



EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO LOCALIZADOS Y EMPLEADOS EN LA REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO: RESULTADOS PRELIMINARES

José Trinidad Pérez Quiroz
Mariela Rendón Belmonte
Miguel Martínez Madrid
Andrés Torres Acosta
Nancy Leticia Araujo Arreola
Lizbeth Rivera Rivera

**Publicación Técnica No. 501
Sanfandila, Qro, 2017**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Evaluación del desempeño de ánodos de sacrificio
localizados empleados en la rehabilitación de
estructuras de concreto: resultados preliminares**

Publicación Técnica No. 501
Sanfandila, Qro, 2017

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. José Trinidad Pérez Quiroz, las Ing. Nancy Leticia Araujo Arreola, Lizbeth Rivera Rivera y la Dra. Mariela Rendón Belmonte.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna **EI 03/16: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO LOCALIZADOS EMPLEADOS EN LA REHABILITACION DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO.**

Se agradece la colaboración de Dr. Miguel Martínez Madrid y del Dr. Andrés Torres Acosta Coordinador e Investigador del Instituto Mexicano del Transporte respectivamente.

Contenido

Índice de tablas.....	v
Índice de figuras.....	vii
Sinopsis	¡Error! Marcador no definido.
Abstract.....	¡Error! Marcador no definido.
Resumen ejecutivo.....	¡Error! Marcador no definido.
Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
1 Antecedentes	3
1.1 Corrosión en estructuras de concreto armado.	3
1.1.1 Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las acero de refuerzo o varillas.	5
1.1.1.1 Iones Cloruro.....	5
1.1.1.2 Carbonatación.....	6
1.1.2 Tipos de corrosión.	6
1.1.2.1 Corrosión uniforme.....	7
1.1.2.2 Corrosión localizada.....	7
1.2 Control de la corrosión.	8
1.2.1 Fundamentos de la protección catódica.	8
1.2.1.1 Protección catódica por corriente impresa.	9
1.2.1.2 Protección catódica con ánodos galvánicos.....	11
1.2.2 Criterios de protección catódica.....	13
1.3 Métodos de evaluación para determinar la presencia de corrosión	15
1.3.1 Medición de potenciales.	15
1.3.1.1 Criterios de Evaluación.	15
1.3.2 Medición de velocidad de corrosión.....	16
1.3.2.1 Criterios de Evaluación.	16
1.3.3 Resistividad eléctrica.	16
1.3.3.1 Criterios de Evaluación.....	16
2 Método Experimental.....	17
2.1 Fabricación de viga.	17
2.1.1 Diseño de viga	17
2.1.2 Proceso de construcción.	17
2.2 Mediciones	18

2.2.1	Medición de pruebas electroquímicas a viga	19
2.2.1.1	Medición de potenciales.....	19
2.2.1.2	Medición de corriente galvánica.....	20
2.3	Caracterización del mortero del ánodo por Difracción de rayos X (DRX).	21
3	Resultados	23
3.1	Resultados de pruebas electroquímicas de viga.....	23
3.1.1	Resultados de viga de concreto.....	23
3.1.1.1	Potencial de corrosión de acero de refuerzo.....	23
3.1.1.2	Potencial de corrosión de ánodos.....	26
3.1.1.3	Corriente galvánica	26
3.2.1	Resultados de Difracción de rayos X.....	28
4	Conclusiones	29
	Bibliografía.....	31

Índice de tablas

Tabla 1.1. Valor crítico de cloruros en concreto reforzado	5
Tabla 1.2. Ventajas y limitaciones de la protección catódica con corriente impresa	10
Tabla 1.3. Serie de Fuerza Electromotriz	11
Tabla 1.4. Ventajas y limitaciones de la protección con ánodos galvánicos ¹⁶	13
Tabla 1.5. Criterio de valoración de potenciales del acero en concreto vs Cu/CuSO ₄ .	15
Tabla 1.6: Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil.	16
Tabla 1.7: Criterios de evaluación para la resistividad eléctrica	16

Índice de figuras

Figura 1.1. Estado natural de la acero de refuerzo en el concreto	3
Figura 1.2. Condiciones para que suceda el fenómeno de corrosión	4
Figura 1.3. Diagrama de vida útil de una estructura de concreto	4
Figura 1.4. Tipos más comunes de corrosión en estructuras de concreto reforzado	7
Figura 1.5. Diagrama potencial-pH para el Hierro (Fe)	9
Figura 1.6. Esquema de protección catódica con corriente impresa de una tubería enterrada	10
Figura 1.7. Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio	12
Figura 1.8. Equivalencia entre escalas de potencial relativas a electrodos de referencia utilizados en protección catódica	14
Figura 2.1. Diseño de viga.	17
Figura 2.2. a) Molde de madera, b) y c) Ubicación de ánodos en acero de refuerzo, d) Unión de cable eléctrico a varilla.	18
Figura 2.3 a. Ubicación de los puntos de medición del potencial de corrosión	19
Figura 2.3 b. Medición de potencial de acero de refuerzo	19
Figura 2.4. Medición de potencial de ánodo	20
Figura 2.5. Medición de potencial de protección	20

Figura 3.1. Muestra los valores de potencial de corrosión y el inicio del funcionamiento del sistema de protección catódica.	23
Figura 3.2: Muestra el funcionamiento del sistema de protección aplicando el criterio de depolarización de los 100 mV.	25
Figura 3.3: Muestra los valores de potencial de corrosión de los ánodos	26
Figura 3.4. Muestra las lecturas de corriente galvánica del sistema de protección catódica	27
Figura 3.5. Muestra el uso de Gecor 8 para medir la efectividad de la protección catódica.	27
Figura 3.6: Espectro obtenido del ánodo empleado en este trabajo.	28

Sinopsis

Esta investigación reporta el rendimiento de ánodos de sacrificio discretos utilizados en la rehabilitación de estructuras de concreto. Para la evaluación de los ánodos se realizaron prismas de concreto armado con dimensiones de 0.2 x 0.2 x 1.0 m. El monitoreo consistió en mediciones del potencial de corrosión del acero de acuerdo con ASTM C876, mediciones de la velocidad de corrosión según ASTM G 59 y STP 906. Estas técnicas generan información como potencial de corrosión (E_{corr}), corriente de corrosión (i_{corr}), resistencia eléctrica (R_e), potencial de protección ($E_{protección}$) y corriente galvánica (I_{galv}).

Los resultados preliminares obtenidos indican que el sistema de protección catódica (según UNE-EN 12696 e ISO 12696) funciona, siempre y cuando la muestra se mantenga húmeda y el área protegida de la barra de refuerzo sea igual al área del ánodo. Sin humedad, la resistividad del concreto aumenta, lo que reduce la corrosión del acero y, en consecuencia, la demanda de corriente se reduce; por lo tanto, se modifica la efectividad de la protección.

Para recomendar su uso en la rehabilitación de estructuras de concreto dañadas por corrosión, es necesario continuar con estas investigaciones para determinar la eficiencia a largo plazo de los ánodos puntuales, así como bajo diferentes condiciones de operación.

Abstract

This research reports the performance of localized sacrificial anodes used in the rehabilitation of concrete structures.

For the evaluation of the anodes reinforced concrete prisms with dimensions of 0.2 x 0.2 x 1.0 m were made. The monitoring consisted of measurements of corrosion potential of the steel in accordance with ASTM C876, corrosion rate measurements according to ASTM G 59 and STP 906. These techniques generated electrochemical information such as corrosion potential (E_{corr}), corrosion current (i_{corr}), electrical resistance (R_e), protection potential ($E_{\text{protection}}$) and galvanic current (I_{galv}).

The preliminary results obtained indicate that the cathodic protection (according to UNE- EN 12696 and ISO 12696) system works, as long as the sample is kept moistened and the protected area of the rebar equals at least the same area of the protective anode. In non-humidity conditions the resistivity of the concrete increases, thus reducing the steel corrosion and consequently the current demand is reduced; thus the effectiveness of the anodic protection will be reduced. To recommend their use in the rehabilitation of corrosion-damaged concrete structures it is necessary to carry on with these investigations in order to determine the long-term efficiency of the point anodes as well as under different operating conditions.

Resumen ejecutivo

Esta investigación está dividida en la introducción, que provee información en relación con el panorama del proyecto incluyendo problema, soluciones y metodología existentes relacionados con el trabajo de investigación. El capítulo 1 antecedentes el cual inicia con la revisión de literatura que describe la teoría sobre la degradación de las estructuras de concreto, las principales formas de corrosión que sufren éstas y los fundamentos del control de la corrosión. El capítulo 2 corresponde a la descripción del desarrollo experimental que ilustra la fabricación de muestras y las metodología empleada para realizar el monitoreo de potenciales de corrosión, corriente galvánica, potenciales con los ánodos conectados al acero y medición de la protección catódica con el equipo Gcor 8. El capítulo 3 presenta los resultados y la discusión del trabajo de investigación donde se presentan gráficas con información que sugiere que el sistema de protección funciona según los criterios de las normas NACE, ISO y UNE. El capítulo 4 contiene las conclusiones encontradas de acuerdo con los resultados obtenidos, y el apartado que corresponde a las referencias bibliográficas.

Introducción

El diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de resistencia mecánica; gracias a este método se han logrado tener estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio¹. Sin embargo, se han encontrado problemas en la infraestructura de concreto relacionados con el ambiente en el cual se encuentra la estructura por ejemplo: carbonatación en el caso del concreto en ambientes urbanos e industriales y corrosión del acero debido a iones cloruro en ambientes marinos/salobres, para los cuales no están diseñadas las estructuras de concreto².

El fenómeno de corrosión del acero, en estructuras de concreto armado, se reconoció por primera vez a finales de la década de 1960, desde entonces muchos métodos se han desarrollado con la intención de prevenir la corrosión, estos métodos se pueden dividir en cuatro categorías diferentes, en función de cómo protegen³:

- Alternativa de refuerzo y re-diseño de elementos de concreto.
- Métodos barrera.
- Métodos electroquímicos.

Protección catódica por corriente impresa (PCCI).

Protección catódica por ánodos de sacrificio o galvánicos localizados (PCAG).

Inhibidores de corrosión.

Extracción electroquímica de iones cloruro.

Realcalinización electroquímica.

- Rehabilitación de estructuras de concreto reforzado con nuevos materiales.

El objetivo de una “reparación” consiste en restaurar o reforzar alguna propiedad específica cómo: la durabilidad, resistencia estructural, funcionalidad o apariencia. La gama de técnicas de rehabilitación es amplia y diversa, de tal manera que algunas son utilizadas sobre el acero y otras en el concreto, o sobre ambos materiales⁴. Cuando se interviene una estructura que presenta deterioro por corrosión, se cuenta con tres estrategias a elegir.

1. La primera consiste en restaurar, significa remover todas las partes deterioradas y reemplazar por materiales nuevos, evidentemente representando un gran volumen de trabajo y costos.
2. La segunda estrategia consiste en mantener la estructura en el estado que se encuentra, por lo general ésta es la opción comúnmente adoptada puesto que solo implica hacer pequeños parches evitando que la corrosión se propague.
3. La tercera estrategia radica en implementar tratamientos capaces de mantener niveles bajos en la velocidad de corrosión del acero.

En los dos últimos casos es donde la aplicación de técnicas como protección catódica, extracción electroquímica de cloruros y realcalinización tienen mayor aceptación. La confirmación de que las estructuras de concreto se corroen y necesitan repararse con sólo 10, 20 o 30 años de servicio, es una realidad y cada vez más la normativa dedica capítulos especiales a la durabilidad de las estructuras de concreto, lo que hace necesaria la evaluación de nuevas propuestas de sistemas de protección antes de aplicarlos en la rehabilitación de estructuras⁵⁻⁶.

Estas consecuencias no sólo afectan la integridad estructural, sino que también compromete la seguridad de las personas y propicia la depreciación del inmueble, debido a su deterioro estético y funcional. Esto conlleva a invertir una gran cantidad de dinero para reparar, reconstruir o sustituir estructuras dañadas por corrosión. Por ello, se detecta la necesidad de desarrollar sistemas para controlar y prevenir el proceso de corrosión en la acero de refuerzo o varilla de refuerzo.

Este trabajo evalúa el funcionamiento de la protección catódica por ánodos localizados en un elemento de concreto.

1 Antecedentes

1.1 Corrosión en estructuras de concreto armado.

Las estructuras de concreto armado forman parte importante del desarrollo de un país, el concreto reforzado es la unión de materiales como cemento portland, agua, agregado fino (arena), agregado grueso (grava) y acero, trabajando en forma conjunta, en la cual el concreto resiste los esfuerzos de compresión y las barras de acero los de tensión⁷⁻⁸.

El concreto provee al refuerzo de una protección de doble naturaleza: por un lado, es una barrera física que lo separa del medio ambiente como se muestra la figura 1.1 y por otro una protección química contra la corrosión.

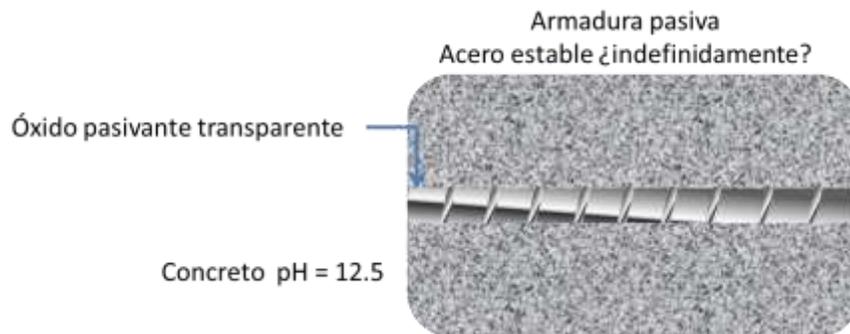


Figura 1.1. Estado natural de la acero de refuerzo en el concreto.

La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa protectora de óxido en la superficie del acero, impidiendo que éste continúe corroyéndose. A este fenómeno se le denomina pasividad, ya que la capa de óxido evita la propagación de la corrosión del acero. Esta alcalinidad del concreto se debe principalmente a los hidróxidos de calcio (CaOH_2) y, en menor medida, al sodio (NaOH) y potasio (KOH). Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores de 12 a 14⁶.

Sin embargo, la presencia de agentes agresivos como: iones cloruros, iones sulfatos y dióxido de carbono en la superficie de las acero de refuerzo o varillas, puede causar la degradación del concreto y en consecuencia, la pérdida de pasividad del acero y crear condiciones propicias para el inicio de la corrosión de éste.

Es importante resaltar que en ausencia total de oxígeno y humedad en el concreto la corrosión no es termodinámicamente posible; sin embargo, se ha reportado que a profundidades de dos mil metros se han determinado hasta dos partes por millón de oxígeno suficiente para iniciar un proceso de corrosión, aunque es factible que no se desarrolle con una velocidad significativa. Ambos factores tienen un carácter

ambivalente, pues cuando las varillas están pasivadas, una cierta cantidad de oxígeno y humedad puede servir para engrosar la capa pasivante, pero cuando las varillas se corroen activamente, actúan acelerando notablemente el ataque. A continuación se muestra un cuadro descriptivo de algunas condiciones para que se presente, o no, la corrosión del acero de refuerzo en el concreto (figura 1.2).

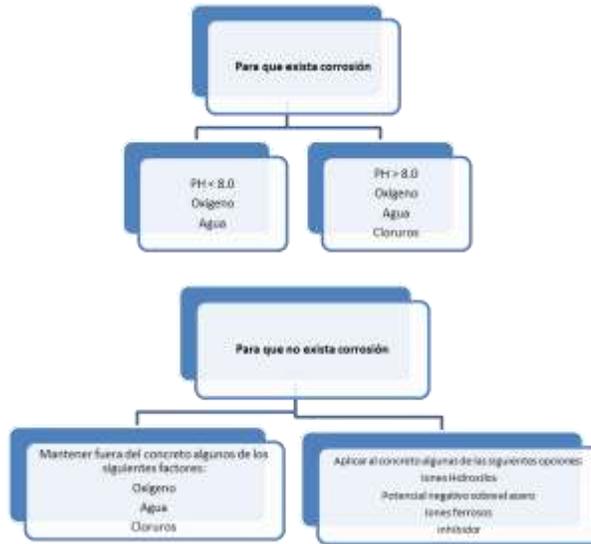


Figura 1.2. Condiciones para que suceda o no fenómeno de corrosión⁹.

El proceso de corrosión se divide claramente en dos períodos. En primer lugar, se tiene un proceso de iniciación el cual corresponde con el tiempo que tarda la carbonatación y/o los cloruros en provocar la despasivación (figura 1.3). Posteriormente, se inicia el período de propagación donde propiamente el acero se corroe hasta llegar a un deterioro inaceptable de seguridad, funcionalidad o estética de la estructura⁴.

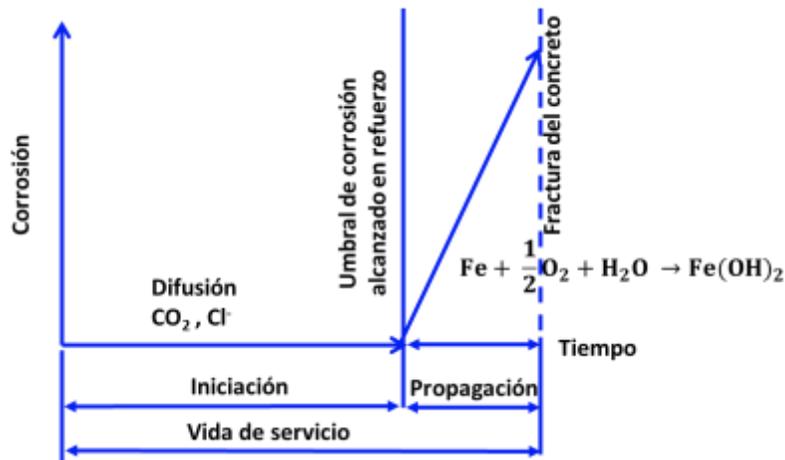


Figura 1.3. Diagrama de vida útil de una estructura de concreto.

1.1.1 Factores que afectan y desencadenan la corrosión del acero de refuerzo.

Existen varios factores que afectan, desencadenan o producen ambos efectos en el proceso de corrosión de las acero de refuerzo o varillas de tal manera que: la dosificación, la compacidad y la homogeneidad del concreto, así como el espesor de recubrimiento del concreto, el estado superficial de la acero de refuerzo o varilla y la humedad ambiental son los factores que afectan este proceso.

Por otra parte, los factores desencadenantes que con más frecuencia dan lugar a la corrosión de la acero de refuerzo o varilla son: presencia de segregación del concreto en contacto con la acero de refuerzo o varilla, altas tensiones mecánicas en el acero (creación de resquicios en fisuras), corrientes erráticas o de interferencia, contacto galvánico entre dos metales, iones despasivantes (Cl^- , SO_4^{2-}), CO_2 atmosférico o cualquier líquido que neutralice la alcalinidad, lixiviación por aguas blandas y las fisuras.

1.1.1.1 Iones Cloruros

Los cloruros pueden encontrarse en la masa del concreto por dos causas: porque los contengan las materias primas (aditivos, agua, cemento o agregados) o porque penetren desde el exterior al estar situada la estructura en ambientes marinos o estar sometida a la acción de sales de deshielo.

En el caso de los cloruros que pudieran ser adicionados durante el colado del concreto, los códigos de fabricación y de cálculo de estructuras de concreto de todos los países limitan su contenido en proporciones variables. En general, los límites que se aceptan son distintos al respecto, tal como se muestra en la tabla 1.1. Por ejemplo, en Europa y en muchos países latinoamericanos se admite para concreto armado 0,4% de acuerdo con el contenido de cemento; y para pretensado 0,2 % en la misma base.

Tabla 1.1. Valor crítico de cloruros en concreto reforzados.

PAÍS	NORMA	LÍMITE MÁX. DE Cl^-	REFERIDO A
USA	ACI 318	\leq a 0.15% en ambiente de Cl^-	cemento
USA	ACI 318	\leq a 0.3% en ambiente normal	cemento
USA	ACI 318	\leq a 1% en ambiente seco	cemento
INGLATERRA	CP-110	\leq a 0.35% al menos en un 95%	cemento
AUSTRALIA	AS 3600	\leq al 0.22%	cemento
NORUEGA	NS 3474	\leq al 0.6%	cemento
ESPAÑA	EH 91	\leq al 0.40%	cemento
EUROPA	EUROCODIGO 2	\leq al 0.22%	Cemento
JAPÓN	JSCE-SP 2	\leq al 0.6 kg/m ³	Concreto
BRASIL	NBR 6118	\leq al 0.05%	Agua

Las diferencias en las cantidades máximas de cloruros admitidas por los distintos códigos aparecen debido a la inexistencia de un límite único de aplicación general. Ello se produce tanto por las diferencias de características de los cementos, como por los tipos de aceros utilizados, así como por las distintas materias potencialmente suministradoras de los cloruros¹⁰.

En cuanto a los cloruros que penetran desde el exterior es necesario diferenciar el caso de ambientes marinos de aquellos donde se hace uso de las sales de deshielo, ya que sus proporciones relativas en el exterior del concreto pueden ser muy diferentes. Así, mientras el agua o ambiente marino contiene una cierta proporción constante de cloruros, en el caso de las sales de deshielo, su proporción exterior será proporcional a la cantidad de sales que se emplean al año debido a la frecuencia y duración de las heladas.

Tres son los aspectos relevantes a tener en cuenta en el caso de los cloruros que penetran desde el exterior: el tiempo que tardan en llegar hasta la acero de refuerzo o varilla, la proporción que induce la despasivación y la velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada la corrosión.

1.1.1.2 Carbonatación

La carbonatación es el proceso en el que el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto bajando abruptamente el pH de alcalino a neutro-ácido. Este cambio da lugar a la aparición de un frente que se denomina "carbonatado". Cuando éste llega hasta la acero de refuerzo o varilla, ésta se despasiva de forma uniforme.

El ingreso del CO_2 depende, principalmente, de la porosidad el concreto, humedad y contenido de materia alcalina carbonatable.

- a) Contenido de humedad del concreto: Si los poros están completamente secos, el CO_2 no podrá reaccionar y, si están completamente saturados, su penetración será lentísima debido a la baja solubilidad del CO_2 en el agua, Solo cuando los poros están parcialmente llenos de agua (entre 50 y 80%) es cuando se dan las condiciones óptimas para la carbonatación.
- b) Porosidad del concreto: Los poros capilares de menor tamaño están siempre saturados de humedad y por tanto inaccesibles a la carbonatación. Los hormigones porosos se carbonatan a gran velocidad.
- c) Contenido de materia alcalina carbonatable: El contenido de CaO y de alcalinos (sodio y potasio) son las materias susceptibles a carbonatarse. Cuanto mayor sea su contenido, menor será la velocidad de carbonatación.

1.1.2 Tipos de corrosión.

En el concreto armado, las formas que puede adoptar la corrosión del acero de refuerzo son diversas. Se han clasificado los diferentes tipos o formas de corrosión

de acuerdo con la apariencia física del ataque (ver figura 1.4). Según esto, en el caso del acero embebido en concreto, los diferentes tipos de corrosión que pueden presentarse son los siguientes:

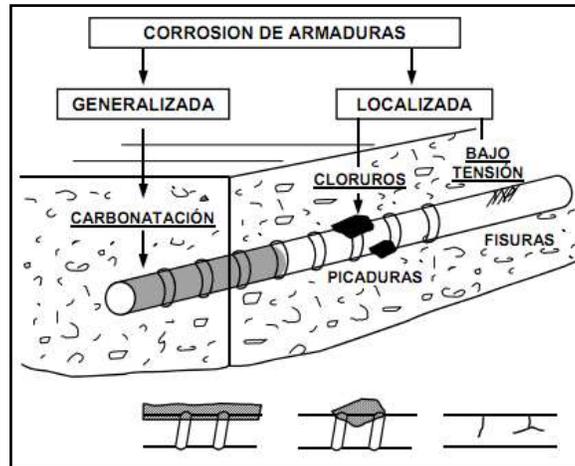


Figura 1.4. Tipos más comunes de corrosión en estructuras de concreto reforzado⁸.

1.1.2.1 Corrosión uniforme.

La corrosión uniforme es el resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva, resultante de la carbonatación del concreto y/o la presencia excesiva cantidad de iones cloruro. También puede ocurrir por efecto de la lixiviación del concreto producida por la percolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente ácidas.

1.1.2.2 Corrosión localizada.

Se da principalmente por la acción de agentes despasivantes como los iones cloruros¹¹. Los cloruros destruyen de forma puntual la película protectora pasiva formada sobre el acero por la alcalinidad del medio circundante. Estos iones pueden estar en el concreto porque se añaden a la mezcla y, por tanto, se hallan en el agua o en la arena, o porque penetran desde el exterior a través de la red de poros en estructuras de ambientes marinos. Aquí se pueden diferenciar varios tipos.

Corrosión por picadura: Se forma por la disolución localizada de la película pasiva. Se forma una celda de corrosión donde existe un área pasiva intacta, actuando como cátodo, en la cual se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, actuando como ánodo, en la cual ocurre la disolución del acero.

Corrosión en espacios confinados: Se presenta cuando no existe acceso de oxígeno a la varilla se crea una celda diferencial que induce la corrosión

Corrosión bajo tensión: Se caracteriza por ocurrir en aceros sometidos a severos esfuerzos en un ambiente altamente agresivo, lo que resulta en microgrietas, las cuales al progresar en su crecimiento pueden generar fracturas del metal¹².

1.2 Control de la corrosión.

Los métodos de prevención y control contra la corrosión se basan en eliminar alguno de los cuatro elementos que conforman la celda de corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor electrónico).

Existen tres maneras de lograr lo anterior y, por tanto, de luchar contra la corrosión:

1) Aislamiento eléctrico del material: Esto se logra mediante el empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente o aplicación de recubrimientos diversos; de esta forma, se puede aislar el metal del contacto directo con el medio agresivo agua, suelo y atmósfera.

2) Cambiando el sentido de la corriente en la pila de corrosión: Conectando eléctricamente, el acero con un metal más activo (cinc o magnesio) llegando a suprimir la corrosión del acero, ya que éste dejará de actuar como ánodo y pasará a comportarse como cátodo, dejando el papel de ánodo al metal más activo (cinc o magnesio). Este es el principio de la protección Catódica.

3) Polarización del mecanismo electroquímico: Esto se cumple eliminando el oxígeno disuelto, mediante la adición de ciertas sustancias llamadas inhibidores, las cuales pueden llegar a polarizar uno de los electrodos de la pila de corrosión y, por lo tanto, llegar a detener o cuanto menos disminuir sus efectos¹³.

Actualmente hay técnicas electroquímicas para proteger al acero de la corrosión; la realcalinización del concreto, la extracción de cloruros y la protección catódica¹⁴.

1.2.1 Fundamentos de la protección catódica.

La protección catódica (CP, por sus siglas en inglés) es el único sistema verdadero de control de corrosión, ya que elimina todos los ánodos de la superficie metálica haciéndola toda catódica.

Desde el punto de vista de la termodinámica, la protección catódica se basa en la existencia de un potencial y de una zona de inmunidad, en el correspondiente diagrama de estabilidad termodinámica o diagrama potencial-pH, más conocido como diagrama de Pourbaix. Si se considera este diagrama para el caso del hierro (ver figura 1.5), se puede observar en él que están perfectamente delimitadas las zonas de corrosión, inmunidad y pasividad.

- Zona de inmunidad: el metal se encuentra perfectamente preservado y estable bajo ciertas condiciones de potencial y pH.

- Zona de pasividad: aplica cuando el metal posee películas de óxidos e hidróxidos sobre su superficie que inhiben la corrosión.
- Zona de corrosión: el metal se disuelve activamente, siendo los productos de corrosión solubles¹⁵.

Para pasar el hierro a la zona de inmunidad hay que desplazar su potencial a un valor de 0.62 V con respecto al electrodo de referencia de hidrógeno, que equivale a 0.80 V con respecto al Ag/AgCl.

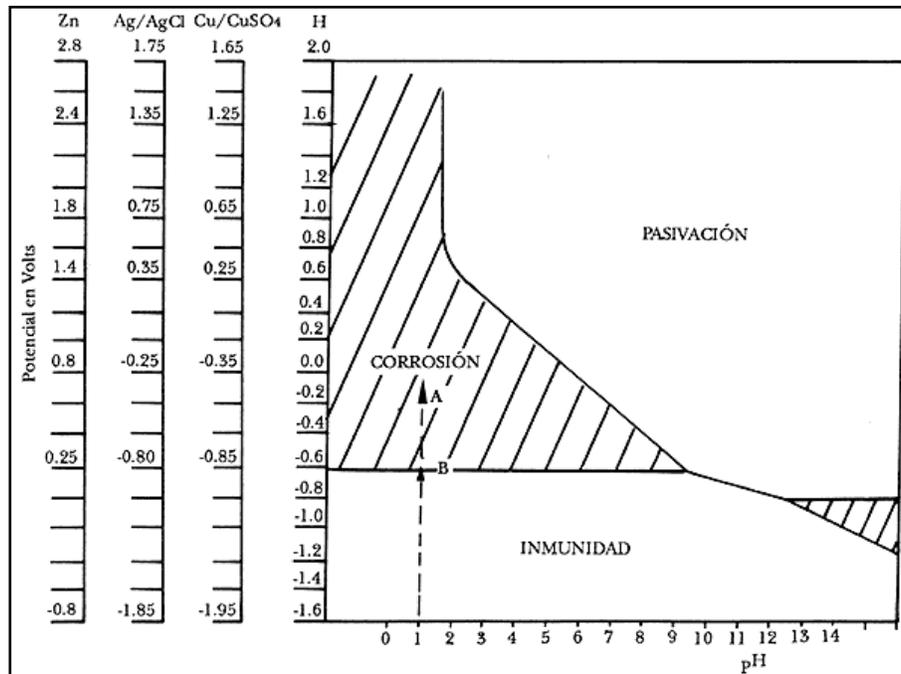


Figura 1.5. Diagrama potencial-pH para el Hierro (Fe)¹⁶.

Existen dos tipos de protección catódica: por ánodos de sacrificio o por corriente impresa.

1.2.1.1 Protección catódica por corriente impresa.

Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito (ver figura 1.6). Los electrodos auxiliares se hacen de aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, titanio-óxido de rutenio, entre otros. Es completamente indispensable la existencia del electrolito que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolytico.

Los componentes de un sistema de protección catódica por corriente impresa son:

1. Un ánodo dispensor.

2. Una fuente de corriente continua.
3. El cable portador de la corriente.

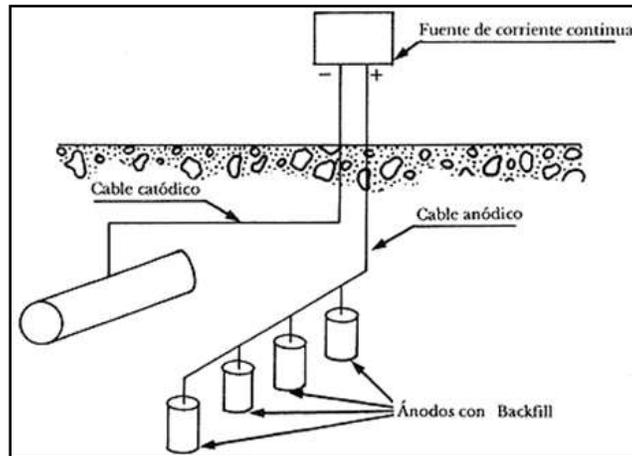


Figura 1.6. Esquema de protección catódica con corriente impresa de una tubería enterrada¹⁶.

Las ventajas y limitaciones que presenta el método de protección catódica por corriente impresa se resumen en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Ventajas y limitaciones de la protección catódica con corriente impresa¹⁶.

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none">• Puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y corriente.• Un ánodo o lecho anódico puede suministrar una gran cantidad de corriente.• Con una sola instalación se pueden proteger superficies muy grandes.• Potencial y corriente variables.• Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada.• Eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas.	<ul style="list-style-type: none">• Puede causar problemas de interferencia.• Está sujeto a rotura de la fuente de corriente.• Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento.• Requiere de una fuente de corriente continua.• Posibilidad de condiciones de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilización por la acción del hidrógeno.• Conexiones y cables sujetos a roturas.• Tiene un costo elevado.

1.2.1.2 Protección catódica con ánodos galvánicos.

La protección con ánodos galvánicos o de sacrificio implica la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero o que sea más susceptible a oxidarse que el metal de refuerzo, el cual actuaría como el ánodo. Tomando en cuenta la serie electroquímica de los metales (ver tabla 1.3), un metal tendrá carácter anódico respecto de otro si se encuentra debajo de él en dicha serie. El metal que actúa como ánodo se “sacrifica” (se disuelve) en favor del metal que actúa como cátodo (ver figura 1.7).

Tabla 1.3. Serie de Fuerza Electromotriz¹⁵.

Serie de fuerza electromotriz	
Reacción en equilibrio	E ^o H (volt)
$Au^{1+} + 1e \leftrightarrow Au$	+1.83
$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e \leftrightarrow H_2O$	+1.229
$Pt^{2+} + 2e \leftrightarrow Pt$	+1.2
$Ag^{1+} + 1e \leftrightarrow Ag$	+0.799
$Cu^{1+} + 1e \leftrightarrow Cu$	+0.522
$2H^{1+} + 2e \leftrightarrow H_2$	0.000 (Por definición)
$Pb^{2+} + 2e \leftrightarrow Pb$	-0.126
$Sn^{2+} + 2e \leftrightarrow Sn$	-0.136
$Ni^{2+} + 2e \leftrightarrow Ni$	-0.250
$Fe^{2+} + 2e \leftrightarrow Fe$	-0.440
$Zn^{2+} + 2e \leftrightarrow Zn$	-0.763
$Al^{3+} + 3e \leftrightarrow Al$	-1.662
$Mg^{2+} + 2e \leftrightarrow Mg$	-2.370

Los elementos que comúnmente se emplean para evitar que el acero de refuerzo sufra daño por corrosión son el zinc, el magnesio y el aluminio; ya que como se observa en la serie electromotriz, sus potenciales de media celda se encuentran por debajo del potencial del hierro.

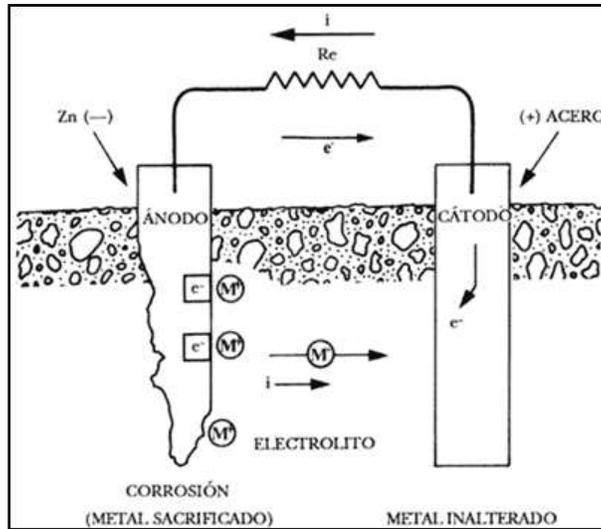


Figura 1.7. Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio¹⁶.

Las propiedades que debe reunir un material anódico son las siguientes:

- 1) Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo como para polarizar la estructura de acero (que es el metal que normalmente se protege) a -0.80 V. Sin embargo, el potencial no debe ser excesivamente negativo ya que eso motivaría un gasto innecesario de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre -0.95 V y -1.7 V.
- 2) Cuando el metal actúe como ánodo debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, no debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
- 3) El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresado en amperes-hora por kg de material (Ah/kg) lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente.
- 4) En su proceso de disolución anódica, la corrosión deberá ser uniforme.
- 5) El metal debe ser de fácil adquisición y deberá fabricarse en diferentes formas y tamaños.
- 6) El metal deberá tener un costo razonable, de modo que en conjunto con las características electroquímicas correctas, se alcance una protección a un costo bajo por ampere-año.

Las ventajas y desventajas de la protección catódica con ánodos galvánicos se resumen en la tabla 1.4.

Tabla 1.4. Ventajas y limitaciones de la protección con ánodos galvánicos¹⁶.

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de instalar • No se necesita de una fuente de corriente continua ni de un regulador de voltaje. • No provoca problemas de interferencia. • Bajo costo de mantenimiento. • Permite obtener una distribución de corriente uniforme. • Se puede aumentar el número de ánodos, con el sistema en operación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente suministrada limitada. • Ineficaz en ambientes de resistividad elevada. • Costo inicial alto. • Alto consumo de ánodos para estructuras enterradas mal revestidas y sin revestimiento en agua de mar.

1.2.2 Criterios de protección catódica.

El criterio más usado para estructuras de acero expuestas **en suelos**, es el potencial de -0,850 V referido a un electrodo de referencia de Cu/CuSO₄ (ver figura 1.8), este criterio es termodinámico y surge del diagrama de Pourbaix del hierro, el cual considera que para que el acero se encuentre en la zona de inmunidad el potencial del hierro debe desplazarse hasta valores más negativos que garanticen que existirá corrosión del metal. Para el caso del concreto el valor considerado para detener la corrosión es un desplazamiento de 100 mV en sentido negativo.

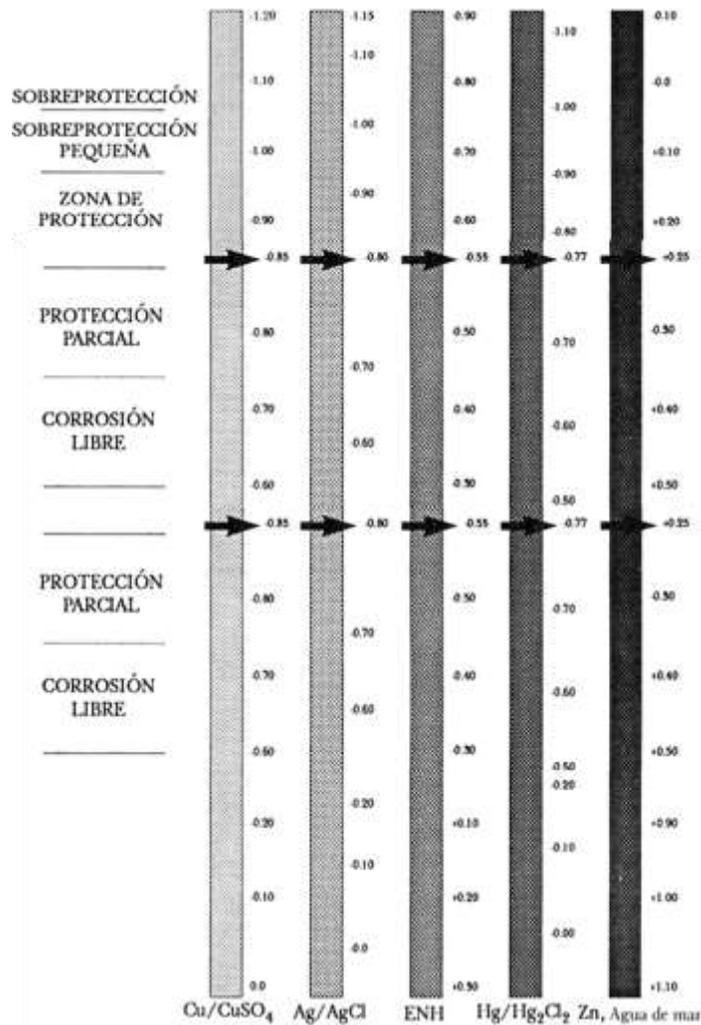


Figura 1.8. Equivalencia aproximada entre las escalas de potencial relativas a los electrodo de referencia utilizados en protección catódica, con indicación de los intervalos de corrosión, protección y sobreprotección para acero al carbono¹⁶.

1.3 Métodos de evaluación para determinar la presencia de corrosión

1.3.1 Medición de potenciales.

El potencial electroquímico es el potencial eléctrico de un metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto. El objetivo de esta prueba es medir el potencial de corrosión (E_{corr}), equilibrio (E_{eq}) o de reposo (E_{rep}) de la acero de refuerzo o varilla del concreto mediante el uso de electrodos de referencia.

1.3.1.1 Criterios de Evaluación.

Las medidas de potencial informan sobre la probabilidad de corrosión de la acero de refuerzo o varilla de una estructura de concreto, pero es esencial que los resultados sean correctamente interpretados a la luz de la información disponible sobre las condiciones de humedad, contaminación, calidad de concreto. Una guía de las condiciones y riesgo asociados a valores de potencial se indican en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Criterio de valoración de potenciales del acero en concreto vs $Cu/CuSO_4^9$.

CONDICIÓN	POTENCIAL (ECS)	OBSERVACIONES	RIESGO DE DAÑO
Estado pasivo	+0.200 A -0.200	Ausencia de Cl^- $pH > 12.5$ H_2O (HR↑)	Despreciable
Corrosión localizada	-0.200 a -0.600	Cl^- , O_2 , H_2O (HR↑)	Alto
Corrosión uniforme	-0.150 a -0.600	Carbonatado O_2 , H_2O , (HR↑)	Moderado Alto
	+0.200 a -0.150	Carbonatado O_2 , Seco, (HR↓)	Bajo
	-0.400 a -0.600	Cl^- Elevado, H_2O o Carbonatado H_2O (HR↑)	Alto
Corrosión uniforme	<-0.600	↑ Cl^- , ↑ H_2O (Sin O_2)	Despreciable

1.3.2 Medición de velocidad de corrosión.

Se llama velocidad o intensidad de corrosión (i_{corr}) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son $g/cm^2día$, aunque la forma usual de definirla a partir de medidas de tipo electroquímico es en $\mu A/cm^2$ o, transformando este dato a partir de la densidad del metal, en unidades de penetración ($mm/año$). El objetivo de esta prueba es determinar la velocidad a la cual la acero de refuerzo o varilla pierde sección, por corrosión de la misma, el equipo empleado debe cumplir con las normas ASTM G3¹⁷, G5¹⁸ y G59¹⁹.

1.3.2.1 Criterios de Evaluación.

Una clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil sería la siguiente:

Tabla 8.6. Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil⁹.

i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Nivel de corrosión
<0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderado
0.5-1	Elevada
>1	Muy elevada

1.3.3 Resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad: su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. El objetivo de este ensayo es la determinación de la Resistividad Eléctrica del concreto en campo o en el laboratorio.

1.3.3.1 Criterios de Evaluación.

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las varillas o acero de refuerzo puede ser considerable despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general:

Tabla 9.7. Criterios de evaluación para la resistividad eléctrica⁹.

Resistividad ($\rho=\Omega.cm$)	Nivel de riesgo
> 200	Poco riesgo
$200 > \rho < 10$	Riesgo moderado
< 10	Alto riesgo

2 Método experimental

2.1 Fabricación de viga.

Para el desarrollo de este proyecto se elaboró una viga de concreto contaminada con cloruros y reforzada con varilla de acero al carbono, para acelerar la corrosión de los elementos. Así mismo, se embebieron ánodos de sacrificio discretos de matriz cementicia, se monitoreo la corriente galvánica anódica (I_{galv}), potencial de corrosión (E_{corr}) y potencial de protección ($E_{protección}$) para evaluar su desempeño.

2.1.1 Diseño de viga

Se realizó el diseño de la viga con las siguientes dimensiones: 20 x 20 x 100 cm, con varilla de refuerzo de $\frac{1}{4}$ " de diámetro en su interior: armex 10 x 10 X 104 cm y una distancia entre estribos de 15 cm, de acuerdo con el acero y las dimensiones del espécimen, el recubrimiento fue de 5 cm, en la figura 2.1 se muestra el diseño.

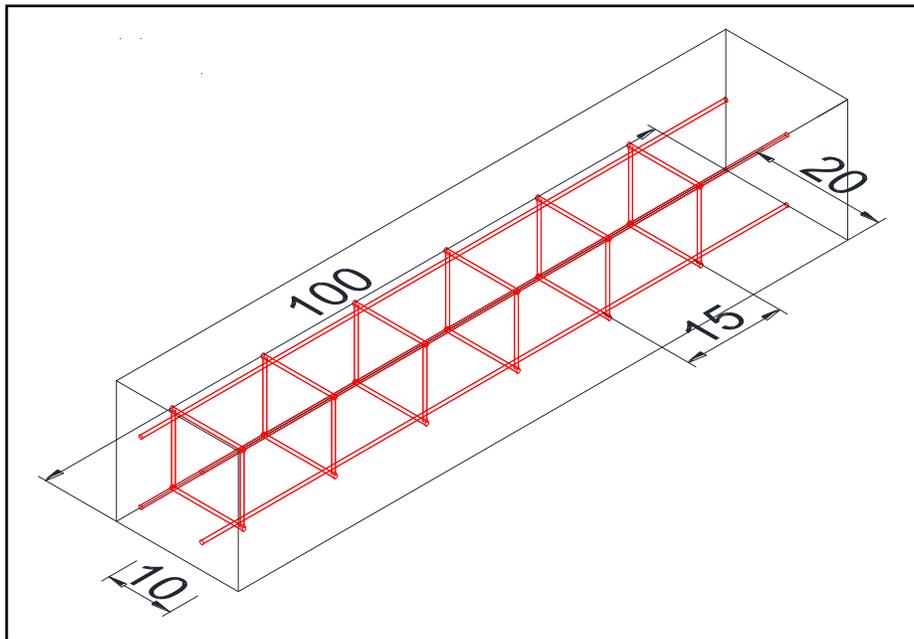


Figura 2.1. Diseño de viga.

2.1.2 Proceso de construcción.

Se fabricó un molde de madera (figura 2.2 a), para el colado de la viga, posterior a esto, se colocaron los ánodos de sacrificio discretos, como se observa en las figuras 2.2 b y 2.2 c, a una distancia de 30 cm distribuidos según recomendación del fabricante a lo largo del armex, cabe mencionar que se colocaron tres ánodos, ya que el fabricante menciona en su ficha técnica que los ánodos cubren un área de 650 cm^2 , por lo tanto el experimento se diseñó de forma tal, que la relación de área ánodo – cátodo fuese al menos de 1 : 1. En este caso el área del acero fue

de 1300 cm² y los ánodos en conjunto cubrían una superficie de 1950 cm², de acuerdo con el fabricante y como se mencionó arriba, un ánodo alcanza a proteger 650 cm², lo cual indicaría que con dos ánodos sería suficiente para alcanzar la protección; aun así se decidió agregar un ánodo más suponiendo que dos ánodos no serían suficientes para proteger el acero debido a la resistividad del concreto, contenido de humedad, concentración de ión cloruro, etc; por lo tanto, este arreglo garantizaría la protección de la estructura ya que la relación ánodo – cátodo fue de 1.5 : 1 respectivamente. Para realizar la unión del ánodo con el acero se colocó cable eléctrico a una de las puntas del armex.

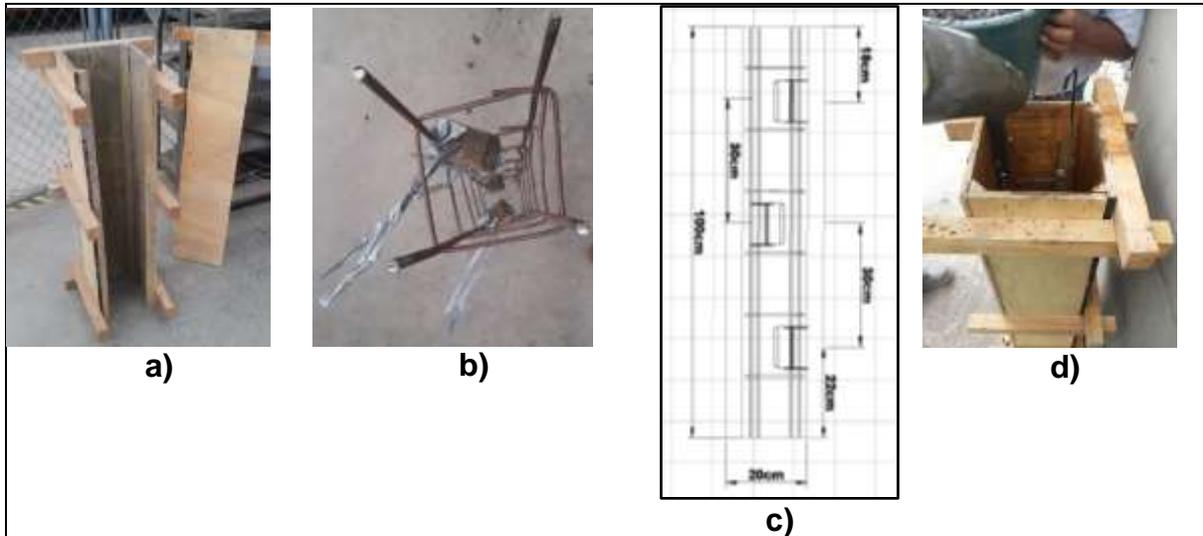


Figura 2.2. a) Molde de madera, b) y c) Ubicación de ánodos en acero de refuerzo, d) Unión de cable eléctrico a varilla.

Una vez terminado el cimbrado, colocados los ánodos y ubicado el armex en el molde, se realizó el mezclado del concreto: arena, grava, cemento y agua. Durante el amasado se agregó cloruro de sodio (NaCl), para acelerar el proceso de corrosión del acero. El contenido de cloruro de sodio (NaCl) fue de 3.5 % por peso del cemento. Posterior al mezclado se realizó el colado de la viga (figura 2.2 d). La conexión del ánodo se hizo por la parte externa con la finalidad de cuantificar el alcance de protección de los ánodos, conectando ánodo1 con acero, ánodo 2 más ánodo 1 con acero y ánodo 3 más ánodo 2 más ánodo 1 con acero.

2.2 Mediciones

Para determinar el desempeño de ánodos de sacrificio en el acero de la viga se realizaron las siguientes pruebas electroquímicas: potencial de corrosión y corriente galvánica, en cuanto a las losas solo se determinó el potencial de corrosión, velocidad de corrosión y resistencia eléctrica para conocer la evolución de los parámetros de corrosión de la acero de refuerzo o varilla antes de la colocación de los ánodos de sacrificio localizados. Cada una de las mediciones se realizó de acuerdo con el Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de

corrosión en estructuras de concreto armado⁹ y las especificaciones de la norma ASTM C 876²⁰. A continuación se describe cada una de ellas.

2.2.1 Medición de pruebas electroquímicas a viga

2.2.1.1 Medición de potenciales.

Esta prueba se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 876²⁰ por un periodo de 135 días de acuerdo con la norma, se humedece la viga durante una hora, posterior a ello se efectuó la medición de potencial de acero de refuerzo, potencial de cada uno de los ánodos, potencial de protección y corriente galvánica.

Medición de potencial del acero de refuerzo.

La medición de potencial del acero de refuerzo, se realizó de la siguiente forma: se realizó la conexión del electrodo de referencia (Cu/CuSO₄) al negativo del voltímetro, el acero de refuerzo se conectó al positivo del multímetro de alta impedancia. Se tomaron tres puntos (P1, P2 y P3) a lo largo de la viga para medir el potencial de corrosión del acero. Una vez efectuada la conexión se colocó el electrodo de manera perpendicular a la superficie del concreto en cada uno de los puntos seleccionados (ver figura 2.3 a y 2.3 b), por último se registraron los datos. Esta medición se realizó durante un periodo de 135 días (como potencial de corrosión).



Figura 2.3 a) Ubicación de los puntos de medición del potencial de corrosión



Figura 2.3 b) Medición de potencial de acero de refuerzo

Medición de potencial de cada uno de los ánodos

La medición de potencial de cada uno de los ánodos, se realizó de la siguiente forma: la conexión del electrodo de referencia (Cu/CuSO₄) al negativo del multímetro, el ánodo se conectó al positivo del voltímetro. Una vez efectuada la conexión se colocó el electrodo de manera perpendicular a la superficie del concreto en un punto cerca al ánodo (ver figura 2.4); por último, se registraron los

datos. Cabe mencionar que con esta metodología se midió el potencial de corrosión de los tres ánodos (ánodo 1, 2 y 3). Esta medición se realizó durante un periodo de 135 días.



Figura 2.4. Medición de potencial de ánodo.

Medición de potencial de protección.

La medición de potencial de protección se realizó de la siguiente forma: primero se realizó la conexión: acero con ánodo 1, ánodo 1 con ánodo 2 y ánodo 2 con ánodo 3; posterior a ello, se efectúa la conexión del electrodo de referencia al negativo del multímetro, el acero se conecta al positivo del multímetro. Una vez efectuada la conexión se colocó el electrodo de manera perpendicular a la superficie del concreto en un punto céntrico de la viga (ver figura 2.5), por último se registraron los datos. Esta medición se realizó durante un periodo de 150 días.



Figura 2.5. Medición de potencial de protección.

2.2.1.2 Medición de corriente galvánica.

La medición de corriente galvánica se realizó de la siguiente forma: la conexión del acero al positivo del multímetro, el ánodo se conectó al polo negativo del multímetro. Una vez efectuada la conexión se midió y, por último, se registraron los datos. Cabe mencionar que la medición se realizó solo con el fin de verificar el funcionamiento del ánodo.

2.3 Caracterización del mortero del ánodo por Difracción de rayos X (DRX)

La cubierta cementicia del ánodo se caracterizó mediante difracción de rayos X para conocer la composición química de este material. En la sección de resultados se colocan los difractogramas obtenidos

3 Resultados

3.1 Resultados de pruebas electroquímicas de viga

3.1.1 Resultados de viga de concreto

3.1.1.1 Potencial de corrosión de acero de refuerzo

Los resultados del potencial de corrosión de acero en la viga se muestran en la figura 3.1. El registro muestra los resultados del potencial (mV) de cada uno de los puntos de la viga donde se realizó la medición (P1, P2, P3) y el tiempo en días en que se llevó a cabo.

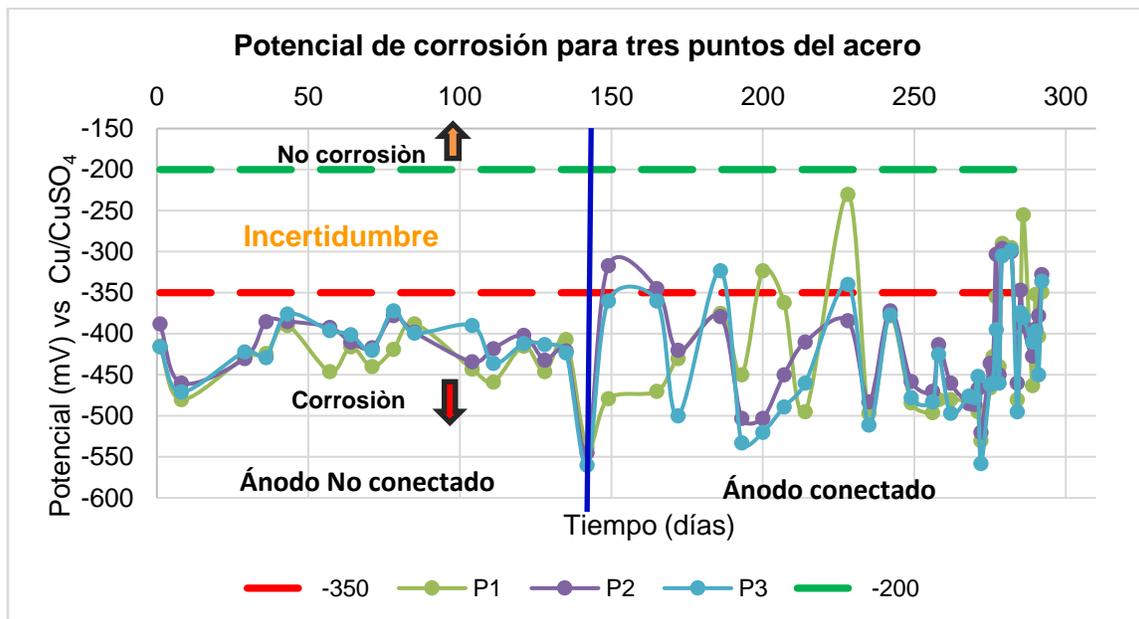


Figura 3.1. Muestra los valores de potencial de corrosión y el inicio del funcionamiento del sistema de protección catódica.

Durante los 135 días de monitoreo de potencial de corrosión (E_{corr}), el acero de refuerzo embebido en la viga presentó valores de corrosión en los puntos medidos, de acuerdo con la norma ASTM C876²⁰. Así mismo, de acuerdo con la tabla 1.5 (Criterio de Valoración de Potenciales del Acero en Concreto vs Cu/CuSO₄), el acero presenta corrosión uniforme con riesgo de daño alto bajo la condición medida.

En la figura 3.1 se muestran los valores de potencial de corrosión (E_{corr}), el cual se monitoreó desde el inicio del proceso de curado (28 días), éste se encuentra en valores que señalan la presencia de corrosión del acero según la norma ASTM

C 876²⁰ (desde el día 1 - 135). Después del día 135 se conectaron los ánodos con el acero (**línea azul**), y se observa cómo el potencial se desplaza a valores más negativos, respecto del potencial de corrosión, se aprecia que el potencial en algunos días (142, 172, 193, 200, 235, 272) alcanza valores de potencial más negativos que -500 mV. Este desplazamiento de potencial indica que el acero se polariza (Eon), lo cual sugiere que en esos días el acero se encuentra protegido, para validar que este sistema se encuentra funcionando se desconectaban los ánodos del acero de acuerdo con las normas ISO/DIS 12696²¹, UNE – EN 12696²² y NACE RP0100²³ se puede ver que los potenciales de depolarización (Eoff) alcanzan 100 mV de depolarización.

Los cambios que se observan en la gráfica 14 se atribuyen:

- 1.- Conexión ánodo – acero día 142, se observa polarización del acero (desplazamiento del potencial).
- 2.- Desconexión ánodo – acero día 149, se observa la depolarización del acero, donde el potencial alcanza valores más positivos respecto del potencial de corrosión, este comportamiento puede asociarse con la reducción de elementos que formen una barrera protectora, el cual inhibe la demanda de corriente.
- 3.- Conexión ánodo – acero día 193, se observa polarización del acero (desplazamiento del potencial).

Cabe mencionar que el cambio de potencial, hacia valores más positivos, está fuertemente relacionado con los efectos causados por la conexión ánodo – acero como se menciona anteriormente. Se resalta que los valores más negativos (-511 a -560) corresponden a lecturas registradas cuando la muestra de concreto se encontraba en condición húmeda (muestra saturada) y los valores que solo alcanzan un desplazamiento de potencial cercano a -500 corresponden a lecturas registradas durante el tiempo en que la muestra se encontraba seca, en este caso se aclara que la muestra no se humectó el tiempo (1 hora) que recomienda la norma ASTM C 876²⁰.

Bajo estas condiciones experimentales, los resultados indican que los ánodos solo entrarán en funcionamiento cuando el contenido de humedad sea alto, en condiciones de baja humedad la resistividad se incrementará y la demanda de corriente por parte del acero disminuirá. Respecto a la diferencia de potencial alcanzado entre el potencial de corrosión y el potencial alcanzado después de conectar el sistema de protección catódica, se obtiene que el sistema de protección catódica sí protege al acero. Como se mencionó anteriormente, una forma de verificar que el sistema de protección catódica está funcionando y que se representa en la figura 3.2, es el empleo del criterio de los 100 mV, establecido por las normas NACE SP0290²⁴, RP0100²³ e ISO/DIS 12696²¹ y UNE-EN- 12696²².

La figura 3.2 muestra algunas lecturas hechas para verificar que sistema de protección catódica funciona de manera apropiada. Estas lecturas fueron potencial

de corrosión (E_{corr}), potencial con el sistema conectado (denominado en este trabajo E_{on}), Potencial con el sistema desconectado (E_{off}) y potencial (E_{off} a 1 hora y 4 horas de depolarización). Se observa que cuando se conecta el sistema hay un desplazamiento de potencial a valores que más negativos respecto del potencial de corrosión y cuando se desconecta el sistema, éste alcanza una depolarización de al menos 100 mV y, como se puede observar en la gráfica, después de una y cuatro horas de depolarización del sistema el acero muestra una tendencia hacia el potencial de corrosión o valores de potencial más positivos (como se alcanza apreciar en la figura 3.1), esto sugiere que el sistema de protección catódica con este tipo de ánodos se encuentra funcionando bajo las condiciones experimentales empleadas.

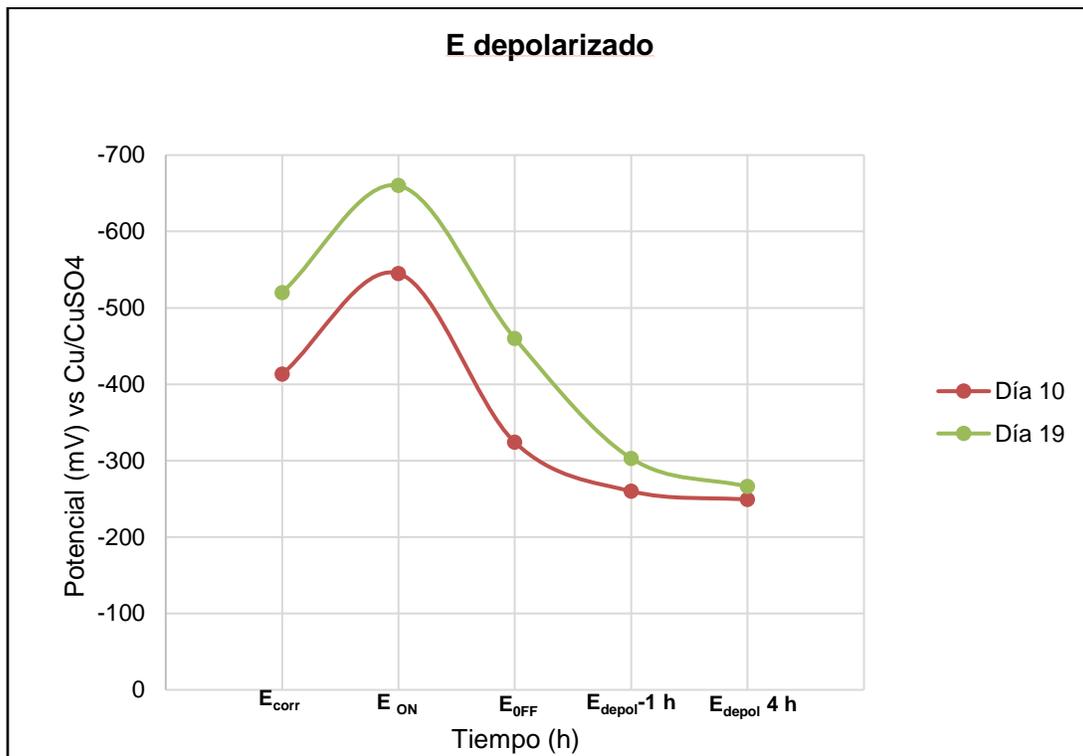


Figura 3.2. Muestra el funcionamiento del sistema aplicando el criterio de depolarización de los 100 mV.

Una forma adicional de verificar que el sistema de PC funciona, es midiendo la **corriente galvánica** que fluye entre ánodo y cátodo (figura 3.3), muestra valores representativos del registro de corriente galvánica, que indican que el conjunto de ánodos está suministrando corriente al acero, aun cuando la corriente medida durante la parte experimental no corresponde con la que el proveedor reporta en sus especificaciones que es de 1 mA de corriente galvánica.

3.1.1.2 Potencial de corrosión de ánodos.

Los resultados del potencial de corrosión de cada ánodo colocado en la viga se muestran en la figura 3.5. El registro muestra los resultados del potencial (mV) de cada uno de los ánodos (ánodo 1,2 y 3) y el tiempo en días en que se llevó a cabo.

Durante los 292 días de monitoreo el ánodo 1 mostró un potencial mínimo de -923 y máximo de -824 , el ánodo 2 tuvo un potencial mínimo de -923 y máximo de -815 , en cuanto al ánodo 3 el valor mínimo fue de -876 y máximo de -769 con respecto al electrodo de Cu/CuSO_4 , de acuerdo con lo reportado el potencial práctico de disolución de los ánodos puede estar comprendido entre -950 mV y -1.7 mV y los datos obtenidos de cada ánodo no alcanzan este criterio, cabe mencionar que este criterio se cumple si y solo si el ánodo se encuentra en agua de mar. Se aprecia que aun cuando no alcanzan el potencial recomendado, estos ánodos funcionan ya que logran desplazar el potencial y además se puede medir la corriente galvánica.

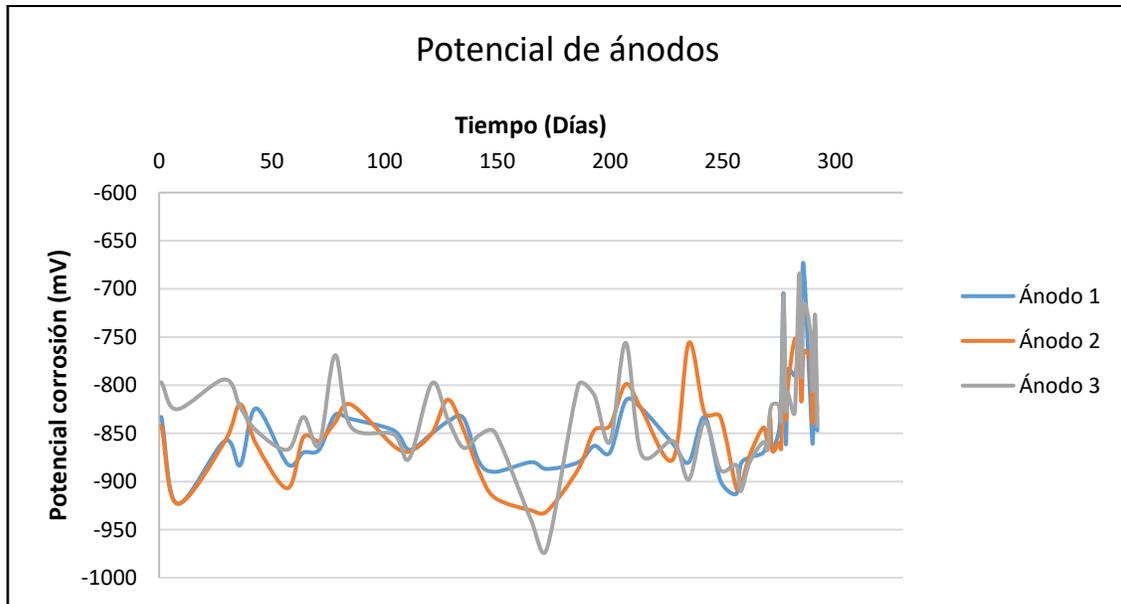


Figura 3.3. Muestra los valores de potencial de corrosión de los ánodos.

3.1.1.3 Corriente galvánica

Los resultados de corriente se muestran en la figura 3.4. El registro muestra los resultados corriente galvánica (mV) entre acero-ánodos y el tiempo en días en que se llevó a cabo la medición. Se observa que la corriente drenada por los ánodos indica que estos están haciendo su función.

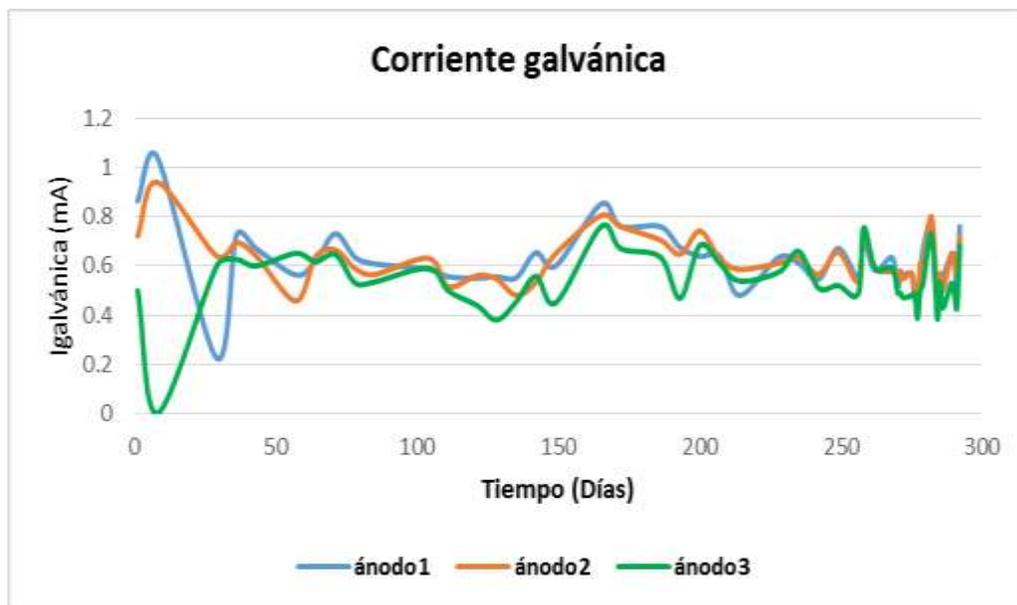


Figura 3.4. Muestra las lecturas de corriente galvánica del sistema de protección catódica.

La figura 3.5 muestra una forma alterna de verificar si el acero se encuentra protegido, o no, con el uso del equipo Gecor 8, el cual tiene una técnica (Técnica de verificación de la pasividad (PVT)), que permite determinar si el sistema de protección catódica funciona de forma adecuada. El Gecor 8 proporciona el valor del potencial de la armadura e indica la eficiencia de la protección catódica como: bien protegido, protegido o no protegido (well protected, protected o non protected).



Figura 3.5. Muestra el uso de Gecor 8 para medir la efectividad de la protección catódica.

3.1.2 Resultados de Difracción de rayos X.

Los ánodos se caracterizaron mediante difracción de rayos X los espectros obtenidos son los siguientes:

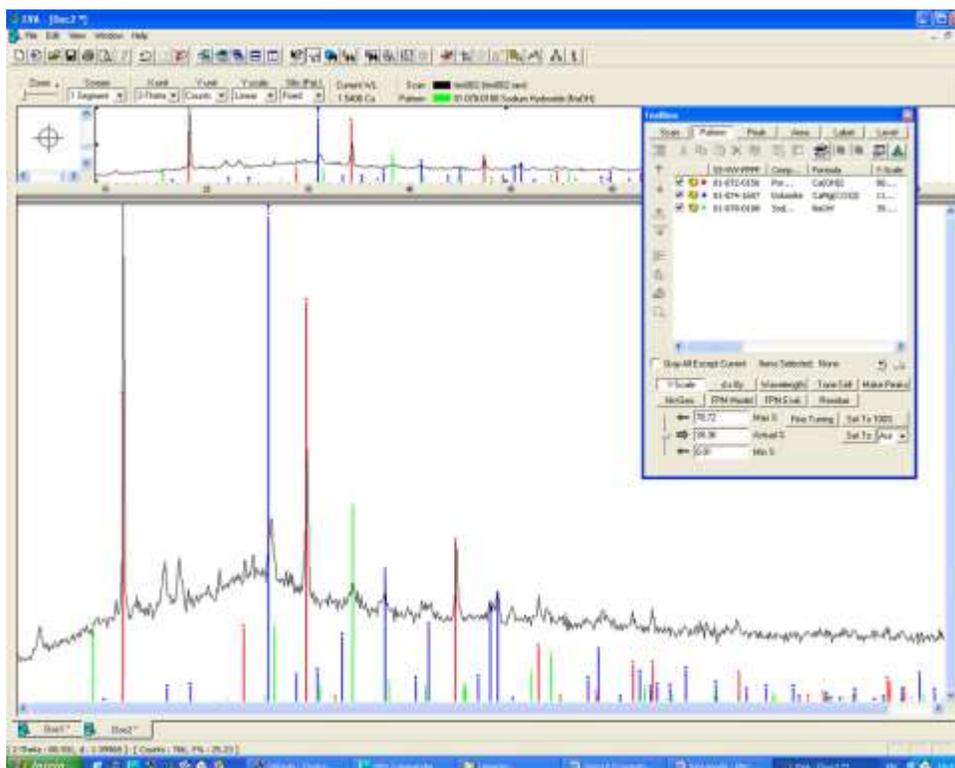


Figura 3.6. Espectro obtenido del ánodo empleado en este trabajo.

En este espectro se observa la composición química del mortero que envuelve al ánodo de zinc, es importante saber su composición ya que debido a ésta el ánodo puede ser más eficiente, si éste no fuera eficiente se podrían determinar las posibles causas y buscar alternativas de mejora.

4 Conclusiones

Los resultados preliminares obtenidos en este trabajo señalan que el sistema de protección catódica funciona de manera adecuada bajo las condiciones experimentales de este trabajo.

Los resultados de potencial polarizado (Eon) solo se alcanzaron cuando la relación de área ánodo – cátodo fue de 1.5:1 respectivamente, y cuando se conectaron solo dos ánodos que mantenían una relación de área ánodo – cátodo de 1:1 no se alcanzó a desplazar lo suficiente al potencial para alcanzar el criterio de protección establecido en la normatividad.

El desplazamiento de potencial polarizado en sentido negativo fue alrededor de 200 mV, este cambio de potencial indicó que el acero se protegió, éste se confirma aplicando el criterio de depolarización de 100 mV, el cual se cumplió.

La humedad del concreto es determinante la eficiencia del sistema de protección del acero de refuerzo.

Recomendaciones

Es necesario continuar con estas investigaciones a fin de determinar la eficiencia de los ánodos puntuales al mediano y largo plazo, así como bajo distintas condiciones de operación, para así sugerir su empleo en procesos de rehabilitación de estructuras de concreto dañadas por corrosión.

Bibliografía

- 1 Hernández O. H , Mendoza C.J. M (2006). *Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico*. Ingeniería. Investigación y Tecnología, 7(1).
- 2 Vico, A., Morris, W., & Vázquez, M. (2003). *Evaluación del avance de la corrosión de refuerzos en estructuras de hormigón*. División Corrosión, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- 3 Kepler, J. L., Darwin, D., & Locke Jr, C. E. (2000). *Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures* (No. K-TRAN: KU-99-6,). Kansas Department of Transportation.
- 4 González Díaz, F. (2010). *Realcalinización electroquímica del concreto reforzado carbonatado: una opción de prevención contra la corrosión* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- 5 Rougier, V., Schierloh, M. I., & Souchetti, R. *Vigas de concreto armado dañadas por corrosión y reparadas con polímeros reforzados con fibras*.
- 6 Llorca, M. Á. C., Terradillos, P.G., & Gómez, E. Z. (2008). *Corrosión de acero de refuerzo o varillas en estructuras de concreto armado*. Editorial Club Universitario.
- 7 Perles, P. (2003). *Concreto armado*. Nobuko.
- 8 Lee Orantes, F., Torres Acosta, A. A., Teran Guillen, J., & Martinez Madrid, M. (2006). *Caracterización de un Sistema de Refuerzo-Protección en Elementos de Concreto Reforzado Dañados por Corrosión, Utilizando Compuestos Base Fibras de Carbón*. Publicación técnica, (292).
- 9 Durar, R. (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales. ISBN 980-296-541-3.
- 10 del Valle Moreno, A., Pérez López, T., & Martínez Madrid, M. (2001). *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Publicación técnica, (182).
- 11 González Meza, J. (2014). *Análisis de la durabilidad del muelle siete de la Terminal Marítima de Pemex Pajaritos, Ver.*
- 12 Del Valle Moreno, A., TORRES ACOSTA, A. A., Terán Guillén, J., Pérez Quiroz, J. T., & Oidor Salinas, P. (2006). *Protección catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificio discretos*. Publicación técnica, (290).

- 13 Ávila, J., & Genescá, J. (1996). *Más allá de la herrumbre 1*. Fondo de Cultura Económica, México.
- 14 Chess, P. M., & Broomfield, J. P. (Eds.). (2003). *Cathodic protection of steel in concrete*. CRC Press.
- 15 Mariaca Rodríguez, L., Genescá Llongueras, J., Uruchurtu Chavarín, J., & Hernández, L. (1999). *Corrosividad Atmosférica (MICAT-México)*. Plaza y Valdés, México.
- 16 Ávila, J., & Genescá, J. (1997). *Más Allá de la herrumbre II. La lucha contra la corrosión*. Fondo de Cultura Económica, México.
- 17 Andrade, C, Castelo, V., Alonso, C. and González, J. A., "The determination of the corrosion rate of steel embedded in concrete by the Rp and A.C. Impedance methods," ASTM-STP 906,1986, pp. 43-64.
- 17 STANDARD, ASTM G3-89. (2010). *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing*. Annual Book of ASTM Standard.
- 18 STANDARD, ASTM G5-94.(2014). *Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*. Annual Book of ASTM Standard.
- 19 STANDARD, ASTM G59-97 (2009). *Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*. Annual Book of ASTM Standard.
- 20 STANDARD, ASTM C876-09. (2009). *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*.
- 21 ISO/DIS 12696 (2009) *Cathodic protection of steel in concrete*.
- 22 UNE – EN 12696 (2001) *Protección catódica del acero en el hormigón*.
- 23 NACE SP0100-2014 (formerly RP0100), *Cathodic Protection to Control External Corrosion of Concrete Pressure Pipelines and Mortar-Coated Steel Pipelines for Water or Waste Water Service*
- 24 NACE SP0290-2007, *Impressed current cathodic protection of reinforcing steel in atmospherically exposed concrete structures*.



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/>

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