



Certificado en ISO 9001:2000
Laboratorios acreditados por EMA

SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES



“IMT, 20 años generando conocimientos y tecnologías para el desarrollo del transporte en México”

PROTECCIÓN CATÓDICA DE CONCRETO REFORZADO USANDO ÁNODOS DE SACRIFICIO DISCRETOS

Angélica Del Valle Moreno
Andrés Torres Acosta
Jorge Terán Guillén
José Trinidad Pérez Quiroz
Patricia Oidor Salinas

Publicación Técnica No 290
Sanfandila, Qro 2006

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

**Protección catódica de concreto reforzado
usando ánodos de sacrificio discretos**

**Publicación Técnica No. 290
Sanfandila, Qro, 2006**

Créditos y agradecimientos

Este documento fue elaborado por la Dra Angélica del Valle Moreno; el Dr Andrés Torres Acosta; el M C Jorge Terán Guillén; el M C José Trinidad Pérez Quiroz; y la I Q M Patricia Oidor Salinas, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Se agradecen los comentarios y sugerencias del Dr Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural.

Índice

	Página
Resumen	V
Abstract	VII
Resumen ejecutivo	IX
Introducción	1
1 Antecedentes	3
1.1 Corrosión en concreto	3
2 Formas de control de la corrosión	7
2.1 Protección catódica	9
3 Métodos de monitoreo	19
3.2 Resistencia a la compresión	19
3.3 Medición de potenciales	20
3.4 Medición de la velocidad de corrosión	21
3.5 Resistividad eléctrica	21
3.6 Corriente catódica	22
4 Metodología	23
5 Resultados	29
6 Discusión de resultados	49
Conclusiones	55
Bibliografía	57

Resumen

La protección catódica es la única técnica comprobada que detiene la corrosión. En este trabajo se estudió la eficiencia de la protección catódica mediante ánodos de sacrificio discretos de zinc; una nueva tecnología que está en vías de desarrollo y de la cual actualmente no se tienen datos técnicos de largo plazo sobre el funcionamiento de tales ánodos.

Se evaluaron seis vigas de concreto reforzado, preparadas con una relación agua/cemento de 0,50, las cuales simulaban un concreto utilizado en ambiente marino. Tres vigas se colaron sin adición de cloruros, y las tres restantes fueron contaminadas con una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3% en peso de cemento, aparentando agua de mar. Todas las vigas permanecieron a una humedad relativa controlada de 90%.

En todas ellas se aparentó una reparación para embeber los ánodos galvánicos de zinc, que proporcionaron protección catódica a las vigas, minimizando la corrosión de la varilla de refuerzo en el concreto.

Las técnicas para obtener los resultados experimentales acerca del comportamiento de la protección catódica, y los efectos de la corrosión de la varilla de refuerzo en concreto fueron: potencial electroquímico de media celda; resistencia a la polarización; decaimiento de polarización; corriente galvánica, y resistividad.

Los resultados de este monitoreo electroquímico mostraron que la varilla de refuerzo fue protegida catódicamente por los ánodos de sacrificio, pero sólo por un período de 300 días para las probetas sin cloruros, y de 350 días para las probetas con cloruros; adicionalmente se encontró que debido a la alta humedad relativa, los productos de corrosión de los ánodos discretos si bien no ocasionaron grietas, si se lixiviaron del mortero, siendo un peligro potencial adicional debido al bromuro de litio, por lo que es necesario evitar el uso de éstos ánodos de sacrificio en ambientes muy húmedos.

Abstract

The only rehabilitation technique that has proven to stop corrosion in salt-contaminated bridges regardless of the chloride content of the concrete is Cathodic Protection, in this work the efficiency of the cathodic protection was studied by means of discreet sacrificial anodes of zinc, a new technology that is developing and that at the present moment technical data of long term on the operation of these anodes is not available.

The new technology uses zinc anodes surrounded by a lithium-cement based mortar that allows the installation of the anodes discretely inside the concrete and provides the same corrosion protection as the externally places anodes. In theory, the mortar surrounding the anodes is sufficiently porous that it allows the accumulation of the excess oxides without cracking the concrete. The lithium solution in the material prevents the zinc anode from passivating, as it common occurrence with zinc embedded in cementitious materials.

The proposed study consists of the evaluation of the performance characteristics of sacrificial anodes for reinforced concrete structures embedded inside the concrete. Such evaluation included the anode material performance on controlling the corrosion activity of the reinforcement and the effects of the anode oxide inside the concrete on the structural components. The performance was studied using advanced potentiostatic techniques and comparing results to standardized criteria.

Six concrete reinforced beams were evaluated, prepared with a water/cement ratio of 0,50, which they simulated a concrete used in marine atmosphere. Three beams were prepared without addition of chlorides and the three remaining were contaminated with a solution of chloride of sodium (NaCl) to the 3% in cement weight, simulating seawater. All the beams remained in a chamber of controlled relative humidity at 90%. In all beams, a repair was simulated in order to imbibe the zinc galvanic anodes that provided cathodic protection to the beams, minimizing the corrosion of the reinforcement bar in the concrete.

The techniques used in order to obtain the experimental results relative to the behavior of the cathodic protection and the effects of the rebar corrosion in concrete were: electrochemical potential of working cell, polarization resistance, depolarization decay, galvanic current and resistivity.

The results of the electrochemical monitoring showed that the rebar was cathodically protected by the sacrificial anodes but only for a period of 300 days for the beams without chlorides and of 350 days for the beams with chlorides. Additionally, due to the high Relative Humidity, the corrosion products of the discreet anodes, although they didn't induce cracks, they did leached of the mortar, being a potential additional danger to the rebar due to the Lithium Bromide, for this reason it is necessary to avoid the use of these sacrificial anodes in very humid atmospheres.

Resumen ejecutivo

El deterioro de los puentes y estructuras de concreto reforzado debido a la corrosión del refuerzo, ha sido y continúa siendo, uno de los mayores problemas que enfrentan los ingenieros de puentes. Durante los últimos años se ha tratado de controlar la corrosión; para ello se han desarrollado diversas herramientas y métodos de prueba que evalúan la condición de las estructuras y puentes existentes; es así que las técnicas de rehabilitación incluyen selladores, recubrimientos y membranas resistentes a la humedad, y muchas otras técnicas y materiales; sin embargo, la protección catódica es la única técnica comprobada que detiene la corrosión. En este trabajo se estudió la eficiencia de la protección catódica mediante ánodos de sacrificio discretos de zinc; una nueva tecnología que está en vías de desarrollo, y de la cual actualmente no se tienen datos técnicos de largo plazo sobre el funcionamiento de dichos ánodos.

La nueva tecnología usa ánodos de zinc rodeados por un mortero de lithium-cemento que permite instalar los ánodos en el interior, y proporciona la misma protección de la corrosión como los ánodos externos. En teoría, el mortero alrededor de los ánodos es lo suficientemente poroso como para permitir la acumulación del exceso de óxidos sin agrietar el concreto. La solución de bromuro de litio en el mortero previene la pasivación del ánodo de zinc, ocurrencia muy común con zinc embebido en materiales cementicios.

Se evaluaron seis vigas de concreto reforzado, preparadas con una relación agua/cemento de 0,50, las cuales simulaban un concreto aplicado en ambiente marino. Tres vigas se colaron sin adición de cloruros, y las tres restantes fueron contaminadas con una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3% en peso de cemento, simulando agua de mar. Todas permanecieron a una humedad relativa controlada de 90%.

En todas las vigas se aparentó una reparación para embeber los ánodos galvánicos de zinc discretos, que proporcionaron protección catódica a las vigas, minimizando la corrosión de la varilla de refuerzo en el concreto.

Las técnicas a que se recurrió para obtener los resultados experimentales acerca del comportamiento de la protección catódica, y los efectos de la corrosión de la varilla de refuerzo en concreto fueron: potencial electroquímico de media celda; resistencia a la polarización; decaimiento de polarización; corriente galvánica y resistividad.

En términos generales, los potenciales pasaron de potenciales activos; es decir, corroidéndose ($\sim -0,350$ V vs ECS), a potenciales de protección ($\sim -1,100$ V vs ECS). Los resultados de este monitoreo electroquímico mostraron que la varilla de refuerzo fue protegida catódicamente por los ánodos de sacrificio, pero sólo por un período de 300 días para las probetas sin cloruros, y de 350 días para las

probetas con cloruros. Las corrientes de protección estuvieron en el rango de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; el decaimiento de la polarización demostró que había más de $-0,100 \text{ V}$ vs ECS de diferencia de potencial, lo que confirmaba que las probetas se encontraban protegidas; sin embargo el tiempo de protección para las probetas con cloruros es mayor, que para las aquellas con cloruros, debido a la humedad y acción de los cloruros sobre la varilla de refuerzo.

Los resultados obtenidos en los ensayos de velocidad de corrosión muestran que el nivel de corrosión de los ánodos es muy elevado, ya que en todas es mayor a 1. Es decir, que los ánodos protegieron a las varillas de refuerzo embebidas en el concreto.

Durante el desarrollo del proyecto se encontró que después de algún tiempo, y debido a la alta humedad relativa, los productos de corrosión de los ánodos discretos se lixiviaron; simultáneamente a la aparición de las manchas blancuzcas lixiviadas, el potencial del ánodo comenzó a pasivarse; esto se debió a que ya no existía el LiBr, que es un agente higroscópico que mantenía al zinc activo.

Como dato especial cabe resaltar que si bien los productos de corrosión del ánodo (óxido de zinc (ZnO); hidróxido de zinc ($\text{Zn}(\text{OH})_2$); bromuro de Litio; y zinc (Li_2ZnBr_4) y bromuro de litio hidratado $\text{LiBr}(\text{H}_2\text{O})$) no ocasionaron grietas, aunque si se lixiviaron del mortero, siendo un peligro potencial adicional debido al bromuro de litio, por lo que es necesario evitar el uso de éstos ánodos de sacrificio en ambientes muy húmedos.

Introducción

De acuerdo con el Plan Nacional de Evaluación de la Degradación por Corrosión en Puentes¹ existen en México 6,500 puentes en la Red Carretera Federal; de los cuales el 7,5% requiere algún tipo de reparación y mantenimiento por problemas de corrosión. Estados Unidos de Norteamérica cuenta con aproximadamente 575,000 puentes de los cuales 280,000 sufren de corrosión. En el Reino Unido se tienen pérdidas por más de \$620 millones de libras esterlinas por problemas de corrosión en los puentes de las grandes autopistas. En general, en todo el mundo los costos por mantenimiento para estructuras de concreto reforzado en puentes es de entre 1,4 y 4% del costo del PIB, dependiendo del grado de desarrollo del país.

Actualmente, el desarrollo de las tecnologías para la prevención y reparación de estructuras va en aumento debido a los gastos que representa la corrosión. En este trabajo se simuló la protección y reparación de componentes de puentes de concreto reforzado, dañados por soluciones agresivas (cloruros), rompiéndole la capa protectora conocida como capa pasiva, debido al ingreso de estas sustancias agresivas, iniciando así el proceso de corrosión.

La protección catódica es una técnica probada que puede resolver el problema de la corrosión, además de que representa un bajo costo; es de fácil instalación, y proporciona un mayor tiempo de vida remanente para las estructuras. Por su parte, la protección catódica por ánodos de sacrificio, aunque es muy utilizada y conocida, es una técnica que ha tomado un nuevo auge al desarrollarse ánodos de sacrificio discretos que se embeben dentro del concreto para prevenir la corrosión de la varilla de refuerzo. La protección con ánodos internos es relativamente nueva, Vector Corrosion Technologies la ha aplicado desde 1990. A pesar de ello, no se cuenta con datos de otros laboratorios / compañías, por lo que esta investigación proporcionará información específica sobre este tipo de ánodos. El objetivo de este proyecto es investigar la efectividad de la protección catódica con ánodos de sacrificio discretos.

En la primera sección de este trabajo se presentan los antecedentes del proyecto, planteando el problema y posible solución.

En la segunda sección se incluyen los conceptos básicos y necesarios para el desarrollo del proyecto; la corrosión como problema fundamental; formas de protección o de luchar contra la corrosión; fundamentos de concreto reforzado, y protección catódica; además de los métodos de monitoreo que se utilizaron: decaimiento de polarización; potenciales; velocidad de corrosión; resistividad eléctrica; corriente catódica y resistencia a la compresión.

¹ **Torres**, Andrés. **Martínez**, Miguel. **2001**. Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Publicación Técnica No 181. Secretaría Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte

En la cuarta sección se describen los materiales utilizados en el proyecto, así como el desarrollo experimental del mismo, iniciando con el análisis de la materia prima; el diseño de las probetas y la mezcla de concreto; el colado de las probetas y su colocación en cámaras de humedad controlada; la simulación de la reparación y aplicación de la protección catódica por medio de los ánodos discretos; y las formas de monitoreo para verificar el funcionamiento de la protección.

En la quinta sección se presentan los resultados del proyecto y la discusión de los mismos que se obtuvieron a lo largo de su desarrollo; finalmente se consideran las conclusiones del proyecto.

1 Antecedentes

Todos los metales que utilizamos en nuestra vida están respaldados principalmente por acero, o algún material metálico. Es por eso que el hombre busca que estos materiales metálicos sean estables en la atmósfera y que su vida útil sea larga. Sin embargo, se degradan con el tiempo en diferentes formas y pierden sus propiedades; todo ello se debe a la propia atmósfera al contener oxígeno y otros elementos que al reaccionar con el acero lo degradan paulatinamente, marcando el retorno del metal hacia una forma más estable, generalmente como óxidos o sulfuros¹.

La mayoría de los metales se obtienen a partir de especies minerales estables en las condiciones naturales. Por tanto, al exponerse a las condiciones ambientales tienden a estabilizarse química y energéticamente. El regreso espontáneo de estos materiales a su estado natural combinado, es la corrosión. Por lo que este proceso puede definirse como la degradación paulatina de los materiales metálicos debido al medio que lo rodea, generando un deterioro en sus propiedades físicas y químicas².

Esta degradación trae como consecuencia pérdidas millonarias de dinero, y al año se destruye hasta un 25% de la producción anual de acero³, por deterioro de estructuras, maquinaria, tuberías, etc, además de los daños indirectos que esto provoca y los inconvenientes que supone su sustitución, así como la degradación y excesivo consumo de los recursos naturales, aplicado principalmente a los metales cuya reserva mundial es limitada y que cada día su extracción es más difícil y costosa.

1.1 Corrosión en concreto

Las estructuras de concreto reforzado no escapan a la corrosión; esto se puede observar en puentes de zonas altamente industrializadas y costeras. La aparición de manchas de herrumbre en las estructuras de concreto reforzado se debe a que el concreto es discontinuo, duro, de alta densidad y tiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar interconectados siendo permeable a líquidos y gases; por lo que los agentes que desencadenan la corrosión en la atmósfera pueden introducirse en el concreto, formando una celda electroquímica y dar inicio así a la corrosión del acero⁴. Cuando se rompe la película pasivante por sustancias agresivas que penetran en el concreto, el óxido formado en exceso

¹ **Rodríguez**, L M; Genescá, J; Uruchurtu, J; Hernández, I. Corrosividad atmosférica., 1ra Edición, Plaza y Valdés, S A de C V, México (1999)

² **Ávila**, J; Genescá, J, Más allá de la herrumbre I; 3ª. Edición, La Ciencia para Todos. México (2002)

³ **Koch**, G H; Brongers, P H; Thompson, N G; Virmani, YP; Payer, J H. Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States. MATERIALS PERFORMANCE: Supplement to Materials Performance (2002)

⁴ **Helene**, P; Pereira, F. Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón Reparación, Refuerzo y Protección. 1ra Edición, Degussa, Sao Paulo (2003)

ocupa un volumen mayor que el acero sin corroer, por lo que disminuye la sección de la varilla y hace perder la adherencia inicial deseada entre el acero y el concreto.

El concreto reforzado es un material compuesto que combina acero (varilla) y concreto, en el cual el concreto constituye una protección contra la corrosión del acero; esto se debe principalmente a la reacción alcalina asociada con la hidratación del cemento, la cual tiene un alto valor de pH (de 12,5 a 13,6) protegiendo a la varilla pasivándola. Debido a su resistencia a la difusión, el concreto constituye una barrera física que dificulta el paso a agentes promotores de la corrosión como oxígeno, dióxido de carbono y cloruros hacia la varilla.

El concreto reforzado ha sido la mezcla por excelencia para una gran cantidad de construcciones, ya que el concreto le confiere al acero una protección de doble naturaleza; por un lado, es una barrera física que lo separa del medio ambiente; y por otro, el líquido encerrado en los poros del concreto forma un electrolito que ayuda a formar una película pasiva¹.

La capa de óxido pasivante en la varilla cambia cuando el concreto se altera, o a través de él penetran sustancias agresivas y se produce el rompimiento de esta película². Los factores que la corrosión son la dosificación; la compactación y la homogeneidad del concreto; el espesor del recubrimiento de concreto; el estado superficial de la varilla y la humedad ambiental. Es por ello que el concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, para garantizar la protección de la varilla de refuerzo contra las acciones agresivas de los agentes externos³.

Existen iones despasivantes, como los cloruros, que provocan una disolución localizada en la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales (picaduras), que reducen drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos⁴. Estos cloruros se pueden encontrar en la masa de concreto, o porque los contengan las materias primas, o porque penetren desde el exterior al estar situada una estructura en ambientes marinos o a la acción de sales de deshielo⁵.

Para que se inicie y mantenga la corrosión de la varilla existen dos mecanismos, generalmente aceptados:

¹ **Helene**, P; Pereira, F. Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón Reparación, Refuerzo y Protección. 1ra Edi., Degussa, Sao Paulo (2003)

² **Moreno**, M; Morris, W; Álvarez M G; Duffó, G S. Corrosion of Reinforcing steel in Simulated Concrete Pore Solutions: Effect of Carbonation and Chloride Content. CORROSION SCIENCE: Vol 46 (2004)

³ **Castro** et al, 2003

⁴ **Trejo**, D; Monteiro, P J. Corrosion Performance of Conventional (ASTM A615) and Low-alloy (ASTM A706) Reinforcing Bars Embedded in Concrete and Exposed to Chloride Environments. CEMENT AND CONCRETE RESEARC: Vol 35 (2005)

⁵ **Whitmore**, 2003

1. Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas, o neutralización parcial con bióxido de carbono u otra sustancia ácida
2. Acción electroquímica que involucra al ion cloruro en presencia de oxígeno

Es importante resaltar que sin la presencia simultánea de oxígeno y humedad en el concreto no es termodinámicamente posible la corrosión, y sin una cantidad mínima crítica, tampoco es factible que se desarrolle con una velocidad apreciable.

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. En su ausencia, sin embargo, la detienen completamente.

Los tipos de corrosión más frecuentes en las varillas son tres:

1. Corrosión uniforme. Es resultado de la pérdida generalizada de la película pasiva; esto se debe principalmente a la carbonatación. El proceso de carbonatación sucede por las reacciones de los compuestos básicos de la fase acuosa del concreto, como NaOH, KOH, y específicamente $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con componentes ácidos de la atmósfera, tales como SO_2 y CO_2 ; éste último es el más abundante, y del cual se deriva el nombre de carbonatación; los productos de tales reacciones son carbonatos, sulfatos y agua, generando un descenso en la alcalinidad del concreto.

2. Corrosión localizada. Se da principalmente por la acción de agentes despasivantes como los iones cloruros. 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
- 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 metal
- Corrosión por corrientes de interferencia. Resultan de corrientes que no forman parte de la celda electroquímica¹.

¹ Durar, 2002

3. Corrosión galvánica. Se presenta cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico; en el concreto la corrosión se formará cuando no se desarrolla una película pasiva característica en alguna sección de la varilla, lo que produce una pila de corrosión¹.

Los mecanismos de deterioro, generalmente se desarrollan a través del tiempo y afectan directamente la vida útil o de servicio de la estructura. El deterioro atraviesa dos fases:

a) *Iniciación*; es el tiempo que tarda el agente agresor en atravesar el recubrimiento de concreto, llegar a la película protectora de la varilla y despasivarla. La penetración de iones cloruro se desarrollan durante la fase de iniciación, y se acelera por ciclos de humedecido/ secado. El establecimiento de un límite seguro de concentración de iones cloruro es difícil de establecer debido a su dependencia de la humedad relativa; la permeabilidad del mismo; y el contenido del cemento. Un valor umbral aceptado de concentración de iones cloruro es 0,4% con relación al peso de cemento, ó 0,05-1% en relación con el peso de concreto².

b) *Propagación*; caracterizada por el deterioro acelerado, donde la varilla se corroe libremente hasta alcanzar un nivel inaceptable de corrosión. Los factores que aceleran la propagación del deterioro son el contenido de humedad y el de oxígeno que rodean la varilla. El concreto absorbe humedad muy rápidamente, pero se seca muy despacio ya que la humedad se almacena en los poros del concreto.

¹ **Ávila, J;** Genescá, J. Más allá de la herrumbre I. 3ª Edi, La ciencia para todos. México (2002)

² **Durar**, 2002

2 Formas de control de la corrosión

Los sistemas y métodos para la reparación, prevención y protección contra la corrosión son muy variados y constantemente aparecen nuevos productos que tratan de evitar y controlar este fenómeno.

Existen diversas maneras de luchar contra la corrosión:

1. Aislamiento eléctrico del material, mediante empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente, o por aplicación de recubrimientos diversos.
2. Polarización del mecanismo electroquímico. Esto se logra eliminando el oxígeno disuelto mediante la adición de inhibidores, los cuales pueden llegar a polarizar uno de los electrodos de la pila de corrosión, y llegar a detener o disminuir sus efectos
3. Utilización de materiales resistentes a la corrosión de acuerdo con el medio de exposición.
4. Cambio del sentido de la corriente en la pila de corrosión. Por ejemplo, al unir acero con un metal más activo (zinc o magnesio) se puede llegar a suprimir la corrosión del acero, ya que dejará de actuar como ánodo y pasará a comportarse como cátodo, dejando el papel de ánodo al metal más activo (zinc o magnesio). Este es el principio de la protección catódica¹.

Actualmente hay técnicas electroquímicas para proteger al acero; entre otras la realcalinización del concreto, la extracción de cloruros y una de las más importantes y utilizada: la protección catódica. Sin embargo, en estructuras nuevas debe comenzarse realizando un buen concreto como la más viable solución, ya que no existe mejor protección de la varilla de refuerzo que la película pasivante formada por la hidratación del cemento.

En el concreto existen diversas técnicas para mantenerlo en buen estado y minimizar el avance de la corrosión; algunas de ellas son:

Extracción de los iones cloruro en el concreto

Es una técnica electroquímica, donde se aprovecha la carga negativa del ion cloruro para ser atraído por un ánodo externo a la superficie de la estructura con que se trabaja; se trata de remover la mayor cantidad de iones cloruro libre con la producción de OH^- que permite restablecer la alcalinidad del concreto y mantener al acero de refuerzo pasivado.

Realcalinización

Es un tratamiento temporal que incrementa la alcalinidad del concreto (pH) por medio de un electrolito que penetra el concreto por los poros desde la superficie exterior; de ahí que este proceso re-pasiva el acero ante las reacciones

¹ Ávila, J; Genescá, J. Más allá de la herrumbre I, 3ª. Edi, La ciencia para todos. México (2002)

electroquímicas que ocurren en el mismo. Esta técnica puede ser utilizada para el caso de concreto carbonatado.

Recubrimientos

Estos se aplican directamente a la varilla de refuerzo; los más utilizados son los recubrimientos epóxicos y actualmente la varilla de acero galvanizada. El epóxico protege como una barrera física, pero es perjudicial cuando esta barrera presenta daños o poros, ya que forman microceldas galvánicas ocasionando la corrosión por picaduras.

El galvanizado es un método de protección contra la corrosión en el acero de refuerzo, por lo que en el concreto se estudia ahora con mayor empeño, ya que el zinc protege al acero por un mecanismo de sacrificio. Actualmente se busca mejorar el acero galvanizado por medio de galvanizado en caliente y añadiendo elementos como el níquel, que supera la adherencia del zinc proporcionando buena protección contra la corrosión de la varilla¹.

En términos generales, un buen concreto debe tener:

- Una relación agua/cemento baja
- Una baja porosidad
- Una alta compacidad
- Un bajo contenido de sales, principalmente cloruros

La compacidad del concreto es la propiedad más importante para efectos de su resistencia a la penetración de agentes agresivos externos. Es inversamente proporcional a la porosidad, y entre más alta sea la compacidad mayor será la protección de la varilla de refuerzo contra la penetración de agentes agresivos. La compacidad es función de la cantidad y calidad de los materiales y de la adecuada proporción entre ellos; sin embargo, puede afectarse por la mala homogeneidad del concreto. Los aditivos son productos orgánicos e inorgánicos formulados para mejorar algunas propiedades del concreto, en estado fresco y endurecido.

Los aditivos se agregan al concreto antes o durante el proceso de amasado en una proporción no mayor al 5% en peso de cemento; se clasifican de acuerdo con su acción principal en aceleradores de fraguado y endurecimiento, retardadores, reductores de agua, o plastificantes y expansores.

Algunos de los aditivos más utilizados se presentan a continuación:

Aceleradores de fraguado: Cloruros [CaCl_2 (más eficaz), NaCl , AlCl , FeCl], hidróxidos, carbonatos, silicatos.

Retardadores de fraguado: Existen dos tipos: inorgánicos (ZnO , PbO , H_3PO_4 , H_3BO_4), orgánicos (ácidos orgánicos, glicerina). Dependen del tipo, cantidad de cemento, dosificación y la relación agua/ cemento (Neville, 1999). Estos aditivos,

¹ Shibli, et al, 2004

según el medio donde se apliquen pueden afectar el proceso de corrosión, ya que las sustancias de los aditivos reaccionan con los compuestos del cemento, como son el silicato y el aluminato tricálcico, que se acostumbra representar en Ingeniería Civil como AC_3 , que reaccionan con los iones cloruro; y debido a la naturaleza de éstos despasiva a la varilla de refuerzo, y cuando alguno de los aditivos reacciona con el concreto pueden acelerar o pasar desapercibidos en esta reacción¹. En general, debe diseñarse una buena obra de construcción, implementando y estableciendo el mantenimiento adecuado de la estructura².

2.1 PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica es una técnica que se emplea desde el siglo antepasado (XIX), Sir Humphrey Davy desarrolló en 1824 una forma de proteger los cascos de cobre de los barcos, empleando ánodos de hierro. Así se considera a Sir Humphrey el padre de la protección catódica, después de esto se continuó la investigación sobre la protección catódica, por lo que en 1840 Robert Mallet produjo una aleación de Zn muy adecuada para ánodos de sacrificio.

Cuando los cascos de madera se remplazaron por los de acero, se hizo tradicional acoplar placas de Zn a todos los buques del Almirantazgo Inglés. Estas placas de zinc dieron protección localizada en especial contra la acción galvánica de las hélices de bronce, pero la protección catódica total de las embarcaciones marinas no se volvió a explorar de nuevo hasta alrededor de 1950; esta vez por la marina canadiense, mediante un empleo adecuado de pinturas antiorganismos, en combinación con pinturas anticorrosivas, con lo que se demostró la factibilidad de protección catódica de embarcaciones, y que pueden obtenerse economías considerables en los costos de mantenimiento.

La primera aplicación de protección catódica por corriente impresa para la protección de estructuras enterradas se efectuó en Inglaterra y en Estados Unidos; desde entonces, el empleo de la protección catódica se ha usado con éxito, extendiéndose su aplicación por todo el mundo³.

Sin embargo, no fue hasta 1970 cuando este método se comenzó a emplear en estructuras de concreto reforzado, ya que se considera el único capaz de detener el proceso de corrosión, aún en concentraciones elevadas de cloruros y con deterioros muy avanzados en las estructuras; la FHWA declaró que actualmente en Estados Unidos el método de protección catódica de estructuras es el más utilizado tanto en reparaciones como en estructuras nuevas⁴.

¹ Helene, P; Pereira, F. Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón Reparación, Refuerzo y Protección. 1ra. Edi., Degussa, Sao Paulo (2003)

² Castro, 2003

³ Uhlig, 1970

⁴ Whitmore, D; Abbott, S. NACE CORROSION 2003, Houston Texas, Paper 03301:1-8 (2003)

La protección catódica se considera el único sistema de verdadero control de la corrosión al permitir que la estructura se comporte como cátodo, llegando a disminuir la velocidad de corrosión, y garantizar así la vida de servicio de la estructura¹. El desarrollo de esta técnica ha sido tan grande que condujo a formar la Asociación de Protección Catódica en Estados Unidos en 1936, la cual sirvió como punto de partida para la creación de la NACE (National Association of Corrosion Engineers), institución reconocida mundialmente para la prevención y control de la corrosión.

La protección catódica opera al producir un flujo de corriente directa de una fuente externa a la estructura metálica que se quiere proteger (cátodo). Cuando la corriente es adecuada y propiamente distribuida, la corrosión puede ser mitigada y la estructura protegida catódicamente. Para que el sistema de protección catódica funcione, la corriente debe descargarse del ánodo al electrolito; al descargar la corriente, el ánodo se corroe².

Existen dos tipos de protección catódica: por corriente impresa, y por ánodos galvánicos o de sacrificio. Las aplicaciones incluyen barcos, tuberías, tanques de almacenamiento, puentes, etc.

2.1.1 Protección catódica por corriente impresa

La protección se logra aplicando una corriente externa a partir de un rectificador que suministra corriente continua de bajo voltaje. La terminal positiva de la fuente de corriente se conecta al ánodo auxiliar (grafito, por ejemplo) localizado a cierta distancia de la estructura a proteger, y la terminal negativa se conecta a la estructura metálica que se desea proteger. Es indispensable la existencia del electrolito, que completa el circuito. El sistema se muestra en la fig 4. Este tipo de sistema trae consigo el beneficio de que los materiales que se utilizan como ánodos se consumen a velocidades menores, por lo que se pueden descargar mayores cantidades de corriente y mantener una vida más amplia, además de ser baratos. Los materiales más empleados como ánodos auxiliares son el grafito, la chatarra de hierro, y el ferrosilicio entre otros³.

¹ **Castro**, P; Moreno E. CONPAT 2003, Mérida Yucatán, México, Vol I: Control de calidad: 71-84, II.65-II.72, V.9-V.16, II.97-II.104, IX.9-X.16, VI.1-VI.8Castro, et al, (2003)

² **Ávila**, J; Genescá, J., Más allá de la herrumbre II, 3ª. Edición, La ciencia para todos. México (2003)

³ **Ávila**, J; Genescá, J; Más allá de la herrumbre II, 3ª. Edi, La ciencia para todos. México (2003)

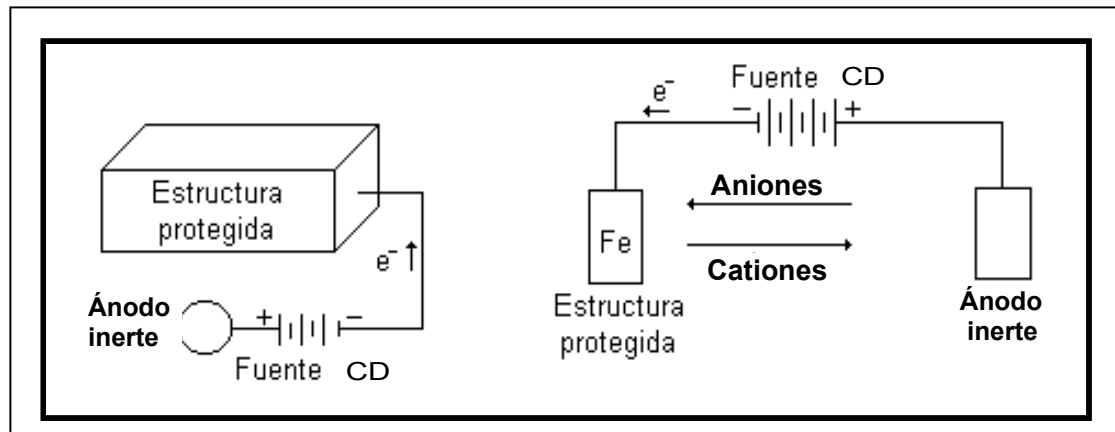


Figura 4
Protección catódica por corriente impresa

Al usar la protección catódica en las estructuras de concreto, el objetivo es forzar la superficie de las barras en el concreto a aceptar la corriente de polarización¹. Los sistemas de protección catódica por corriente impresa han trabajado con los ánodos colocados externamente a la estructura, ya que se han utilizado en tuberías subterráneas y estructuras de concreto marinas mediante un rectificador como fuente de alimentación.

En virtud de que todo elemento metálico conectado e inmerso en el electrolito es un punto de drenaje de corriente forzada y por tanto de corrosión; al emplear un sistema de protección catódica por corriente impresa, es necesario un mayor cuidado en las instalaciones y un aislamiento total de cables de interconexión.

Ánodos auxiliares utilizados

Los tipos de ánodos utilizados se escogen en función de sus prestaciones necesarias y del medio en que serán colocados. En general, un buen ánodo debe poseer las siguientes propiedades:

- Bajo consumo
- Densidad de corriente drenada elevada
- Pequeñas dimensiones
- Baja resistividad
- Buena resistencia mecánica

Elevado potencial de ruptura representa el potencial anódico máximo que puede soportar el ánodo, y es función de la densidad de corriente suministrada por él mismo; si se supera este valor de potencial, el ánodo se consume a gran velocidad.

¹ASM HANDBOOK Corrosion, Vol 13 (1998)

Fuentes de corriente

Las más utilizadas son los rectificadores, los cuales permiten el paso de la corriente en un sólo sentido. Es un mecanismo de transformación de corriente alterna a corriente continua de bajo voltaje, mediante la ayuda de diodos de rectificación, comúnmente de selenio o silicio y sistemas de adecuación regulable manual y/o automática, a fin de controlar las características de la corriente según las necesidades del sistema a proteger.

Las condiciones que el diseñador debe estimar para escoger un rectificador son:

1. Características de la corriente alterna disponible en el área (voltios, ciclos, fases)
2. Requerimiento máximo de salida en CD (amperios y voltios)
3. Sistemas de montaje: sobre el piso, empotrado en pared, en un poste
4. Tipos de elementos de rectificación: selenio, silicio
5. Máxima temperatura de operación
6. Sistema de seguridad: alarma, breaker, etc
7. Instrumentación: voltímetros y amperímetros, sistemas de regulación

Otras fuentes de corrientes

Es posible que habiendo decidido utilizar el sistema de corriente impresa no se disponga en la zona de líneas de distribución de corriente eléctrica, por lo que sería conveniente analizar la posibilidad de hacer uso de fuentes como:

- Baterías, de limitada aplicación por su bajo drenaje de corriente y vida limitada
- Motores generadores
- Generadores termoeléctricos

2.1.2 Protección catódica por ánodos de sacrificio

La protección por ánodos de sacrificio implica la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero, el cual actuaría como ánodo. Se han empleado ánodos de magnesio, aluminio, zinc y sus aleaciones, ya que tienen un potencial muy negativo que protege a la varilla de acero, tienen poca tendencia a la polarización, y además presentan una corrosión uniforme.

En los últimos años se ha incrementado la investigación en el uso de ánodos de sacrificio para la protección catódica de la armadura en estructuras de concreto armado, debido principalmente a la simplicidad de su aplicación y el bajo mantenimiento que este sistema requiere; la fig 5 muestra un sistema típico de protección catódica por ánodos de sacrificio. La diferencia de potencial entre el metal anódico y la estructura a proteger es de bajo valor, por lo que este sistema se usa para pequeños requerimientos de corriente, y en medios de baja resistividad.

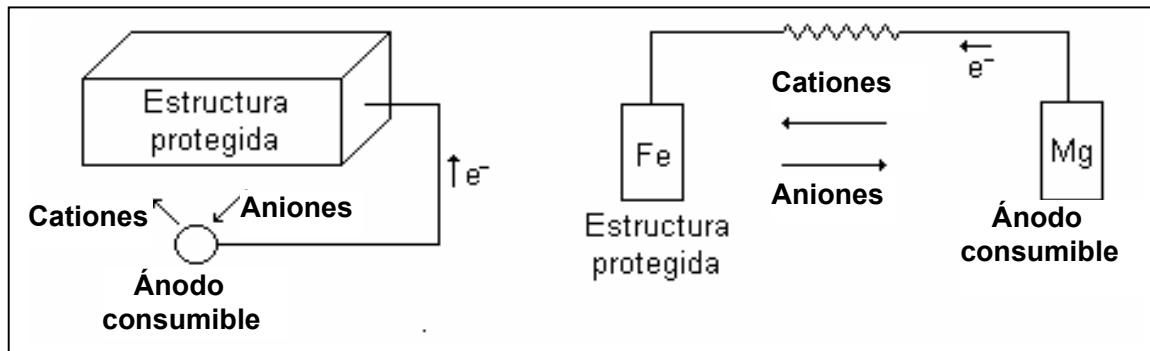


Figura 5
Sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio

a) Características de un ánodo de sacrificio

1. Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo para polarizar la estructura de acero (metal que normalmente se protege) a $-0,8$ V contra el electrodo de Ag/AgCl. Sin embargo, el potencial no debe ser excesivamente negativo, ya que eso motivaría un gasto superior con un innecesario paso de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre $-0,95$ a $-1,7$ V vs Ag/AgCl.
2. El metal debe presentar una pequeña tendencia a la polarización, no desarrollar películas pasivantes protectoras, y 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 (A-h/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 poderse fundir en diferentes formas y tamaños.
6. Bajo costo.

b) Tipos de ánodos

Considerando que el flujo de corriente se origina de la diferencia de potencial entre el metal a proteger y el ánodo, éste último deberá ocupar una posición más elevada en la tabla de potencial (serie electroquímica). De acuerdo con esto, los materiales anódicos que pueden ser utilizados son el zinc, magnesio y aluminio.

Magnesio: Los ánodos de magnesio tienen un alto potencial con respecto al hierro y están libres de pasivación. Se diseñan para obtener el máximo rendimiento posible y son apropiados para oleoductos, pozos, tanques de

almacenamiento de agua; incluso para cualquier estructura que requiera protección catódica temporal.

Se utilizan en estructuras metálicas enterradas en suelos de baja resistividad hasta 3 000 Ω -cm. No son recomendables en agua de mar, ya que su elevada autocorrosión hace que los rendimientos sean muy bajos y su mejor campo de aplicación es en medios de resistividad elevada, entre 5 000 y 20 000 Ω -cm.

Zinc: La gran utilización del zinc como ánodo de sacrificio se justifica porque el valor relativamente elevado de su potencial de disolución, le confiere un alto rendimiento de corriente. Uno de los factores que más puede limitar su empleo es la resistividad del medio agresivo; de ahí que se recomienda aplicarlo en resistividades inferiores a 5 000 Ω -cm; también hay que cuidar su empleo en presencia de aguas dulces a temperatura arriba de 65°C, ya que en estas condiciones puede invertir su polaridad y hacerse catódico con relación al acero. Como ánodo galvánico tiene un empleo masivo, sobre todo para la protección catódica de estructuras metálicas inmersas en agua de mar, buques, andenes marítimos, refuerzos metálicos, boyas, plataformas de perforación de petróleo, depósitos de agua, etc, o en suelo con resistividad eléctrica de hasta 1 000 Ω -cm.

Aluminio: El aluminio a pesar de ser por sus características electroquímicas el material idóneo para emplearse como ánodo de sacrificio, este metal forma una película de óxido de aluminio (pasivación anódica) que lo hace muy resistente a la corrosión y por tanto, al sacrificio. Tiene una capacidad elevada de corriente, por lo que un sólo ánodo de aluminio puede ejercer la acción de tres de zinc de iguales características, para una misma duración del ánodo. Es por ello, que para su aplicación se han hecho múltiples aleaciones que limitan la pasivación anódica del mismo, incrementando su utilidad en tanques de lastre, carga lastre, petroleros y principalmente en estructuras sumergidas e inmersas en agua de mar; aunque el precio del aluminio es más elevado que el del zinc, al tener que colocar menos ánodos ésta diferencia se compensa.

Relleno Backfill

Para mejorar las condiciones de operación de los ánodos en sistemas enterrados, se utilizan algunos rellenos; entre ellos, el de Backfill especialmente con ánodos de zinc y magnesio; estos productos químicos rodean completamente el ánodo produciendo algunos beneficios como:

- Promueven una mayor eficiencia
- Desgaste homogéneo del ánodo
- Evita efectos negativos de los elementos del suelo sobre el ánodo
- Absorben humedad del suelo, manteniendo dicha humedad constante

La composición típica del Backfill para ánodos galvánicos está constituida por yeso (CaSO_4), bentonita, sulfato de sodio; y la resistividad de la mezcla varía entre 50 y 250 Ω -cm.

En la tabla 2 se muestran las características de los ánodos enterrados con relleno Backfill; éste promueve una mejor eficiencia al brindar un desgaste homogéneo, mejorando así el rendimiento del ánodo.

Tabla 2
Características de los ánodos galvánicos

Ánodo	Eficiencia (%)	Rendimiento A-h/kg	Contenido de energía A-h/kg	Potencial de trabajo (voltios)	Relleno (cuando se usa en tuberías enterradas)
Zinc	95	778	820	-1,10	50 % yeso; 50 % bentonita
Magnesio	95	1102	2204	-1,45 a -1,70	75 % yeso; 20 % bentonita; 5 % SO ₄ Na ₂
Aluminio	95	2817	2965	-1,10	----

Los ánodos de sacrificio utilizados para protección catódica tienen ventajas y limitaciones uno sobre otro, debido a su rendimiento, eficiencia y potencial; lo mismo pasa con los sistemas de protección catódica; en la tabla 3 se muestran las ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica.

En una instalación de protección catódica conviene comprobar periódicamente el funcionamiento del sistema, lo cual se realiza con ayuda de un electrodo de referencia y un multímetro. Los electrodos de referencia más empleados son el de plata/ cloruro de plata (Ag/ AgCl), y el de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄).

La protección catódica por ánodos de sacrificio puede emplear ánodos de sacrificio externos que se colocan en el exterior del concreto, o ánodos de sacrificio internos que es una nueva tecnología en la que el ánodo va embebido dentro del concreto.

Ánodos de sacrificio externos

En los últimos años se han venido desarrollando ánodos de sacrificio externos que pueden ser recubrimientos metálicos, los cuales son una alternativa simple y barata como sistema de protección catódica. Este recubrimiento metálico (40 - 50 µm), denominado termoroziado o metalizado, consiste en alambres o polvo de metal, por ejemplo de zinc, que se funden por arco eléctrico; y se aplica sobre la superficie del concreto mediante una corriente de aire.

Tabla 3
Ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica

Ánodos galvánicos	Corriente impresa
VENTAJAS	
Fácil de instalar	Sirve para áreas grandes
No requieren potencia externa	Aplicables en cualquier medio
Voltaje de aplicación fijo	Útil en diseño de cualquier requerimiento de corriente mayor de 5 amperios
Aplicable en casos de requerimiento de corriente pequeña, económico hasta 5 amperios	Resistividad eléctrica ilimitada
La interferencia con estructuras enterradas es prácticamente nula	
Mantenimiento simple	
DESVENTAJAS	
Sólo se los utiliza hasta un valor límite de resistividad eléctrica hasta 5 000 ohm-cm	Amperaje variable
Útil en medios de baja resistividad	Voltaje de aplicación variable
Amperaje limitado	Requiere potencia externa
	Mantenimiento no simple
	Alto costo de instalación
	Es necesario analizar la posibilidad de interferencia

Los sistemas de zinc metalizado ofrecen muchas ventajas sobre los métodos convencionales de control de la corrosión, ya que tienen un costo mínimo de reparación reduciendo la remoción de concreto contaminado con cloruros, proporcionando una efectiva protección contra la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto contaminadas con cloruros.

Es el sistema con menor costo por ciclo de vida; requiere de un mantenimiento mínimo durante el tiempo de vida del sistema; y los sistemas de sacrificio pueden ser convertidos fácilmente a sistemas de corriente impresa, sin implicar un diseño de zonas complejas con extenso cableado y requerimientos de monitoreo; puede ser protegido con una variedad de recubrimientos finales para propósitos estéticos y para maximizar la vida efectiva del sistema. Se aplica a columnas, vigas y pilotes

de puentes de concreto contaminadas por iones cloruros, y en estructuras en contacto con sales anticongelantes o ambientes marinos¹.

El funcionamiento es muy sencillo, ya que los ánodos de zinc al tener una diferencia de potencial con el acero; dado el ambiente marino y la alta humedad crea una reacción electroquímica entre ellos, que protege el acero haciéndolo cátodo en el sistema. Existe un tipo de ánodos denominados genéricamente "bulk", los cuales tienen diferente geometría y que se usan externamente en la protección catódica de tuberías enterradas.

Ánodos de sacrificio internos

Actualmente se estudian los ánodos de sacrificio embebidos en el interior del concreto; este sistema se aplica en la reparación con parches protectores, y para protección de los alrededores de concreto contaminado con cloruros².

El parcheo es la reparación del concreto contaminado con cloruros o carbonatado, y puede crear incompatibilidades electroquímicas que conducen a la corrosión acelerada de la varilla en el concreto vecino, debido a la diferencia de concentración de los agentes agresivos. El resultado es una nueva celda que puede requerir parcheo adicional en tres o cinco años. La idea de este sistema es que los ánodos galvánicos instalados en la reparación del parcheo se corroan sacrificadamente, y de esta manera reducir la potencialidad para una nueva corrosión sobre el acero de refuerzo, y al mismo tiempo mitigar problemas existentes de corrosión. El resultado es una extensión de la vida de servicio en la reparación con parches.

El sistema consiste en un ánodo galvánico embebido dentro del concreto, protegiendo las barras cercanas a las zonas donde el concreto no se ha removido, o sea no activándolas como ocurre convencionalmente. Dichos ánodos están constituidos por un núcleo de zinc rodeado por una matriz activa de componentes cementantes; sus dimensiones más comunes son 63 mm (2 1/2") diámetro x 28 mm (1 1/8") de alto; el ánodo galvánico es rápida y fácilmente asegurado con el acero de refuerzo (fig 6).

¹ **Yadav**, A P; Nishikata, A; Tsuru, T. Degradation Mechanism of Galvanized Steel in Wet-dry Cyclic Environment Containing Chloride Ions. CORROSION SCIENCE: Vol 46 (2004)

² **Whitmore**, D; Abbott, S. NACE CORROSION 2003, Houston Texas, paper 03301 (2003)

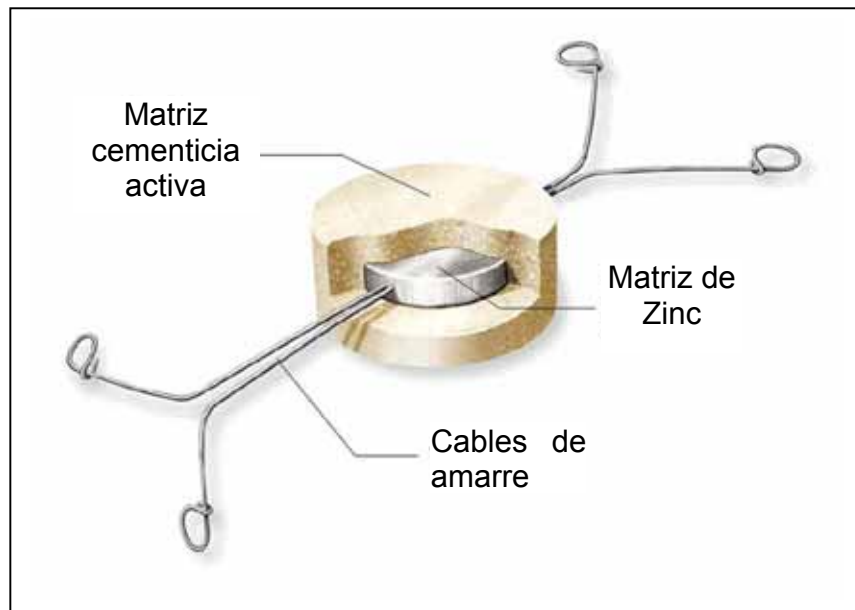


Figura 6
Representación esquemática de los ánodos puntuales

Una vez instalado, el núcleo de zinc se corroerá preferencialmente ejerciendo la protección catódica del acero de refuerzo. El zinc puede pasivarse; sin embargo, estos ánodos contienen en el mortero que rodea al zinc, una solución de hidróxido de litio monohidratado que evita, debido a su alta higroscopicidad, que el zinc se pasive y siga actuando eficientemente por su elevada higroscopicidad¹.

Se ha indicado que estos ánodos proveen protección localizada contra la corrosión; son efectivos en concreto contaminado con cloruro y carbonatado; económicamente rentables, ya que extienden la vida de servicio (10 a 20 años) por reparaciones con parcheo en concreto; son de fácil instalación, sin embargo, tienen limitaciones, ya que sólo son adecuados para estructuras pequeñas, pues para grandes estructuras, el costo sería elevado².

¹ **Vaysburd**, A. Galvashield Embedded Galvanic Anodes for Repair of Concrete. Concrete Innovations Appraisal Service (CIAS): CIAS REPORT (2001)

² **Wittmore**, D. 2005. www.vector-corrosion.com

3 Métodos de monitoreo

Actualmente se emplean diversas técnicas electroquímicas para evaluar los ánodos embebidos internamente, algunas de ellas tienen ventajas y limitaciones sobre otras¹; las más utilizadas son potencial de media celda, corriente catódica, resistividad, decaimiento de depolarización, resistencia a la polarización, impedancia electroquímica, y para las cuales se emplean diversos criterios internacionales para determinar si una estructura se está corroyendo, o se encuentra protegida².

La Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE) especifica los siguientes criterios para determinar cuándo una estructura de acero está protegida catódicamente.

- Un voltaje de $-0,85$ V respecto al electrodo de Cu/CuSO₄ saturado
- Un desplazamiento del E_{corr} de al menos 300 mV en dirección negativa, causado por la aplicación de la corriente de protección catódica
- Un desplazamiento del E_{corr} de 100 mV en dirección negativa, determinado por la interrupción de la corriente y eliminando la caída óhmica

3.1 Decaimiento de depolarización

Esta es una técnica electroquímica que establece la NACE para evaluar cuándo una estructura está protegida catódicamente.

A una estructura, a la cual se le está aplicando protección catódica, se le interrumpe la corriente de protección; y por medio de la evaluación de potenciales de media celda, se observa el decaimiento de potencial durante cuatro horas y hasta las 24 horas; si la estructura está protegida, debe cumplir el criterio de un desplazamiento de 100 mV en dirección negativa, determinado por la interrupción de la corriente y eliminando la caída óhmica.

3.2 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto se considera una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la

¹ **González**, J A; iranda, J M; Birbilis, N; Feliu, S. Electrochemical Techniques for Studying Corrosion of Reinforcing Steel: Limitations and Advantages. CORROSION: Vol. 61 (2005)

² **Andrade**, C; Alonso, C, Gulikers, A; Polder R; Cigma, R; Vennesland, Ø., Salta, M; Raharinaivo, A; Elsener, B. Test Methods for On-site Corrosion Rate Measurement of Steel Reinforcement in Concrete by Means of the Polarization Resistance Method. Materials and Structures: Vol 37 2004 y **Bosch** R W. Electrochemical Impedance Spectroscopy for the Detection of Stress Corrosion Cracks in Aqueous Corrosion Systems at Ambient and High Temperature. Corrosion Science: Vol. 47 (2005)

estructura, desde el punto de vista de resistencia mecánica. La resistencia a la compresión del concreto se define como la tensión máxima (de ruptura en general) de compresión axial, en MPa, que puede soportar un testigo cilíndrico de diámetro igual o superior a tres veces el tamaño máximo nominal (T.M.N.) del agregado. La relación entre la altura (h) y el diámetro (\emptyset) del testigo debe ser $h/\emptyset = 2$, y deseable que nunca sea $h/\emptyset < 1$. Esta prueba se realiza de acuerdo con la norma ASM/C39/C39M-01. El valor de la resistencia mecánica, por si sólo, no es indicativo de la durabilidad del concreto, ya que dependerá de varios factores entre los cuales se puede mencionar: la relación a/c; la dosificación; el tipo de cemento; el espesor de recubrimiento de la varilla; etc. Sin embargo, en general se acepta que concretos de elevada resistencia >45 MPa son durables, y que concretos por debajo de 20 MPa son de baja durabilidad.

3.3 Medición de potenciales

El potencial electroquímico es el potencial eléctrico de un metal con respecto a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto. El objetivo es medir el potencial de la varilla mediante electrodos de referencia.

Criterios de evaluación

Las medidas de potencial informan sobre la probabilidad de corrosión de la varilla de una estructura de concreto, pero es esencial que los resultados sean correctamente interpretados con la información disponible sobre las condiciones de humedad, contaminación, calidad del concreto, etc. En la tabla 4 se muestran los criterios para evaluar el potencial.

Tabla 4
Criterio de valoración de potenciales del acero en concreto vs Cu/CuSO₄.

Condición	Potencial (E) V	Observaciones	Riesgo de daño
Estado pasivo	+0,200 a -0,200	Ausencia de Cl ⁻ pH > 12,5 H ₂ O (alta HR)	Despreciable
Corrosión localizada	-0,200 a -0,600	Cl ⁻ , O ₂ , H ₂ O (alta HR)	Alto
Corrosión uniforme	-0,150 a -0,600	Carbonatado O ₂ , H ₂ O, (alta HR)	Moderado Alto
	+0,200 a -0,150	Carbonatado O ₂ , seco (baja HR)	Bajo
	-0,400 a -0,600	Cl ⁻ elevado, H ₂ O ó carbonatado H ₂ O, (alta HR)	Alto
Corrosión uniforme	<-0,600	Alto Cl ⁻ , alta H ₂ O (Sin O ₂)	Despreciable

3.4 Medición de la velocidad de corrosión

Se llama velocidad de corrosión o densidad de corriente (i_{corr}), a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son g/cm^2 –día; aunque la forma usual de definirla a partir de medidas de tipo electroquímico es en $\mu\text{A/cm}^2$, o transformando este dato a partir de la densidad del metal, en unidades de velocidad (mm/año).

Criterios de evaluación

Tabla 5

Criterios de evaluación para la velocidad de corrosión en términos de la vida útil de una estructura de concreto

i_{corr} ($\mu\text{A} / \text{cm}^2$)	Nivel de corrosión
< 0,1	Despreciable
0,1 – 0,5	Moderado
0,5 - 1	Elevada
> 1	Muy elevada

3.5 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.

Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto, y en menor grado de la hidratación de la mezcla y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables, tales como el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad, entre otras.

Criterios de evaluación

No existe un acuerdo de carácter general acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual, el riesgo de corrosión de la varilla llegue a considerarse como despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se pueden utilizar como criterio general los parámetros que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6

Criterios de evaluación para la resistividad eléctrica

Resistividad ($\rho = \text{K}\Omega. \text{cm}$)	Nivel de riesgo
> 200	Bajo
$200 > \rho < 10$	Moderado
< 10	Alto

3.6 Corriente catódica

La corriente catódica es la cantidad de corriente aplicada por el sistema de protección catódica al metal protegido. La corriente aplicada, controla parcialmente el potencial de polarización producido por el sistema.

4 Metodología

Se llevó a cabo la caracterización de los materiales con objeto de realizar la mezcla de concreto, la cual se hizo de acuerdo con normas internacionales a nivel laboratorio para evaluar la calidad de los materiales, y poder así diseñar la mezcla de concreto, esta caracterización es necesaria para tener una medida de la calidad del concreto.

Potencial electroquímico de media celda. La medición de potenciales se realizó para observar el comportamiento de la varilla de acuerdo con el criterio de la NACE; que establece que para que una estructura esté protegida debe mantener un voltaje de $-0,850$ V respecto al electrodo de Cu/CuSO_4 . Esta prueba se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 876 – 91¹. Esta prueba mide la probabilidad de que exista o no corrosión en la varilla de refuerzo.

Corriente catódica, se midió para conocer la cantidad de corriente que drenan los ánodos a la varilla, a lo largo de la estructura.

Decaimiento de depolarización. Un desplazamiento del E_{corr} de 100 mV en dirección negativa, determinado por la interrupción de la corriente y eliminando la caída óhmica, establece que existe protección catódica.

Resistencia a la polarización. Medida indirecta de la velocidad de corrosión o densidad de corriente (i_{corr}).

Resistividad eléctrica. Medida de la resistividad del medio en el cual se está llevando a cabo la corrosión, ya que ésta representa la facilidad o dificultad que tendrán los iones para moverse a lo largo de la viga de concreto.

Resistencia a la comprensión. Es la tensión máxima (de ruptura en general) de compresión axial en MPa, que puede soportar un cilindro de concreto.

IV.3 Diseño de experimentos

Se caracterizaron los agregados gruesos y finos para diseñar la mezcla de concreto; para ello, se les realizaron las siguientes pruebas

- Análisis granulométrico
- Densidad específica
- Absorción

¹ **ASTM C 876 – 91.** Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. ASTM ANNUAL BOOK OF STANDARDS. Concrete and Aggregates. Vol 04.02: 466-477

- Peso volumétrico suelto
- Peso volumétrico compacto
- Tamaño máximo
- Módulo de finura

Una vez caracterizados los agregados, se diseñó una mezcla con una relación agua/cemento (a/c) de 0,5 que es la que contienen las vigas de concreto.

Se prepararon seis vigas de concreto reforzado de 60 x 10 x 15 cm, cuatro cilindros de 10 x 20 cm para las pruebas de resistencia a la compresión, y cuatro cilindros de 10 x 10 cm que contienen ánodos discretos, en los que se evaluó la autocorrosión de los mismos. Las probetas se muestran en la fig 7.



Figura 7
Probetas durante el proceso de colado

El diseño de las vigas corresponde la fig 8; y en la fig 9 se muestran los moldes en los que se colaron las probetas. Cada viga consta de una varilla de 60 cm de largo y 9,5 mm de diámetro como contra-electrodo, cinco secciones de varilla de 9,5 mm de diámetro por 10 cm de largo cada una, unidas mecánicamente, pero aisladas eléctricamente mediante tubos de acrílico y un electrodo de referencia de Ti/TiO_2 .

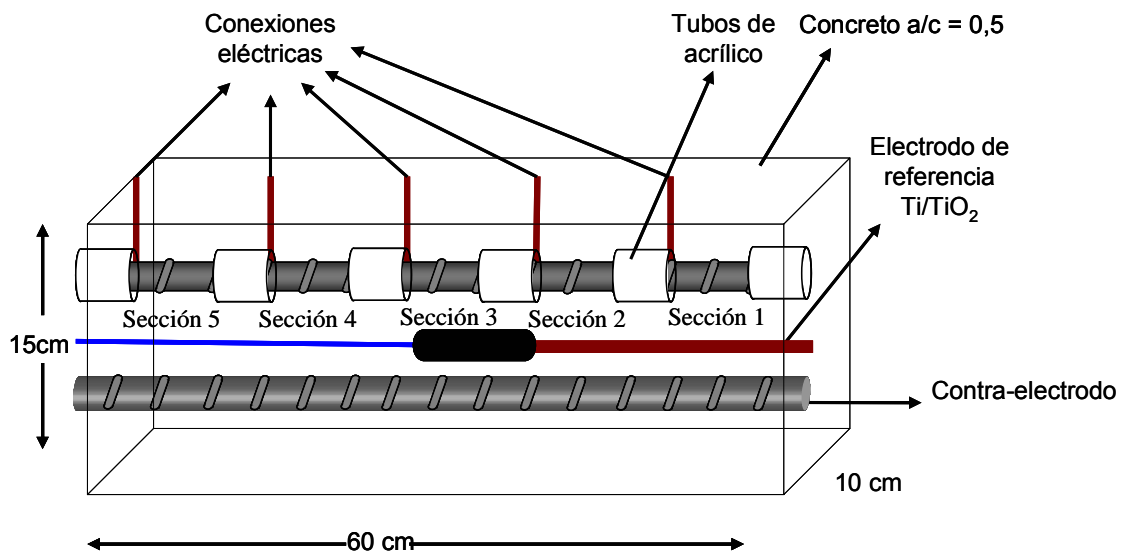


Figura 8
Diseño de las probetas



Figura 9
Diseño de los moldes para las probetas

Cada sección de la varilla, el contra-electrodo, y el electrodo de referencia tienen una conexión eléctrica hacia el exterior con las cuales se realizaron las pruebas electroquímicas (fig 10).

Se prepararon dos mezclas de concreto; una sin cloruros, y otra con cloruros al 3% en peso de cemento para usarse en la reparación de las probetas y colocación del ánodo de sacrificio. Las probetas se colaron sin el ánodo discreto; el cuál se colocó y conectó 28 días después de coladas para simular una reparación del

concreto y la aplicación de protección catódica con ánodos de sacrificio discretos (fig 11).



Figura 10
Monitoreo electroquímico

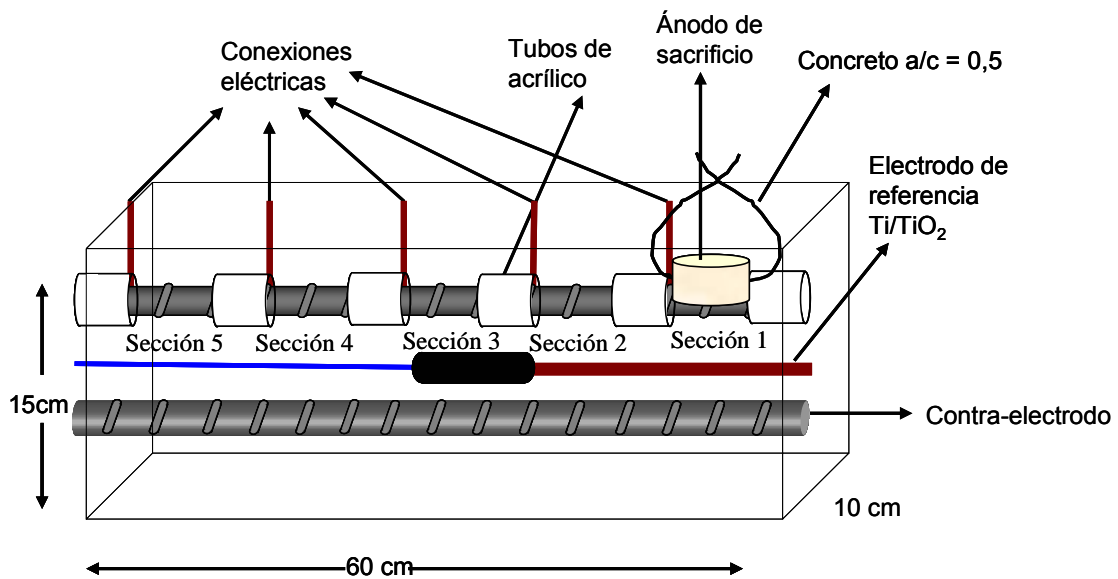


Figura 11
Diseño de la reparación

En total se realizaron seis vigas, tres sin adición de cloruros y tres contaminadas con cloruros, dos cilindros de 20 x 20 cm sin cloruros y dos con cloruros; cuatro cilindros de 10 x 10 cm que contienen el ánodo discreto, dos sin cloruros y dos con cloruros; y un cilindro de 10 x 10 cm con una concentración de 0,2% de Cl^- para evaluar el mortero de reparación.

Se hicieron conexiones eléctricas para la evaluación electroquímica, que incluyen la interconexión de cada una de las secciones; se colocó un interruptor entre una sección y otra, para realizar las mediciones individuales y la conexión del ánodo de sacrificio que drena la corriente a todas las secciones. Se llevó a cabo la conexión del electrodo de referencia de Ti/TiO₂, y el contra/electrodo hacia el exterior; además del monitoreo electroquímico de las probetas con las mediciones siguientes:

- Potenciales de media celda
- Corriente catódica
- Decaimiento de polarización
- Resistividades
- Resistencia a la polarización (Rp).

Para obtener una evaluación continua del sistema mediante protección catódica, se realizó diariamente la medición de potenciales de media celda a cada sección de varilla contra el electrodo de referencia interno de Ti/TiO₂, y contra un electrodo externo de Cu/CuSO₄. La fig 12 muestra la cámara de humedad en la que las probetas fueron mantenidas a humedad controlada.



Figura 12
Cámaras de humedad relativa controlada

Para cuantificar la corriente catódica, se midió y registró diariamente a fin de observar la cantidad de corriente que el ánodo drenaba a cada sección de la varilla, dependiendo de la distancia a la que se encontraba.

Se midió el decaimiento de polarización cada 50 días a cada sección de la varilla, para comprobar la eficiencia de la protección catódica (fig 13).



Figura 13
Prueba de decaimiento de depolarización

Se realizó una evaluación cada 50 días de la resistividad eléctrica y resistencia a la polarización. Además de las pruebas electroquímicas se efectuó el ensayo mecánico de la resistencia a la compresión del concreto.

Se aplicaron las pruebas de resistencia a compresión a los cilindros de concreto 90 días después de haber sido fabricados; estas se realizaron en la máquina INSTRON (fig 14).



Figura 14
Ensayo de resistencia a compresión

Los cilindros fueron cabeceados con azufre para obtener en las caras de compresión, una superficie lisa libre de puntos de concentración de esfuerzos que pudieran afectar el resultado.

5 Resultados

Para mostrar de una manera más sencilla los resultados obtenidos en cada una de las pruebas y facilitar la comprensión de los mismos, se utilizó la siguiente nomenclatura para cada probeta.

1, 2, 3, 4, 5, 6 es el número de probeta; SCL significa sin cloruros; y CCL con cloruros.

Ejemplo: 1SCL significa que es la probeta 1 sin cloruros

Las probetas sin cloruros son la número 1, 2, 3, y con cloruros la 4, 5, 6.

La tabla 7 contiene los resultados de resistencia a compresión en los cilindros de concreto diseñados para esa prueba.

En el punto VI.2 se incluyen las graficas de potencial de media celda vs tiempo, en las cuales se muestran tres etapas A, B y C; la etapa A corresponde a los potenciales antes de colocar el ánodo de sacrificio; la etapa B es la de reparación y colocación del ánodo de sacrificio dentro del concreto; y la C es la interconexión del ánodo de sacrificio a la varilla de refuerzo; es el periodo en el que el ánodo de sacrificio ejerce protección catódica sobre la varilla de refuerzo. Este potencial se midió en volts contra un electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 .

En el punto VI.3 se presentan las graficas de corriente catódica vs tiempo; se muestran las cinco secciones en una sola grafica para analizar la cantidad de corriente drenada por el ánodo a cada sección de la varilla a lo largo del tiempo.

En el punto VI.4 aparecen los resultados de las curvas de polarización de las seis probetas a lo largo del tiempo, para corroborar de acuerdo con los criterios de la NACE si está ejerciendo protección catódica sobre la varilla de refuerzo.

En el punto VI.5 se muestran los resultados de R_p de las seis probetas, para evaluar la velocidad de corrosión de la varilla dentro del concreto.

Al ir avanzando el desarrollo del experimento, se observó que sobre las probetas estaban apareciendo productos de color blancuzco, los cuales se mandaron analizar; los resultados del análisis de estos productos se muestran en el punto VI.6.

5.1 Propiedades mecánicas del concreto

La fig 15 corresponde a los cilindros después de haber sido sometidos al ensayo de resistencia a compresión.

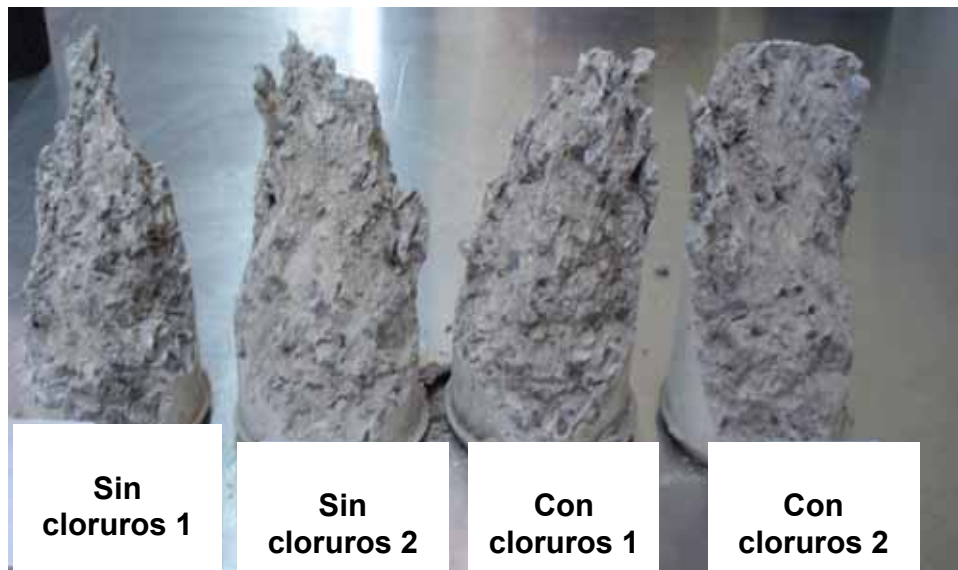


Figura 15
Cilindros después de la prueba de resistencia a la compresión

Esta prueba fue realizada 90 días después de haberse fabricado las probetas, cuando el concreto ya ha alcanzado su máxima resistencia. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 7:

Tabla 7
Resultados de resistencia a la compresión del concreto

Nombre de la probeta	Carga ultima (kg)	Resistencia al a compresión (kg/ cm ²)
Cilindro SCL-1	32,000	407,43
Cilindro SCL-2	32,950	419,53
Cilindro CCL-3	32,780	417,36
Cilindro CCL-4	33,990	432,77

Los resultados estimados de la resistencia a la compresión se obtuvieron a partir de la carga última ejercida por la máquina dividida entre el área del cilindro, de acuerdo con la Norma ASTM-C119. El área del cilindro fue de 78,54cm². Conforme los resultados, los cilindros SCL tienen en promedio una resistencia de 410 kg/cm², y los cilindros CCL un valor promedio de 425 kg/cm².

5.2 Resultados de potenciales de media celda, en las seis probetas de concreto.

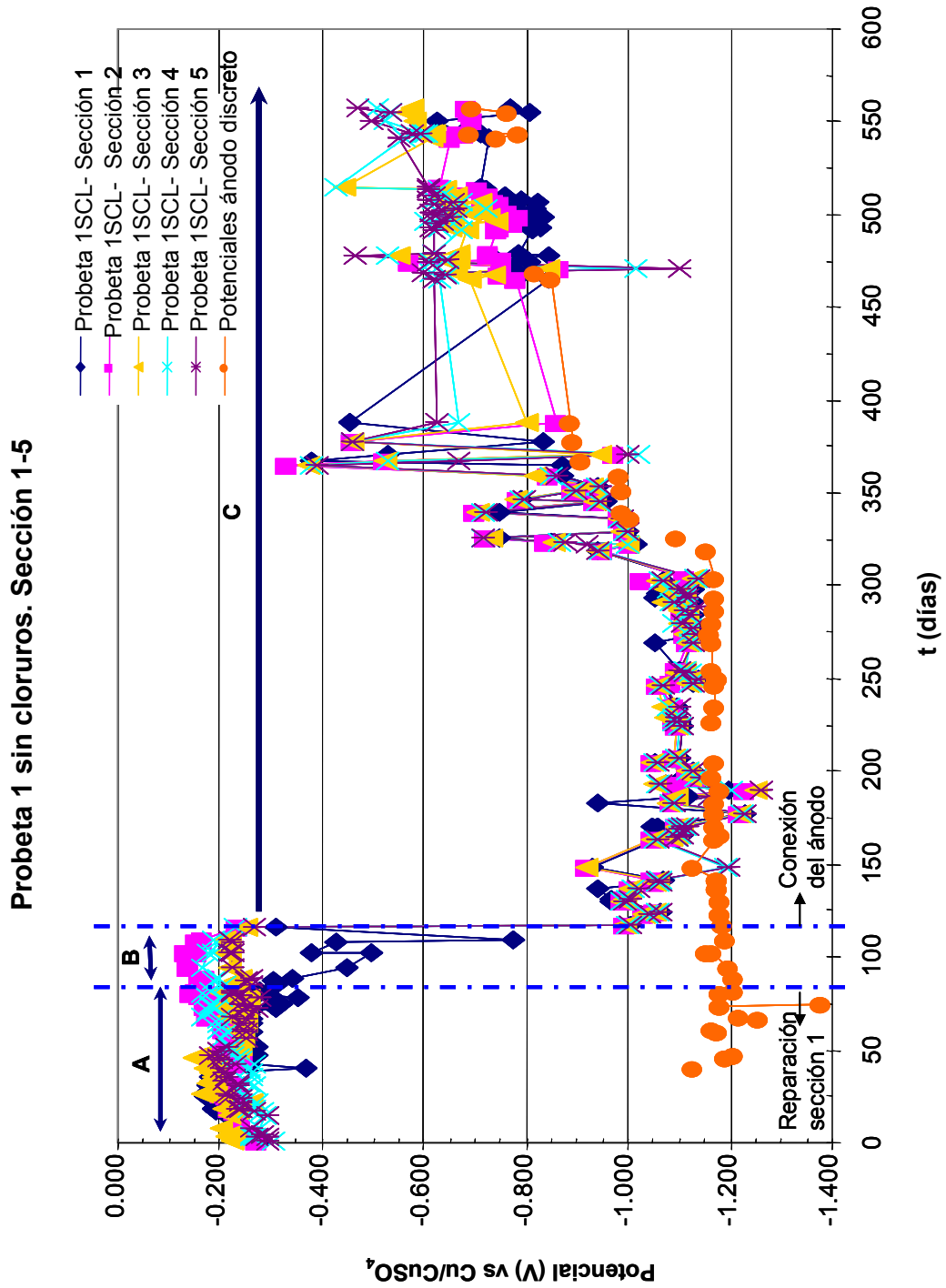


Figura 16
Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 1SCL

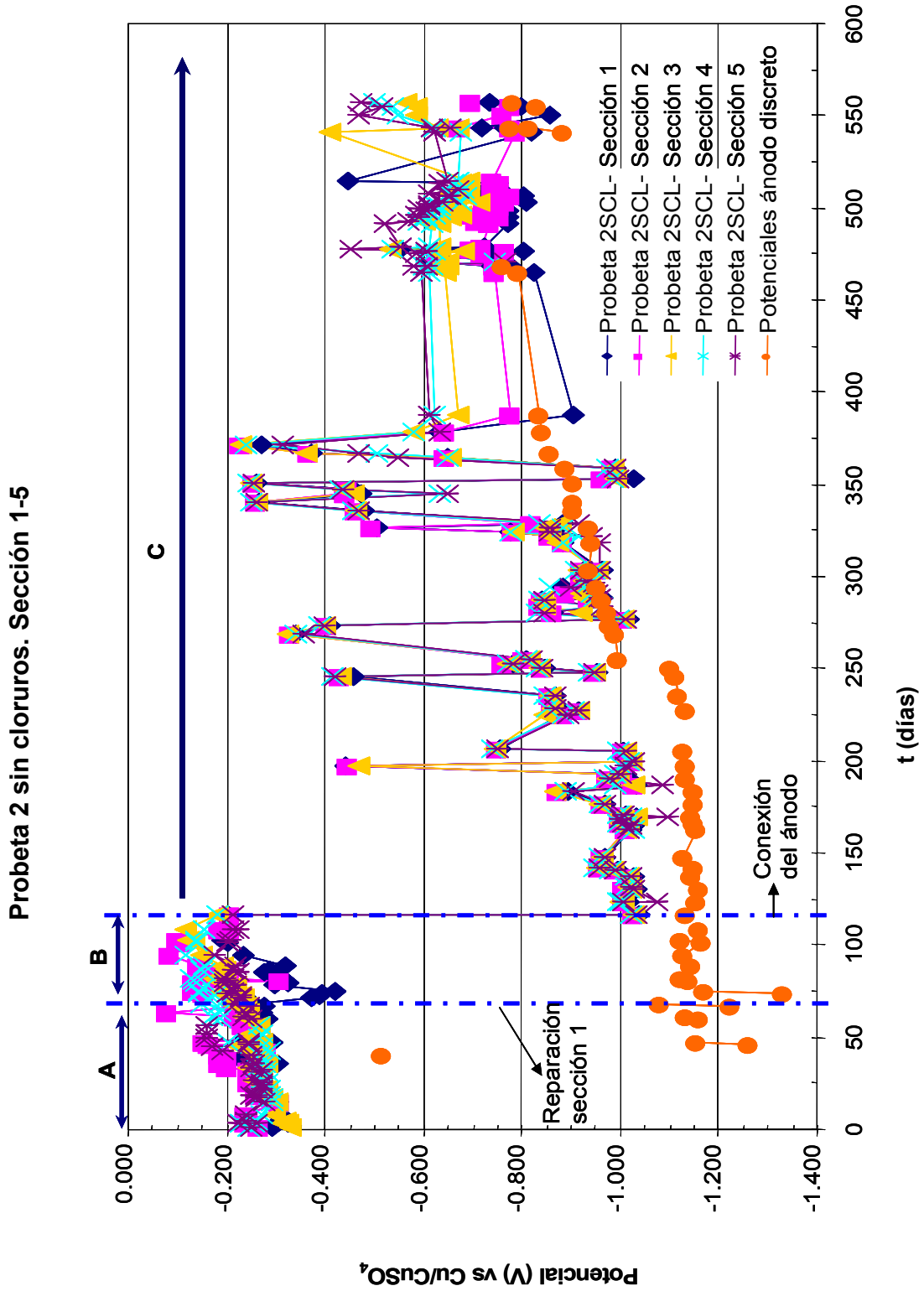


Figura 17

Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 2SCL

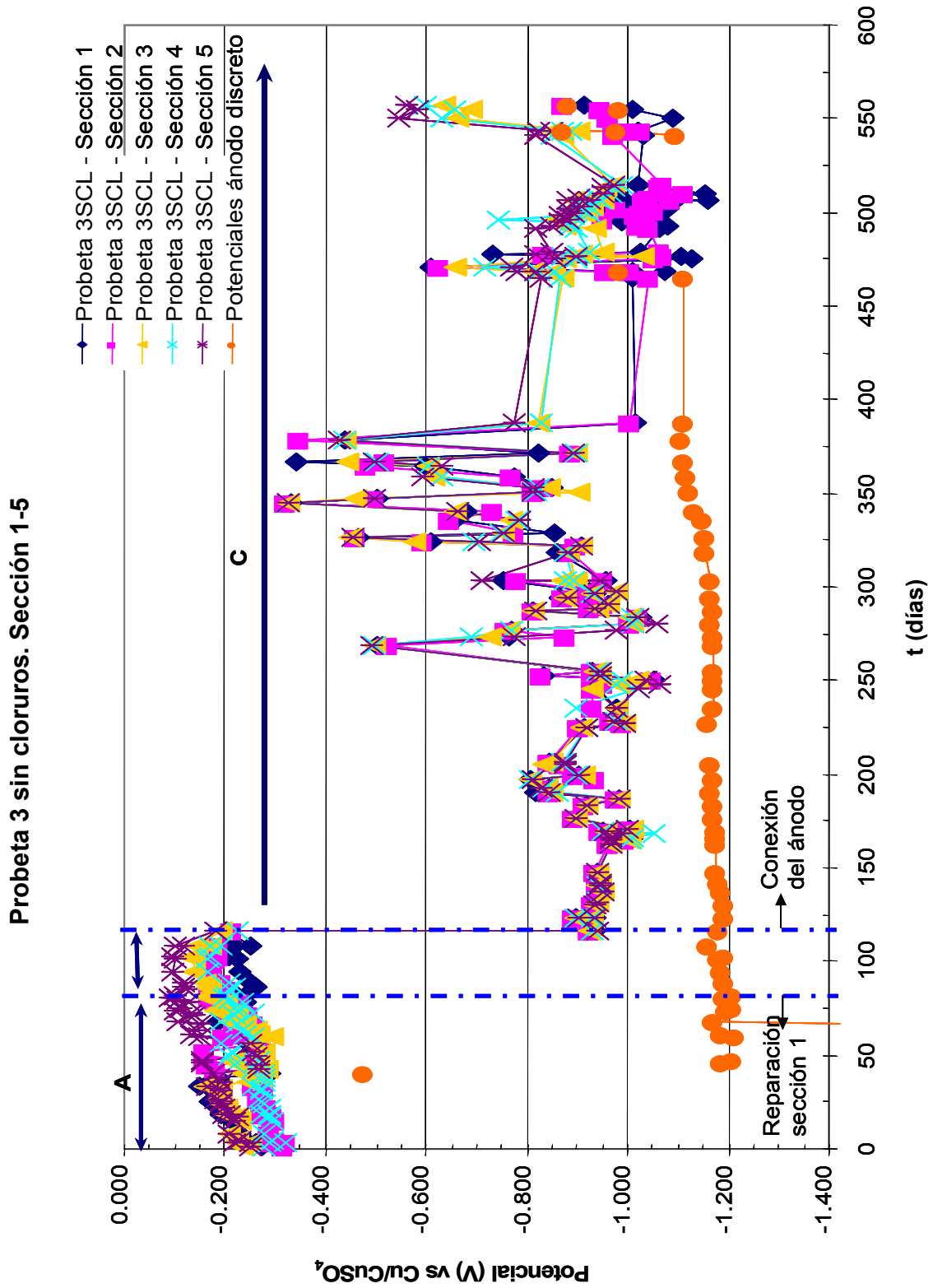


Figura 18
Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 3SCL

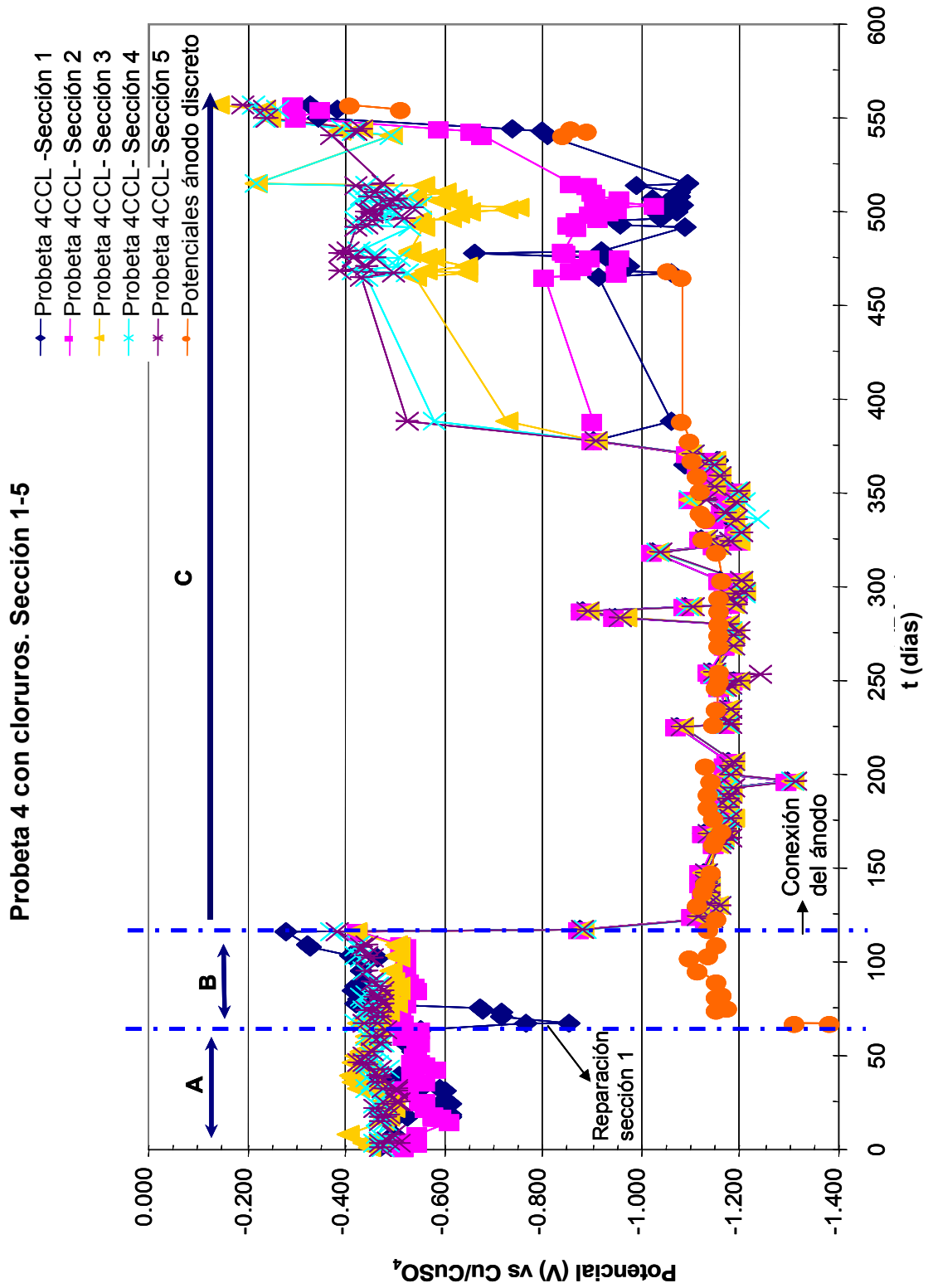


Figura 19
Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 4CCL

Probeta 5 con cloruros. Sección 1-5

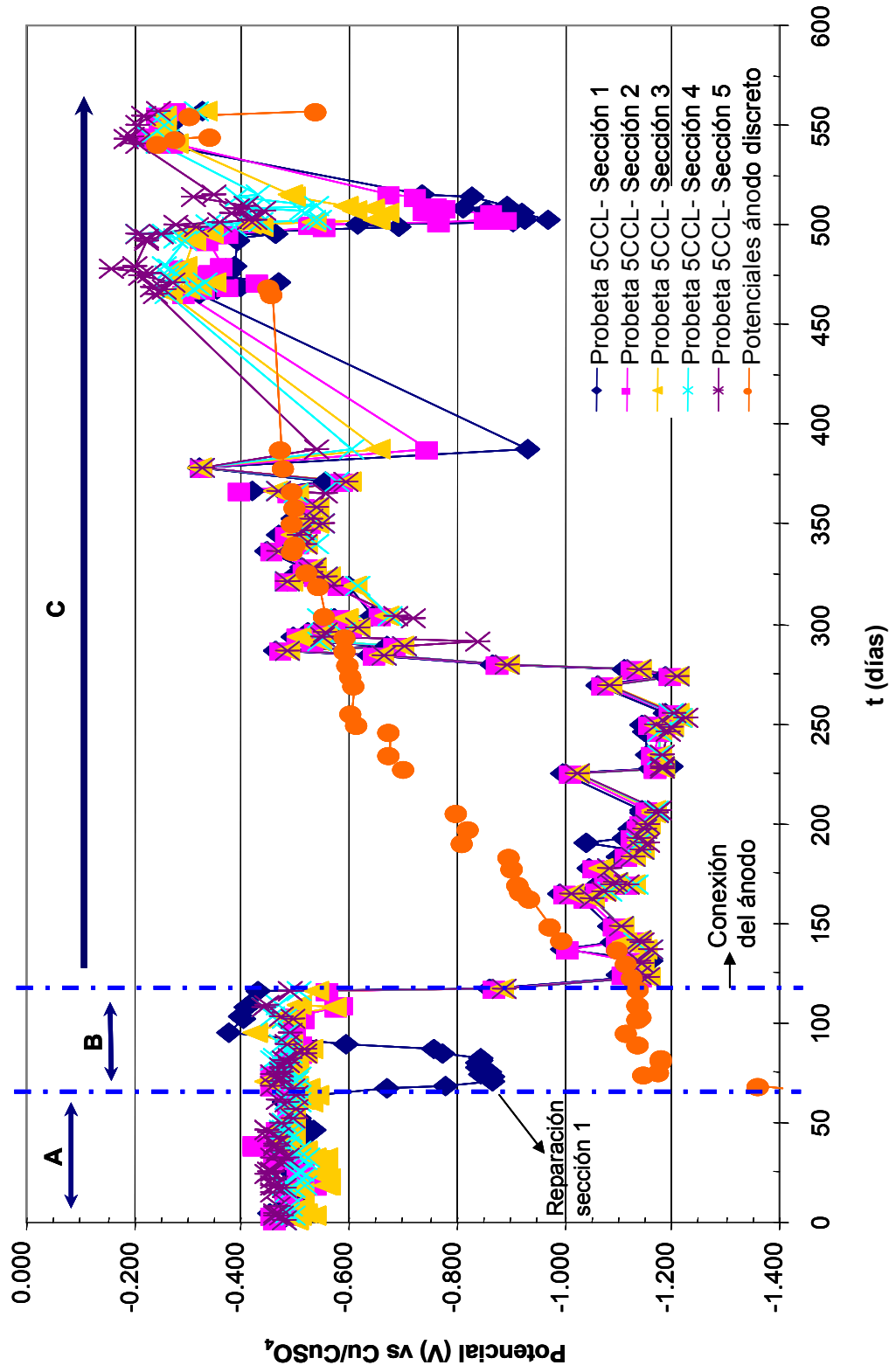
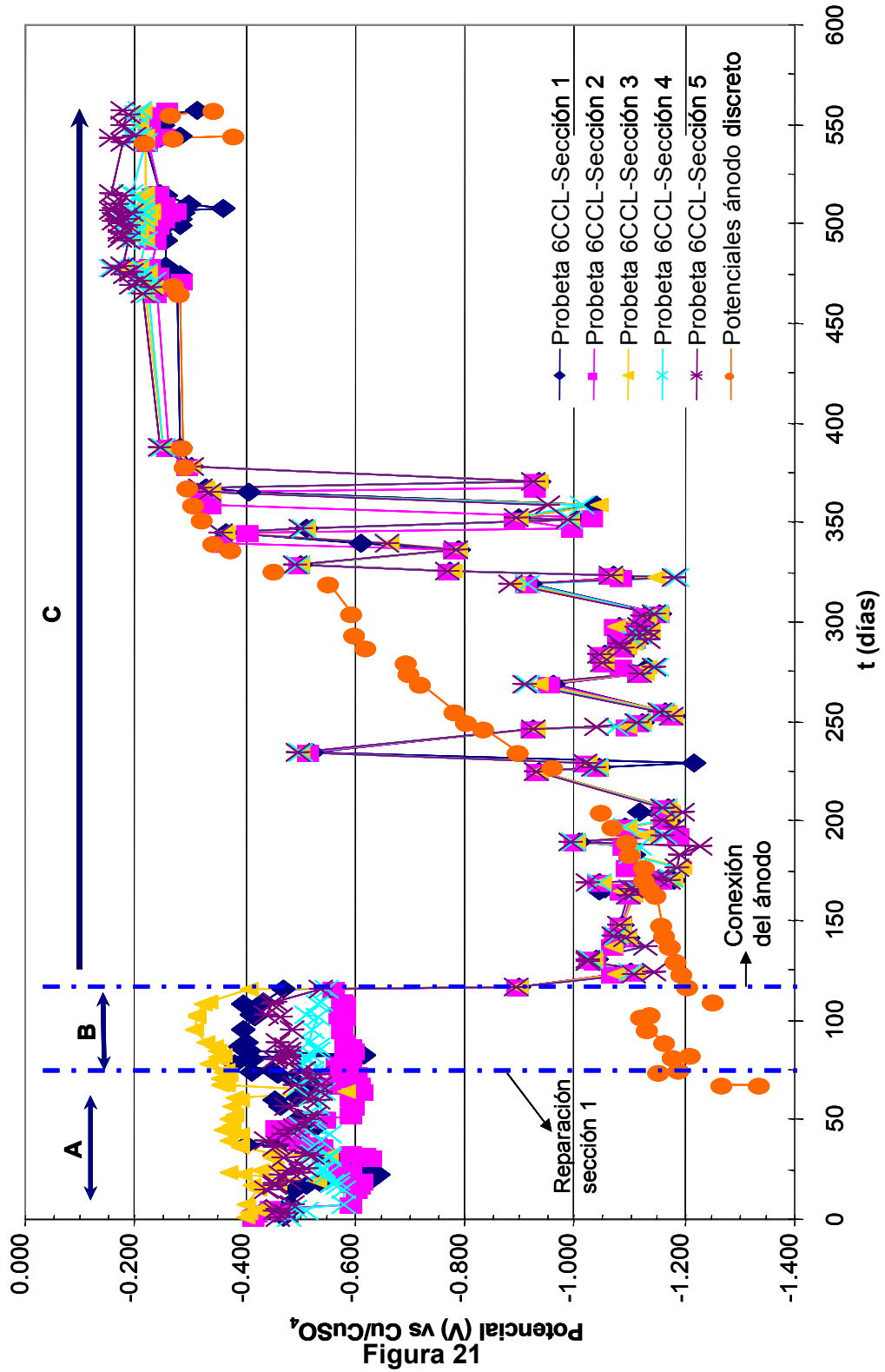


Figura 20
Gráfica potencial de media celda vs tiempo para la probeta 5CCL

Probeta 6 con cloruros. Sección 1-5



Gráfica potencial de media celda vs tiempo para la probeta 6CCL

Para facilitar el análisis y el comportamiento de las probetas se obtuvo el promedio de los últimos 179 días en los que cada una de las probetas comenzó a registrar valores más positivos, y así evaluar el comportamiento de cada sección en las probetas con y sin cloruros.

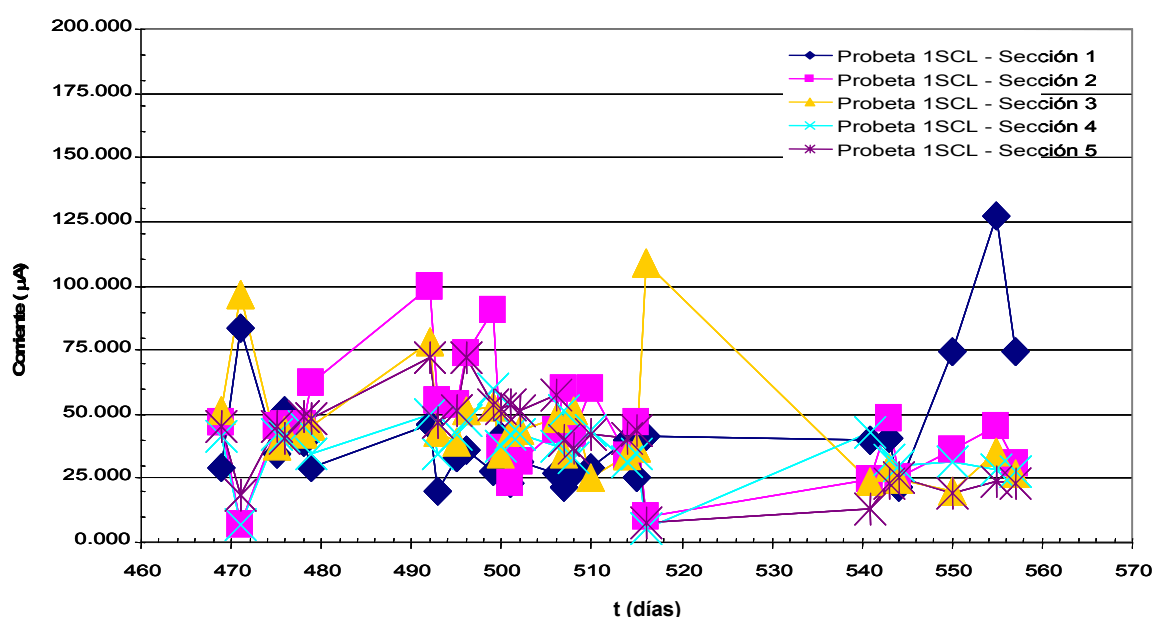
Tabla 8. Potenciales promedio probetas sin cloruros

Probeta 1. Sin cloruros		Probeta 2. Sin cloruros		Probeta 3. Sin cloruros	
Sección	Potencial vs CuSO_4	Sección	Potencial vs CuSO_4	Sección	Potencial vs CuSO_4
1	-0,763	1	-0,745	1	-1,000
2	-0,721	2	-0,736	2	-0,979
3	-0,653	3	-0,635	3	-0,858
4	-0,621	4	-0,624	4	-0,862
5	-0,613	5	-0,598	5	-0,820

Tabla 9. Potenciales promedio probetas con cloruros

Probeta 1. Con cloruros		Probeta 2. Con cloruros		Probeta 3. Con cloruros	
Sección	Potencial vs CuSO_4	Sección	Potencial vs CuSO_4	Sección	Potencial vs CuSO_4
1	-0,914	1	-0,537	1	-0,266
2	-0,820	2	-0,480	2	-0,244
3	-0,547	3	-0,401	3	-0,219
4	-0,455	4	-0,350	4	-0,210
5	-0,443	5	-0,287	5	-0,187

V.3 Resultados de la medición de corriente catódica



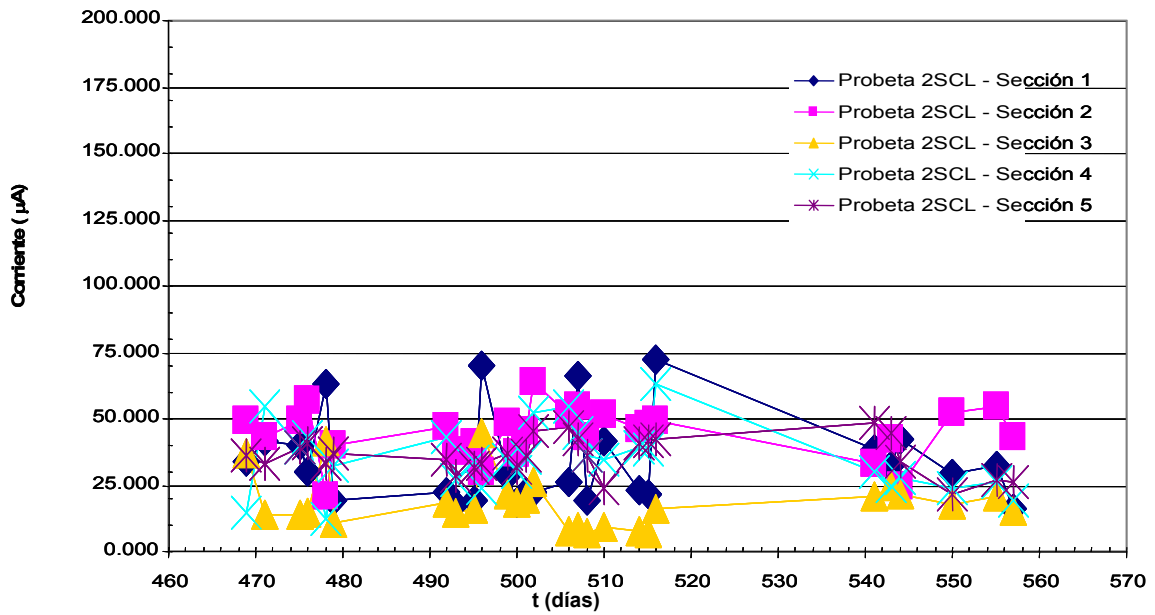


Figura 23
Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 2SCL

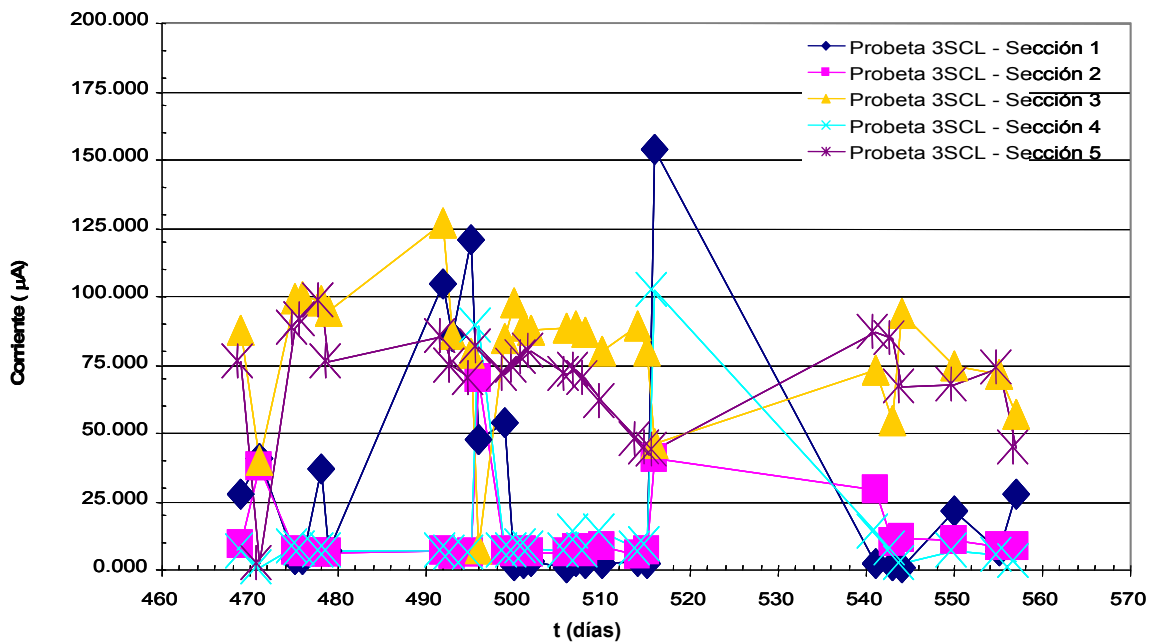


Figura 24
Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 3SCL

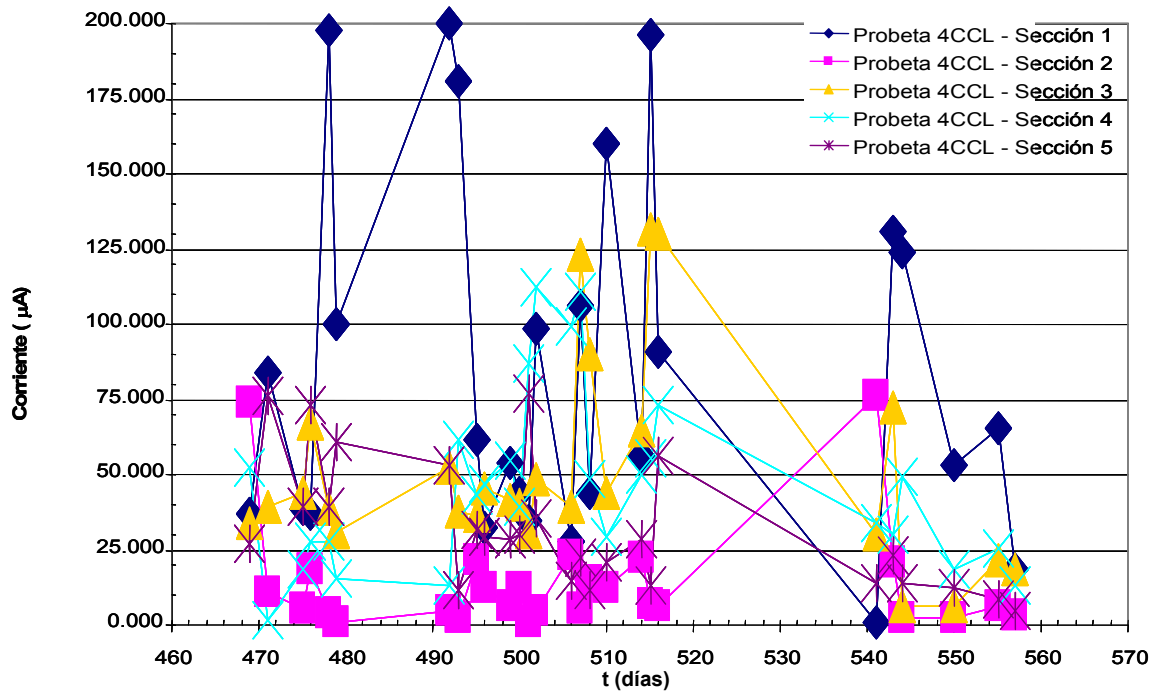


Figura 25
Gráfica potencial vs tiempo para la probeta 4CCL

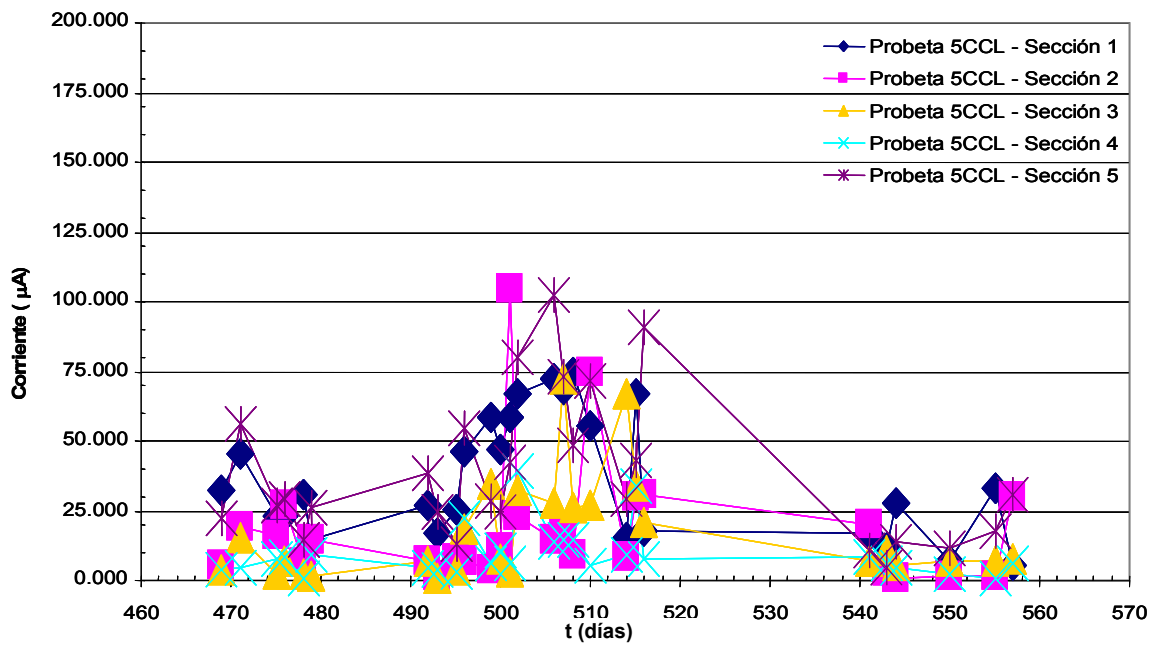


Figura 26
Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 5CCL

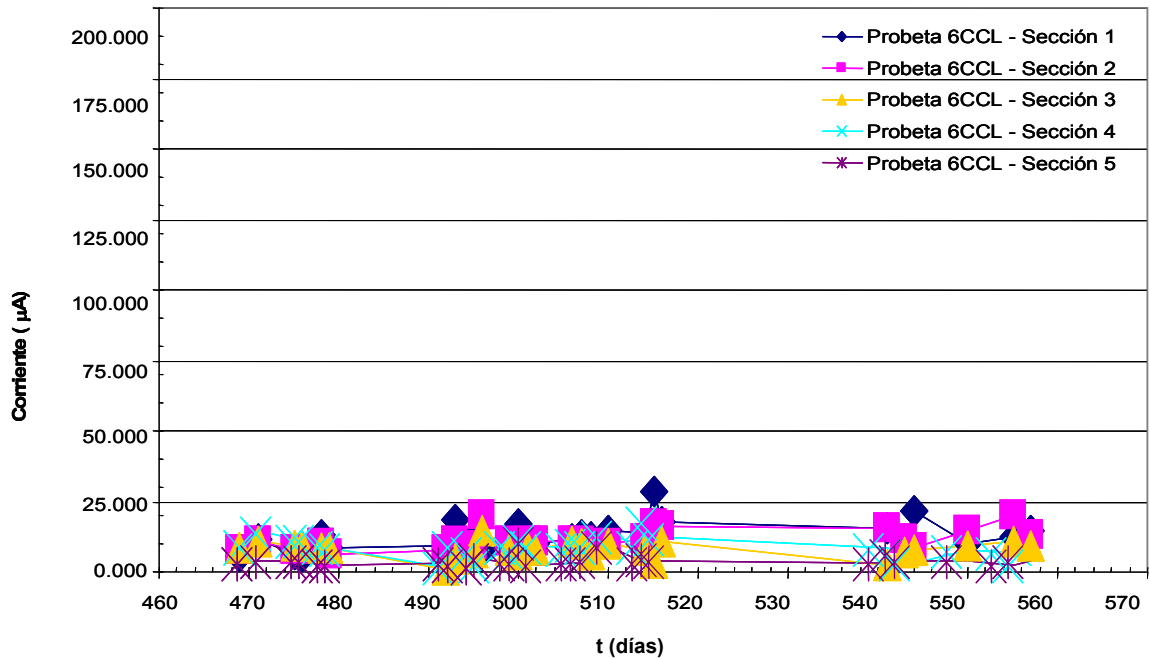


Figura 27
Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 6CCL

Al igual que en las gráficas de potencial contra tiempo, se obtuvo el promedio de cada sección por probeta para facilitar el análisis de resultados.

Tabla 10
Promedios corriente probetas sin cloruros

Probeta 1. Sin cloruros		Probeta 21. Sin cloruros		Probeta 31. Sin cloruros	
Sección	Corriente μA	Sección	Corriente μA	Sección	Corriente μA
1	41,213	1	33,597	1	28,476
2	45,275	2	44,494	2	12,850
3	44,476	3	18,402	3	80,124
4	36,798	4	34,800	4	13,844
5	40,583	5	36,099	5	69,839

Tabla 11
Promedios corriente probetas con cloruros

Probeta 1. Con cloruros		Probeta 2. Con cloruros		Probeta 3. Con cloruros	
Sección	Corriente μA	Sección	Corriente μA	Sección	Corriente μA
1	84,129	1	36,588	1	12,593
2	14,121	2	18,474	2	11,466
3	50,746	3	17,021	3	8,004
4	45,777	4	9,557	4	8,746
5	31,557	5	38,117	5	3,867

V.4 Resultado de las pruebas de depolarización, de acuerdo con las fechas en que se realizaron

Tabla 12
Depolarización de las probetas sin cloruros, del día 22 de febrero, 2005

TABLA DE DEPOLARIZACIÓN DE LAS PROBETAS SIN CLORUROS (Cu/CuSO ₄) 22 de febrero 2005															
	Probeta 1SCL					Probeta 2SCL					Probeta 3SCL				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Eoc	-0,428	-0,153	-0,218	-0,193	-0,222	-0,201	-0,205	-0,116	-0,152	-0,213	-0,221	-0,189	-0,171	-0,190	-0,120
Eon	-1,113	-1,100	-1,099	-1,090	-1,095	-0,878	-0,866	-0,866	-0,748	-0,871	-1,014	-1,004	-1,012	-1,008	-1,018
Einstoff	-1,050	-1,038	-1,039	-1,046	-1,042	-0,477	-0,461	-0,461	-0,457	-0,462	-0,853	-0,837	-0,845	-0,844	-0,838
E4h	-0,816	-0,808	-0,807	-0,811	-0,816	-0,283	-0,275	-0,273	-0,267	-0,278	-0,338	-0,332	-0,337	-0,337	-0,338
ΔE 4h	-0,234	-0,230	-0,232	-0,235	-0,226	-0,194	-0,186	-0,188	-0,190	-0,184	-0,515	-0,505	-0,508	-0,507	-0,500
E24h	-0,454	-0,447	-0,445	-0,450	-0,454	-0,277	-0,269	-0,267	-0,261	-0,272	-0,277	-0,271	-0,276	-0,276	-0,277
ΔE24h	-0,596	-0,591	-0,594	-0,596	-0,588	-0,200	-0,192	-0,194	-0,196	-0,190	-0,576	-0,566	-0,569	-0,568	-0,561

Tabla 13
Depolarización de las probetas con cloruros, del día 22 de febrero 2005

TABLA DE DEPOLARIZACIÓN DE LAS PROBETAS CON CLORUROS (Cu/CuSO ₄) 22 de febrero 2005															
	Probeta 4CCL					Probeta 5CCL					Probeta 6CCL				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Eoc	-0,327	-0,525	-0,507	-0,419	-0,434	-0,406	-0,577	-0,570	-0,439	-0,439	-0,397	-0,583	-0,326	-0,533	-0,451
Eon	-1,171	-1,163	-1,162	-1,166	-1,172	-1,074	-1,066	-1,064	-1,059	-1,069	-1,041	-1,032	-1,034	-1,037	-1,038
Einstoff	-1,159	-1,151	-1,146	-1,150	-1,153	-1,063	-1,055	-1,057	-1,044	-1,053	-0,981	-0,974	-1,030	-0,976	-0,975
E4h	-1,085	-1,076	-1,075	-1,081	-1,085	-0,991	-0,983	-0,982	-0,975	-0,986	-0,834	-0,828	-0,833	-0,832	-0,832
ΔE 4h	-0,074	-0,075	-0,071	-0,069	-0,068	-0,072	-0,072	-0,075	-0,069	-0,067	-0,147	-0,146	-0,197	-0,144	-0,143
E24h	-1,068	-1,059	-1,058	-1,063	-1,068	-0,878	-0,870	-0,868	-0,862	-0,873	-0,712	-0,706	-0,711	-0,711	-0,712
ΔE24h	-0,091	-0,092	-0,088	-0,087	-0,085	-0,185	-0,185	-0,189	-0,182	-0,180	-0,269	-0,268	-0,319	-0,265	-0,263

Tabla 14
Depolarización de las probetas sin cloruros, del día 12 de abril 2005

TABLA DE DEPOLARIZACIÓN DE LAS PROBETAS SIN CLORUROS (Cu/CuSO ₄) 12 de abril 2005															
	Probeta 1SCL					Probeta 2SCL					Probeta 3SCL				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Eoc	-0,428	-0,153	-0,218	-0,193	-0,222	-0,201	-0,205	-0,116	-0,152	-0,213	-0,221	-0,189	-0,171	-0,190	-0,120
Eon	-1,113	-1,100	-1,099	-1,090	-1,095	-0,878	-0,866	-0,866	-0,748	-0,871	-1,014	-1,004	-1,012	-1,008	-1,018
Einstoff	-1,050	-1,038	-1,039	-1,046	-1,042	-0,477	-0,461	-0,461	-0,457	-0,462	-0,853	-0,837	-0,845	-0,844	-0,838
E4h	-0,816	-0,808	-0,807	-0,811	-0,816	-0,283	-0,275	-0,273	-0,267	-0,278	-0,338	-0,332	-0,337	-0,337	-0,338
ΔE 4h	-0,234	-0,230	-0,232	-0,235	-0,226	-0,194	-0,186	-0,188	-0,190	-0,184	-0,515	-0,505	-0,508	-0,507	-0,500
E24h	-0,454	-0,447	-0,445	-0,450	-0,454	-0,277	-0,269	-0,267	-0,261	-0,272	-0,277	-0,271	-0,276	-0,276	-0,277
ΔE24h	-0,596	-0,591	-0,594	-0,596	-0,588	-0,200	-0,192	-0,194	-0,196	-0,190	-0,576	-0,566	-0,569	-0,568	-0,561

Tabla 15
Depolarización de las probetas con cloruros, del día 12 de abril 2005

TABLA DE POLARIZACIÓN DE LAS PROBETAS CON CLORUROS (Cu/CuSO ₄) 12 de abril 2005															
	Probeta 4CCL					Probeta 5CCL					Probeta 6CCL				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Eoc	-0,327	-0,525	-0,507	-0,419	-0,434	-0,406	-0,577	-0,57	-0,439	-0,439	-0,397	-0,583	-0,326	-0,533	-0,451
Eon	-1,186	-1,177	-1,176	-1,181	-1,187	-1,114	-1,107	-1,105	-1,095	-1,106	-0,983	-0,975	-0,979	-0,978	-0,965
Einstoff	-1,148	-1,139	-1,141	-1,147	-1,146	-1,095	-1,081	-1,086	-1,081	-1,086	-0,955	-0,943	-0,949	-0,950	-0,946
E4h	-1,078	-1,069	-1,068	-1,073	-1,078	-1,039	-1,032	-1,030	-1,024	-1,035	-0,849	-0,857	-0,848	-0,852	-0,864
ΔE 4h	-0,07	-0,07	-0,073	-0,074	-0,068	-0,056	-0,049	-0,056	-0,057	-0,051	-0,106	-0,086	-0,101	-0,098	-0,082
E24h	-1,044	-0,220	-0,219	-1,041	-1,044	-0,991	-0,981	-0,978	-0,971	-1,005	-0,753	-0,749	-0,754	-0,752	-0,755
ΔE24h	-0,104	-0,104	-0,107	-0,106	-0,102	-0,104	-0,100	-0,108	-0,110	-0,081	-0,202	-0,194	-0,195	-0,198	-0,191

Tabla 16
Depolarización de las probetas sin cloruros, del día 02 de junio 2005

TABLA DE DEPOLARIZACIÓN DE LAS PROBETAS SIN CLORUROS (Cu/CuSO ₄) 2 de junio 2005															
	Probeta 1SCL					Probeta 2SCL					Probeta 3SCL				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Eoc	-0,428	-0,153	-0,218	-0,193	-0,222	-0,201	-0,205	-0,116	-0,152	-0,213	-0,221	-0,189	-0,171	-0,190	-0,120
Eon	-1,110	-1,101	-1,096	-1,083	-1,089	-0,932	-0,923	-0,918	-0,914	-0,925	-0,566	-0,559	-0,557	-0,559	-0,559
Einstoff	-1,050	-1,039	-1,027	-1,039	-1,049	-0,749	-0,745	-0,738	-0,727	-0,777	-0,563	-0,557	-0,553	-0,554	-0,555
E4h	-0,783	-0,775	-0,775	-0,778	-0,783	-0,333	-0,322	-0,321	-0,319	-0,340	-0,283	-0,277	-0,282	-0,283	-0,284
ΔE 4h	-0,267	-0,264	-0,252	-0,261	-0,266	-0,416	-0,423	-0,417	-0,408	-0,437	-0,280	-0,280	-0,271	-0,271	-0,271
E24h	-0,425	-0,416	-0,415	-0,420	-0,425	-0,271	-0,281	-0,289	-0,293	-0,290	-0,239	-0,225	-0,225	-0,219	-0,218
ΔE24h	-0,625	-0,623	-0,612	-0,619	-0,624	-0,478	-0,464	-0,449	-0,434	-0,487	-0,324	-0,332	-0,328	-0,335	-0,337

Tabla 17
Depolarización de las probetas con cloruros, del día 02 de junio 2005

TABLA DE DEPOLARIZACIÓN DE LAS PROBETAS CON CLORUROS (Cu/CuSO ₄) 2 de junio 2005															
	Probeta 4CCL					Probeta 5CCL					Probeta 6CCL				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Eoc	-0,327	-0,525	-0,507	-0,419	-0,434	-0,406	-0,577	-0,570	-0,439	-0,439	-0,397	-0,583	-0,326	-0,533	-0,451
Eon	-1,173	-1,163	-1,158	-1,165	-1,171	-0,485	-0,477	-0,475	-0,469	-0,480	-0,919	-0,913	-0,914	-0,914	-0,917
Einstoff	-1,152	-1,141	-1,137	-1,143	-1,146	-0,453	-0,445	-0,439	-0,436	-0,453	-0,880	-0,873	-0,874	-0,877	-0,883
E4h	-1,067	-1,059	-1,058	-1,064	-1,069	-0,425	-0,417	-0,416	-0,412	-0,419	-0,862	-0,856	-0,861	-0,860	-0,862
ΔE 4h	-0,085	-0,082	-0,079	-0,079	-0,077	-0,028	-0,028	-0,023	-0,024	-0,034	-0,018	-0,017	-0,013	-0,017	-0,021
E24h	-1,037	-1,028	-1,027	-1,033	-1,037	-0,399	-0,391	-0,389	-0,392	-0,394	-0,725	-0,719	-0,753	-0,753	-0,753
ΔE24h	-0,115	-0,113	-0,110	-0,110	-0,109	-0,054	-0,054	-0,050	-0,044	-0,059	-0,155	-0,154	-0,121	-0,124	-0,130

V.5 Resultados de Rp obtenidos por medio del equipo Gamry

Tabla 18
Resistencia a la polarización de las probetas sin cloruros, del día 23 de febrero 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DÍA 23 DE FEBRERO 2005															
	Probeta 1SC					Probeta 2SC					Probeta 3SC				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
(Rp (Ω))	1116,0	1124,0	1125,0	1053,0	998,2	5169,0	10520,0	7,766	8685,0	8713,0	2378,0	2491,0	2095,0	2260,0	2224,0
I_{corr} (μA)	23,3	23,1	23,1	24,7	26,1	1,8	2,5	3,3	3,0	2,9	10,9	10,5	12,4	11,5	11,7
E_{corr} (mV)	-250,9	-247,1	-248,5	-254,9	-259,6	-161,3	-180,9	-186,9	-188,7	-185,1	-195,4	-205,6	-213,1	-197,1	-205,9

Tabla 19
Resistencia a la polarización de las probetas con cloruros, del día 23 de febrero 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DÍA 23 DE FEBRERO 2005															
	Probeta 4CC					Probeta 5CC					Probeta 6CC				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
(Rp (Ω))	191,400	183,700	178,600	179,700	178,400	228,700	223,300	221,200	236,600	233,900	1134,0	565,8	575,7	1251,0	558,2
I_{corr} (μA)	136,1	141,8	145,9	145,0	146,1	113,9	116,7	117,8	110,1	111,4	22,9	46,0	45,3	20,8	46,7
E_{corr} (mV)	-887,0	-890,0	-891,3	-891,7	-892,2	-734,7	-736,6	-738,0	-738,4	-738,7	-267,2	-255,3	-253,2	-223,7	-244,6

Tabla 20
Resistencia a la polarización de las probetas sin cloruros, del día 14 de abril 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DÍA 14 DE ABRIL 2005															
	Probeta 1SC					Probeta 2SC					Probeta 3SC				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
(Rp (Ω))	912,8	927,1	941,7	801,4	994,1	3123,0	3459,0	3531,0	3738,0	3845,0	2813,0	2826,0	2986,0	3026,0	2842,0
I_{corr} (μA)	28,5	28,1	27,7	36,5	26,2	8,3	7,5	7,4	6,9	6,8	9,3	9,2	8,7	8,6	9,2
E_{corr} (mV)	-187,0	-171,4	-163,4	-158,5	-150,8	-75,0	-80,3	-74,3	-74,3	-93,5	-140,9	-128,0	-118,8	-108,3	-105,1

Tabla 21
Resistencia a la polarización de las probetas con cloruros, del día 14 de abril 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DÍA 14 DE ABRIL 2005															
	Probeta 4CC					Probeta 5CC					Probeta 6CC				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
(Rp (Ω))	190,2	207,3	190,1	186,1	187,0	257,2	260,2	254,2	258,6	1195,0	442,1	447,4	442,9	437,7	435,9
I_{corr} (μA)	137,0	125,7	137,1	140,1	139,3	101,3	100,1	102,5	100,7	13,0	58,9	58,2	58,8	59,5	59,7
E_{corr} (mV)	-743,4	-740,0	-732,9	-732,2	-728,7	-716,4	-712,0	-704,9	-712,8	-679,3	-483,7	-484,5	-483,9	-483,2	-482,7

Tabla 22
Resistencia a la polarización de las probetas sin cloruros, del día 03 de junio 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DÍA 03 DE JUNIO 2005															
	Probeta 1SC					Probeta 2SC					Probeta 3SC				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
(Rp (Ω))	1346,0	1279,0	1354,0	1312,0	1491,0	4854,0	5316,0	5518,0	5595,0	4798,0	2628,0	3449,0	4126,0	4166,0	4069,0
I_{corr} (μA)	19,4	20,4	19,3	19,9	17,5	5,4	4,9	4,6	4,7	5,4	9,9	7,6	6,3	6,3	6,4
E_{corr} (mV)	-132,1	-114,8	-133,8	-109,3	-125,5	-73,3	-59,5	-63,4	-56,3	-56,1	-90,9	-62,5	-51,6	-52,6	-44,9

Tabla 23
Resistencia a la polarización de las probetas con cloruros, del día 03 de junio 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DÍA 03 DE JUNIO 2005															
	Probeta 4CC					Probeta 5CC					Probeta 6CC				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
(Rp (Ω))	187,4	184,3	178,2	166,5	166,2	706,7	725,3	1929,0	1512,0	1571,0	576,0	600,0	2287,0	2083,0	1953,0
I_{corr} (μA)	139,0	141,4	146,2	156,5	156,7	36,9	35,9	13,5	17,2	16,6	45,2	43,4	11,4	12,5	13,3
E_{corr} (mV)	-827,1	-821,0	-817,3	-815,9	-809,6	-281,3	-258,0	-271,0	-215,8	-208,5	-172,8	-172,8	-161,0	-28,25	-57,11

V.6 DIFRACCIÓN DE RAYOS-X

Mientras se desarrollaba la medición de potenciales se observó que estaban apareciendo productos de color blancuzco sobre la superficie del concreto, aproximadamente a los 275 días (fig 28).



Figura 28
Productos de corrosión del ánodo de sacrificio

Estos productos de corrosión se retiraron del concreto y se mandaron analizar por medio de difracción de R-X para conocer la composición química de los mismos; el resultado se muestra en la fig 29.

Los resultados del espectro muestran que estos productos de corrosión son óxido de zinc (ZnO); hidróxido de zinc ($Zn(OH)_2$); bromuro de litio y zinc (Li_2ZnBr_4); y bromuro de litio hidratado $LiBr(H_2O)$.

Estos productos son componentes del ánodo de sacrificio, mostrando óxidos generados por la humedad, y que se expandieron hacia el exterior sobre los poros del concreto.

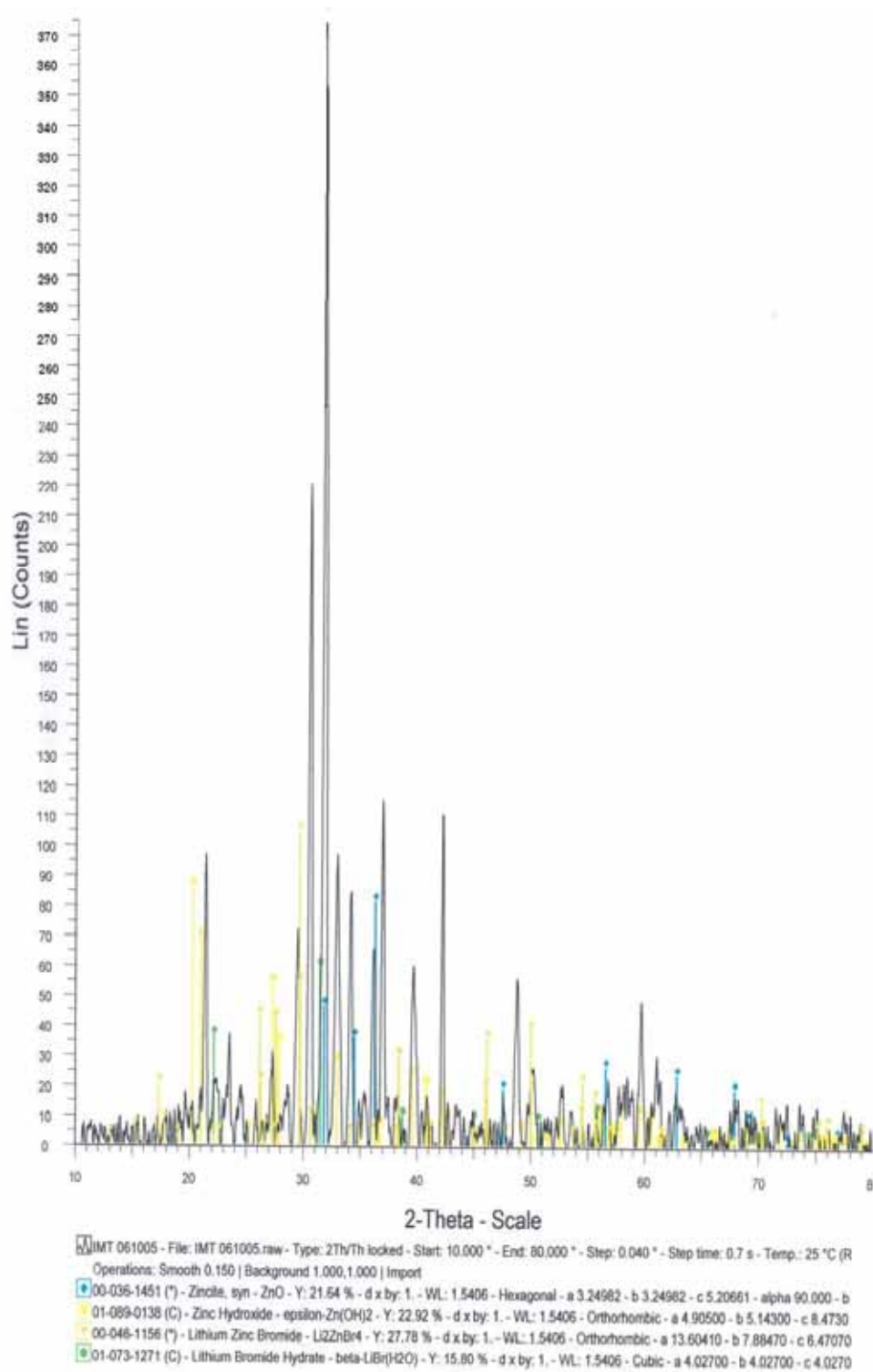


Figura 29
Resultados del análisis de difracción de R-X

6 Discusión de resultados

En el capítulo anterior se mostraron los resultados del monitoreo electroquímico durante 557 días de evaluación continua.

VI.1 Concreto

La evaluación de las propiedades mecánicas del concreto se realizó con la prueba de resistencia a compresión, la cual mostró que el concreto en el que se embebieron las varillas y los ánodos discretos, es de buena calidad; esta no es una prueba que asegure la protección contra la corrosión, es tan solo un indicativo de la calidad del concreto. Los resultados, como se estableció en la tabla 7 muestran que las probetas con cloruros tienen una más alta resistencia que las probetas sin cloruros, debido a que los cloruros absorben más humedad durante el curado y, por tanto, aumenta su resistencia.

VI.2 Potenciales de media celda

La medición de potenciales se utiliza para todos los sistemas donde se evalúa la protección catódica. NACE establece que con un potencial de -850 mV vs el electrodo de Cu/CuSO₄ (ECS), el ánodo de sacrificio ejerce protección catódica sobre el sistema. En este trabajo se analizaron las tres etapas, que se citan a continuación.

VI.2.1 Etapa “A”. Antes de colocar el ánodo

En esta etapa, en las probetas sin cloruros (figs 16 a 18) se puede observar que los potenciales son de alrededor de $-0,200$ V vs Cu/CuSO₄, lo que indica que se encontraban pasivadas las varillas de refuerzo, pues la capa pasiva formada por los productos alcalinos del concreto la protegen de la corrosión. En las tres probetas se observó mucha similitud en los valores y el comportamiento entre ellas; al ir pasando el tiempo, estos valores se van haciendo ligeramente más positivos, lo que indica que las varillas continúan pasivadas. En las probetas con cloruros (figs 19 a 21) aprecia que los potenciales en la etapa “A”, son de alrededor de $-0,500$ V vs Cu/CuSO₄ lo que señala que la varilla se está corroyendo, debido a que estas contienen cloruros, que es uno de los agentes que aceleran el proceso de corrosión y destruyen con mayor rapidez la capa pasiva formada por el medio alcalino; este comportamiento se observa en las tres probetas.

VI.2.2 Etapa “B”. Reparación y colocación del ánodo en el concreto.

En esta etapa se simuló la reparación del concreto; se realizó retirando el concreto de la sección 1, hasta dejar descubierta la sección de la varilla; y sobre está se colocó el ánodo de sacrificio y se reparó con mortero. Después de poner el ánodo

de sacrificio en la sección 1, se comenzó a medir el potencial de dicho ánodo a partir del día 40 para las probetas SCL; y del día 67 para las probetas CCL. En esta etapa en todas las probetas se observa que los potenciales de media celda de la sección 1 comenzaron a ser más negativos; esto sucedió en cuatro de las seis probetas.

En la sección 1 de la probeta 1 SCL se registraron potenciales de hasta $-0,800$ V vs Cu/CuSO_4 y en las 4,5 CCL de hasta $-0,850$ V por la diferencia de potencial entre la varilla de refuerzo y el ánodo de sacrificio, que como se observa en las figs 16 a 21, el ánodo presenta un potencial de $-1,20$ V vs Cu/CuSO_4 que es el potencial del Zn. Las otras secciones de todas las probetas, se mantuvieron en el mismo rango en que se encontraban antes de la reparación. Mientras que la varilla de refuerzo venía con potenciales pasivos para las probetas SCL, y corroyéndose activamente en las probetas CCL.

VII.2.3 Etapa “C”. Conexión

En esta etapa, el ánodo se conectó a la varilla de refuerzo para que ejerciera la protección catódica sobre la misma, dejando de actuar la varilla como ánodo y comportándose como cátodo; mientras el zinc que se encontraba en el ánodo, se corroyera activamente debido a la diferencia de potencial. Esto ocurrió muy claramente en cada una de las probetas, pues el cambio fue inmediato al conectar la varilla de refuerzo al ánodo de sacrificio.

En las probetas con y sin cloruros, el potencial se desplazó de $-0,200$ V vs Cu/CuSO_4 hasta $-1,000$ V vs Cu/CuSO_4 para las probetas SCL; y desde $-0,500$ V vs Cu/CuSO_4 hasta $-1,100$ V vs Cu/CuSO_4 , en las probetas CCL, lo que indica una pequeña sobreprotección en todas las probetas de acuerdo con Ávila, 2003. Dicho comportamiento se mantuvo constante durante aproximadamente 300 días, en las probetas con y sin cloruros. Para la probeta 1SCL y 2SCL fue de 400 días; la probeta 3SCL se mantuvo protegida hasta el final del experimento.

Las probetas CCL mostraron un comportamiento constante de protección hasta aproximadamente 350 días. Después de este tiempo en el que las probetas se mantuvieron protegidas activamente por el ánodo de sacrificio se comenzó a observar que los valores fueron más positivos, por lo que se siguieron registrando para observar el comportamiento que se tuvo; a medida que los valores del potencial de la varilla se hicieron más positivos, el ánodo también tendió hacia valores más positivos; al aumentar la distancia de separación del ánodo a la varilla este va dejando de proteger a la sección de la varilla (sección 5) terminando con un potencial más positivo, aproximadamente $0,150$ V vs Cu/CuSO_4 más positiva la sección 5 que la 1 en las probetas SCL, y aproximadamente $-0,250$ V vs Cu/CuSO_4 más positiva la sección 5 que la 1 en las probetas CCL.

Para observar mejor el comportamiento de protección del ánodo de sacrificio, la tabla 8 muestra los valores promedio de potencial de las cinco secciones de varilla, en la cual los valores de la sección 5 son los más positivos, y va en descenso la protección, pues la sección 1 es la más protegida y la 5 la que por el potencial medido ya se está corroyendo.

En el caso de la probeta 3SCL, todas las secciones aún permanecen activas en toda la viga de concreto pues tuvieron un potencial de $-0,800$ V vs Cu/CuSO_4 , sin

embargo, se observa el mismo comportamiento que en las probetas 1 y 2 al aumentar la distancia del ánodo a la varilla, el potencial de la sección 5 disminuyó.

En las probetas con cloruros se puede observar que los últimos días de monitoreo los potenciales tendieron hacia valores más positivos, con un cambio repentino y sin muchas variaciones como en las probetas sin cloruros. Las probetas con cloruros siguen el mismo comportamiento que las sin cloruros, pues entre más alejado se encuentra el ánodo de sacrificio de la sección de la varilla éste deja de proteger la sección y como resultado se obtienen valores de potencial más positivos como los de la tabla 9, donde se muestran los valores promedio de los últimos 179 días de monitoreo. Estos tienen un diferencia de potencial entre la sección 1 y la 5 de hasta -0,500 V vs Cu/CuSO₄, lo que indica que la demanda de protección es mayor en las probetas con cloruros. En la probeta 6CCL, los valores de potencial los últimos días son muy positivos (aproximadamente de -0,200 V vs Cu/CuSO₄), o sea que el ánodo se pasivó y dejó de ejercer protección catódica a la varilla de refuerzo.

Los resultados de los últimos días de monitoreo, indican que el ánodo tiene el mismo comportamiento en las seis probetas; el ánodo fue perdiendo la capacidad de polarizar la varilla al aumentar la distancia. En las probetas sin cloruros, el ánodo se mantuvo activo hasta aproximadamente 500 días; sin embargo, en las probetas con cloruros el ánodo fue progresiva, y rápidamente perdiendo su capacidad de polarizar la varilla aproximadamente a partir del día 250.

VI.3 Corriente

En las figs 22 a 27 se muestran las gráficas de corriente contra potencial; se observó que la corriente drenada por el ánodo varió en cada una de las probetas y cada una de las secciones; esto debido a la heterogeneidad del material, pues donde el flujo de corriente es alto puede existir una parte muy porosa del concreto, y estar más compacto en las zonas donde hay una discontinuidad que debilite el flujo de corriente. Además, dependiendo de la distancia entre el ánodo y las varillas, la corriente que necesita la varilla puede ser mayor o menor dependiendo de dicha distancia y la distribución de la corriente.

En las probetas sin cloruros se observó que la corriente no siguió un comportamiento homogéneo en cada una de las probetas, pues en cada una la demanda de corriente para cada sección fue diferente; en la probeta 1SCL, el promedio de corriente fue de 40 μ A; en la 2SCL fue 34 μ A; y en la probeta 3SCL fue 50 μ A. Las probetas 1 y 2 mostraron un comportamiento muy similar, pero la probeta tres tuvo mayor variación, aunque como ya se dijo, suele deberse a la heterogeneidad del concreto y a las condiciones de alta humedad.

En las probetas con cloruros, también existe una variación entre cada una de las probetas, pues mientras la probeta 4CCL tiene un promedio de 40 μ A, la 6CCL drena una corriente de 8 μ A, que se mantuvo constante a lo largo del experimento.

Así en la probeta 4CCL, donde hay una gran variación en los valores, como se aprecia en la fig 25.

Las graficas de corriente muestran la cantidad de corriente drenada por el ánodo, donde se observa que al aumentar la distancia de separación del ánodo, la corriente drenada por el mismo es menor, para las secciones 3 a 5 de cada probeta sin cloruros; excepto en la probeta tres donde es mayor para las secciones 4-5; y para las probetas con cloruros, la corriente drenada es menor para las últimas secciones, conforme las figs 25 a 27.

VI.4 Curvas de depolarización

Las curvas de depolarización para las probetas sin cloruros en las tres ocasiones que se realizaron, mostraron que la varilla se encontraba protegida por el ánodo de sacrificio teniendo diferencias de potenciales mayores a $-0,100$ V vs Cu/CuSO_4 en dirección negativa; es decir con potenciales más positivos, la diferencia a las cuatro horas de potencial es de alrededor de $-0,200$ V vs Cu/CuSO_4 , lo que comprueba según lo que establece la NACE que la estructura se encuentra protegida.

Al comparar las tablas 16, 18 y 20 se observó que en la probeta 1SCL no existe gran variación en las tres mediciones que se realizaron pues se tiene una diferencia promedio de $-0,200$ V vs Cu/CuSO_4 ; en la 2SCL se denota que en la ultima medición, la diferencia de potencial es $-0,400$ V vs Cu/CuSO_4 mientras que en la primera fue de $-0,260$ V vs Cu/CuSO_4 . Esta diferencia es porque la protección del ánodo fue incrementando con el tiempo, pues la varilla se estaba corroyendo activamente. En la probeta 3SCL sucedió lo contrario, comenzó con una diferencia de potencial de $-0,400$ V vs Cu/CuSO_4 , y en la última medición fue de $-0,270$ V vs Cu/CuSO_4 , que nos indica que la varilla de refuerzo seguía protegida.

Para las probetas con cloruros, en promedio existió una diferencia de potencial de $-0,075$ V vs Cu/CuSO_4 ; la probeta 4CCL muestra que no se encuentra protegida a los 212 días; y ninguno de los otros experimentos prueban lo contrario manteniendo una diferencia de potencial de $-0,075$ V vs Cu/CuSO_4 , conforme lo que indica la fig 19 que el ánodo estaba perdiendo su capacidad de ejercer protección a la varilla de refuerzo.

La probeta 5CCL tiene una tendencia en los tres experimentos, a disminuir su protección obteniendo a los 312 días una diferencia de potencial de $-0,028$ V vs Cu/CuSO_4 ; y la fig 20 muestra que el ahondo comenzó a dejar de mantener su potencial de protección paulatinamente.

La probeta 6 CCL es la única con cloruros que cumple el criterio de protección en el primer experimento, ya que en la última realización mostró potenciales de $-0,020$ V vs Cu/CuSO_4 ; y como se muestra en la fig 21 el ánodo tuvo paulatinamente una disminución de potencial. De acuerdo con el criterio de la NACE de $-0,100$ V vs Cu/CuSO_4 en dirección negativa, los ánodos de sacrificio protegen catódicamente a las probetas con y sin cloruros. Sin embargo, el tiempo de protección para las probetas con cloruros es mayor que para las probetas con cloruros, debido a la humedad y acción de los cloruros sobre la varilla de refuerzo.

VI.5 Velocidad de corrosión

Los resultados de esta prueba (tablas 18 a 23) muestran que el nivel de corrosión en las probetas es muy elevada, ya que en todas es mayor a 1; esto se deduce según los criterios establecidos en la tabla 5 de este trabajo. Es por ello que los ánodos protegieron a las varillas de refuerzo por el medio corrosivo en el que se encontraban embebidas las varillas en el concreto.

La probeta 1SCL denota en las tres repeticiones que se realizaron del ensayo, el más elevado nivel de corrosión; mientras que las probetas 2 y 3SCL, un nivel más bajo. En comparación con las probetas con cloruros podemos observar que estas probetas mantienen un muy elevado nivel de corrosión, mayor que las sin cloruros en razón al medio corrosivo en el que se encontraban.

VI.6 Lixiviación y difracción de R-X

En esta etapa donde analizamos los productos de lixiviación, las gráficas 16 a 21 muestran que el potencial del ánodo principió a pasivarse en menor proporción para las probetas SCL, donde en las probetas 1 y 2 SCL el ánodo comienza a pasivarse o perder su capacidad de polarizar a la varilla después de que también la varilla empieza a tener valores de potencial más positivos; mientras que el de la 3SCL, el ánodo mantiene aún una protección sobre la varilla de refuerzo.

En las probetas CCL, el ánodo en la probeta 4CCL comenzó a pasivarse justo cuando la varilla registró valores de potencial más positivo; en tanto que en la P5CCL y P6CCL, el ánodo se va pasivando lentamente a lo largo del tiempo.

La lixiviación del mortero se muestra en la fig 28, mientras que los resultados de R-X indican que son óxidos de Zn e hidróxidos de bromuro de litio, componentes esenciales de los ánodos de sacrificio, y que debido a su acción de protección extendieron los óxidos hacia la superficie de las vigas del concreto por medio de los poros, lo que indica que efectivamente los productos de corrosión se expanden en el mortero poroso del ánodo, y éste a su vez salió hacia la superficie por medio de los poros del concreto.

Al romper las probetas de concreto, las varillas no muestran indicios de corrosión, lo que indica que los ánodos la protegieron de la corrosión; los ánodos parecían no tener ningún deterioro aparente, y mantenían su alcalinidad; sobre todo, en las probetas sin cloruros.

Conclusiones

Los ánodos de sacrificio discretos protegen catódicamente la varilla de refuerzo, hasta 60 cm de distancia, aceptando la hipótesis planteada para este trabajo.

Los ánodos de sacrificio actuaron como un eficiente sistema de protección catódica hasta 60 cm de distancia durante aproximadamente 300 días; después de este tiempo, el ánodo va dejando de proteger paulatinamente la probeta al aumentar la distancia del ánodo a la sección de la varilla.

Debido a las limitaciones de la distancia a la que protege, el uso de estos ánodos queda reducido a secciones pequeñas; de otra forma, su costo sería muy elevado.

En zonas de alta humedad no son recomendables, ya que se produce la lixiviación de productos de corrosión del ánodo, que en un momento determinado pueden dañar las varillas.

Recomendaciones

Es necesario continuar trabajando sobre este sistema para conocer sus limitaciones a través del tiempo. Se requiere para un trabajo posterior tomar en cuenta las condiciones de temperatura y humedad a través del tiempo, ya que estos pueden proporcionar valiosa información acerca de las condiciones más óptimas o desfavorables para este tipo de ánodos.

Bibliografía

1. **Andrade**, C;Alonso, C;Gulikers, A;Polder R;Cigma, R;Vennesland, Ø., Salta, M;Raharinaivo, A;Elsener, B. Test Methods for On-site Corrosion Rate Measurement of Steel Reinforcement in Concrete by Means of the Polarization Resistance Method. *Materials and Structures*; Vol 37: 623-643. (2004)
2. **ASM HANDBOOK**, 1998. Corrosion; Vol: 13, 15-45, 77-123, 466-477
3. **ASTM C29/C29M – 97**. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. *ASTM ANNUAL BOOK OF STANDARDS. Concrete and Aggregates*; Vol 04.02 :1-4
4. **ASTM C39/C 39M**. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM ANNUAL BOOK OF STANDARDS. Concrete and Aggregates*; Vol 04.02: 18-22
5. **ASTM C127 – 88**. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. *ASTM ANNUAL BOOK OF STANDARDS. Concrete and Aggregates*; Vol 04.02: 64-68
6. **ASTM C128 – 97**. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. *ASTM ANNUAL BOOK OF STANDARDS. Concrete and Aggregates*; Vol 04.02: 69-73.
7. **ASTM C136 - 96a**. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *ASTM ANNUAL BOOK OF STANDARDS. Concrete and Aggregates*; Vol 04.02:78-82
8. **ASTM C566 - 97**. Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. *ASTM ANNUAL BOOK OF STANDARDS. Concrete and Aggregates*; Vol 04.02: 290-292.
9. **ASTM C702 – 98**. Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. *ASTM ANNUAL BOOK OF STANDARDS. Concrete and Aggregates* Vol 04.02: 374-377.
10. **ASTM C 876 – 91**. Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. *ASTM ANNUAL BOOK OF STANDARDS. Concrete and Aggregates*; Vol 04.02: 466-477.
11. **Ávila**, J; Genescá, J; Más allá de la herrumbre I; 3^a Edi, *La ciencia para todos*. México: 25-86. (2002)
12. **Ávila**, J; Genescá, J; Más allá de la herrumbre II; 3^a Edi, *La ciencia para todos*. México: 48-81 (2003)
13. **Bosch** R W. Electrochemical Impedance Spectroscopy for the Detection of Stress Corrosion Cracks in Aqueous Corrosion Systems at Ambient and High Temperature. *Corrosion Science*; Vol 47: 125-143. (2005)
14. **Brown**, Michael; **Sharp**, Stephen. Effectiveness of Sacrificial Anodes in High-resistivity Shotcrete Repairs. Report final, Virginia Transportation Research Council (2005)

15. **Castro**, P y Moreno, E. CONPAT 2003, Mérida Yucatán, México; Vol I Control de Calidad , II.65-II.72; V.9-V.16, II.97-II.104, IX.9-X.16, VI.1-VI.8 (2003)
16. **Castro**, P y Moreno E. CONPAT 2003, Mérida, Yucatán, México, Vol II: Patología: XII.25-XII.32, II.169-II.175, II.1-II.7, II.153-II.160 (2003)
17. **Castro**, P y Moreno E. CONPAT 2003, Mérida, Yucatán, México, Vol III: Recuperación: VII.9-VII.16, VII.41-VII.48 (2003)
18. **Durar**. Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado; 3ra Edi. CYTED : 18-60, 88-92, 112-117, 124-128, 135. (2002)
19. **Feliu**, S; González, J A; Miranda, J M; Feliu, V. Possibilities and Problems of in Situ Techniques for Measuring Steel Corrosion Rates in Large Reinforced Concrete Structures. CORROSION SCIENCE; Vol 47: 217-238. (2005)
20. **González**, J A; Miranda, J M; Birbilis, N; Feliu, S. Electrochemical Techniques for Studying Corrosion of Reinforcing Steel: Limitations and Advantages. CORROSION; Vol 61: 37-50. (2005)
21. **Helene**, P, Pereira, F. Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón Reparación, Refuerzo y Protección. 1ra Edi., Degussa, Sao Paulo: 39-49, 131, 147, 341-375, 730-741. (2003)
22. **Koch**, G H; Brongers, P H; Thompson, N G; Virmani, YP; Payer, J H. Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States. MATERIALS PERFORMANCE: Supplement to Materials Performance: 2-11 (2002)
23. **Lasa**, Ivan. State Materials Office Corrosion Research Laboratory. State of Florida Department of Transportation; documento 00-124 (2002)
24. **Moreno**, M; Morris, W; Alvarez M G; Duffó, G S. Corrosion of Reinforcing Steel in Simulated Concrete Pore Solutions: Effect of Carbonation and Chloride Content. CORROSION SCIENCE; Vol 46: 2681-2699. (2004)
25. **Neville**, A. **1999**. Tecnología del Concreto. 1ra Edición., IMCYC, México: 75-121, 167-183, 187-197, 406-410.
26. **Pérez**, J T. Seguimiento por medio de la técnica de impedancia electroquímica de la protección catódica del acero de refuerzo en concreto modificado por un agente humectante. México. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias: 34-35. (2004)
27. **Rodríguez**, L M; Genescá, J; Uruchurtu, J; Hernández, I. Corrosividad atmosférica., 1ra Edi., Plaza y Valdés, S A de C V México: 5-38 (1999)
28. **Sagüés**, AA; Pech – Canal, M A; Shahid Al – Mansur, A K M. Corrosion Macrocell Behavior of Reinforcing Steel in Partially Submerged Concrete Columns. CORROSION SCIENCE; Vol 45: 7-32. (2003)
29. **Sagüés**, AA; Balakrishna, V; Powers, RG. An Approach for the Evaluation of Performance of Point Anodes for Corrosion Prevention of Reinforcing Steel in Concrete Repairs., Symposium *Structural Concrete and Time* La Plata, Argentina. Paper 2046, 35-41. (2005)
30. **Torres**, Andrés; **Martínez**, Miguel. Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Publicación Técnica 181. Secretaría de Comunicaciones y Transportes; Instituto Mexicano del Transporte (2001)

31. **Trejo**, D; Monteiro, P J. Corrosion Performance of Conventional (ASTM A615) and Low-alloy (ASTM A706) Reinforcing Bars Embedded in Concrete and Exposed to Chloride Environments. CEMENT AND CONCRETE RESEARC; Vol 35: 562-571. (2005)
32. **Uhlig**, H. Corrosión y control de la corrosión. Séptima edición, Editorial URMO, España: 92-125, 155-165. (1970)
33. **Vadillo**, M C. Seguimiento del proceso de la corrosión del acero de refuerzo en pilotes de concreto. México. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias: 1-9, 22-27. (2004)
34. **Vaysburd**, A. Galvashield Embedded Galvanic Anodes for Repair of Concrete. Concrete Innovations Appraisal Service (CIAS): CIAS REPORT; 01-1 (2001)
35. **Whitmore**, D. Corrosion Protection Systems, Vector Corrosion Technologies (2003)
36. **Whitmore**, D; Abbott, S. NACE CORROSION 2003, Houston Texas, Paper 03301:1-8 (2003)
37. **Wittmore**, D. **2005**. www.vector-corrosion.com
38. **Beaudette**, M. **2001**. www.norcure.com
39. **Yadav**, A P; Nishikata, A; Tsuru, T. Degradation Mechanism of Galvanized Steel in Wet-dry Cyclic Environment Containing Chloride Ions. CORROSION CIENCE; Vol 46: 361-376. (2004)



‡ Certificación ISO 9001:2000 según documento No 0109-2007-AQ-MEX-EMA,
vigente hasta el 24 de octubre de 2009 (www.imt.mx)

CIUDAD DE MÉXICO

Av Nuevo León 210, piso 2
Col Hipódromo Condesa
06100, México, D F
tel (55) 5265 3190
fax (55) 5265 3190 ext 4711

SANFANDILA

km 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx