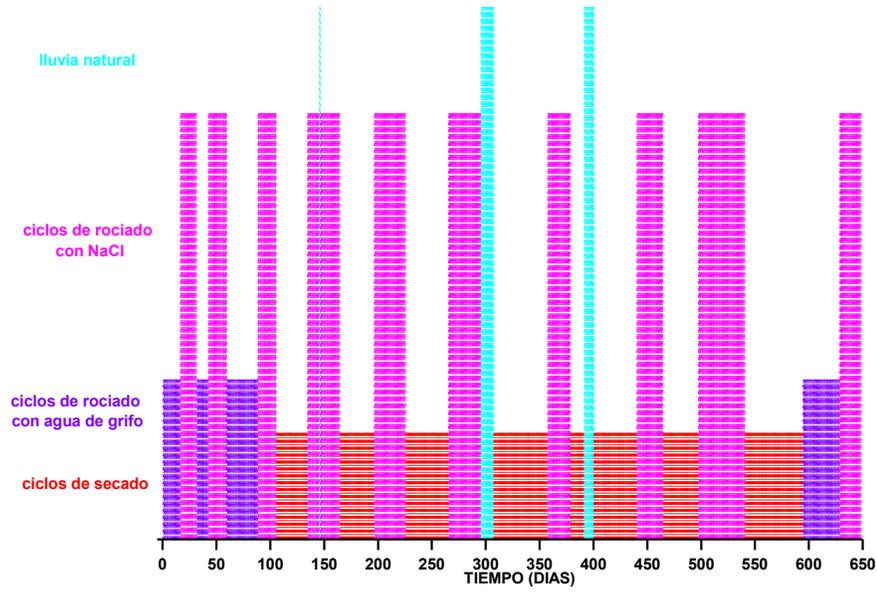


Figura 2.17. Condición en la que se mantuvieron las losas fabricadas con adición de iones cloruro durante el monitoreo electroquímico

3 Resultados y discusión

La presentación de los resultados se describe de la siguiente manera:

3.1. Potenciales de corrosión de las losas testigo fabricadas con y sin adición de iones cloruro.

3.2. Potenciales de polarización.

3.3. Potencial de corrosión de los ánodos.

3.4. Corriente galvánica.

3.5. Potenciales de depolarización.

3.6. Resistividad eléctrica de las losas y morteros de reparación A y D.

3.1 Potenciales de corrosión de losas testigo

3.1.1 Potenciales de corrosión de la losa testigo fabricada con adición de iones cloruro y sin instalación de ánodo galvánico

Para el caso de la losa 10 fabricada con adición de cloruros, el comportamiento se muestra en la Figura 3.1. En la mayoría del monitoreo se apreciaron potenciales más negativos que -350 mV vs Cu/CuSO₄, valores que de acuerdo con los criterios de la norma ASTM C 876 [21] mostrados en la Tabla 3.1 indican presencia de corrosión.

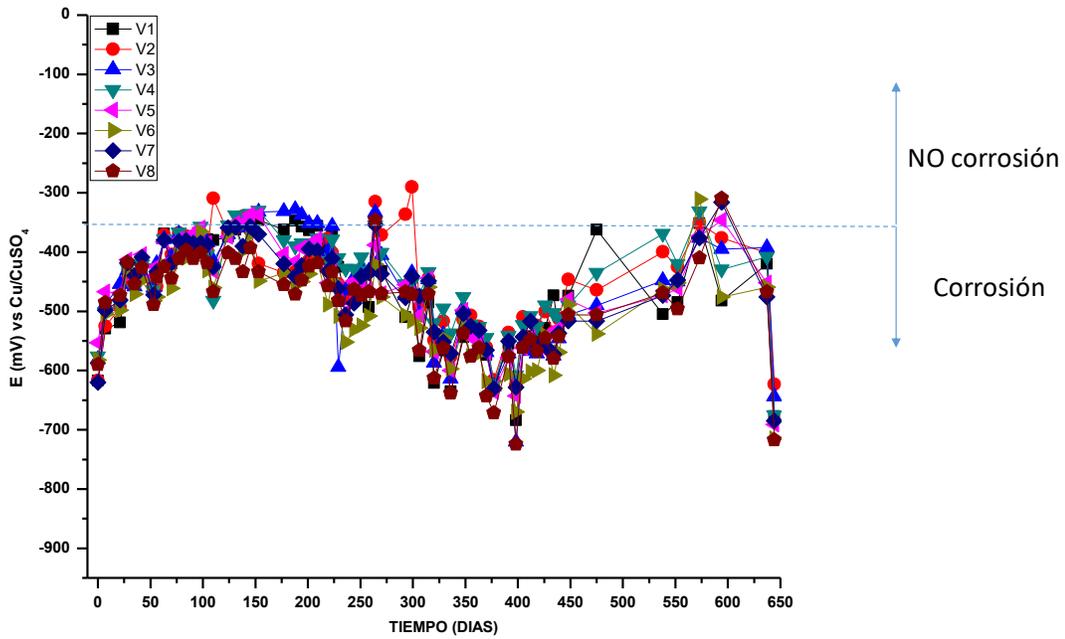


Figura 3.1. Potencial de corrosión de las varillas embebidas en la losa 10, fabricada con adición de iones cloruro

Tabla 3.1. Criterios de evaluación de potencial de corrosión [21]

Criterios para la interpretación de potenciales	
Potencial de corrosión (E_{corr}) Cu/CuSO ₄	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

3.1.2 Potenciales de corrosión de la losa testigo fabricada sin adición de iones cloruro y sin instalación de ánodo galvánico

Las varillas de acero embebidas en la losa 9 (testigo) fabricada sin adición de cloruros, en general mostraron potenciales de no corrosión de acuerdo con la Figura 3.2 y Tabla 3.1.

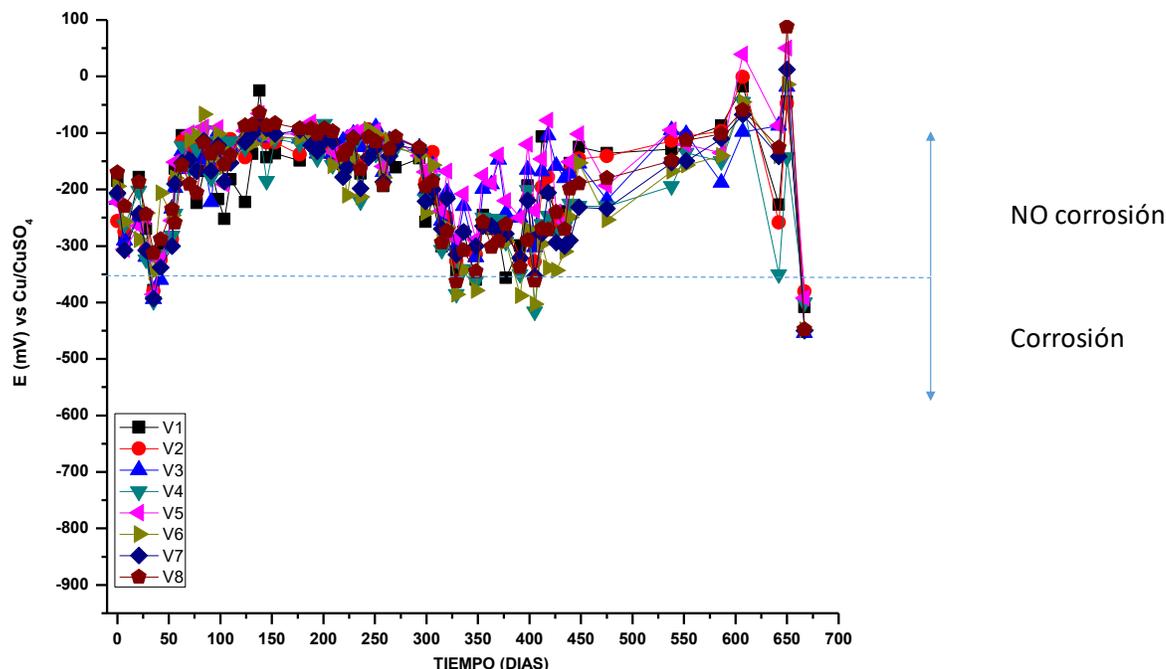


Figura 3.2. Potencial de corrosión de las varillas embebidas en la losa 9, fabricada sin adición de iones cloruro

3.2 Potencial de polarización de las losas fabricadas con iones cloruros e instalación de ánodos galvánicos

3.2.1 Losas con iones cloruros y con instalación de Ánodos Gold

En la losa 1 se instaló el **Ánodo Gold L1** empleando como mortero de reparación A. Inicialmente el área considerada a proteger fue de $0,26 \text{ m}^2$, área total de acero de refuerzo embebida en la losa de acuerdo al diseño original de la losa (Figura 3.3); esta condición se mantuvo durante 57 días, pero desafortunadamente no se obtuvo un desplazamiento significativo del potencial en sentido negativo de las varillas como muestra la Figura 5, fue entonces cuando se redujo el área de acero a proteger de $0,26 \text{ m}^2$ a $0,086 \text{ m}^2$, área alcanzada con la

conexión de las varillas V3, V4, V5 y V6. Bajo esta condición, se notó un desplazamiento de potencial de ~ 100 mV en sentido negativo para dichas varillas, mientras el potencial de las varillas: V1, V2, V3, V4 y V8 (sin conexión con el ánodo) tendieron a valores positivos cercanos al potencial de corrosión (E_{corr}) inicial, como resultado de la interrupción de la conexión con el ánodo Gold L1.

Considerando el área de 0.086 m^2 conectada al Ánodo Gold L1, los potenciales de polarización oscilaron ~ -450 y -750 mV vs Cu/CuSO₄. Durante el monitoreo se observó que los potenciales en los ciclos de secado (indicados en la Figura 3.3 con círculos en color negro) fueron más positivos respecto a los obtenidos en los ciclos de rociado con solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3.5%, esto se atribuye a la falta de humedad en la losa y mortero donde estuvo embebido el ánodo, lo que ocasionó incremento de la resistividad eléctrica y disminución del flujo de corriente del ánodo al acero conectado.

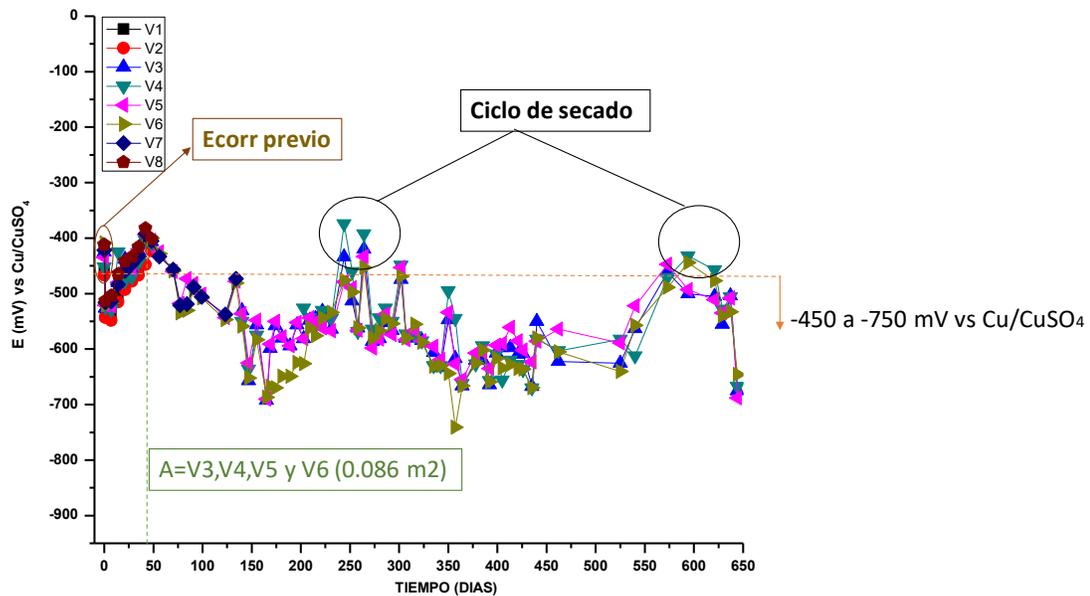


Figura 3.3. Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 1, fabricada con adición de iones cloruro

En la losa 4 se instaló el Ánodo Gold L4 empleando como mortero de reparación mortero D. Durante 130 días se mantuvo el área total de acero $0,26 \text{ m}^2$ (ocho varillas de acero) conectada al ánodo galvánico. Durante este tiempo se observó un desplazamiento aproximado del potencial de corrosión en sentido negativo de 50 mV en la mayoría de las mediciones. Con la finalidad de incrementar este desplazamiento después de 75 días se redujo el área protegida a $0,086 \text{ m}^2$ conectando únicamente las varillas V3, V4, V5 y V6. Con esta reducción de área, los potenciales de polarización resultaron más negativos que -540 mV vs CuSO₄, comportamiento mostrado en la Figura 3.4.

En los ciclos de secado se observó tendencia de los potenciales de polarización en sentido positivo, comportamiento asociado a la falta de humedad en la losa y

mortero de reparación, solo en la medición marcada con un círculo en la Figura 3.4 el potencial de protección fue más positivo que -540 mV vs Cu/CuSO_4 .

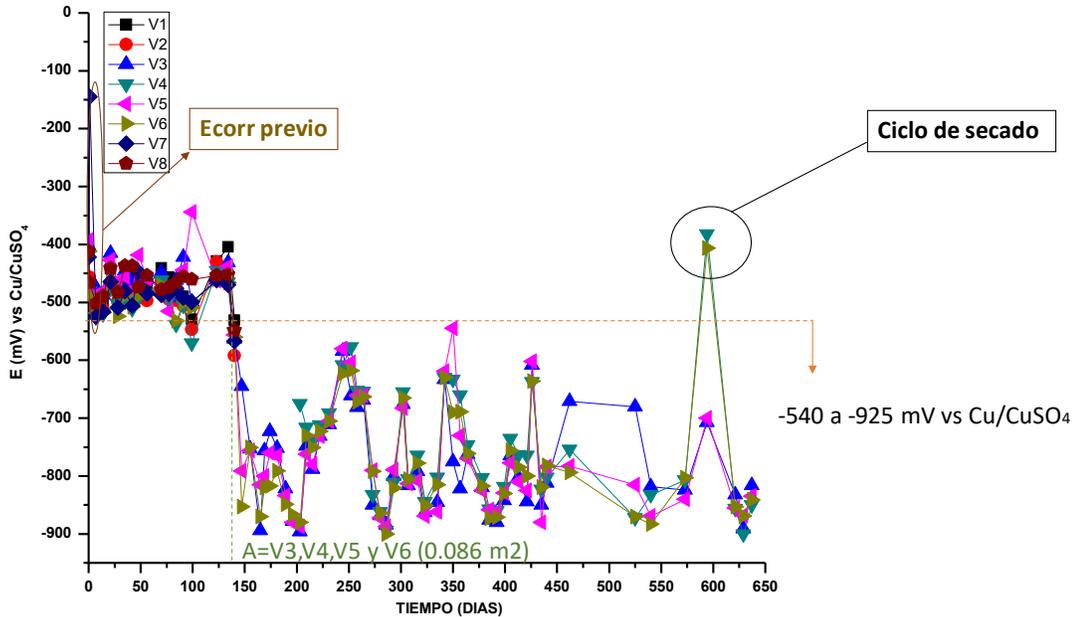


Figura 3.4. Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 4, fabricada con adición de iones cloruro

En la losa 7 se instaló el **Ánodo Gold L7** empleando como mortero de reparación mortero C. Para este caso desde el inicio se conectaron únicamente las varillas V3, V5 y V6 que sumaron un área protegida de 0.064 m^2 . Durante el periodo de monitoreo por 59 días se observó un desplazamiento del potencial de corrosión en sentido negativo mayor a 300 mV en todas las mediciones, como se observa en la Figura 3.5.

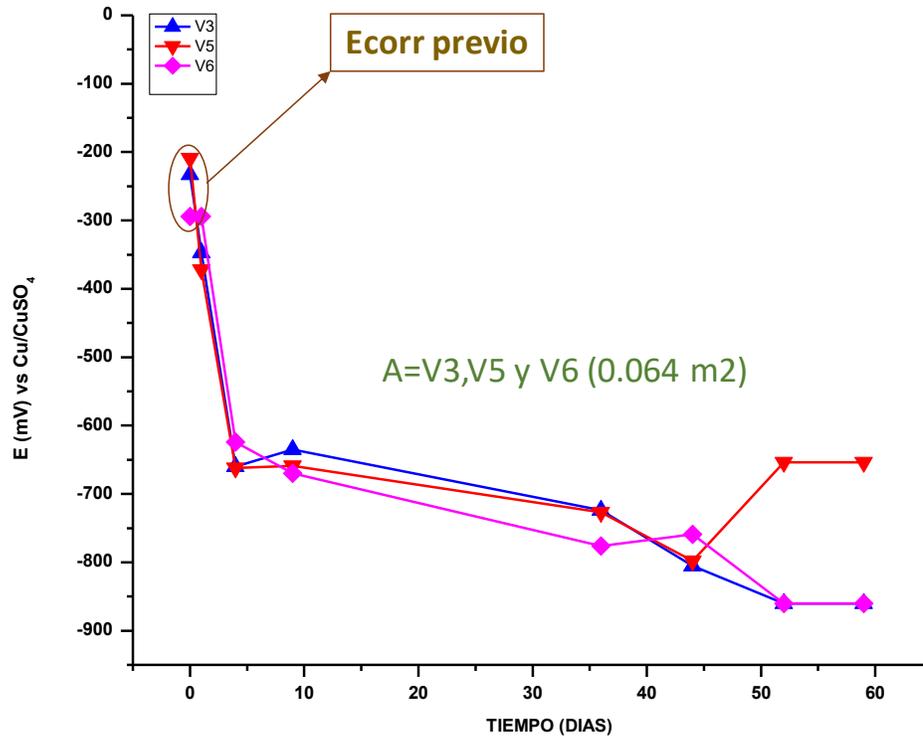


Figura 3.5. Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 7, fabricada con adición de iones cloruro

3.2.2 Losas con iones cloruros y con instalación de Ánodos Silver

En la losa 2 se instaló el **Ánodo Silver L2** con mortero A. De acuerdo con la Figura 3.6 durante 56 días de conexión del ánodo con las ocho varillas (0,26 m²) no se apreció desplazamiento del potencial de las varillas en sentido negativo, incluso se apreciaron valores de potencial similares al potencial de corrosión (E_{corr}) medido previo a la conexión del ánodo; esto originó que se redujera el área de acero a 0,086 m² con las varillas V5, V6 y V7. En esta condición, se obtuvo un desplazamiento de 100 mV del potencial de corrosión en sentido negativo para tales varillas, mientras el potencial del resto de las varillas (sin conexión con el ánodo) tendieron a valores cercanos al potencial de corrosión previo a la conexión del ánodo galvánico. Después de 140 días se redujo el área a 0,064 m² conectando las varillas V3, V5 y V6 alcanzando potenciales de polarización entre -450 y -825 mV vs CuSO₄. Aunque en un ciclo de secado se notaron potenciales del orden de -450 mV vs CuSO₄ (marcado con círculo), en todas las mediciones resultaron más negativos que el potencial de corrosión (E_{corr}).

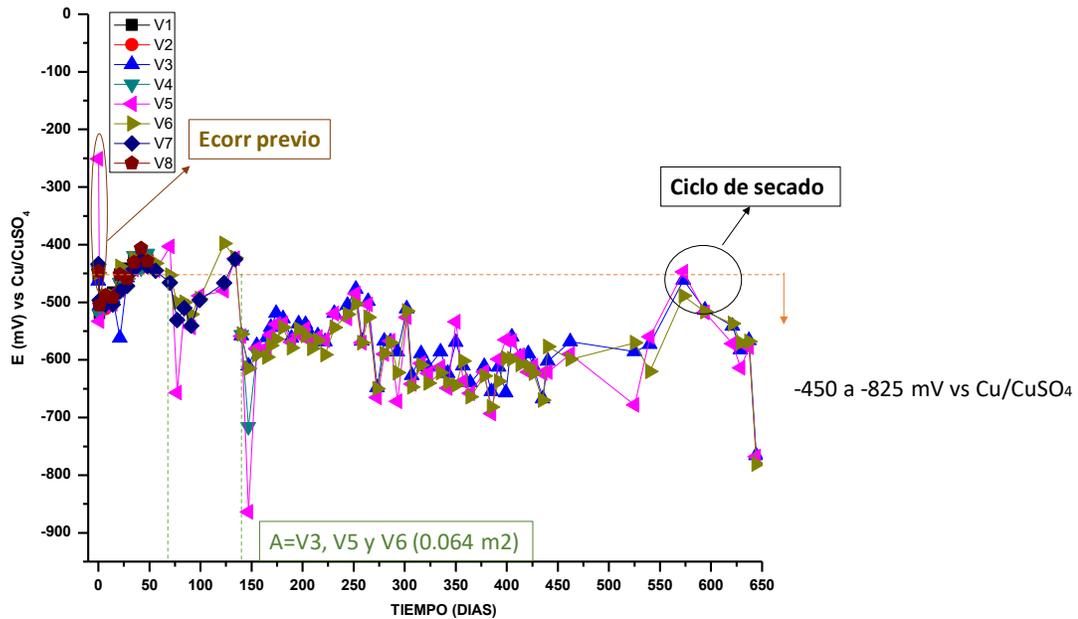


Figura 3.6. Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 2, fabricada con adición de iones cloruro

En la losa 5 se colocó el Ánodo Silver L5 con mortero D. Durante 84 días se mantuvieron todas las varillas de acero de refuerzo conectadas al ánodo galvánico. De acuerdo con la Figura 3.7, durante este período se observó variabilidad de valores de potencial, solo en algunas mediciones de las varillas V5, V6, V7 y V8 se observó desplazamiento del potencial de corrosión en sentido negativo mayor a 100 mV respecto al potencial de corrosión, en el resto el desplazamiento del potencial en sentido negativo fue menor. Con base en esto se redujo el área a proteger a 0,086 m² y finalmente a 0,064 m² manteniendo conectadas las varillas V3, V5 y V6. Con esta área se obtuvieron valores de potencial de protección del orden de -515 y -900 mV vs CuSO₄, aún con las variaciones de potencial en sentido positivo en los ciclos de secado, se obtuvieron el orden del potencial de polarización el cual se mantuvo al menos en -515 mV vs CuSO₄.

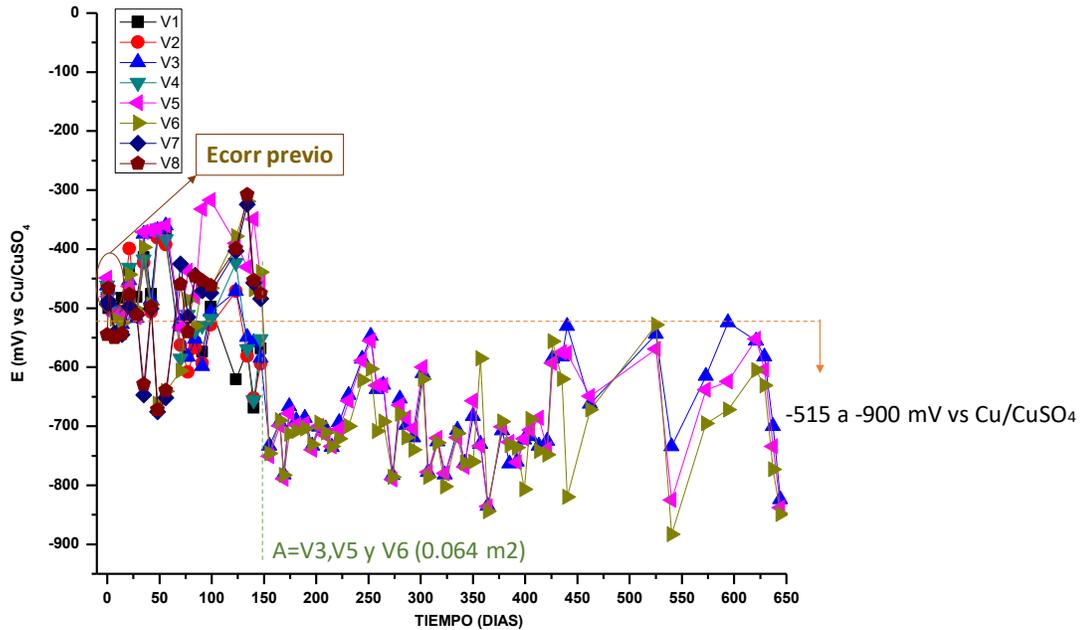


Figura 3.7. Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 5, fabricada con adición de iones cloruro

3.2.3 Losas con iones cloruro y con instalación de Ánodos GL

La losa 3 se reparó con Ánodo GL L3 con mortero A. El comportamiento de la losa 3 se muestra en la Figura 3.8. Durante 56 días de conexión del ánodo con las ocho varillas ($0,26 \text{ m}^2$) no se apreció desplazamiento significativo del potencial de corrosión de las varillas en sentido negativo, incluso se apreciaron valores de potencial similares al potencial de corrosión; el área de acero ($0,26 \text{ m}^2$) propuesta inicialmente era excesiva para la capacidad de protección del ánodo instalado, razón por la que se disminuyó el área de acero conectado a $0,086 \text{ m}^2$ el día 56 con las varillas V5, V6 y V7, sin embargo en esta condición no se notó un desplazamiento considerable de potencial en sentido negativo. Con la finalidad de incrementar el potencial de polarización el día 147 se redujo el área a $0,043 \text{ m}^2$ alcanzando valores de potencial más negativos que $\sim -500 \text{ mV vs CuSO}_4$ en todos los ciclos de rociado con solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3.5% y casi todos los ciclos de secado a la intemperie, excepto en la medición marcada con círculo en la Figura 3.8, este resultado es atribuido a la falta de humedad en el concreto y mortero de reparación.

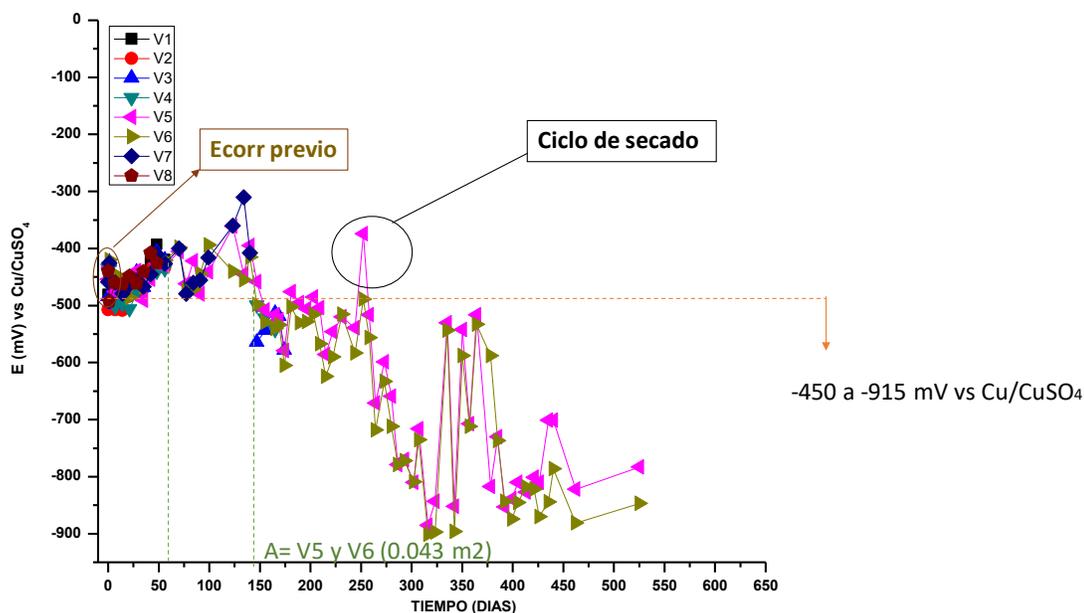


Figura 3.8. Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 3, fabricada con adición de iones cloruro

La losa 3 después de 525 días se retiró el Ánodo GL L3 y se reparó nuevamente la losa colocando un Ánodo GL L3-1 y mortero B. Para este caso desde el inicio se conectaron únicamente las varillas V5 y V6 que cubrieron un área protegida de 0.043 m^2 .

El comportamiento de esta losa 3 se muestra en la Figura 3.9. Durante los 54 días de monitoreo que se tiene a la fecha se apreció desplazamiento del potencial de corrosión de las varillas en sentido negativo.

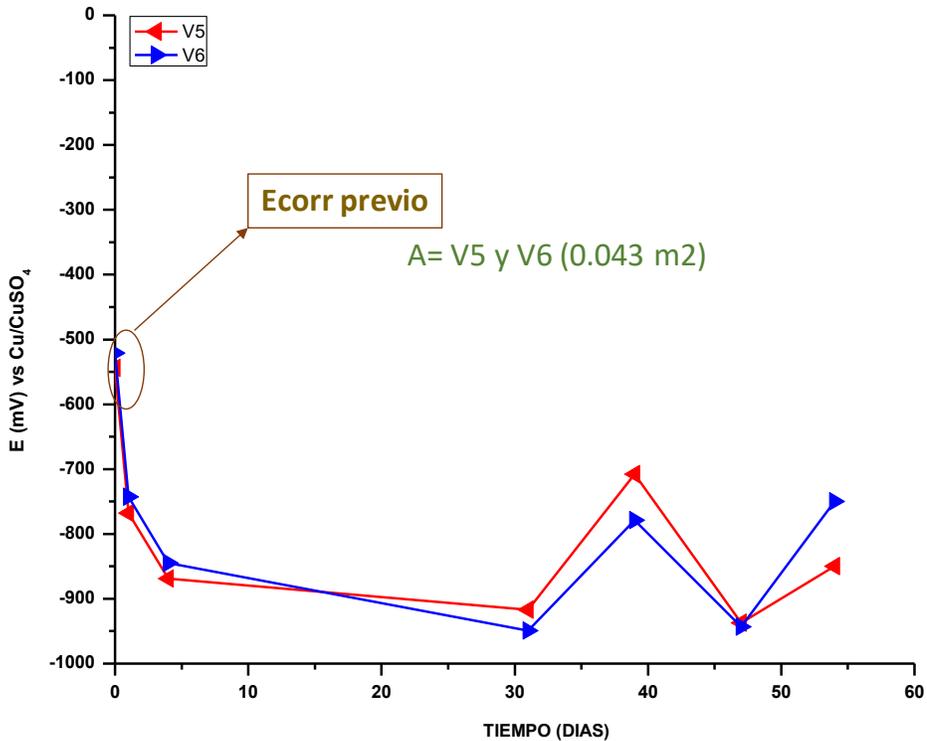


Figura 3.9. Potencial de polarización de las varillas V5 y V6 embebidas en la losa 3, fabricada con adición de iones cloruro

En la losa 6 se colocó Ánodo GL L6 con mortero D. Para este caso, durante 134 días se mantuvieron todas las varillas (8) conectadas al ánodo galvánico. Este comportamiento se muestra en la Figura 3.10 y se observa que los valores de potencial oscilaron dentro del intervalo de potencial de corrosión. Considerando esta situación, posterior a 134 días se disminuyó el área de acero a 0,043 m² con las varillas V5 y V6 alcanzando valores de potencial de protección entre -525 y -780 mV vs CuSO₄.

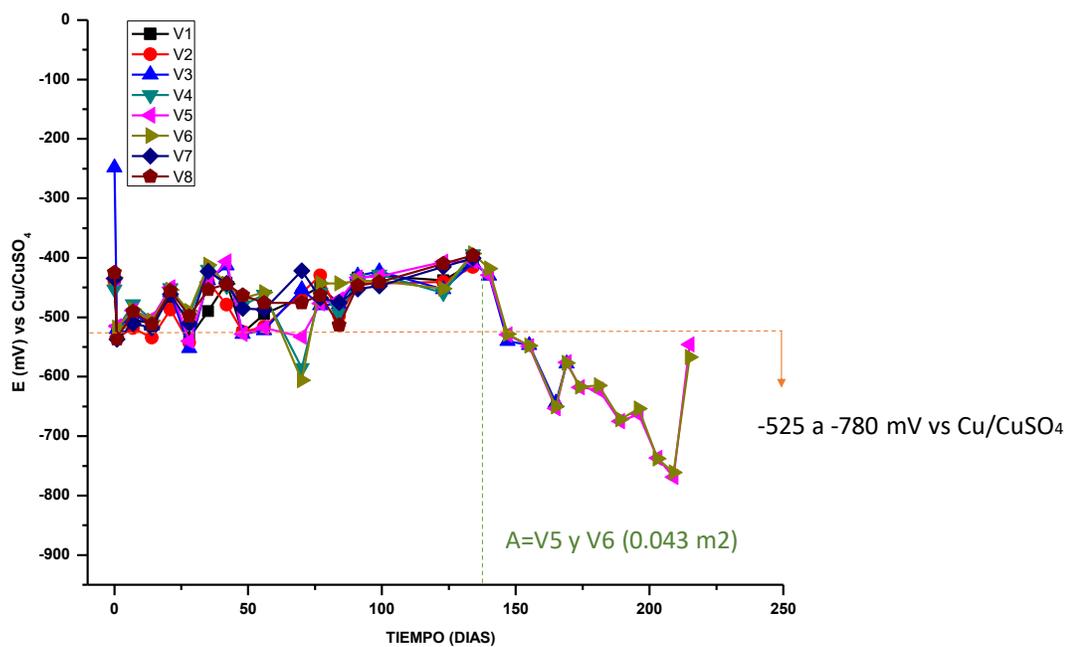


Figura 3.10. Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 6, fabricada con adición de iones cloruro

Con la finalidad de conocer el comportamiento con un área a proteger inicial de 0,043 m² se decidió retirar **el ánodo GL L6 de la losa 6 el día 215 y reparar nuevamente la losa con un ánodo GL denominado GL L6-1**, empleando el mortero de reparación D. El monitoreo logrado se muestra en la Figura 3.11.

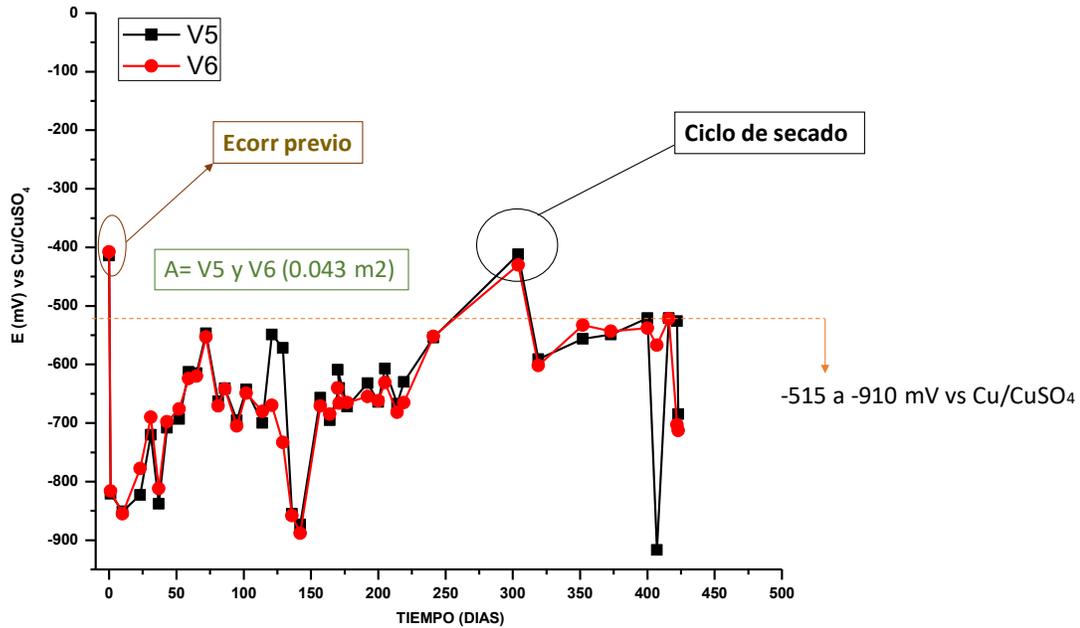


Figura 3.11. Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 6, fabricada con adición de iones cloruro

Para este caso, los potenciales del acero conectado al ánodo GL L6-1 en casi todas las mediciones resultaron en el rango de -515 y -910 mV vs Cu/CuSO_4 , solo el día 300 los potenciales fueron del orden del E_{corr} previo a la conexión del ánodo, dicho comportamiento se asocia con la falta de humedad en la losa y mortero de reparación, ya que en este tiempo la losa se mantuvo en ciclo de secado (valor señalado en círculo color negro).

3.2.4 Potencial de polarización de losa fabricada sin iones cloruros y con instalación de ánodo Gold

En la losa 8 se instaló el Ánodo Gold L8 con mortero de reparación A. El comportamiento de la losa 8 se muestra en la Figura 3.12. Posterior a la conexión de las ocho varillas al ánodo se observó un desplazamiento de potencial en sentido negativo mayor a 100 mV, este se mantuvo durante 230 días continuos de monitoreo, tanto en los ciclos de rociado con cloruro de sodio (NaCl) y secado.

Posterior a los 230 días de monitoreo, se observaron valores de potencial cercanos a -250 mV vs Cu/CuSO_4 e incluso más positivos que el potencial previo a la conexión del ánodo durante los ciclos de secado (marcados en círculo color negro), comportamiento asociado con la falta de humedad en el concreto y mortero de reparación, incrementando la resistencia eléctrica del mismo y disminuyendo el flujo de corriente del ánodo hacia las varillas. Sin embargo, en los

ciclos de rociado con agua de grifo los valores de potencial polarizado oscilaron entre -400 y -700 mV vs Cu/CuSO₄.

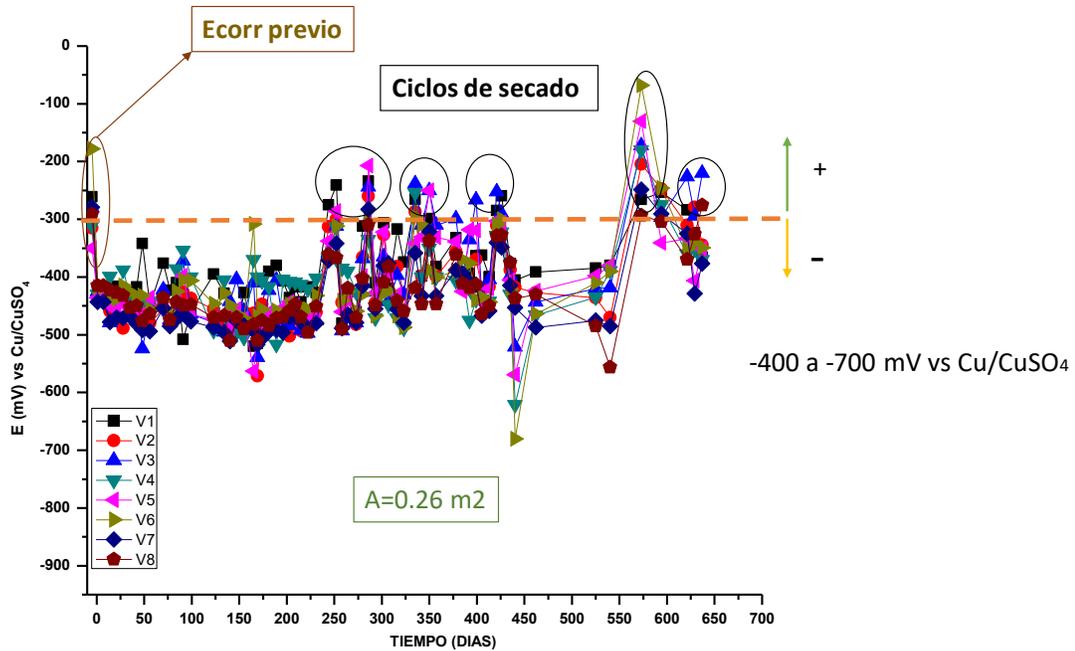


Figura 3.12 Potencial de polarización de las varillas embebidas en la losa 8, fabricada sin adición de cloruros

3.3 Potencial de corrosión de los ánodos

El potencial previo a la conexión del ánodo con las varillas de cada losa se muestra en **el tiempo cero** de la Figura 3.13. Los potenciales de los ánodos en todas las mediciones resultaron más negativos que -700 mV vs Cu/CuSO₄. Las mediciones se obtuvieron interrumpiendo la conexión eléctrica del ánodo con las varillas de acero correspondientes.

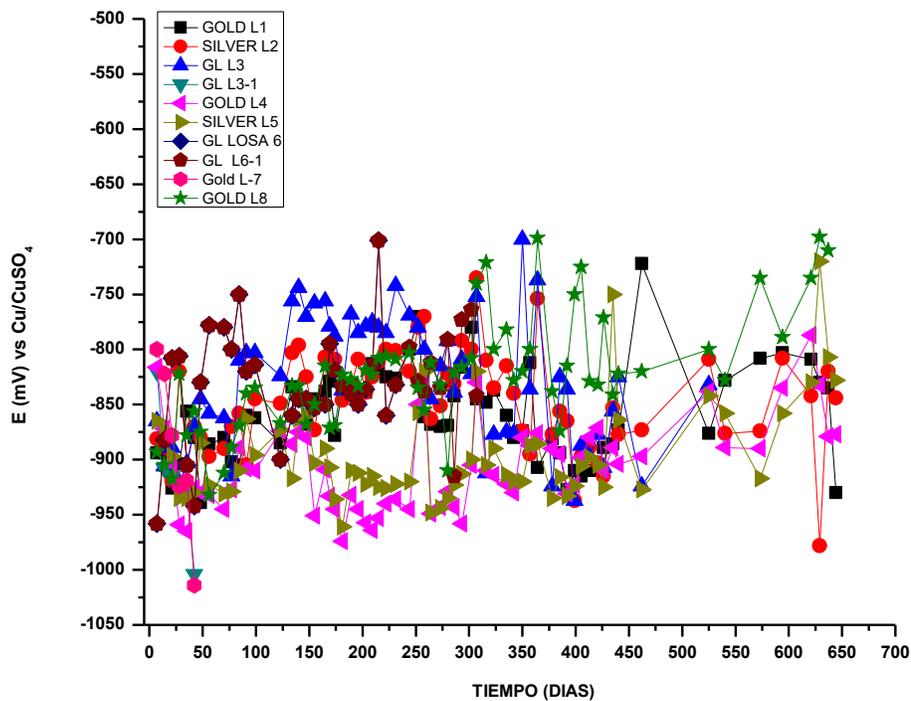


Figura 3.13. Potencial de corrosión de los ánodos galvánicos

3.4 Corriente galvánica

La corriente galvánica obtenida durante todo el monitoreo se muestra en la Figura 3.14. Es importante mencionar que las mediciones se obtuvieron conectando una terminal del multímetro al conjunto de las varillas protegidas y la otra terminal al ánodo galvánico correspondiente.

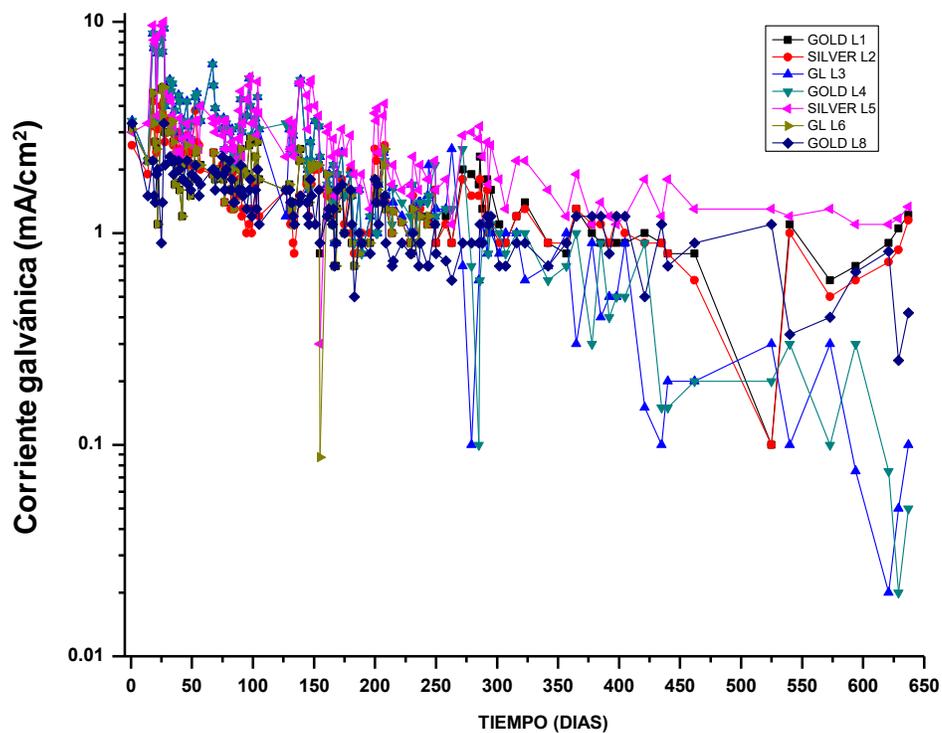


Figura 3.14. Corriente galvánica de las losas

La corriente galvánica obtenida durante los primeros y últimos 100 días de monitoreo se muestra en la Figura 3.15. Esto con la finalidad de conocer la tendencia de los valores respecto al paso del tiempo.

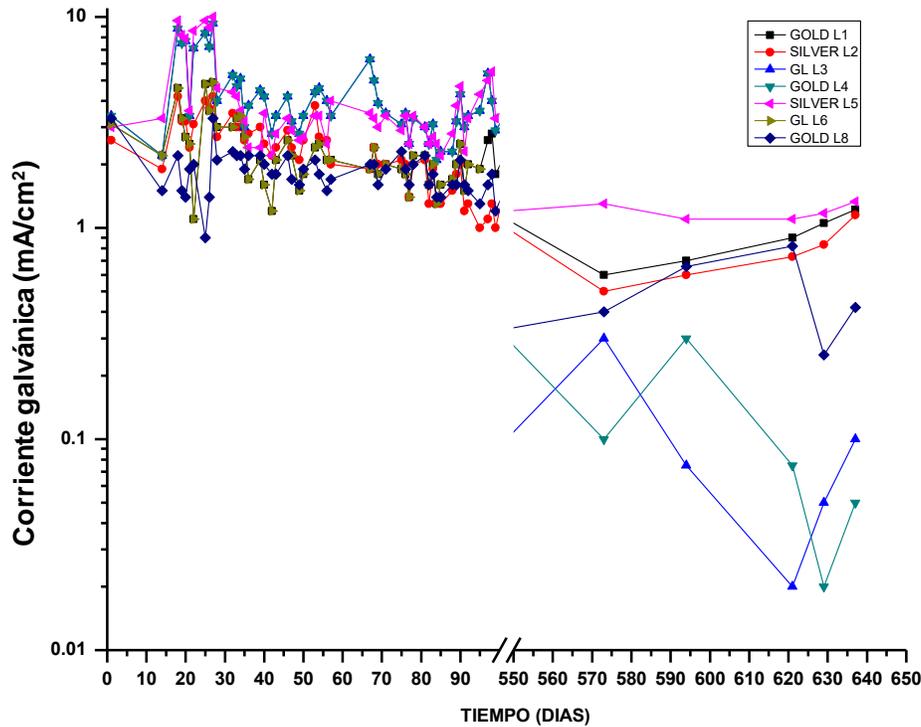


Figura 3.15. Corriente galvánica durante los primeros y últimos 100 días de monitoreo

El orden de la corriente galvánica inicial de todas las losas fue ~ 3 mA/cm². Para la losa 1 con ánodo Gold L1 la corriente galvánica inicial fue de 3.1 mA/cm² y después de 600 días resultó de 1.22 mA/cm². En la losa 2 los valores variaron de 2.6 a 1.15 mA/cm²; en la losa 3 de 3.4 y 0.1 mA/cm², losa 4 de 3.4 a 0.05 mA/cm², losa 5 de 3 a 1.3 mA/cm², losa 6 de 3.1 a 1.3 mA/cm² y en la losa 8 de 3.3 a 0.4 mA/cm². En general se observó que las corrientes galvánicas con el paso del tiempo tendieron a valores menores que las iniciales.

La ficha técnica de la tecnología SENTINEL menciona que proporcionan una protección de corriente igual o mayor a 1.0 miliamperios después de 90 días, valores que coinciden con los obtenidos en esta investigación. Posterior a esta edad, se observó que los valores disminuyeron con el paso del tiempo, como se observa en las Figuras 3.14 y 3.15. Investigaciones reportadas asocian este comportamiento con factores tales como: temperatura, humedad en el concreto, resistividad eléctrica del concreto, condición del ánodo y condición de la interfase ánodo/concreto [23-27]. En este caso se considera que el decaimiento de corriente es consecuencia de los cambios de condición en las que se mantuvieron las losas durante el período de evaluación de acuerdo con la Figura 2.2.

3.5 Potenciales de depolarización

Las mediciones de depolarización se realizaron a diferentes edades y se reportan en las próximas siete Tablas (Tabla 3.2 a 3.8).

3.5.1 Potenciales de depolarización de losas fabricadas con adición de cloruros y ánodos Gold

Losa 1

Los valores de la Tabla 3.2 marcados en color rojo, indican que la diferencia de potencial alcanzada para la varilla V5 de la losa 1 en algunas mediciones no se cumplió con el criterio de los 100 mV; sin embargo, considerando la Figura 3.3, se observa que en estos tiempos los potenciales polarizados resultaron más negativos respecto al E_{corr} , marcado en círculo y tiempo cero, indicando que la estructura estaba polarizada.

Tabla 3.2. Potenciales de depolarización de losa 1

L1	234 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO				371 DIAS CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl				441 DIAS CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl				541 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO			
	V3	V4	V5	V6	V3	V4	V5	V6	V3	V4	V5	V6	V3	V4	V5	V6
1 s	-420	-392	-433	-453	-537	-549	-546	-597	-520	-561	-570	-578	-550	-570	-491	-549
4 h	-282	-305	-407	-310	-409	-429	-501	-475	-338	-415	-465	-320	-397	-475	-364	-365
24 h	-214	-292	-382	-290	-322	-434	-491	-437	-376	-376	-421	-376	-374	-314	-404	-320
ΔE	206	100	51	163	215	115	55	160	144	185	149	202	176	256	87	229

Losa 4

En la losa 4, la varilla V3 no cumplió con el criterio de los 100 mV, valor marcado en color rojo de la Tabla 3.3. Este resultado se atribuye principalmente a la falta de humedad en la losa, ya que esta medición se realizó durante el ciclo de secado. Cabe mencionar que, de acuerdo con la Figura 3.4, en este tiempo la estructura estaba polarizada aun cuando el criterio de los 100 mV no se alcanzó.

Tabla 3.3. Potenciales de depolarización de losa 4

L4	234 DIAS				371 DIAS				441 DIAS				541 DIAS			
	CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO				CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl				CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl				CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO			
	V3	V4	V5	V6	V3	V4	V5	V6	V3	V4	V5	V6	V3	V4	V5	V6
1 s	-374	-491	-507	-547	-786	-702	-731	-805	-785	-613	-625	-740	-802	-680	-759	-712
4 h	-297	-397	-366	-403	-619	-553	-490	-545	-618	-472	-508	-441	-768	-560	-466	-422
24 h	-351	-362	-350	-387	-504	-515	-477	-512	-481	-462	-420	-420	-590	-452	-512	-350
ΔE	23	129	157	160	282	187	254	293	304	151	205	320	212	228	247	362

3.5.2 Potenciales de depolarización de losas fabricadas con adición de cloruros y ánodos Silver

Losa 2

Los valores de la Tabla 3.4 marcados en color rojo, indican que la diferencia de potencial alcanzada no cumplió con el criterio de los 100 mV, pero, de acuerdo con la Figura 3.5, el ánodo Silver mantuvo polarizada las varillas. Esto sustenta que el criterio de los 100 mV es solo una referencia, pero no debe determinar si el ánodo es funcional o no.

Tabla 3.4. Potenciales de depolarización de losa 2

L2	234 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO			371 DIAS CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl			441 DIAS CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl			541 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO		
	V3	V5	V6	V3	V5	V6	V3	V5	V6	V3	V5	V6
1 s	-427	-431	-452	-540	-552	-561	-580	-561	-565	-550	-520	-570
4 h	-366	-395	-329	-487	-544	-470	-367	-453	-338	-390	-550	-401
24 h	-328	-401	-284	-460	-522	-368	-364	-366	-327	-351	-458	-319
ΔE	99	30	168	80	30	193	216	195	238	199	62	251

Losa 5

En este caso, en todos los potenciales de depolarización mostrados en la Tabla 3.5 se cumplió con el criterio de los 100 mV [21], resultado atribuido a las propiedades del mortero de reparación empleado (base cemento:arena) descritas en la Tabla 3.7.

Tabla 3.5. Potenciales de depolarización de losa 5

L5	234 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO			371 DIAS CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl			441 DIAS CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl			541 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO		
	V3	V5	V6	V3	V5	V6	V3	V5	V6	V3	V5	V6
1 s	-499	-521	-497	-707	-701	-692	-604	-624	-621	-685	-670	-680
4 h	-395	-410	-242	-628	-619	-555	-477	-481	-443	-497	-448	-402
24 h	-380	-380	-247	-473	-500	-503	-428	-464	-403	-389	-380	-388
ΔE	119	141	250	234	201	189	176	160	218	296	290	292

3.5.3 Potenciales de depolarización de losas fabricadas con adición de cloruros y ánodos GL

Losa 3

En esta losa, excepto el valor marcado en color rojo de la Tabla 3.6, no cumplió con el criterio de los 100 mV este detalle se detectó únicamente en la varilla 3 (V3), resultado atribuido a la condición en la que se encontraba la losa, es decir, ciclo de secado.

Tabla 3.6. Potenciales de depolarización de losa 3

	234 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO		371 DIAS CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl		441 DIAS CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl	
	V5	V6	V5	V6	V5	V6
L3						
1 s	-431	-451	-833	-764	-805	-867
4 h	-388	-406	-615	-551	-529	-595
24 h	-381	-179	-517	-523	-496	-718
ΔE	50	272	316	241	309	149

Losa 6

En esta losa, excepto el valor marcado en color rojo de la Tabla 3.7, no cumplió con el criterio de los 100 mV este detalle se detectó únicamente en la varilla 5 (V5), resultado atribuido a la condición en la que se encontraba la losa, ciclo de secado.

Tabla 3.7. Potenciales de depolarización de losa 6

LOSA 6	149 DIAS CONDICIÓN EN ROCIADO CON NaCl		219 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO		296 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO	
	V5	V6	V5	V6	V5	V6
1 s	-865	-853	-865	-853	-560	-588
4 h	-575	-568	-575	-568	-460	-367
24 h	-500	-514	-500	-514	-518	-465
ΔE	365	339	365	339	42	123

3.5.4 Potenciales de depolarización de losa fabricadas sin adición de cloruros y ánodo Gold

Losa 8

En esta losa, en casi todas la depolarizaciones reportadas en la Tabla 3.8, se cumplió con el criterio de los 100 mV; en algunas mediciones no se alcanzó a cumplir este criterio, resultado atribuido a la falta de actividad del acero dado que la losa no fue fabricada ni rociada con cloruros. Aunado a esto, la norma SP 0290 considerada como referencia para estas mediciones, menciona que, si el potencial de corrosión o el potencial decaído es menos negativo que -200 mV vs Cu/CuSO₄, entonces el acero está pasivo y no se necesita una polarización mínima. Esto es reforzado con el comportamiento mostrado en las Figuras 3.12 y 3.17.

Tabla 3.8. Potenciales de depolarización de losa 8

L8	123 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO								174 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO								234 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO							
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
1 s	-409	-380	-392	-374	-377	-476	-367	-450	-368	-451	-354	-419	-353	-445	-339	-428	-296	-333	-417	-390	-390	-398	-476	-336
4h	-167	-216	-193	-249	-203	-272	-198	-274	-242	-262	-210	-289	-177	-251	-190	-251	-137	-234	-207	-255	-227	-282	-212	-210
24h	-95	-126	-144	-124	-186	-179	-202	-203	-200	-174	-207	-222	-182	-182	-172	-191	-64	-119	-160	-188	-216	-243	-201	-181
ΔE	314	254	248	250	191	297	165	247	168	277	147	197	171	263	167	237	232	214	257	202	174	155	275	155
371 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE ROCIADO (AGUA DE GRIFO)								441 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE ROCIADO (AGUA DE GRIFO)								535 DIAS CONDICIÓN EN CICLO DE SECADO								
1 s	-294	-353	-174	-377	-419	-413	-402	-402	-432	-425	-415	-577	-545	-573	-465	-473	-219	-360	-376	-360	-320	-370	-360	-515
4 h	-213	-266	-138	-305	-191	-325	-309	-323	-231	-207	-202	-256	-294	-276	-249	-277	-173	-136	-178	-186	-188	-228	-210	-138
24h	-185	-262	-136	-296	-153	-331	-329	-316	-202	-244	-170	-247	-217	-235	-223	-264	-69	-72	-111	-133	-128	-327	-155	-128
ΔE	109	91	38	81	266	82	73	86	230	181	245	330	328	338	242	209	150	288	265	227	192	43	205	387

La Figura 3.17 muestra el comportamiento de Losa 9 (Blanco sin cloruros) y potenciales de polarización de la Losa 8 (fabricada sin cloruros y con ánodo Gold). Se observa que los potenciales de la Losa 8 son más negativos vs a la Losa 9, desplazamiento ocasionado por el ánodo galvánico. Algunas mediciones de las varillas de la Losa 9 presentaron valores más negativos que -350 mV vs Cu/CuSO₄, valores asociados con los periodos de rociado con agua de grifo mostrados en la Figura 2.2.

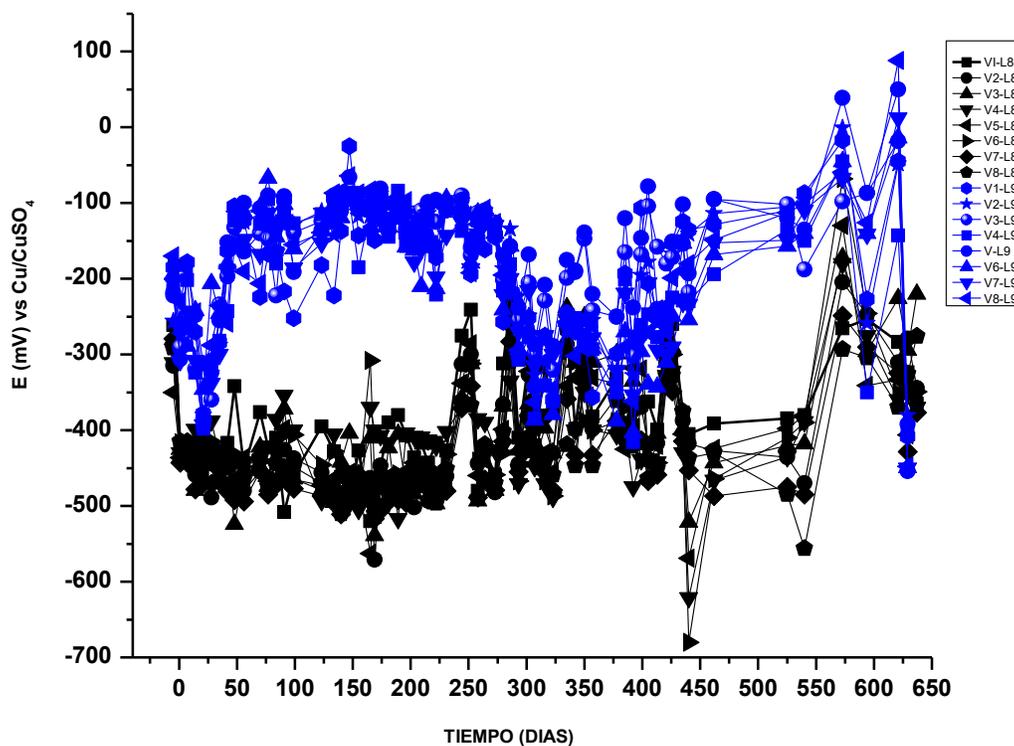


Figura 3.17. Potenciales de corrosión de la Losa 8 y Losa 9 fabricadas sin adición de cloruros

3.6 Resistividad eléctrica de las losas y morteros de reparación A y D

La Tabla 3.9 muestra los promedios de valores de resistividad eléctrica obtenidos a diferentes edades y en condición húmeda de 10 muestras cúbicas de cada mortero de reparación: A y D, del resto de los morteros no se realizaron mediciones por falta de disponibilidad de muestras por parte del cliente. También se presentan los valores de muestras cilíndricas (5) de las losas fabricadas con y sin adición de iones cloruro.

Tabla 3.9. Resultados de resistividad eléctrica de las losas y morteros de reparación A y D.

Edad (días)	7	14	21	28	99	231	238	420	650	660
Resistividad eléctrica (KΩ*cm)										
Losa sin Cl	2.44	3.52	3.85	4.66	4.75	5.4	10.99	10.6	9.03	11.78
Losa con Cl	1.6	2.59	2.97	3.52	3.38	4.19	9.42	9.03	9.03	10.6
Mortero A	4.1	4.67	5.78	6.1	8.04	8.92	9.83	14.33	14.33	14.34
Mortero D	1.4	2	2.27	2.75	6.42	6.83	11.83	9	11.33	11.40

Con base en los valores reportado en la Tabla 3.7, el orden de resistividad eléctrica máxima obtenida con el mortero A fue del orden de 14 KΩ*cm, mientras el mortero con menor resistividad resultó el mortero D con valores cercanos a 11 KΩ*cm. Tomando en cuenta la recomendación de Ávila y Genescá [28] que mencionan que uno de los factores que más puede limitar la utilización del Zn es la resistividad del medio agresivo y sugieren que su empleo quede limitado a las resistividades inferiores a los 5 000 ohms-cm, el mortero que se aproxima más a este valor resultó el mortero D, aunque posterior a 28 días de edad los valores de resistividad incrementaron.

Por otro lado, considerando la ficha técnica del mortero A, que reporta 8,200 ohm/cm a 28 días considerando que está formulado con baja resistividad para ser compatible con dispositivos de protección catódica y comparando dicho valor con los obtenidos en el laboratorio del IMT, este valor se alcanzó después de ~231

días, situación que favorece el comportamiento del mortero A como material de reparación para los ánodos galvánicos.

A partir de la Tabla 3.7, se observa que el orden de resistividad eléctrica máxima para el caso de los cilindros de la mezcla sin cloruros fue alrededor de $12 \text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$, mientras para las muestras con cloruros resultó del orden de $11 \text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$; en ambos casos los valores fueron similares.

Tomando en cuenta los valores de resistividad eléctrica de los dos morteros de reparación empleados (A y D) y las losas donde se instalaron los ánodos, el orden de la resistividad eléctrica fue similar.

4 Conclusiones

- Considerando los potenciales de polarización y depolarización, se concluye que la humedad existente en las losas juega un papel importante en el nivel de polarización que se alcance. Aun cuando los potenciales de polarización no sean muy negativos y la diferencia de los 100 mV no se alcance, no necesariamente indica que el sistema de protección sea ineficiente ya que, al no existir humedad suficiente, la actividad del acero se reducirá y por consiguiente la demanda de corriente y la polarización que se alcance será pequeña.
- Con base en los resultados obtenidos, se concluye que los ánodos galvánicos de la línea Sentinel son una tecnología adecuada para la reparación de estructuras de concreto reforzado con problemas de corrosión y como sistema preventivo, siempre y cuando el área a proteger sea la adecuada y calculada mediante diseño, el mortero de reparación sea seleccionado y aplicado de manera correcta.
- En esta investigación, el área de acero determinada como la adecuada para lograr una protección efectiva ante la corrosión mediante el ánodo Gold resultó de 0,086 m², para el ánodo Silver 0,064 m² y para el ánodo GL 0,043 m². Se recomienda tomar en cuenta esto, para determinar el espaciamiento en la colocación de los ánodos.
- Para el caso del uso del ánodo Gold como sistema preventivo protegió satisfactoriamente un área de acero de 0,26 m².
- El criterio de los 100 mV debe considerarse como una medición complementaria para valorar si un sistema de protección catódica por ánodos galvánicos es eficiente o no, ya que este criterio se refiere específicamente a evaluar sistemas de protección catódica por corriente impresa.

4.1 Recomendaciones

Se recomienda que previo a la selección o aplicación del mortero elegido como material de reparación, donde se embeberán los ánodos galvánicos, se conozcan los valores de resistividad eléctrica, espesor máximo de aplicación y utilizar un sistema de curado adecuado conforme a lo especificado en la ficha técnica del mismo.

Bibliografía

- 1.-M-82 “Protocol to Evaluate the Performance of Corrosion Mitigation Technologies in Concrete Repairs” (2014) United States Department of the Interior Bureau of Reclamation Denver Federal Center Technical Service Center Materials Engineering and Research Laboratory Denver, Colorado 80225-0007.
- 2.- Informe final del proyecto EE 04/16: Investigación del desempeño de ánodos de sacrificio localizados en la rehabilitación de estructuras de concreto con fecha del 20 de diciembre de 2016.
- 3.- Informe final del proyecto EE 09/17: Investigación del desempeño de ánodos de sacrificio localizados en la rehabilitación de estructuras de concreto fase B con fecha 28 de diciembre de 2017.
- 4.- C. Christodoulou, C.I. Goodier, S.A. Austin, G.K. Glass, J. Webb. “A new arrangement of galvanic anodes for the repair of reinforced concrete structures”. *Construction and building materials* 50(2014) 300-307.
- 5.- Aris Mahasiripan, Somnuk Tangtermsirikul, Pakawat Sancharoen “A study of different sacrificial anode materials to protect corrosion of reinforcing steel in concrete” Vol.19, No. 4, October-December 2014.
- 6.- David W. Whitmore and J. Chris Ball. “Using Galvanic Anodes in Shotcrete Repairs”. *Shotcrete. Summer 2014*.
- 7.- Moe M.S. Cheung, Chong Cao. “Application of cathodic protection for controlling macrocell corrosion in chloride contaminated RC structures”. *Construction and building materials* 42(2013) 199-207.
- 8.- Keir Wilson, Mohammed Jawed, Vitalis Ngala. “The selection and use of cathodic protection systems for the repair of reinforced concrete structures”. *Construction and building Materials* 39 (2013) 19-25.
- 9.-Gareth Glass, Christian Chistodoulou and Steven Holmes. “Protection of steel in concrete using galvanic and hydrid electrochemical treatments”.ISBN 978-0-415-89952-9.
- 10.- Elena Redaelli, Federica Lollini, Luca Bertolini. “Cathodic protection with localised galvanic anodes in slender carbonated concrete elements”. *Materials and Structures*.

- 11.- Elena Redaelli, Federica Lollini, Luca Bertolini. "Elements in atmospheric conditions" *Construction and Building Materials* 39 (2013) 95-104.
- 12.- Sergi G. Ten-year results of galvanic sacrificial anodes in steel reinforced concrete. *Materials and corrosion* 2011; 62:98–104. No 2.
- 13.- S.P Holmes, D.G. Wilcox, P.J. Robins, G.K. Glass, A.C. Roberts. "Responsive behavior of galvanic anodes in concrete and the basis for its utilization". *Corrosion Science* 53(2011) 3450-3454.
- 14.- Oladis Trocónis de Rincón, Yolanda Hernandez-López, Angélica del Valle-Moreno, Andrés A. Torres-Acosta, Freddy Barrios, Pablo Montero, Patricia Oidor-Salinas, José Rodríguez Montero. "Environmental influence on point anodes performance in reinforced concrete". *Construction and Building Materials* 22 (2008) 494-503.
- 15.- Hassan Malik Md Ridzuan BinMd Hamid Esa Haruman, (2008), "Effect of pH and temperature on the performance of zinc anodes for a risk-based storage tank management approach", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 55 Iss 5 pp. 243-249.
- 16.- K. Wang, P.R.L. Helene, P.J.M. Monteiro "Potential use of zinc in the repair of corroded reinforced concrete" *Cement & Concrete Composites* 28 (2006) 707-715.
- 17.- A.M. Hassanein, G.K. Glass, N.R. Buenfeld. "Protection current distribution in reinforced concrete cathodic protection systems". *Cement & concrete composites* 24 (2002) 159-167
- 18.- L. Bertolini, M. Gastaldi, M.P. Pedferri, E. Redaelli. "Prevention of steel corrosion in concrete exposed to seawater with submerged sacrificial anodes" *Corrosion Science* 44 (2002) 1497-1513.
- 19.- L. Bertolini, F. Bolzoni, A. Cigada, T. Pastore and P. Pedferri "Cathodic protection of new and old reinforced concrete structures" *Corrosion Science*, Vol. 35, Nos. 5-8, pp. 1633-1639, 1993.
- 20.-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 (2000). 3a Edición
- 21.- ASTM C876 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete (2015)
- 22.- SP0290 Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures (2007).

- 23.- Brousseau R. and Baldock B. Laboratory Study of Sacrificial Anodes for Reinforced Concrete Corrosion 1998, Vol. 54, paper No. 3 pp. 241-245.
- 24.- Lee S.K, Sigonney Y.M. and Hartt W.H. Characterization of the Arc Sprayed Zinc Coating-Concrete Interface by Electrochemical Techniques, Corrosion 1999, NACE International Conference, paper 552. pp. 19.
- 25.- Bullard S., Covino Bernard, Cramer.S., Holcomb G., and Russell J. Alternative consumable anodes for cathodic protection of reinforced concrete bridges. Corrosion 1999. Paper no. 544.
- 26.- Zecho M., Menzel K, Nürnberger U. The performance of thermally sprayed zinc coatings as anode for cathodic protection on reinforced concrete. Otto-G raf-Journal Vol. 9, 1998. pp. 164-184.
- 27.- Bertolini L., Bolzoni F., Pedferri P. Cathodic protection and cathodic prevention in concrete: principles and applications. Journal of applied electrochemistry 28, 1998. pp. 1321-1331.
- 28.- Ávila, J. y Genescá J., (2003). Más allá de la herrumbre II; 3ª Ed. La ciencia para todos. México: pp. 48-81



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

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