



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“PROTECCIÓN CATÓDICA DE CONCRETO REFORZADO
USANDO ÁNODOS DE SACRIFICIO DISCRETOS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

ALMA PATRICIA OIDOR SALINAS

DIRIGIDA POR

Dra. ANGÉLICA DEL VALLE MORENO

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2007.

BIBLIOTECA CENTRAL UAQ

No. Adq: H7-2911
No. Título _____
Clas 75
620.11223
Ø 35p

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA



“PROTECCIÓN CATÓDICA DE CONCRETO REFORZADO
USANDO ÁNODOS DE SACRIFICIO DISCRETOS”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

ALMA PATRICIA OIDOR SALINAS

DIRIGIDA POR
Dra. ANGÉLICA DEL VALLE MORENO

SINODALES

Dra. ANGÉLICA DEL VALLE MORENO
DIRECTOR

M. C. JOSÉ ANTONIO DEOLARTE POU
ASESOR INTERNO

Q. M. ÁNGEL F. PEREZ MARTINEZ
SINODAL

Q. M. SALVADOR ALVARADO BALLEZA
SINODAL

VI. RESULTADOS	58
VI.1 Propiedades mecánicas del concreto	59
VI.2 Resultados de potenciales de media celda en las 6 probetas de concreto	60
VI.3 Resultados de la medición de corriente catódica	67
VI.4 Resultados de las pruebas de depolarización	71
VI.5 Resultados de Rp	75
VI.6 Difracción de R-X	78
VII. DISCUSION	80
VII.1 Concreto	80
VII.2 Potenciales de media celda	80
VII.2.1 Etapa "A" Antes de colocar el ánodo	80
VII.2.2 Etapa "B" Reparación y colocación del ánodo en el concreto	81
VII.2.3 Etapa "C" Conexión	81
VII.3 Corriente	83
VII.4 Curvas de depolarización	84
VII.5 Velocidad de corrosión	85
VII.5 Lixiviación y difracción de R-X	86
VIII. CONCLUSIONES	87
IX. BIBLIOGRAFÍA	88
X. ANEXOS	92
X.1 Análisis de los materiales	92
X.1.1 Análisis del agregado grueso	92
X.1.2 Análisis del agregado fino	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama de Pourbaix para el hierro a 25° C	12
2. Equivalencia aproximada entre las escalas de potencial relativas a los electrodos de referencia utilizados	13
3. Modelo de vida útil de una estructura	21
4. Protección catódica por corriente impresa	29
5. Protección catódica por ánodos de sacrificio	34
6. Ánodo de sacrificio interno	40
7. Probetas durante el proceso de colado	52
8. Diseño de las probetas	53
9. Diseño de los moldes para las probetas	53
10. Realización de pruebas electroquímicas	54
11. Diseño de la reparación	54
12. Cámara de humedad de las probetas	55
13. Prueba de decaimiento de depolarización	56
14. Ensaye de resistencia a la compresión	56
15. Cilindros después de la prueba de resistencia a la compresión	59
16. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 1SCL	60
17. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 2SCL	62
18. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 3SCL	63
19. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 4CCL	64
20. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 5CCL	65
21. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 6CCL	67
22. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 1SCL	67
23. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 2SCL	68
24. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 3SCL	68
25. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 4CCL	69
26. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 5CCL	69
27. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 6CCL	69
28. Productos de corrosión del ánodo de sacrificio	78

29. Resultados del análisis de difracción de R-X	79
30. Gráfica de análisis granulométrico	92

79

92

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Serie de fuerza electromotriz	10
2. Características de los ánodos galvánicos	37
3. Ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica	36
4. Criterios de valoración de potenciales del acero en concreto vs Cu/CuSO_4 .	44
5. Criterios de evaluación para la velocidad de corrosión en términos de la vida útil de una estructura de concreto.	45
6. Criterios de evaluación para la resistividad eléctrica.	46
7. Resultados de resistencia a la compresión del concreto	59
8. Potenciales promedio probetas sin cloruros	66
9. Potenciales promedio probetas con cloruros	66
10. Promedios corriente probetas sin cloruros	70
11. Promedios corriente probetas con cloruros	70
12. Depolarización de las probetas sin cloruros del día 22 de Febrero 2005.	72
13. Depolarización de las probetas con cloruros del día 22 de Febrero 2005.	72
14. Depolarización de las probetas sin cloruros del día 12 de Abril 2005.	73
15. Depolarización de las probetas con cloruros del día 12 de Abril 2005.	73
16. Depolarización de las probetas sin cloruros del día 02 de Junio 2005.	74
17. Depolarización de las probetas con cloruros del día 02 de Junio 2005.	74
18. Resistencia a la polarización de las probetas sin cloruros del día 23 de Febrero 2005	75
19. Resistencia a la polarización de las probetas con cloruros del día 23 de Febrero 2005	75

20. Resistencia a la polarización de las probetas sin cloruros del día 14 de Abril 2005	76
21. Resistencia a la polarización de las probetas con cloruros del día 14 de Abril 2005	76
22. Resistencia a la polarización de las probetas sin cloruros del día 03 de Junio 2005	76
23. Resistencia a la polarización de las probetas con cloruros del día 03 de Junio 2005	77
24. Resultados del agregado grueso	93
25. Resultados del agregado fino	93
26. Cantidad de agregados para realizar concreto con una relación a/c 0,50.	93
27. Cantidad de agregados para las probetas coladas	94

RESUMEN

La gran cantidad de problemas que existen en México y en todo el mundo debido a la corrosión en estructuras metálicas nos llevó a realizar este estudio enfocándolo a estructuras de concreto reforzado que se encuentran en ambientes marinos. Actualmente existen diversos métodos y técnicas para prevenir la corrosión, en este estudio se trató de probar la eficiencia de la protección catódica mediante ánodos de sacrificio discretos de zinc, una nueva tecnología que está en vías de desarrollo, ya que actualmente no se tienen datos técnicos de largo plazo sobre el funcionamiento de estos ánodos.

En el presente trabajo se evaluaron seis vigas de concreto reforzado, preparadas con una relación agua/cemento de 0,50, las cuales simularon al 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, simulando el agua de mar, con el objeto de reproducir en lo posible las condiciones experimentales prevalecientes en un ambiente marino. Todas permanecieron a una humedad relativa de 90%.

En todas las vigas, se simuló 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 que se utilizaron 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 muestran que la varilla de refuerzo fue protegida catódicamente por los ánodos de sacrificio por lo que los ánodos de sacrificio pueden funcionar como un sistema de prevención catódica en estructuras de concreto reforzado, en medios similares.

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo al Plan Nacional de Evaluación de la Degradación por Corrosión en Puentes del año 2002 existen en México 6500 puentes en la Red Carretera Federal, de los cuales el 7,5% requiere algún tipo de reparación y mantenimiento debido a problemas de corrosión. Estados Unidos de Norteamérica cuenta con aproximadamente 575 000 puentes de los cuales 280 000 de ellos 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, que han sido 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 protección contra la corrosión, además de que representa un bajo costo, es de fácil instalación y proporciona un mayor tiempo de vida remanente para las estructuras. La protección catódica por ánodos de sacrificio, ya es muy utilizada y conocida, sin embargo esta técnica 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, sin embargo, no se cuenta con datos de otros laboratorios / compañías por lo que esta investigación proporcionará datos específicos sobre este tipo de ánodos.

El objetivo de este proyecto es investigar la efectividad de la protección catódica con ánodos de sacrificio discretos.

En el primer capítulo de este trabajo se presentan los antecedentes del proyecto, planteando el problema y posible solución.

En el segundo capítulo se presentan 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. Se presentan además los métodos de monitoreo que se utilizaron: decaimiento de polarización, potenciales, velocidad de corrosión, resistividad eléctrica, corriente catódica y resistencia a la compresión.

En el tercer y cuarto capítulo se plantean la hipótesis y objetivos de este proyecto.

En el quinto capítulo se describen los materiales utilizados en este 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 el sexto capítulo se presentan los resultados del proyecto y la discusión de los mismos, que se obtuvieron a lo largo de su desarrollo y obtenidos gracias a los métodos de monitoreo descritos en el capítulo dos.

Después se presentan las conclusiones del proyecto, aceptando la hipótesis planteada al inicio del mismo.

II. ANTECEDENTES

II.1 Corrosión

Todos los metales que utilizamos en nuestra vida diaria desde el grifo del agua, las tuberías, el autobús en el que viajamos, los automóviles, aviones, edificios, utensilios de cocina y todas las obras de construcción, están soportadas 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 los metales se degradan con el tiempo de diferentes formas y pierden sus propiedades, todo esto se debe a la propia atmósfera que contiene oxígeno y otros elementos que reaccionan con el acero y lo degradan paulatinamente marcando el retorno del metal hacia una forma más estable, generalmente como óxidos o sulfuros (Rodríguez y col., 1999).

La mayoría de los metales, son obtenidos a partir de especies minerales estables en las condiciones naturales. Por tanto, al ser expuestos 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, produciendo un deterioro en sus propiedades físicas y químicas (Ávila y Genescá, 2002). Esta degradación trae como consecuencia pérdidas millonarias de dinero y al año se destruye hasta un 25% de la producción anual de acero (Koch y col., 2002)., debido al deterioro de estructuras, maquinaria, tuberías, etc., además de los daños indirectos que este provoca y los inconvenientes que supone su sustitución y por supuesto 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.

II.1.1 Generalidades sobre corrosión

Los metales forman parte de nuestra vida cotidiana, sin embargo estos se desgastan, tal dependencia nos ha obligado a utilizar aleaciones, metales o sistemas que no permitan la corrosión o que hagan que el avance de la misma sea muy lento. Existen muchas formas, por las que un metal o aleación deja de ser útil, por ejemplo puede disolverse lentamente y transformarse en otra especie (corrosión uniforme), a los metales también puede formárseles grietas bajo ciertas condiciones, al estar sujetos a un medio agresivo y un alto esfuerzo mecánico (corrosión bajo tensión) o pueden formar agujeros profundos que avanzan rápidamente (corrosión por picaduras). Los metales también pueden sufrir de fatiga, con la consecuente pérdida de resistencia (corrosión por fatiga). La corrosión, por tanto, es un proceso, a veces inevitable, cuya prevención es difícil, pero sobre el que es posible y practicable un control y protección al mismo. El proceso de corrosión en los metales, es un proceso químico cuando se refiere a sistemas no electrolíticos como gases y vapores o líquidos no conductores y electroquímico cuando se presentan reacciones de oxidación y reducción, estableciéndose un intercambio de electrones y consecuentemente el paso de una corriente eléctrica entre un ánodo y un cátodo, a través de un medio conductor, como en una pila galvánica (Uhlig, 1970).

Las reacciones electroquímicas se presentan generalmente en un medio acuoso y toman parte especies químicas y cargas eléctricas, un ejemplo de reacciones electroquímicas es la reacción de los iones hidrógeno a hidrógeno gas y la oxidación del agua a oxígeno gas. Este tipo de reacciones generan un proceso instantáneo que denota la existencia de una zona anódica (que sufre la corrosión y donde ocurre la reacción de oxidación), una zona catódica (donde ocurre la reacción de reducción), un electrolito y un contacto eléctrico entre el ánodo y el cátodo. Un electrolito es una solución que conduce la electricidad, debido a la presencia de iones (Ávila y Genescá, 2002).

Los cátodos o ánodos involucrados en un proceso de corrosión se conocen como electrodos y para que se lleve a cabo el proceso de corrosión el ánodo y el cátodo deben estar sumergidos en un electrolito.

La corriente eléctrica circula desde el cátodo al ánodo, en el electrolito el transporte de la corriente eléctrica tendrá lugar del ánodo al cátodo. Habrá un consumo y por consiguiente pérdida de metal en aquellos lugares del ánodo en que la corriente abandone el electrodo para pasar al electrolito. Este tipo de corrosión electroquímica también se presenta cuando dos metales diferentes, que tienen por lo tanto actividades diferentes, son sumergidos en un electrolito y conectados eléctricamente entre sí, se tendrá un flujo de electrones del metal más activo o anódico hacia el metal más noble o catódico, dejando el material anódico con una diferencia de electrones. Esto trae como consecuencia que el ánodo se disuelva, es decir se corroe. A la actividad electroquímica de esta naturaleza se le conoce como corrosión galvánica, esta corrosión constituye también el principio de las llamadas pilas "secas". Cualquier par galvánico es capaz de crear energía en forma de una diferencia de potencial capaz de mover electrones. La energía generada por la corrosión no puede ser recuperada o usada, se desperdicia sin que podamos hacer algo, esto debido a que los procesos de corrosión ocurren a niveles microscópicos, en donde los pares galvánicos son sistemas tan locales que inclusive el conductor eléctrico externo es la misma estructura metálica que se corroe. Un proceso de corrosión involucra tanto la reacción anódica como la catódica y si una de las dos reacciones falla, el proceso de corrosión se detiene.

Para describir el deterioro del acero en la atmósfera, tendremos en primer lugar que decir que el acero es una aleación hierro - carbono (máximo 2% C) que presenta diferentes fases, dependiendo del método utilizado para su fabricación, de la concentración de carbono, de la presencia de aleantes, de la refinación del acero o de su tratamiento térmico, el cual es necesario para imprimirle ciertas propiedades mecánicas.

En el acero encontramos una fase rica en hierro llamada ferrita y otra conteniendo carburos de hierro en una matriz de ferrita llamada perlita, estas dos fases son diferentes y conductoras, es fácil establecer un par galvánico ante la presencia de un electrolito. Sin embargo la ferrita es siempre más anódica (activa) que la fase perlitica (noble), el electrolito lo constituirá la humedad que existe en la atmósfera, la cual forma películas muy finas y casi imperceptibles sobre la superficie metálica. Esta película de agua se acumulará y concentrará ciertos elementos e impurezas que están presentes en el aire, tales como el oxígeno, bióxido de carbono, anhídrido sulfuroso, cloruros, etc., dando como resultado una solución muy conductora y específicamente agresiva, es así como se conforma la pila de corrosión (Ávila y Genescá, 2002).

Esta pila forma un circuito eléctrico y en un circuito eléctrico existen varios fenómenos que se pueden medir:

- La corriente , medida en amperes (A)
- La fuerza electromotriz y la diferencia de potencial, ambas medidas en volts (V)
- La resistencia medida en ohms (Ω)

La conductividad eléctrica es la facilidad con que puede moverse la carga eléctrica. La habilidad de diferentes sustancias para permitir el flujo de una carga está determinada por la movilidad de los electrones portadores de la carga o de los iones que contenga la sustancia. Ya que un electrón es una cantidad de carga muy pequeña, para medirlo se utiliza una unidad más grande denominada Coulomb (Q), ecuación 1. Un coulomb corresponde a 6,24 trillones de electrones ($6,24 \times 10^{18}$). A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (densidad (I)). El flujo de la carga puede trasladarse por medio de electrones y por iones, el flujo de corriente en metales se da a través de un flujo de electrones (corriente eléctrica) ecuación 2.

$$A = Q/s \quad (1)$$

1Ampere = 1 Coulomb/Segundo

$$Q = It \quad (2)$$

Coulomb = Ampere x s

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado (J), cuando 1 Q de electricidad se mueve de un punto al otro (Ávila y Genescá, 2003).

A la unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama volt (V) y se define como sigue: dos puntos tienen una diferencia de potencial de 1 volt cuando se realiza un trabajo de 1 J por cada coulomb de electricidad que transita de un punto al otro (ecuación 3), por lo tanto:

$$V = J/C \quad (3)$$

La fuerza electromotriz (fem) de una celda se mide en volts y se define como la suma de las diferencias de potencial que puede producir a través de todos los componentes de un circuito al cuál está conectado, incluyendo la diferencia de potencial requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda. Esta fem representa el trabajo total efectuado en joules por los coulombs de electricidad transportados en un circuito en el que la celda esta conectada.

Resistencia: es la habilidad de una sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella. Un buen conductor tiene baja resistencia y un mal conductor tiene alta resistencia.

Ley de Ohm

La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos (Ávila y Genescá, 2003).

El conductor que siga esta relación obedece la ley de Ohm, ecuación 4

$$V = RI \quad (4)$$

Un ohm se define como la resistencia de un conductor dado, cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 volt en sus extremos y una corriente de 1 A fluye por él (ecuación 5).

$$\Omega = V/A \quad (5)$$

La resistencia de un metal puro aumenta con la temperatura, pero por ejemplo en el carbón la resistencia baja con la temperatura.

La resistencia al flujo de corriente es mínima cuando:

- a) El medio presenta baja resistividad (alta conductividad)
- b) Existe una distancia pequeña para el flujo de corriente
- c) Tenemos un área transversal grande para el flujo de corriente

En cambio la resistencia al flujo de corriente es máxima cuando:

- a) El medio presenta alta resistividad (baja conductividad)
- b) Las distancias son grandes para el flujo de corriente
- c) El área transversal es pequeña para el flujo de corriente

Es así que la fuerza de una corriente que se obtiene de una celda no sólo depende de su fuerza electromotriz, sino también de su resistencia interna (Ávila y Genescá, 2003; ASM, 1998).

Debido a que los valores de una celda de corrosión representan especies químicas, es conveniente transformar la energía de una reacción química como energía eléctrica. Cuando una reacción química sucede espontáneamente, libera energía, este tipo de energía puede ser empleada parcialmente para efectuar algún tipo de trabajo y es a lo que se denomina energía libre de una reacción y se representan como ΔG (ecuación 6).

$$-\Delta G = W \quad (6)$$

en donde $-\Delta G$ es el cambio de energía libre de una reacción espontánea y W es cualquier trabajo, a este trabajo se le llama trabajo eléctrico y se define como la carga transportada, multiplicada por la diferencia de potencial existente entre las dos fases, es decir ΔE° , se tiene entonces en la ecuación 7 que :

$$\text{Trabajo eléctrico } W = nF \Delta E^\circ \quad (7)$$

En donde n es el número de electrones transportados y F es la constante de Faraday.

Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (7) se obtiene que:

$$-\Delta G = nF \Delta E^\circ \quad (8)$$

La ecuación (8) implica que el cambio de una reacción química es directamente proporcional al potencial de celda generado. Es por ello que para poder conocer la tendencia de los metales a corroerse, bajo el estudio de esta corriente eléctrica, se diseñó una escala donde los diversos metales en solución con sus mismas sales son medidos bajo condiciones estándar de temperatura, presión y concentración (ASM, 1998).

Sin embargo, es imposible conocer el potencial verdadero o absoluto de un metal con sus iones en solución, ante esta situación se eligió un patrón de referencia contra el cuál se pudieran medir todos los potenciales de electrodo. Para ello se eligió la reacción (9)



en agua, bajo condiciones estándar y con un electrodo de platino. Esta ecuación representa la reacción del electrodo estándar de hidrógeno y se le asigna un valor de 0,000 volts. A la lista de metales en equilibrio con sus propios iones, respecto al electrodo normal de hidrógeno (ENH) se le llama Serie de Fuerza Electromotriz, la cuál se muestra en el cuadro 1. Esta serie de fuerza electromotriz nos muestra la tendencia termodinámica de los metales a corroerse y la espontaneidad de las

reacciones, ya que cuanto más negativo sea el valor, la tendencia a corroerse será aún mayor. Sin embargo, esta serie posee severas limitaciones debido a que los metales no están siempre en contacto con sus mismas sales, sino con el agua, que es un factor muy importante para que se lleve a cabo la corrosión, por lo que los estudios deben llevarse a cabo en medios acuosos.

Cuadro 1. Serie de Fuerza Electromotriz (ASM, 1998).

Reacción	Potencial estándar 25 °C , V vs ENH
$Au^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow Au$	1,50
$Pd^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Pd$	0,98
$Hg^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Hg$	0,85
$Ag^{+} + e^{-} \longrightarrow Ag$	0,80
$Hg_2^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow 2 Hg$	0,79
$Cu^{+} + e^{-} \longrightarrow Cu$	0,52
$Cu^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Cu$	0,33
$2H^{+} + 2e^{-} \longrightarrow H_2$	0,00
$Pb^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Pb$	-0,12
$Sn^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Sn$	-0,13
$Ni^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Ni$	-0,25
$Co^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Co$	-0,27
$Tl^{+} + e^{-} \longrightarrow Tl$	-0,33
$In^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow In$	-0,34
$Cd^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Cd$	-0,40
$Fe^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Fe$	-0,44
$Ga^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow Ga$	-0,53
$Cr^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow Cr$	-0,74
$Cr^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Cr$	-0,91
$Zn^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Zn$	-0,76
$Mn^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Mn$	-1,18
$Zr^{4+} + 4e^{-} \longrightarrow Zr$	-1,53
$Ti^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Ti$	-1,63
$Al^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow Al$	-1,66
$Hf^{4+} + 4e^{-} \longrightarrow Hf$	-1,70
$U^{3+} + 3e^{-} \longrightarrow U$	-1,80
$Be^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Be$	-1,85
$Mg^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Mg$	-2,37
$Na^{+} + e^{-} \longrightarrow Na$	-2,71
$Ca^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Ca$	-2,87
$K^{+} + e^{-} \longrightarrow K$	-2,93
$Li^{+} + e^{-} \longrightarrow Li$	-3,05

Una buena aproximación para el estudio del comportamiento de los metales en medios acuosos lo constituye los diagramas de potencial de reducción (E°_H) contra pH, también llamados de Pourbaix, en honor a Marcel Pourbaix quien los desarrolló.

Los diagramas de Pourbaix muestran los equilibrios existentes entre un metal y el agua a 25° C y son representados por líneas que dependen del potencial, del pH o de ambos, delimitando así zonas termodinámicamente estables en donde el metal existe en alguna de sus formas (disueltos, como óxido, como hidróxido, o como metal, etc.). Los diagramas de Pourbaix contienen una división natural del campo gráfico en tres regiones, las cuales pueden ser clasificadas de acuerdo a su actividad corrosiva en: pasividad, corrosión e inmunidad. La zona de pasividad, corresponde a una zona de corrosión, donde la fase formada constituye una película protectora formada por óxidos, hidróxidos, etc., que evita el avance del proceso de corrosión.

La formación de imperfecciones en la misma (pasivación imperfecta) conlleva a la aparición de corrosiones locales (picaduras). La zona de corrosión, se caracteriza por el predominio de las reacciones de oxidación, que causan la destrucción por combinación o disolución continua del metal. El límite entre la zona de inmunidad y la de corrosión activa es gradual, al igual que con el de pasividad. La zona de inmunidad, o zona de predominio de las reacciones de reducción, corresponde a la zona donde el metal se encuentra preservado bajo ciertas condiciones muy especiales de potencial y pH.

Pueden estudiarse para todos los metales, las zonas de inmunidad, corrosión y pasivación, para determinar en cada caso las condiciones de E°_H -pH que supone estos comportamientos, lo que ayudará a diseñar estrategias adecuadas de lucha contra la corrosión. En especial, debemos hacer hincapié en el diagrama E°_H -pH para el hierro (Figura 1), por ser el material más usado en la industria de la construcción.

Éste muestra una zona de inmunidad para pH inferiores a 11, a partir de un potencial estándar de -0,53 V con respecto al electrodo normal de hidrógeno (ENH), ó -0,85 V con respecto al electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4), que constituye el fundamento de la aplicación de la protección catódica. A pesar de la gran estabilidad del ENH, este presenta dificultades en su operación, ya que es demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones prácticas, es por ello que se utilizan los llamados electrodos de referencia que deben cumplir con las siguientes condiciones:

- No reaccionar con su contenedor
- Fácil de construir
- No polarizable
- Reproducible
- Fácil de usar
- Que el potencial de reacción oxido-reducción permanezca constante respecto al ENH.

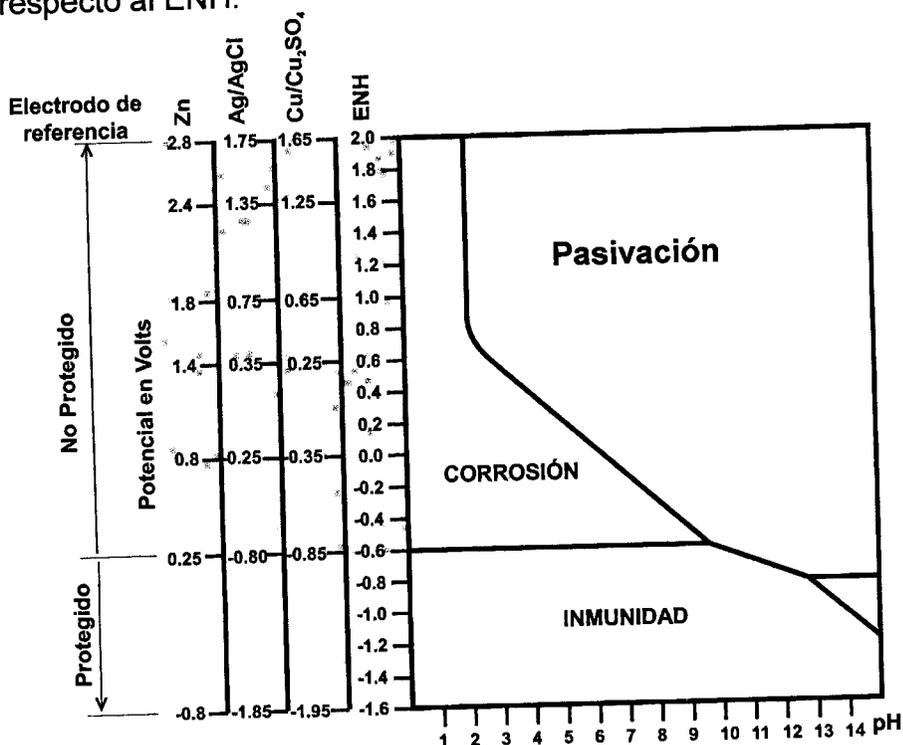


Figura 1. Diagrama de Pourbaix para el hierro a 25° C (Pourbaix, 1974)

Como electrodos de referencia se utilizan el de calomel, el electrodo de plata/cloruro de plata, el electrodo de zinc, el electrodo de cobre/sulfato de cobre, teniendo este último una gran utilización práctica (ASTM C 876 – 91; ASM, 1998). La Figura 2 representa una equivalencia aproximada entre las escalas de potencial relativas a los electrodos de referencia utilizados en protección catódica, con indicación de los intervalos de corrosión, protección y sobreprotección para el acero al carbono (Ávila y Genescá, 2003).

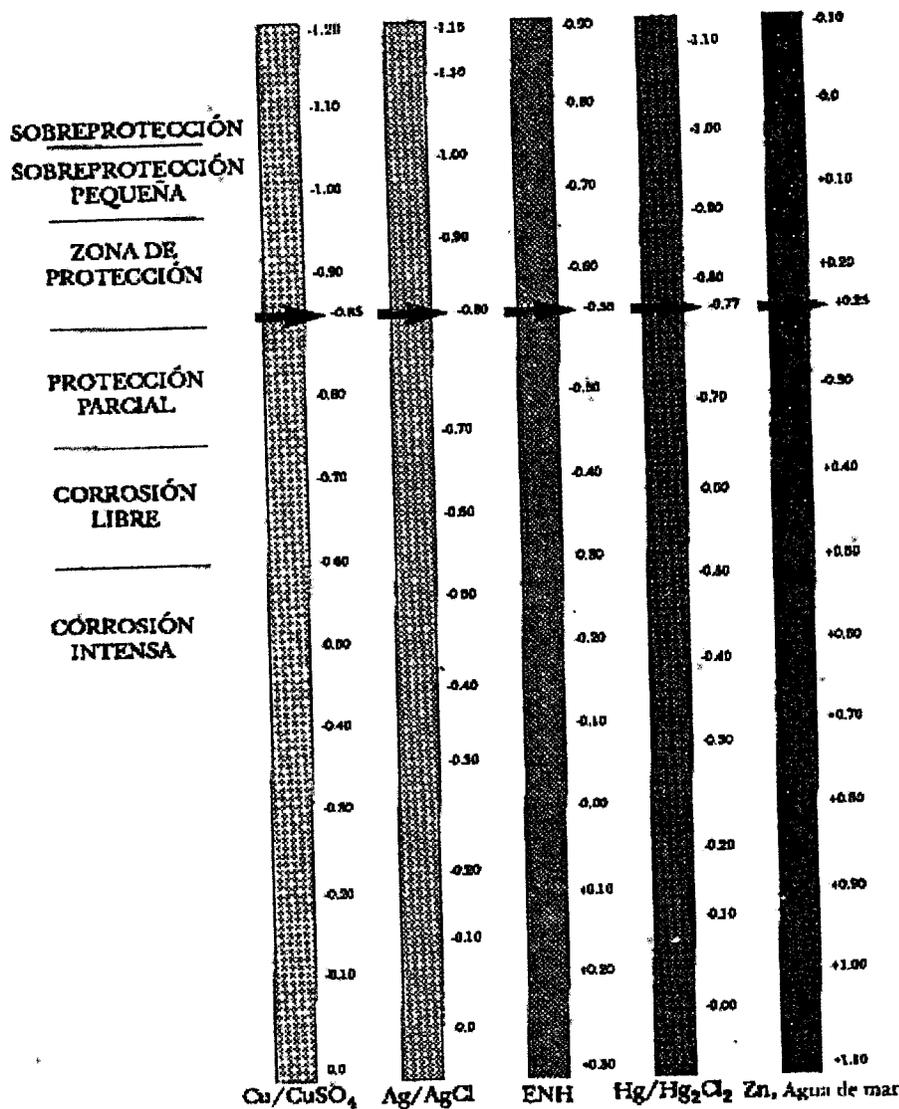


Figura. 2 Equivalencia aproximada entre las escalas de potencial relativas a los electrodos de referencia utilizados en protección catódica, con indicación de intervalos de corrosión, protección y sobreprotección para el acero al carbono (Ávila y Genescá, 2003).

En los diagramas de Pourbaix, que representan un proceso termodinámico de corrosión, no se incluyen los datos cinéticos. Esto significa que la velocidad del proceso no se toma en cuenta, sólo la tendencia a que la corrosión ocurra. La cinética nos dice qué cantidad de metal por unidad de tiempo se está disolviendo en un medio dado, cuando este sistema está desplazado de una situación de equilibrio (ASM, 1998). Butler y Volmer desarrollaron la teoría cinética electroquímica, obteniendo una expresión para la velocidad de reacción de transferencia electrónica bajo la influencia de un campo eléctrico (ecuación 10), por lo que esta relación representa la ecuación fundamental de la cinética electroquímica para transferencia de carga de electrodos.

$$i = i_0 \exp(1-\beta)\eta^{\frac{F}{RT}} - \exp(-\beta)\eta^{\frac{F}{RT}} \quad (10)$$

donde i es la corriente neta, i_0 es la corriente de intercambio, η es el sobrepotencial, β es el coeficiente de simetría (para corrosión toma un valor de 0,5), R es la constante de los gases, T representa la temperatura absoluta y F es la constante de Faraday. Esta ecuación es semejante a una función de seno hiperbólico, cuando se representa en una gráfica de potencial en función de la corriente, la cual se conoce como curva de polarización. Cuando el sobrepotencial es pequeño $< 0,05$ V, la ecuación de Butler-Volmer se puede simplificar (ecuación 11 y 12):

$$i = i_0 \eta^{\frac{nF}{RT}} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{iRT}{i_0 nF} \quad (12)$$

Por lo que la curva se puede considerar lineal y la pendiente de la curva de polarización, tiene unidades de una resistencia eléctrica y se conoce como resistencia a la polarización R_p , que es la resistencia de transferencia de carga bajo ciertas condiciones. Un valor de i_0 grande representa una R_p pequeña y viceversa.

y por las leyes de Faraday, ésta puede ser convertida a velocidad de corrosión (ecuación 13).

$$R_p = \frac{RTi}{nFi_0} \quad (13)$$

Los potencióstatos - galvanostatos son instrumentos capaces de medir la Resistencia a la polarización (R_p), que se relaciona con la velocidad o densidad de corriente (i_{corr}) como la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Sus unidades son $\mu A/cm^2$, transformando este dato a partir de la densidad de corriente, en unidades de velocidad (mmpy, mpy), ecuación 14.

$$R_p = \frac{B}{i_{corr}} \quad (14)$$

$$R_p = \Omega cm^2$$

$$i_{corr} = \mu A/cm^2$$

B se calcula mediante las pendientes catódicas y anódicas de la curva de polarización cíclica, se asume como una constante que oscila entre 26-52 mV.

La R_p resulta de aplicar una pequeña perturbación eléctrica a las varillas y medir el cambio de potencial o intensidad que se produce. Estas perturbaciones deben causar un cambio de ± 20 mV como máximo (ecuación 15).

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta i} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (15)$$

Los valores obtenidos en $\mu A/cm^2$ se pueden transformar en pérdida de espesor por unidad de tiempo mediante la ley de Faraday (ecuación 16).

$$\frac{\mu m}{año} = \frac{M i_{corr}}{nF\delta} \quad (16)$$

Donde n es el número de electrones de intercambio o transferidos, i_{corr} es la corriente en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, F es la constante de Faraday, M es el peso molecular del metal y δ es la densidad del metal.

II.1.2 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. El concreto es la protección natural idónea para las varillas, ya que su alta alcalinidad hace que se forme una capa pasiva que las protege. La aparición de signos de deterioro en las estructuras de concreto reforzado, se deben 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 acero (Helene y Pereira, 2003). Cuando se rompe la película pasivante debido a sustancias agresivas que penetran en el concreto, el óxido formado en exceso 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 pasiva (Helene y Pereira, 2003).

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 película (Moreno y col., 2004). Los factores que afectan 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 externos (Castro y Moreno, 2003). Existen iones despasivantes, como los cloruros, que provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales (picaduras), que reducen drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos (Moreno y col., 2004; Trejo y Monteiro., 2005). Estos cloruros se pueden encontrar en la masa de concreto por que 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 deshielo (Whitmore, 2003).

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

- 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 en el concreto de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y sin una cantidad mínima crítica, no es posible 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 pueden 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:

a) Corrosión Uniforme. Es el 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 Ca(OH)_2 con los componentes ácidos de la atmósfera, tales como SO_2 y CO_2 , éste último es el más abundante y del cual deriva el nombre de carbonatación; los productos de estas reacciones son carbonatos, sulfatos y agua, generando un descenso en la alcalinidad del concreto.

b) 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 estén presentes en el agua o en la arena, o porque penetren 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 altos esfuerzos en un ambiente altamente agresivo, lo que resulta en microgrietas, las cuales al progresar su crecimiento, pueden generar fracturas del metal.
- Corrosión por corrientes de interferencia. Son causadas por corrientes que no forman parte de la celda electroquímica (Durar, 2002).

c) Corrosión Galvánica. Esta se presenta cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico, en el concreto esta corrosión se formará cuando no se desarrolla una película pasiva característica en alguna sección de la varilla, lo que produce una pila de corrosión (Ávila y Genescá, 2002).

Los mecanismos de deterioro son generalmente desarrollados 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 este proceso es acelerado 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 concreto (Durar, 2002).

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 contenido de oxígeno que rodean la varilla. El concreto absorbe humedad muy rápidamente, pero se seca muy despacio debido a que la humedad se almacena en los poros del concreto.

Cuando los poros están saturados de humedad, existe una resistividad mínima y se facilita la formación de la pila de corrosión, sin embargo el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua para poder alcanzar la varilla, si este es el caso, las velocidades de corrosión serán de moderadas a bajas (Helene y Pereira, 2003).

En el reporte de la Red Temática DURAR se propone una definición para el concepto de vida útil de una estructura: "periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento. En el diseño de estructuras por durabilidad el requerimiento de la vida útil de la estructura puede ser definido de antemano por el cliente, por lo que se le llamará vida útil de servicio, (TVU). Después del término de la vida útil comienza lo que se conoce como vida residual y es el tiempo en que la estructura alcanza el fin de la vida útil. Este es el periodo en el que la estructura necesitaría reparación, remodelación o completa renovación para que regrese a su estado de servicio original; esto es, que sea segura, funcional y estética. La etapa de vida residual es el tiempo que tiene el dueño de la estructura, para repararla antes que la degradación avance hasta el límite de posible colapso.

Los valores mínimos de servicio (o valores máximos aceptables de degradación) son llamados los estados límites de la durabilidad de una estructura. Estos son principalmente dos: 1) Estado límite de servicio (ELS) y 2) Estado límite último (ELU). El primero (ELS) corresponde al punto en el tiempo en el cual la estructura ha llegado al fin de su vida útil, o sea, "es el estado en el cual los requerimientos de servicio de una estructura (seguridad, funcionalidad y estética) ya no se cumplen". El ELU es el estado en que la estructura "se encuentra asociada con colapso u otra forma similar de falla estructural" (Torres y Martínez, 2001). Se considera que la

estructura mantiene las características de diseño mientras el deterioro no alcance un cierto valor límite que dependerá de cada elemento estructural.

Sin embargo en la propagación o vida residual es necesario y propicio realizar la reparación de la estructura, ya que si no se realiza la reparación en este tiempo se puede llegar al colapso de la misma. La Figura 3 muestra un esquema de la vida útil de una estructura. (Torres y Martínez, 2001).

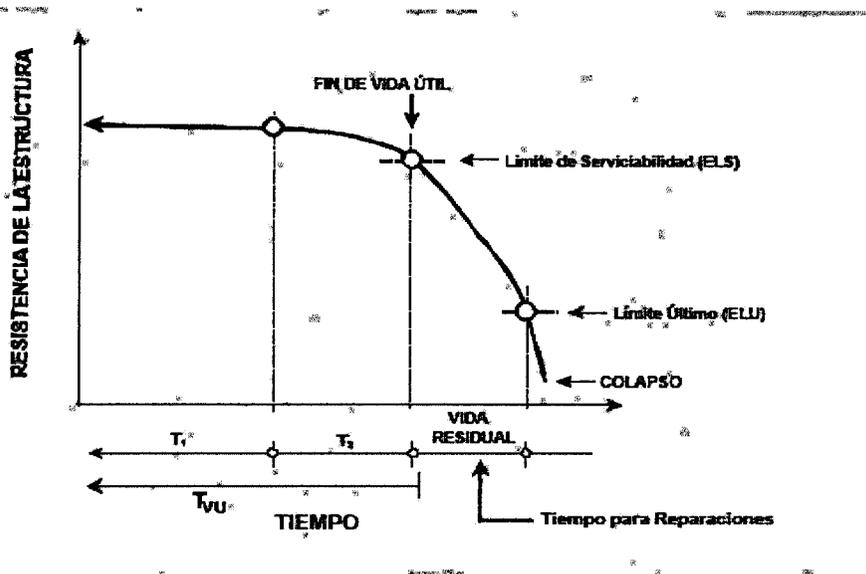


Figura 3. Modelo de vida útil de una estructura (Torres y Martínez, 2001).

La corrosión en el concreto ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste de cuatro elementos principales:

1. Ánodo, donde ocurre la reacción de oxidación
2. Cátodo, donde ocurre la reacción de reducción
3. Conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
4. Electrolito, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso. En presencia de humedad, el concreto actúa como electrolito.

La corrosión del acero (varilla) en concreto contaminado con cloruros se lleva a cabo como sigue:

Reacción anódica:

El hierro cambia a un ion cargado positivamente y libera electrones al ánodo:



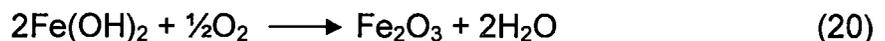
El ion hierro y el ion cloruro se combinan para producir un cloruro de hierro complejo en el ánodo como sigue:



En condiciones alcalinas, el cloruro de hierro complejo reacciona con agua y el ion hidroxilo (del cátodo) en el sitio de corrosión y forma un hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), dejando los iones cloruro en el poro del agua en el ánodo. El hidróxido de hierro es la forma inicial de la corrosión del acero y tiene un color negro verdusco. El ion cloruro en el agua del poro es ahora libre de reaccionar con más hierro y continuar el proceso de corrosión.

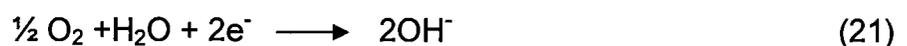


El hidróxido de hierro y el oxígeno presentes en el poro de agua del concreto en el ánodo, reaccionan para formar el óxido rojizo característico (Fe_2O_3 , hematita).



Reacción catódica

Para mantener el equilibrio, los electrones liberados en el ánodo, se mueven a través del acero y son consumidos en el cátodo, suponiendo que existen humedad y oxígeno. Como resultado, en el cátodo, se forman iones hidroxilo:



Los iones hidroxilo producidos, se difunden en el ánodo y toman parte en el proceso de corrosión.

Electrolito

El concreto húmedo actúa como un electrolito y permite la corrosión. Un concreto totalmente seco no permite reaccionar a los iones ni es lo suficientemente conductivo para permitir que fluya la corriente de corrosión.

La presencia de sal en el concreto baja la resistividad del mismo. Mediciones en campo han mostrado que una resistividad del concreto de 50 000 - 70 000 ohm-cm es el nivel, arriba del cuál, la corrosión puede considerarse despreciable.

Oxígeno

El oxígeno es un factor esencial en el proceso de corrosión. El oxígeno se difunde a través del agua de los poros del concreto. El oxígeno es un elemento necesario para que ocurra la reacción catódica, sin embargo, no es necesario para la reacción anódica (Helene y Pereira, 2003).

El concreto debe garantizar, además de las sollicitaciones mecánicas requeridas, la protección de la varilla de las acciones agresivas de los agentes externos.

El concreto que cubre las varillas de acero debe cumplir dos funciones:

- a) Crear una barrera física que se opone a la penetración de los agentes agresivos externos.
- b) Crear una capa pasivante sobre el acero, en virtud de su alcalinidad, que lo mantiene protegido durante un tiempo indefinido.

Sin embargo, las buenas prácticas de ingeniería deben ser el primer paso para la protección de las estructuras contra la corrosión:

- a) Evitar / limitar la introducción de los cloruros como parte de la mezcla de concreto.
- b) Mantener una relación agua/cemento tan baja como sea posible.
- c) Proporcionar suficiente espesor al recubrimiento del concreto sobre las armaduras.
- d) Proporcionar un curado adecuado
- e) Consolidar el concreto completamente
- f) Usar concreto pos-tensado para minimizar agrietamiento, cuando sea aplicable.
- g) Incluir planes para reparación de grietas, asumiendo que el concreto se va a agrietar.

II.2 Formas de protección

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 el empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente o por aplicación de recubrimientos diversos.
- 2) Polarización del mecanismo electroquímico. Esto se puede lograr 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 por tanto llegar a detener o disminuir sus efectos
- 3) Utilización de materiales resistentes a la corrosión de acuerdo al 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 catódica (Ávila y Genescá, 2002).

Actualmente existen técnicas electroquímicas para proteger al acero, entre las cuales se encuentran 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 que sería la mejor solución, ya que no existe mejor protección de la varilla de refuerzo que la película pasivante formada por la hidratación del cemento (Durar, 2002). En el concreto existen diversas técnicas para mantener el concreto en buen estado y minimizar el avance de la corrosión, algunas de estas técnicas 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, por lo que este proceso re-pasiva el acero, debido a las reacciones 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 estos forman microceldas galvanicas, lo que ocasiona la

presencia de 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 está estudiando ahora con mayor auge, ya que el zinc protege al acero por un mecanismo de sacrificio. Actualmente se está tratando de mejorar el acero galvanizado realizándolo por medio de galvanizado en caliente y añadiendo elementos como el níquel que mejora la adherencia del zinc y proporciona buena protección contra la corrosión de la varilla (Shibli y col., 2004).

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 mas 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 (Durar, 2002). 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 a 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). Estos dependen del tipo, cantidad de cemento, dosificación y la relación agua/ cemento (Neville, 1999). Estos aditivos, dependiendo del medio donde se apliquen, pueden afectar el proceso de corrosión, ya que las sustancias de los aditivos reaccionan con los compuestos del cemento como lo 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 desapercibido en esta reacción (Helene y Pereira, 2003). En general debe diseñarse una buena obra de construcción, implementando y estableciendo el mantenimiento adecuado de la estructura (Castro y Moreno, 2003).

II.2.1 Protección catódica

La protección catódica es una técnica que se emplea desde el siglo antepasado (XIX), Sir Humpherey Davy en 1824 desarrolló la técnica para proteger los cascos de cobre de los barcos empleando ánodos de hierro. Así se considera a Sir Humpherey 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 reemplazaron 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, donde se demostró que era factible la 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 mundo (Uhlrig, 1970).

Sin embargo no fue hasta 1970 cuando este método se comenzó a utilizar en estructuras de concreto reforzado, ya que se considera el único método 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 nuevas (Whittmore, 2003).

La protección catódica, se considera el único sistema de verdadero control de la corrosión, ya que permite que la estructura se comporte como cátodo, llegando a disminuir la velocidad de corrosión, garantizando así la vida de servicio de la estructura (Castro y Moreno, 2003). El desarrollo de esta técnica ha sido tan grande, que condujo a la creación de una Asociación de Protección Catódica en Estados Unidos en 1936, la cuál 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 corroe (Ávila y Genescá, 2003).

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.

II.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 una determinada 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 Figura 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 utilizados como ánodos auxiliares son el grafito, la chatarra de hierro y el ferrosilicio entre otros (Ávila y Genescá, 2003).

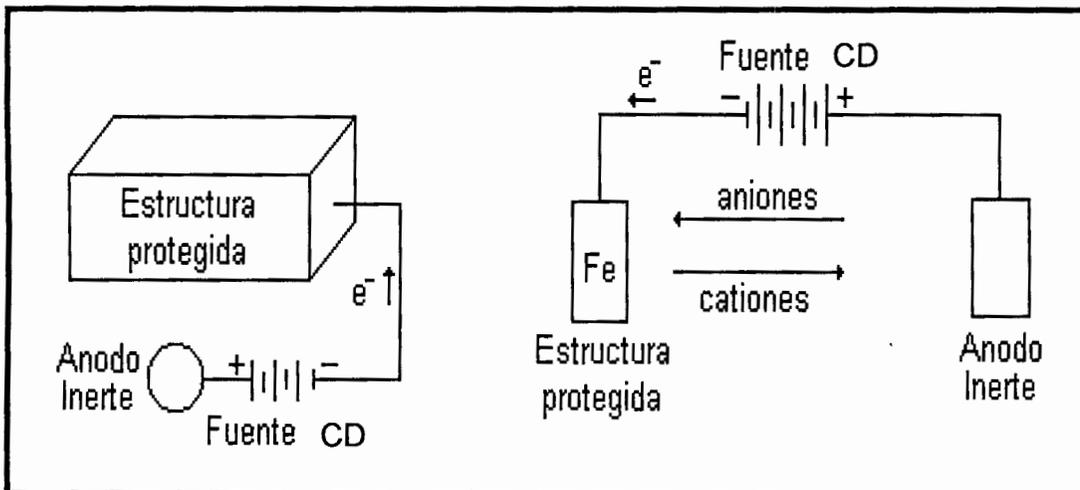


Figura 4 . Protección catódica por corriente impresa

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 polarización (ASM, 1998). 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, usando 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 lo 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:

- a) Bajo consumo
- b) Densidad de corriente drenada elevada
- c) Pequeñas dimensiones
- d) Baja resistividad
- e) Buena resistencia mecánica
- f) 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.

Los más utilizados de acuerdo a sus propiedades son los siguientes:

Chatarra de hierro: Por su economía es muy utilizado. Este tipo de ánodo puede ser aconsejable en terrenos de resistividad elevada y es recomendable que se rodee

de un relleno artificial constituido por carbón de coque. El consumo medio de estos lechos de dispersión de corriente es de 9 kg/A-año.

Ferrosilicio: Este ánodo es recomendable en terrenos de media y baja resistividad. Se coloca en el suelo hincado o tumbado rodeado de un relleno de carbón de coque. A intensidades de corriente bajas de 1 Amp, su vida es prácticamente ilimitada, siendo su capacidad máxima de drenaje de corriente de unos 12 a 15 A por ánodo. Su consumo oscila a intensidades de corriente altas, entre 0,1 a 0,3 kg/A-año. Su dimensión más usual es la correspondiente a 1500 mm de longitud y 75 mm de diámetro.

Grafito: Puede utilizarse principalmente en terrenos de resistividad media y se utiliza con relleno de grafito o carbón de coque. Es frágil, por lo que su transporte y embalaje debe ser cuidadoso. Sus dimensiones son variables, su longitud oscila entre 1000-2000 mm y su diámetro entre 60-100 mm, son más ligeros que los de ferrosilicio. El drenaje máximo de corriente es de 3 a 4 A por ánodo y su desgaste oscila entre 0,5 y 1 kg/A-año.

Titanio-Platinado: Este material está especialmente indicado para instalaciones de agua de mar, aunque pueda perfectamente ser utilizado en agua dulce o incluso en suelos. Su característica más relevante es que a pequeños voltajes (12 V), se pueden obtener densidades de corriente elevadas, siendo su desgaste apenas perceptible. Sin embargo en agua de mar tiene limitaciones en la tensión a la que se puede aplicar, la cual nunca puede pasar de 12 V, ya que a tensiones más elevadas podrían ocasionar el despegue de la capa de óxido de titanio y, por lo tanto, el deterioro del ánodo. En aguas dulces que no tengan cloruros pueden actuar estos ánodos a tensiones de 40-50 V. El drenaje máximo de corriente puede ser de 3000 A/m² y su desgaste en las condiciones más adversas es de 0,01 g/A-año.

Tántalo platinado: Es semejante al titanio platinado teniendo la ventaja de que en agua de mar puede trabajar a tensiones altas (50-60 V) y la desventaja de que es más caro y de difícil adquisición.

Plomo-Plata: Esta constituido por 1% de plata y una pequeña cantidad de antimonio. El peróxido de plomo que se forma al actuar anódicamente posee propiedades mucho más elevadas en virtud de los elementos de aleación que se traducen en un mejor funcionamiento y duración del electrodo. Se utiliza más frecuentemente en agua de mar y se desgasta de 50-200 g/A-año. Estos ánodos en su forma geométrica deben evitar en lo posible las aristas.

Titanio-óxido de titanio y óxido de rutenio: Están constituidos por una combinación de óxidos de titanio y rutenio, que se adhieren al titanio, mientras se controla el proceso a alta temperatura (700° C), obteniéndose una estructura cristalina y dura con una superficie extremadamente rugosa, lo que aminora los problemas de resistencia y facilita el proceso electroquímico. Su máxima capacidad de corriente es de 1100 A/m² (Ávila y Genescá, 2003).

Fuentes de corriente

Los más utilizados son los rectificadores, los cuales permiten el paso de la corriente en un solo 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 C.D. (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 otras fuentes como:

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

II.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 cuál actuaría como ánodo. Se han utilizado ánodos de magnesio, aluminio, zinc y sus aleaciones, ya que estos tienen un potencial muy negativo que protege a la varilla de acero, tienen poca tendencia a la polarización y además presentan una corrosión uniforme (Ávila y Genescá, 2003).

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 Figura 5 muestra un sistema típico de protección catódica por ánodos de sacrificio.

La diferencia de potencial existente 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.

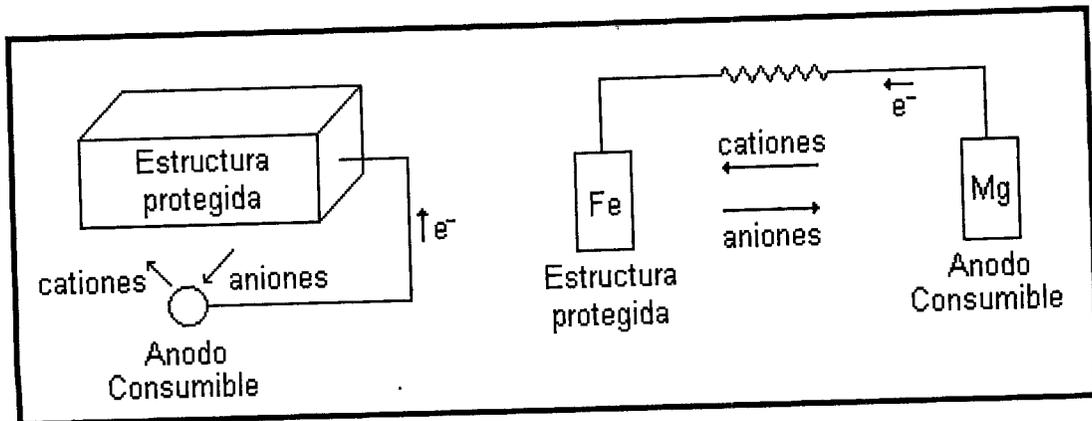


Figura 5. Protección catódica por ánodos de sacrificio

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 de 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 debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
3. El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresado en amperes-hora por kg de material (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 deberá poderse fundir en diferentes formas y tamaños.
6. Bajo costo.

Tipos de ánodos

Considerando que el flujo de corriente se origina de la diferencia de potencial existente 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. Están diseñados 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 suelo de baja resistividad hasta 3000 Ω -cm. No son recomendables estos ánodos 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 esta justificada por que 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 utilización es la resistividad del medio agresivo, por lo que se recomienda usar 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 1000 Ω -cm.

Aluminio: El aluminio a pesar de ser por sus características electroquímicas, el material idóneo para ser utilizado 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 lo tanto al sacrificio. Tiene una capacidad elevada de corriente, por lo que un solo 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 empleo se han hecho múltiples aleaciones que limiten 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 esta 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 a 250 Ω -cm.

En el cuadro 2 se muestran las características de los ánodos enterrados con relleno Backfill, este promueve una mejor eficiencia ya que promueve un desgaste homogéneo, mejorando así el rendimiento del ánodo.

Cuadro 2. Características de los ánodos galvánicos

Ánodo	Eficiencia (%)	Rendimiento A-hr/kg	Contenido de energía A-hr/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 el cuadro 3 se muestran las ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica.

Cuadro 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 5000 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

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 ó 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 termorociado 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.

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, por lo que proporcionan 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 recubierto 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 marinos (Ditescor, 2000).

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 (Castro y Moreno, 2003).

Ánodos de sacrificio internos

Actualmente se estudian los ánodos de sacrificio que son embebidos en el interior del concreto, este sistema es aplicado en la reparación con parches protectores y para protección de los alrededores de concreto contaminado con cloruros (Whitmore y Abbott, 2003).

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 sacrificialmente y de esta manera reducirán la potencialidad para una nueva corrosión sobre el acero de refuerzo y al mismo tiempo mitigarán 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. Estos ánodos están constituidos por un núcleo de zinc rodeado por una matriz activa de componentes cementicios, sus dimensiones más comunes son 63 mm (2 ½") diámetro x 28 mm (1 1/8") de alto, el ánodo galvánico es rápidamente y fácilmente asegurado con el acero de refuerzo (Figura 6).

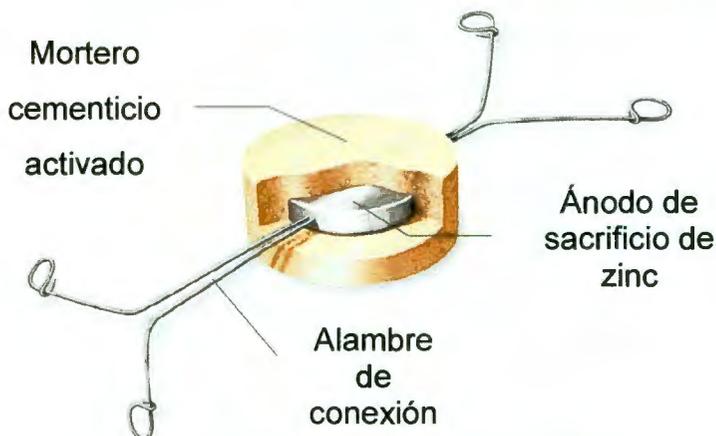


Figura 6. Ánodo de sacrificio interno

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 debido a su alta higroscopicidad (Vaysburd, 2001).

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 solo son adecuados para estructuras pequeñas, ya que para grandes estructuras el costo sería elevado (Wittmore, 2005).

II.3 MÉTODOS DE MONITOREO

Actualmente se emplean diversas técnicas electroquímicas para evaluar los ánodos embebidos internamente, algunas de ellas tienen ventajas y limitaciones sobre otras (González y col., 2005), 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 protegida (Andrade y col., 2004 ; Bosch, 2005).

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

- Un voltaje de $-0,85$ V respecto al electrodo de Cu/CuSO_4 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, (Durar, 2002).

II.3.1 Decaimiento de depolarización

Esta es una técnica electroquímica que establece la NACE para evaluar cuando una estructura esta protegida catódicamente.

A una estructura, a la cual se le esta 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 4 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.

II.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 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 $h/\emptyset < 1$.

Equipos y materiales

Prensa para ensayo de compresión axial que cumpla con los requisitos de la norma ASTM E-4-01.

La muestra de concreto debe haber sido sometida a los mismos procedimientos de manufactura, curado y fraguado de la estructura de concreto. Esta prueba se realiza de acuerdo a la norma ASM/C39/C39M-01. El valor de la resistencia mecánica, por si solo, 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.

II.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 el uso de electrodos de referencia.

Materiales y equipos

Brocha, cepillo, lima y otras herramientas para limpieza manual/mecánica de la superficie.

Cable y conectores

Esponja húmeda

Electrodo de referencia apropiado (Cu/CuSO₄)

Voltímetro de alta impedancia

Procedimiento:

Esta medición se realiza de acuerdo a la norma ASTM C876-91.

Conectar el electrodo de referencia a la terminal negativa (-) del voltímetro.

Conectar el acero de refuerzo (cátodo) a la terminal positiva (+) del voltímetro.

Colocar la esponja húmeda sobre el punto a monitorear.

Colocar el electrodo sobre la esponja. La pantalla del multímetro debe mostrar un valor estable de voltaje. Registrar este valor de potencial.

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 el Cuadro 4 se muestran los criterios para evaluar el potencial.

Cuadro 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

II.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/cm² -día, aunque la forma usual de definirla a partir de medidas de tipo electroquímico es en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ o, transformando este dato a partir de la densidad del metal, en unidades de velocidad (mm/año).

Equipos y materiales

Potenciostato/galvanostato capaz de medir la Resistencia a la Polarización (R_p), que se relaciona con la i_{corr} a través de la fórmula de Stern y Geary (Ecuación 11).

Procedimiento: En las áreas de medida seleccionadas, se realiza una perforación sobre la superficie del concreto para hacer contacto con la varilla y se sitúa el sensor sobre la superficie del concreto a través de una esponja u otro medio que asegure un buen contacto.

Debido a la variabilidad de las medidas de corrosión, se debe adoptar criterios estadísticos de muestreo para tener un valor medio o, al menos detectar las zonas de mayor corrosión.

Los criterios de muestreo se adoptan de forma similar a otros tipos de ensayo, después de haber efectuado el levantamiento de daños de la estructura y la localización correspondiente de la varilla. Como además la i_{corr} varía con el grado de humedad del concreto y la temperatura, es conveniente realizar al menos tres medidas a lo largo de un año, con el fin de caracterizar la influencia de las distintas variaciones estacionales. A efectos de predicción se utilizará el valor medio de los datos obtenidos, a no ser que se tengan datos suficientes para efectuar la simple integración a lo largo del tiempo. Los criterios de evaluación se presentan en el Cuadro 5.

Criterios de evaluación

Cuadro 5. Criterios de evaluación para la velocidad de corrosión en términos de la vida útil de una estructura de concreto.

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

II.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.

Materiales y equipos

Medidor de resistividad eléctrica (Resistómetro)

Una vez que se tengan las estructuras a ser medidas, se miden sus dimensiones (área A, diámetro de la varilla \varnothing , longitud L) y se efectúa el montaje del ensayo, se registran los resultados obtenidos.

De esta manera la resistividad eléctrica esta dada por la ecuación 22

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad (22)$$

Donde A, es el área transversal del espécimen y L es la longitud del espécimen y R_e es el valor de resistencia que muestra el equipo en ohms.

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 puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general los parámetros que se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Criterios de evaluación para la resistividad eléctrica

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

II.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.

Equipo

Amperímetro de resistencia cero

Cables de conexión

Procedimiento

Conectar los cables de prueba al amperímetro y fijar la escala para leer miliamperios.

Conectar el otro lado de los cables de prueba a dos puntos de contacto del interruptor de circuito. Si no existiese un aparato de interrupción, use el empalme de conexión a la estructura para interrumpir el sistema.

Interrumpa el circuito usando el aparato de interrupción o desconectando los cables de conexión. En este momento, la corriente debe fluir a través del amperímetro.

El valor indicado en el amperímetro es el valor de la corriente del sistema.

III. HIPÓTESIS

Los ánodos de sacrificio discretos ejercen protección catódica sobre el acero de refuerzo en el concreto, en cualquier ambiente, hasta 60 centímetros de distancia.

IV. OBJETIVOS

IV.1 General

Demostrar que los ánodos discretos protegen las estructuras de concreto reforzado.

IV.2 Específico

Comparar la eficiencia de la protección catódica mediante ánodos discretos en ambientes con y sin cloruros.

V. METODOLOGÍA

V.1. Materiales

Cemento Pórtland

Agregados gruesos y finos (grava y arena)

Cloruro de sodio (NaCl)

Agua

Varillas de acero A706 de 9,5 mm de diámetro

Moldes de madera para colar las probetas

Revolvedora eléctrica

Tubos de acrílico

Cable de cobre

Epóxico

Cámaras de humedad relativa controlada

Galvanostato/Potenciostato Gamry

Multímetro

Máquina Servohidráulica Universal INSTRON

Electrodos de Referencia (Cu/CuSO₄, Ti/TiO₂)

Resistómetro Nilsson

V.2. Métodos

Se realizó la caracterización de los materiales para realizar la mezcla de concreto. Esta se hizo de acuerdo con normas internacionales a nivel laboratorio (que se encuentran en la bibliografía) 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 al 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 a la norma ASTM C 876 – 91. 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 cuál se está llevando a cabo la corrosión, ya que esta representa la facilidad o dificultad que tendrán los iones para moverse a lo largo de la viga de concreto.

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

V.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 Especifica
- Absorción
- 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 Figura 7.



Figura 7. Probetas durante el proceso de colado.

El diseño de las vigas se muestra en la Figura 8 y en la Figura 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 .

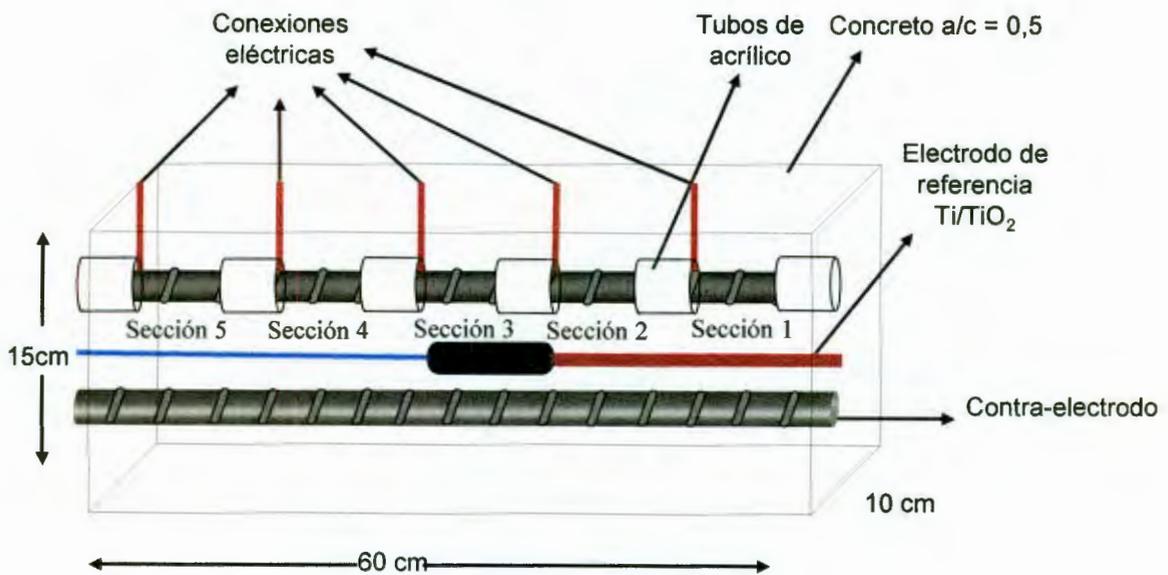


Figura 8. Diseño de las probetas



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 (Figura 10).



Figura 10. Realización de pruebas electroquímicas.

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 Figura 11.

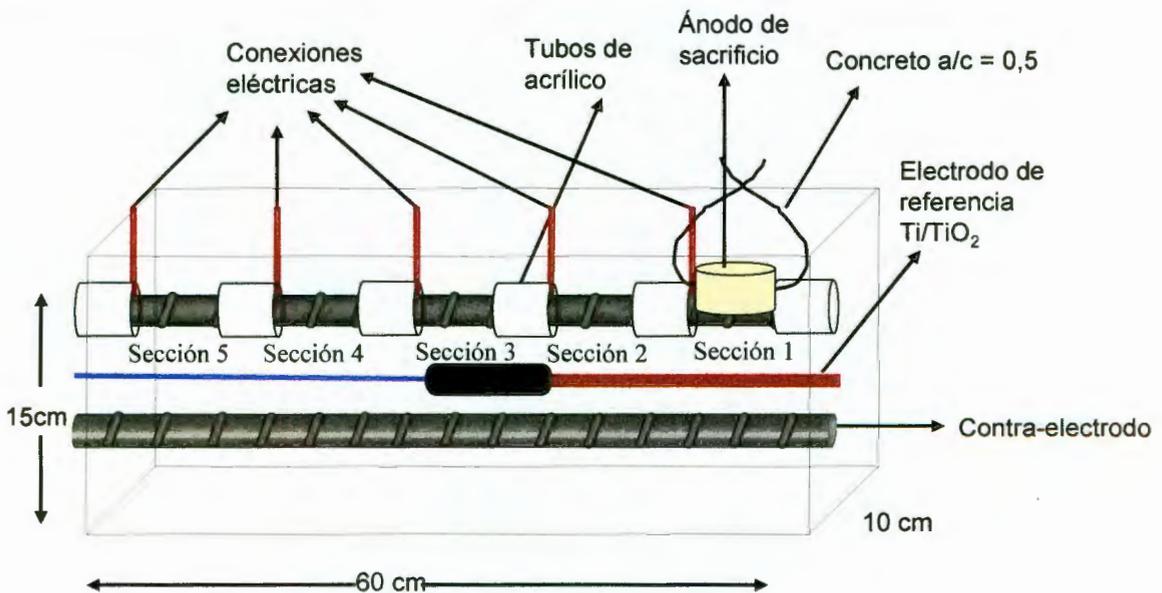


Figura 11. Diseño de la reparación

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 realizaron conexiones eléctricas para hacer 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 realizó la conexión del electrodo de referencia de Ti/TiO_2 y el contra/electrodo hacia el exterior. Se realizó el monitoreo electroquímico de las probetas con las mediciones siguientes:

- Potenciales de media celda
- Corriente Catódica
- Decaimiento de Polarización
- Resistividades
- Resistencia a la polarización (R_p).

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/TiO_2 y contra un electrodo externo de Cu/CuSO_4 . La Figura 12 muestra la cámara de humedad en la que las probetas fueron mantenidas a humedad controlada.

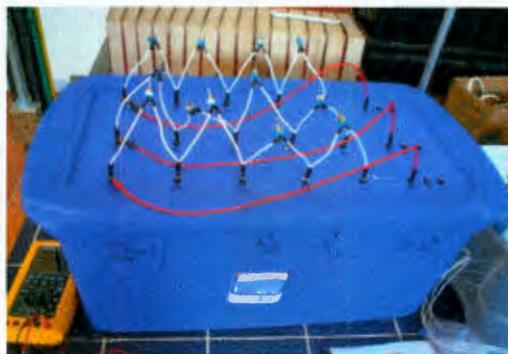


Figura 12. Cámara de humedad de las probetas

Para la cuantificación de corriente catódica, se midió y registró diariamente para 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 periódicamente, cada 50 días a cada sección de la varilla para comprobar la eficiencia de la protección catódica, Figura 13.

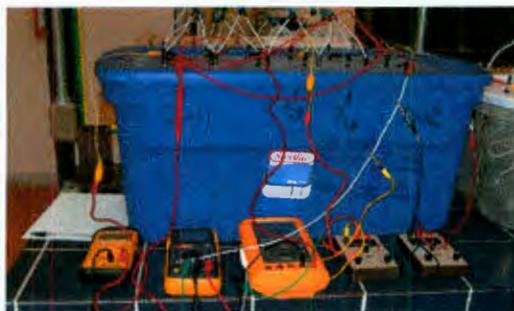


Figura 13. Prueba de decaimiento de depolarización

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

Se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión a los cilindros de concreto 90 días después de haber sido fabricados, estos se realizaron en la máquina INSTRON. Este ensayo se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Ensayo de resistencia a la compresión.

Estos 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.

VI. RESULTADOS

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

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.

En el Cuadro 7 muestra los resultados obtenidos de resistencia a la compresión en los cilindros de concreto diseñados para esta prueba.

En el punto VI.2 se muestran las gráficas de potencial de media celda vs tiempo, en las cuales se muestran 3 etapas A, B y C, la etapa A muestra los potenciales antes de colocar el ánodo de sacrificio, la etapa B es la etapa de reparación y colocación del ánodo de sacrificio dentro del concreto y la etapa 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 muestran las gráficas de corriente catódica vs tiempo se muestran las 5 secciones en una sola gráfica 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 se muestran los resultados de las curvas de polarización de las 6 probetas, a lo largo del tiempo, para corroborar de acuerdo a 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 6 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 y los resultados del análisis de estos productos se muestran en el punto VI.6.

VI.1 Propiedades mecánicas del concreto

La Figura 15 muestra los cilindros después de haber sido sometidos al ensayo de resistencia a la compresión.

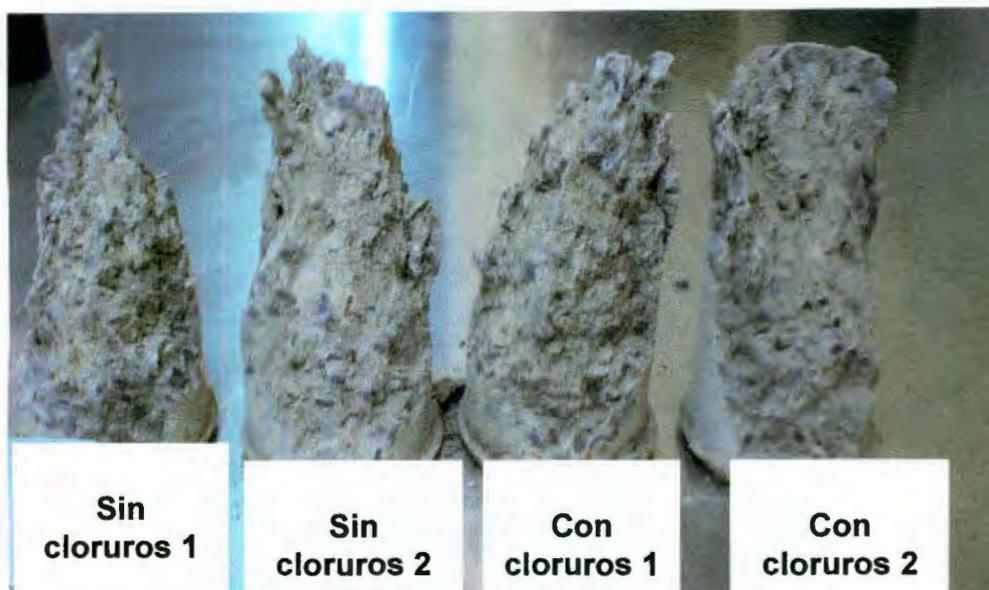


Figura 15. Cilindros después de la prueba de resistencia a la compresión.

Esta prueba fue realizada 90 días después de haber sido fabricadas las probetas, cuando el concreto ya ha alcanzado su máxima resistencia. Los valores obtenidos se muestran en el Cuadro 7:

Cuadro 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 ultima ejercida por la maquina dividida entre el área del cilindro, de acuerdo a la norma ASTM-C119. El área del cilindro fue de 78,54cm². De acuerdo a 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.

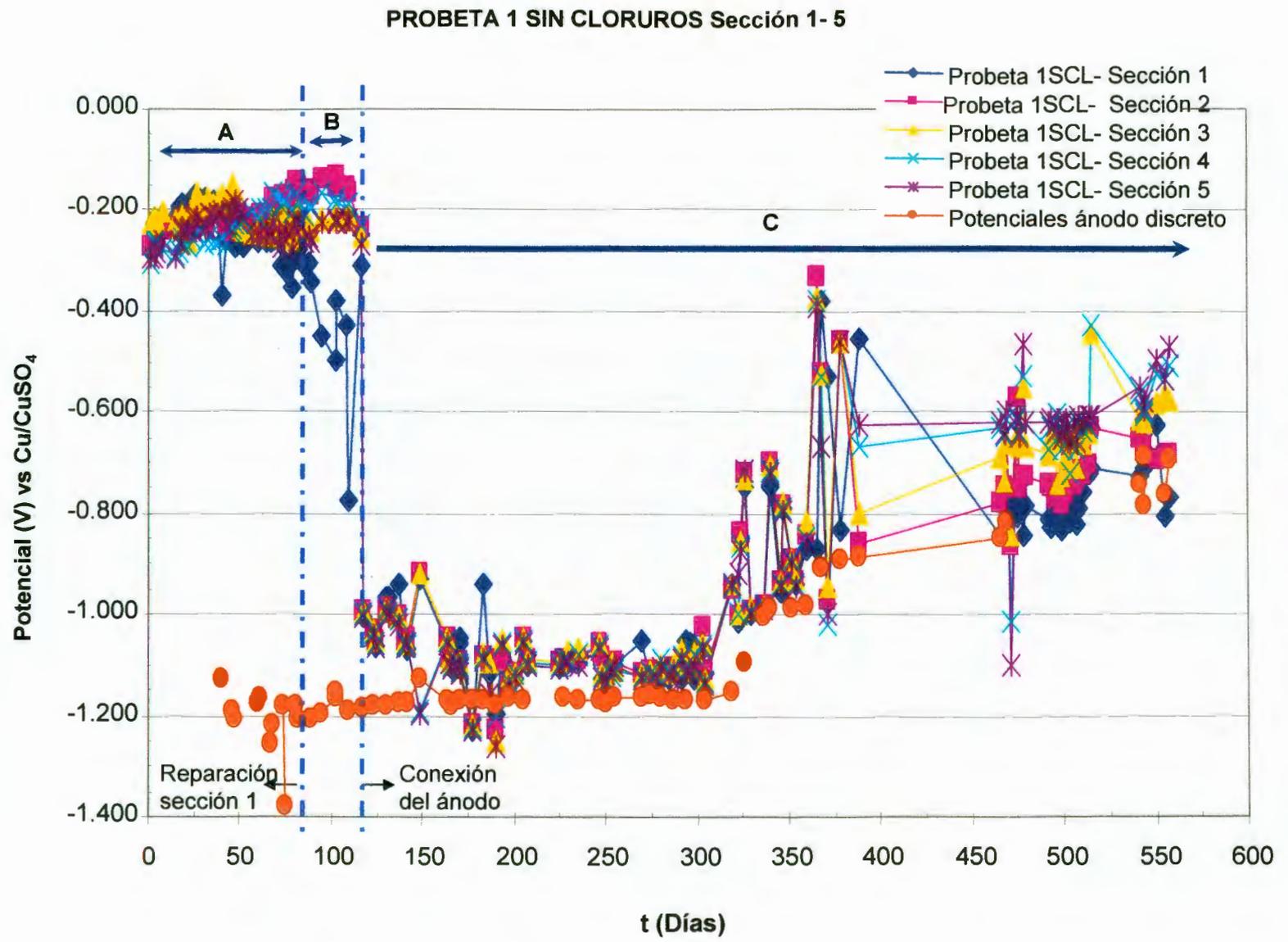


Figura 16. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 1SCL.

Figura 17. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 2SCL.

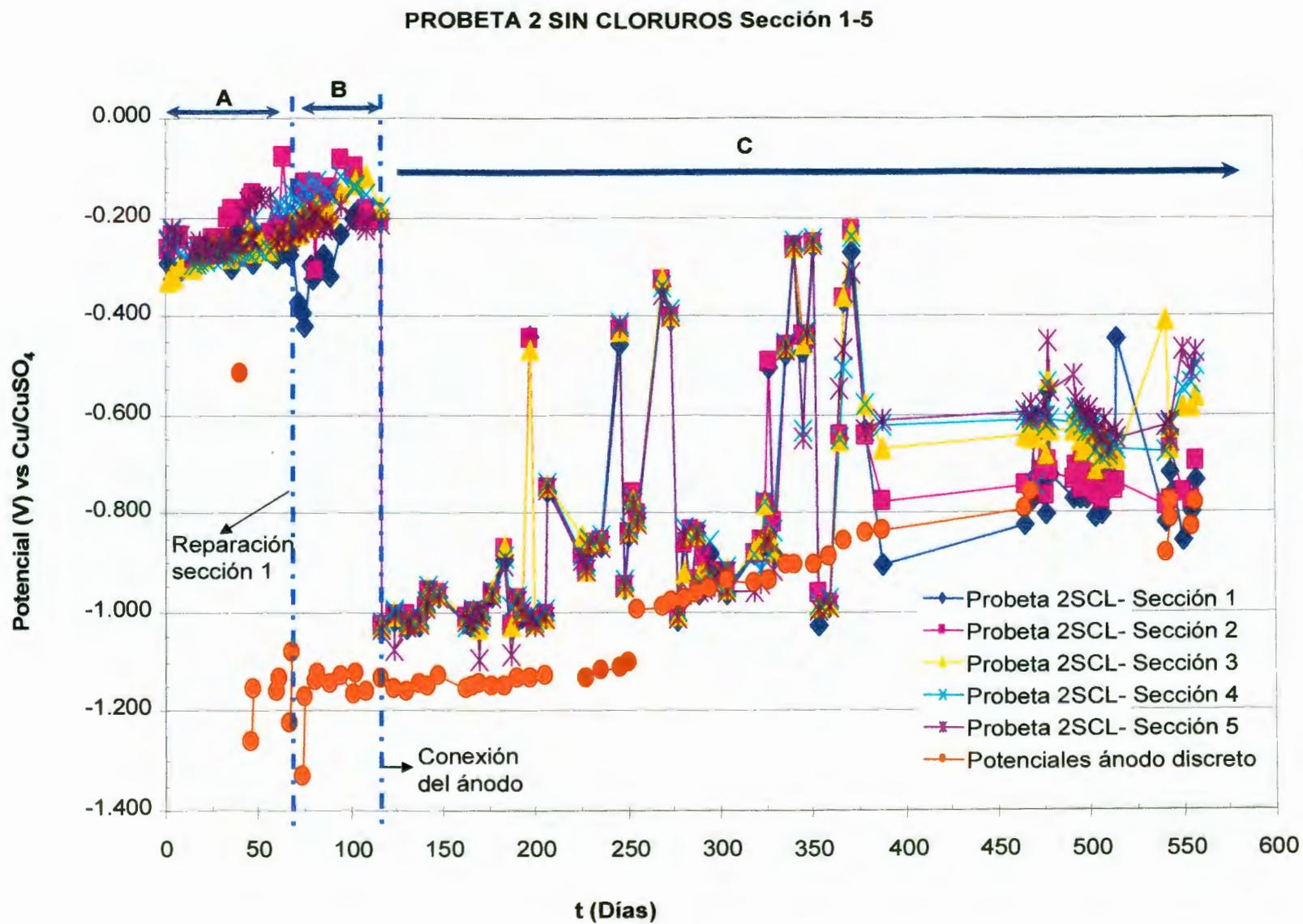


Figura 18. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 3SCL.

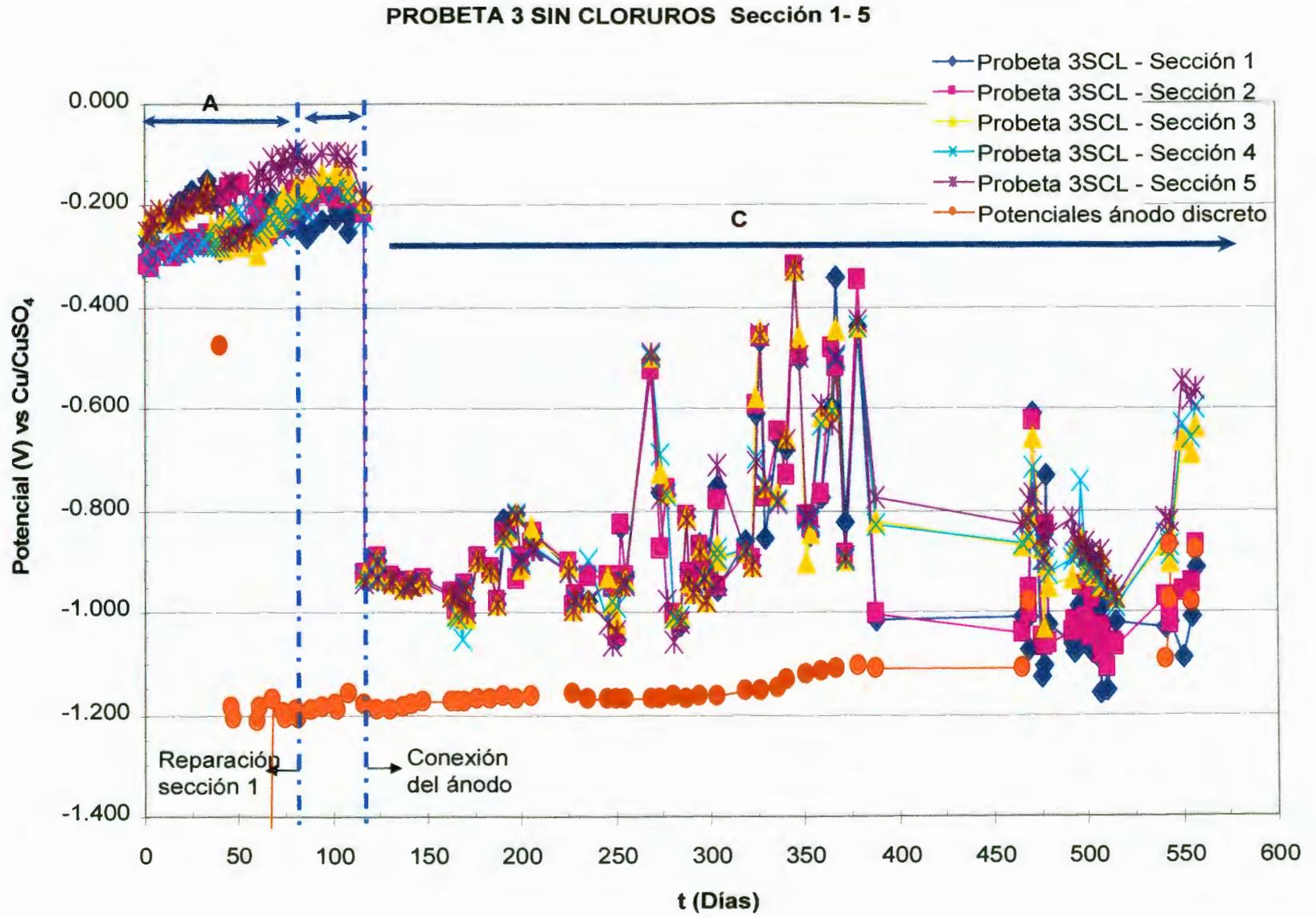
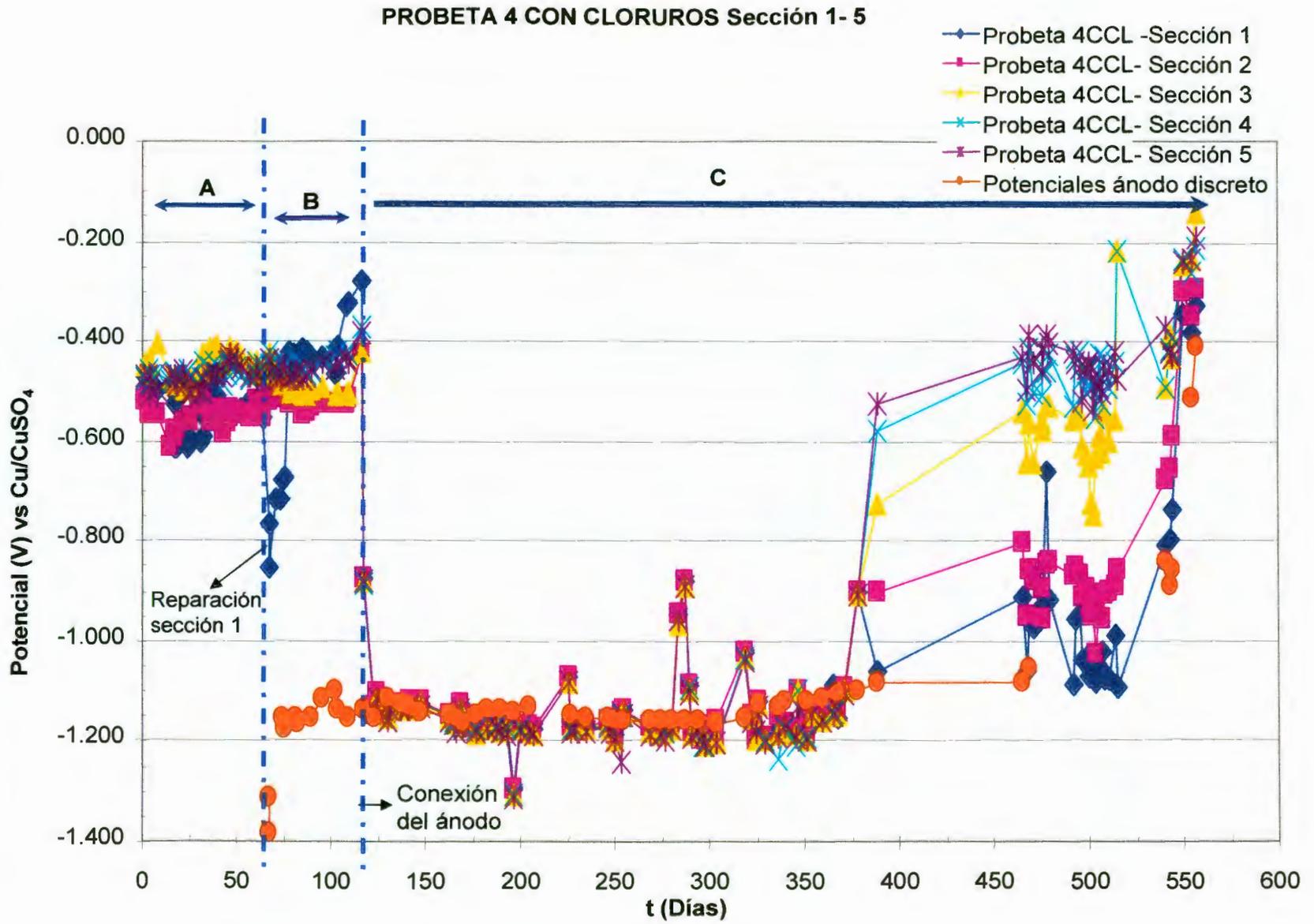


Figura 19. Gráfica de potencial de media celda vs tiempo para la probeta 4CCL.



PROBETA 5 CON CLORUROS Sección 1- 5

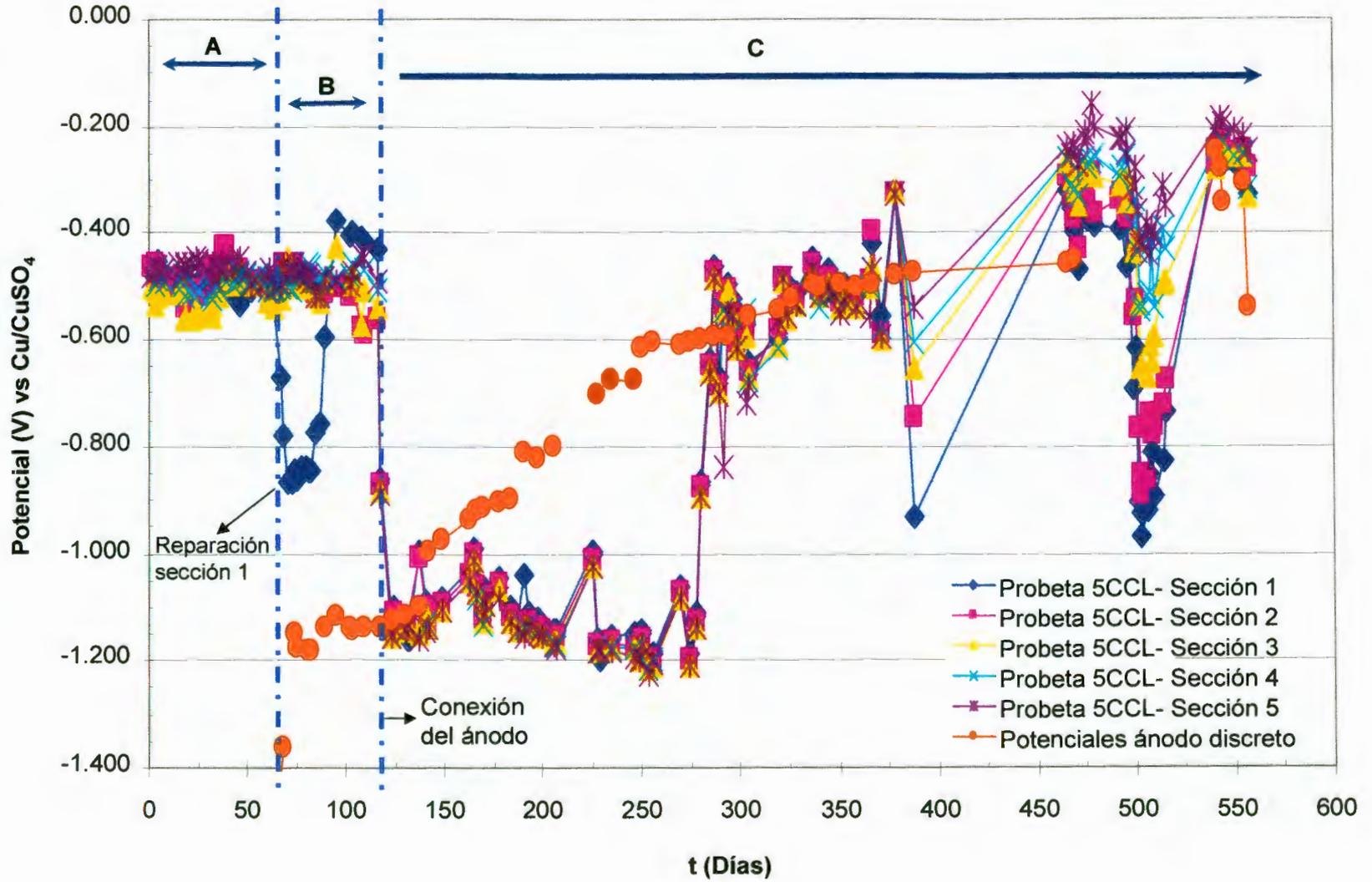


Figura 20. Gráfica potencial de media celda vs tiempo para la probeta 5CCL.

PROBETA 6 CON CLORUROS Sección 1- 5

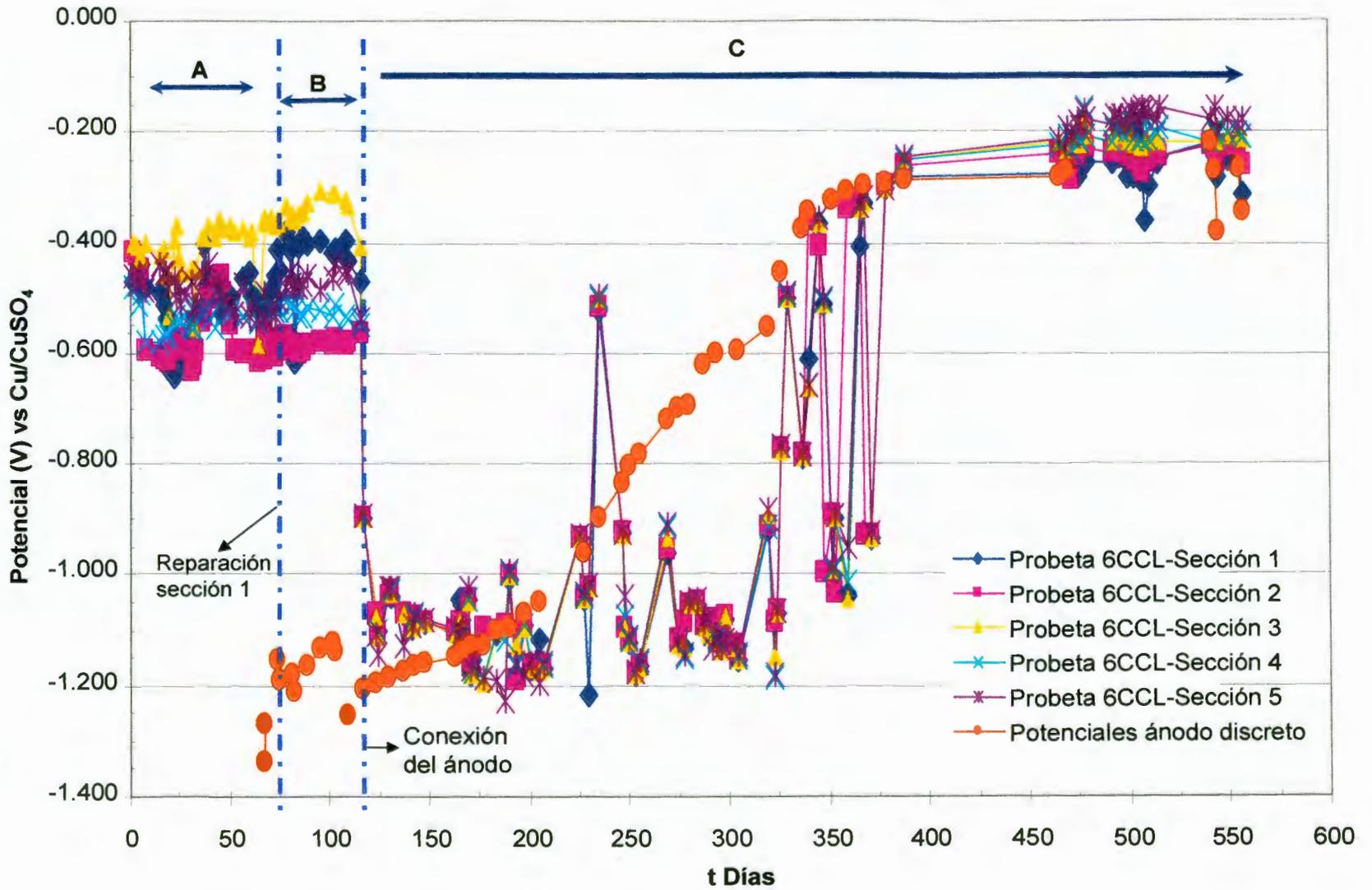


Figura 21. Gráfica potencial de media celda vs tiempo para la probeta 6CCL.

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, como se muestra en los cuadros 8 y 9.

Cuadro 8. Potenciales promedio probetas sin cloruros

PROBETA 1		PROBETA 2		PROBETA 3	
<i>Sección</i>	<i>Potencial vs CuSO₄</i>	<i>Sección</i>	<i>Potencial vs CuSO₄</i>	<i>Sección</i>	<i>Potencial vs CuSO₄</i>
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

Cuadro 9. Potenciales promedio probetas con cloruros

PROBETA 1		PROBETA 2		PROBETA 3	
<i>Sección</i>	<i>Potencial vs CuSO₄</i>	<i>Sección</i>	<i>Potencial vs CuSO₄</i>	<i>Sección</i>	<i>Potencial vs CuSO₄</i>
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

VI.3 Resultados de la medición de corriente catódica

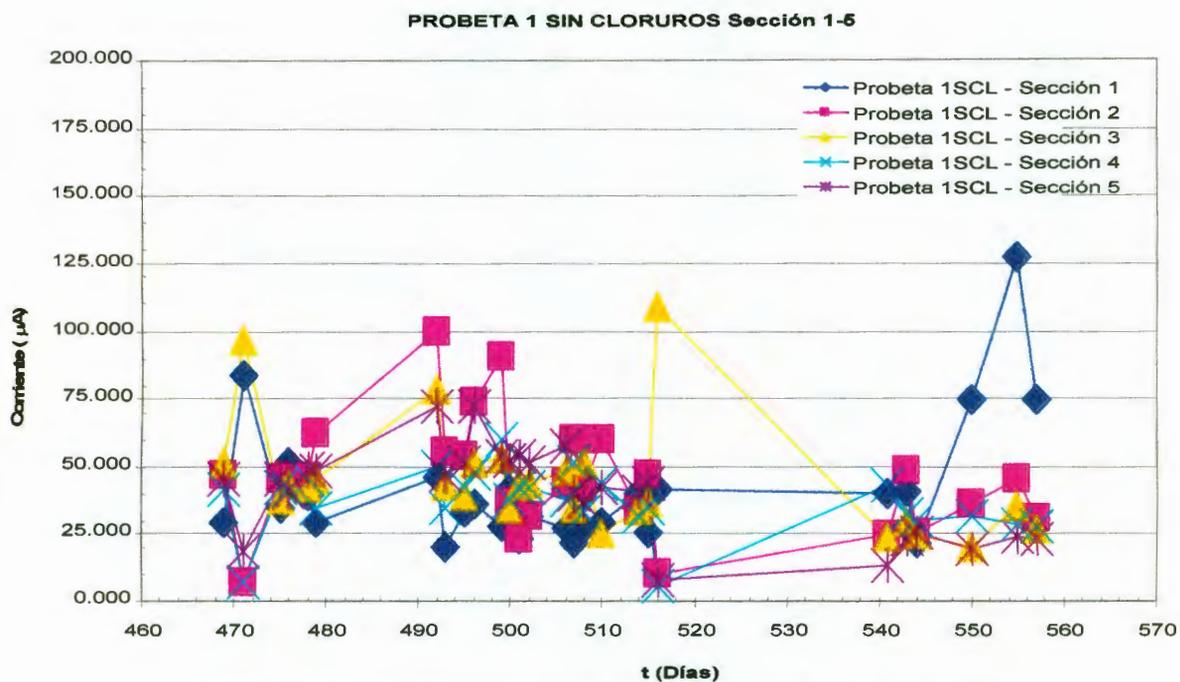


Figura 22. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 1SCL.

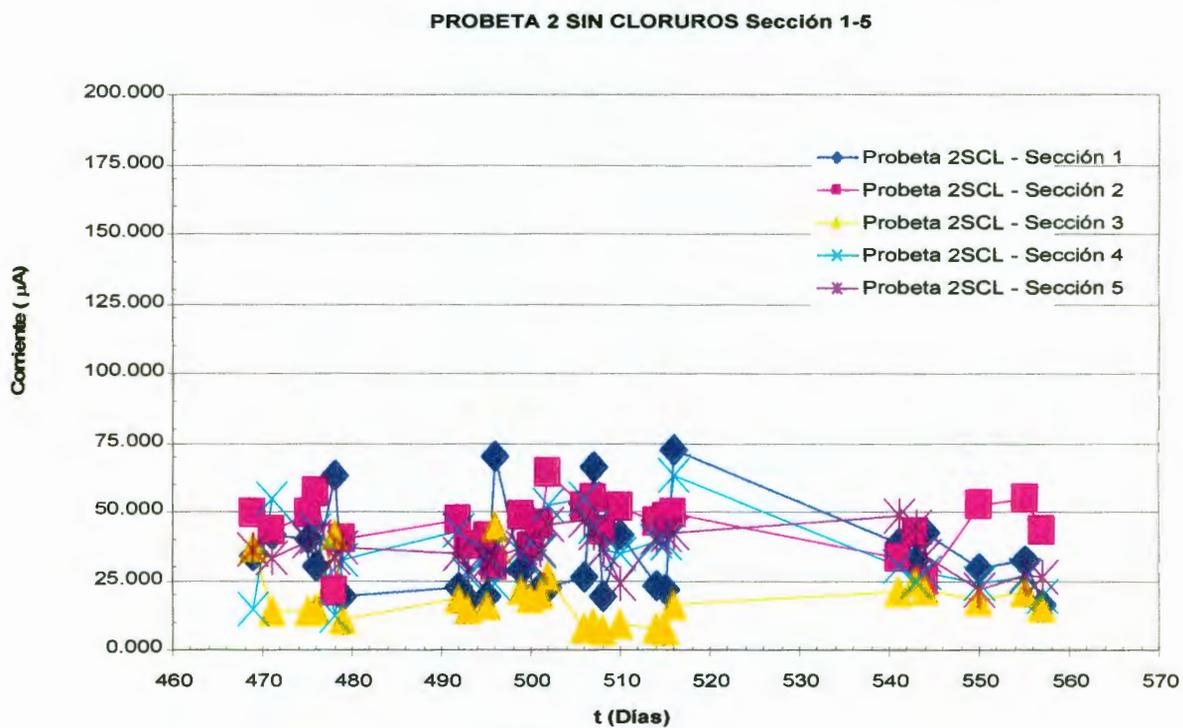


Figura 23. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 2SCL.

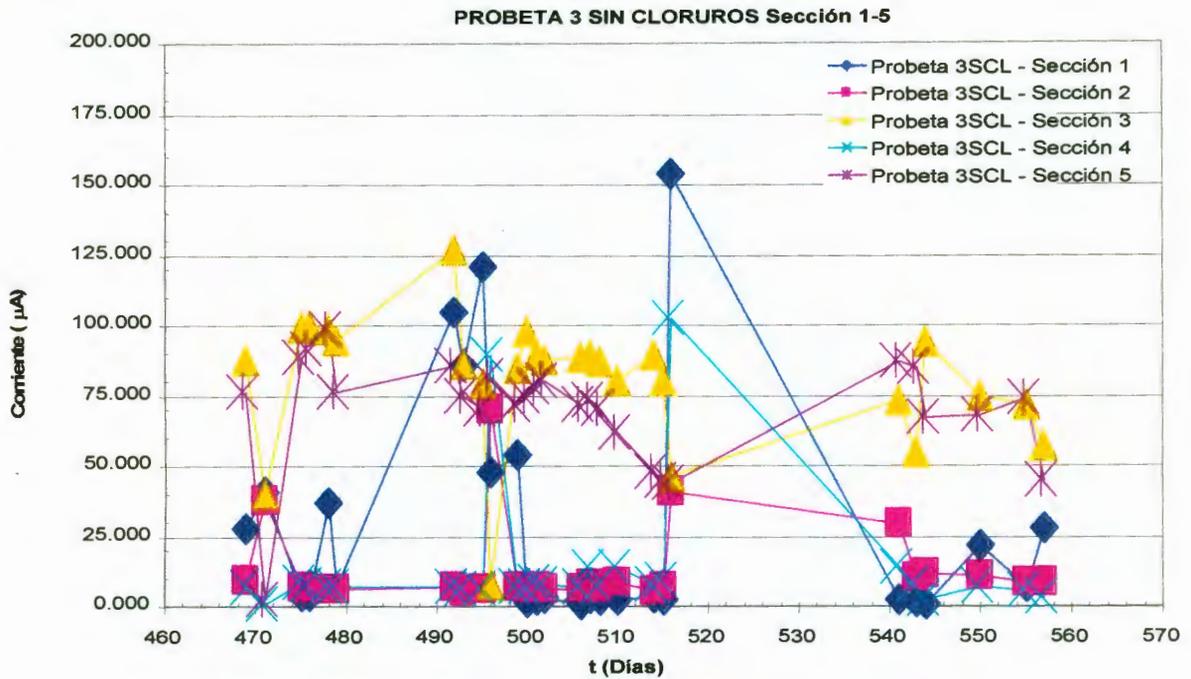


Figura 24. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 3SCL.

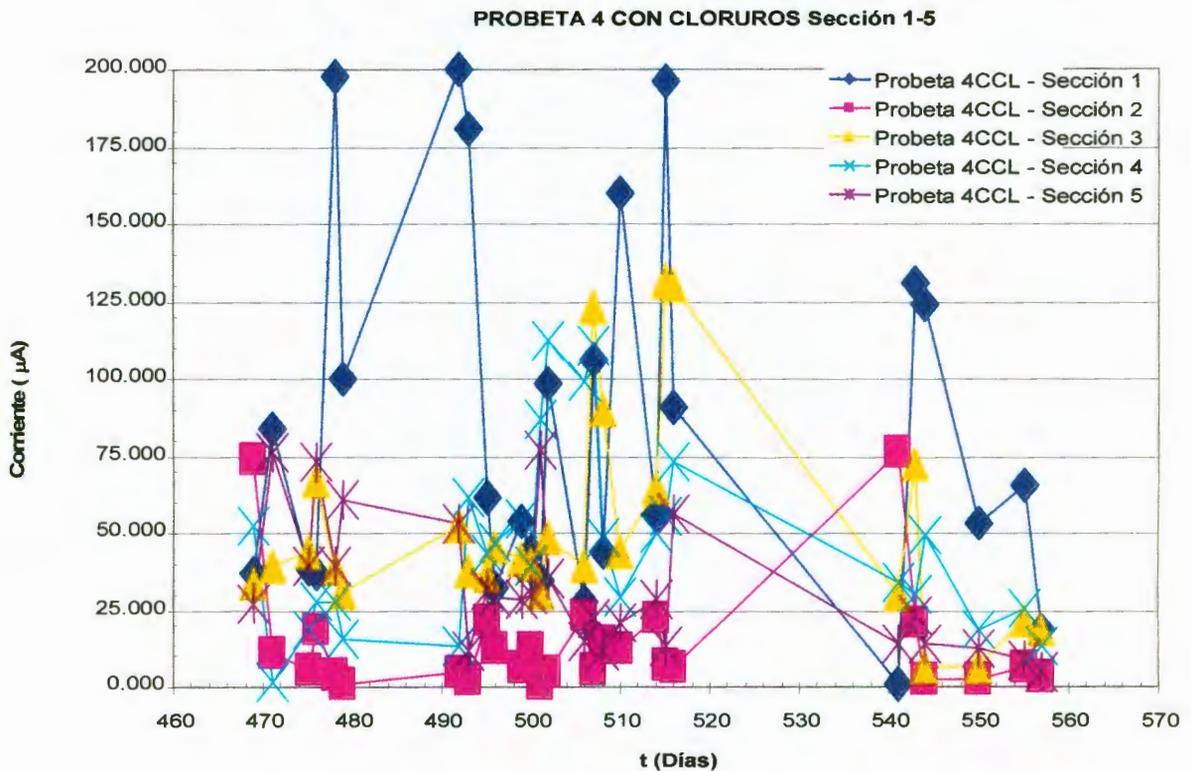


Figura 25. Gráfica potencial vs tiempo para la probeta 4CCL.

PROBETA 5 CON CLORUROS Sección 1-5

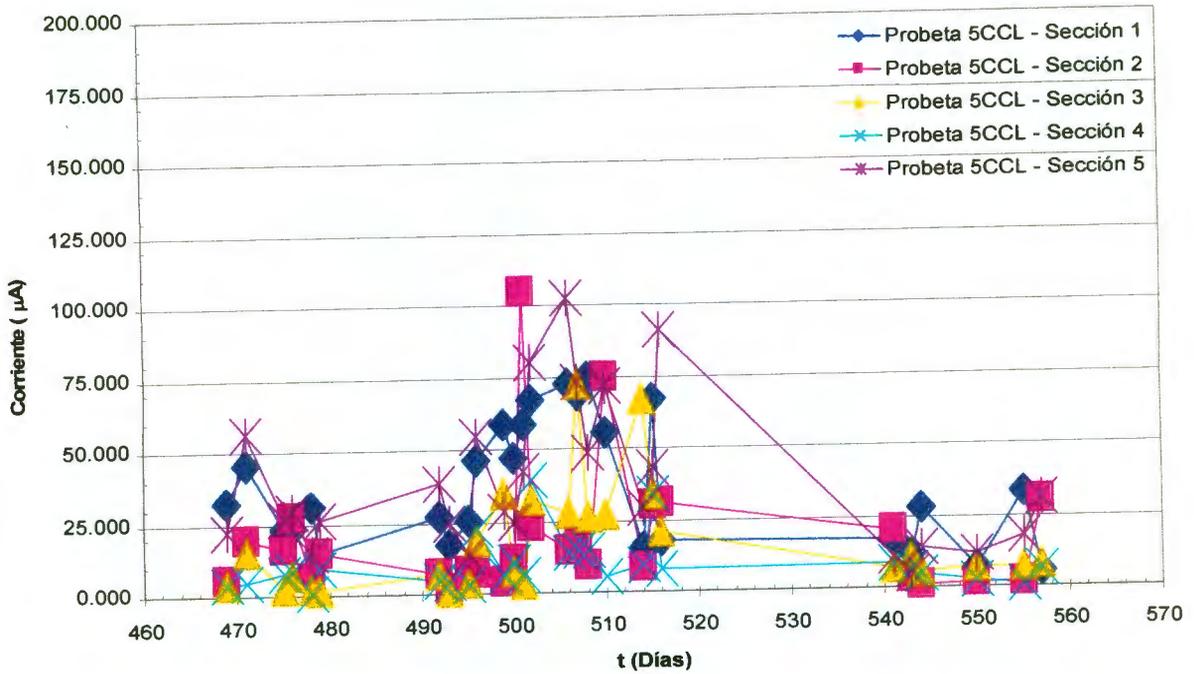


Figura 26. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 5CCL.

PROBETA 6 CON CLORUROS Sección 1-5

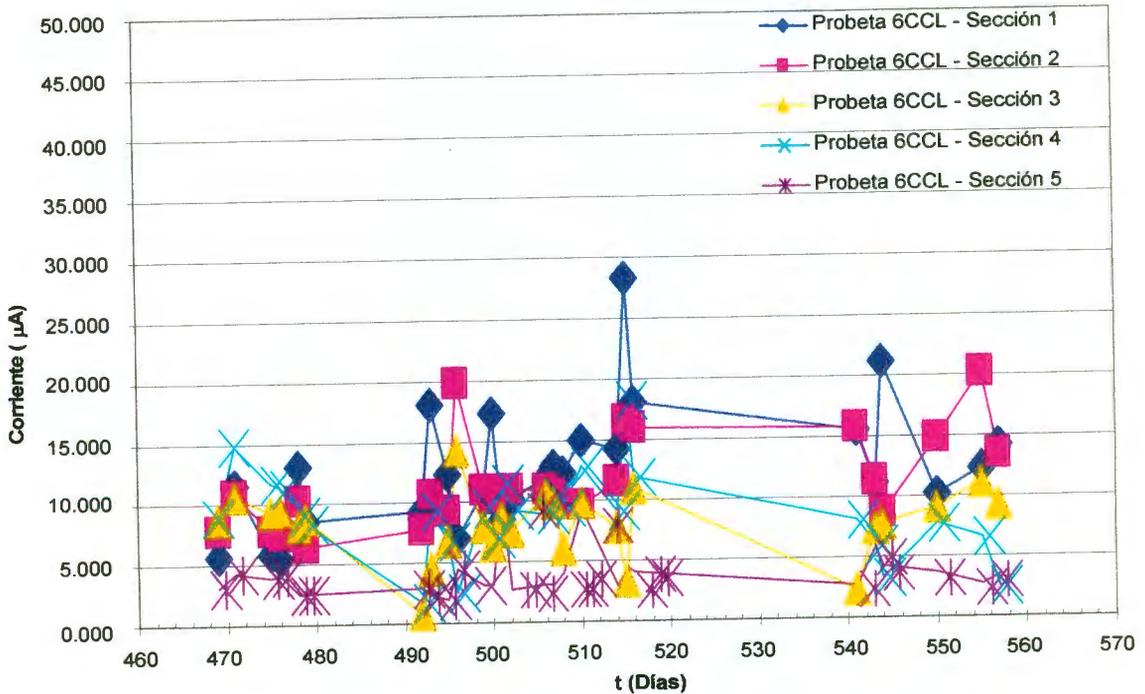


Figura 27. Gráfica corriente vs tiempo para la probeta 6CCL.

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, según cuadros 10 y 11.

Cuadro 10. Promedios corriente probetas sin cloruros

PROBETA 1		PROBETA 2		PROBETA 3	
<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>	<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>	<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>
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

Cuadro 11. Promedios corriente probetas con cloruros

PROBETA 1		PROBETA 2		PROBETA 3	
<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>	<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>	<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>
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

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, según cuadros 10 y 11.

Cuadro 10. Promedios corriente probetas sin cloruros

PROBETA 1		PROBETA 2		PROBETA 3	
<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>	<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>	<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>
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

Cuadro 11. Promedios corriente probetas con cloruros

PROBETA 1		PROBETA 2		PROBETA 3	
<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>	<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>	<i>Sección</i>	<i>Corriente μA</i>
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

VI.4 Resultado de las pruebas de depolarización, de acuerdo a las fechas en que se realizaron.

Los cuadros del 12 al 17 de las pruebas de depolarización muestran diferentes valores, para calcular la diferencia de potencial y determinar si el ánodo esta protegiendo catódicamente a la varilla de refuerzo de acuerdo a la NACE.

Utilizando la siguiente nomenclatura:

E_{oc} , es la medición de potencial antes de ser conectado el sistema de protección catódica.

E_{on} , es el potencial medido antes de que el sistema de protección sea desconectado

$E_{instoff}$, es el potencial medido al momento de desconectar el sistema de protección catódica

E_{4hrs} , es el potencial medido después de las 4 horas de haber sido desconectado

ΔE_{4hrs} , es la diferencia de potencial entre el valor $E_{instoff}$ y E_{4hrs}

E_{24hrs} , el potencial medido después de 24 horas de haber sido desconectado

ΔE_{24hrs} , es la diferencia de potencial entre el valor $E_{instoff}$ y E_{24hrs}

VI.4 Resultado de las pruebas de depolarización, de acuerdo a las fechas en que se realizaron.

Los cuadros del 12 al 17 de las pruebas de depolarización muestran diferentes valores, para calcular la diferencia de potencial y determinar si el ánodo esta protegiendo catódicamente a la varilla de refuerzo de acuerdo a la NACE.

Utilizando la siguiente nomenclatura:

E_{oc} , es la medición de potencial antes de ser conectado el sistema de protección catódica.

E_{on} , es el potencial medido antes de que el sistema de protección sea desconectado

$E_{instoff}$, es el potencial medido al momento de desconectar el sistema de protección catódica

E_{4hrs} , es el potencial medido después de las 4 horas de haber sido desconectado

ΔE_{4hrs} , es la diferencia de potencial entre el valor $E_{instoff}$ y E_{4hrs}

E_{24hrs} , el potencial medido después de 24 horas de haber sido desconectado

ΔE_{24hrs} , es la diferencia de potencial entre el valor $E_{instoff}$ y E_{24hrs}

Cuadro 12. Depolarización de las probetas sin cloruros del día 22 de Febrero 2005.

DEPOLARIZACION DE LAS PROBETAS SIN CLORUROS (Cu/CuSO₄) 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
E4hrs	-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 4hrs	-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
E24hrs	-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
ΔE24hrs	-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

Cuadro 13. Depolarización de las probetas con cloruros del día 22 de Febrero 2005

DEPOLARIZACION DE LAS PROBETAS CON CLORUROS (Cu/CuSO₄) 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
E4hrs	-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 4hrs	-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
E24hrs	-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
ΔE24hrs	-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

Cuadro 14. Depolarización de las probetas sin cloruros del día 12 de Abril 2005

DEPOLARIZACION DE LAS PROBETAS SIN CLORUROS (Cu/CuSO₄) 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
E4hrs	-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 4hrs	-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
E24hrs	-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
ΔE24hrs	-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

Cuadro 15. Depolarización de las probetas con cloruros del día 12 de Abril 2005

DEPOLARIZACION DE LAS PROBETAS CON CLORUROS (Cu/CuSO₄) 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
E4hrs	-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 4hrs	-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
E24hrs	-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
ΔE24hrs	-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

Cuadro 16. Depolarización de las probetas sin cloruros del día 02 de Junio 2005

DEPOLARIZACION DE LAS PROBETAS SIN CLORUROS (Cu/CuSO₄) 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
E4hrs	-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 4hrs	-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
E24hrs	-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
ΔE24hrs	-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

Cuadro 17. Depolarización de las probetas con cloruros del día 02 de Junio 2005

DEPOLARIZACION DE LAS PROBETAS CON CLORUROS (Cu/CuSO₄) 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
E4hrs	-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 4hrs	-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
E24hrs	-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
ΔE24hrs	-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

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

Estos resultados muestran los valores de Rp, medidos en ohms que representa la velocidad de corrosión de la varilla, I_{corr} es la densidad de corriente y E_{corr} es el potencial de la sección de la varilla en mV.

Cuadro 18. Resistencia a la polarización de las probetas sin cloruros del día 23 de Febrero 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DIA 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

Cuadro 19. Resistencia a la polarización de las probetas con cloruros del día 23 de Febrero 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DIA 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))	191,4	183,7	178,6	179,7	178,4	228,7	223,3	221,2	236,6	233,9	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

Cuadro 20. Resistencia a la polarización de las probetas sin cloruros del día 14 de Abril 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DIA 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

Cuadro 21. Resistencia a la polarización de las probetas con cloruros del día 14 de Abril 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DIA 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

Cuadro 22. Resistencia a la polarización de las probetas sin cloruros del día 03 de Junio 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DIA 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

Cuadro 23. Resistencia a la polarización de las probetas con cloruros del día 03 de Junio 2005

RESULTADOS DE Rp DEL DIA 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

VI.6 DIFRACCION 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, como se observa en la Figura 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 de los productos de corrosión, el resultado se muestra en la Figura 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 que son generados por la humedad y que se expandieron hacia el exterior, sobre los poros del concreto.

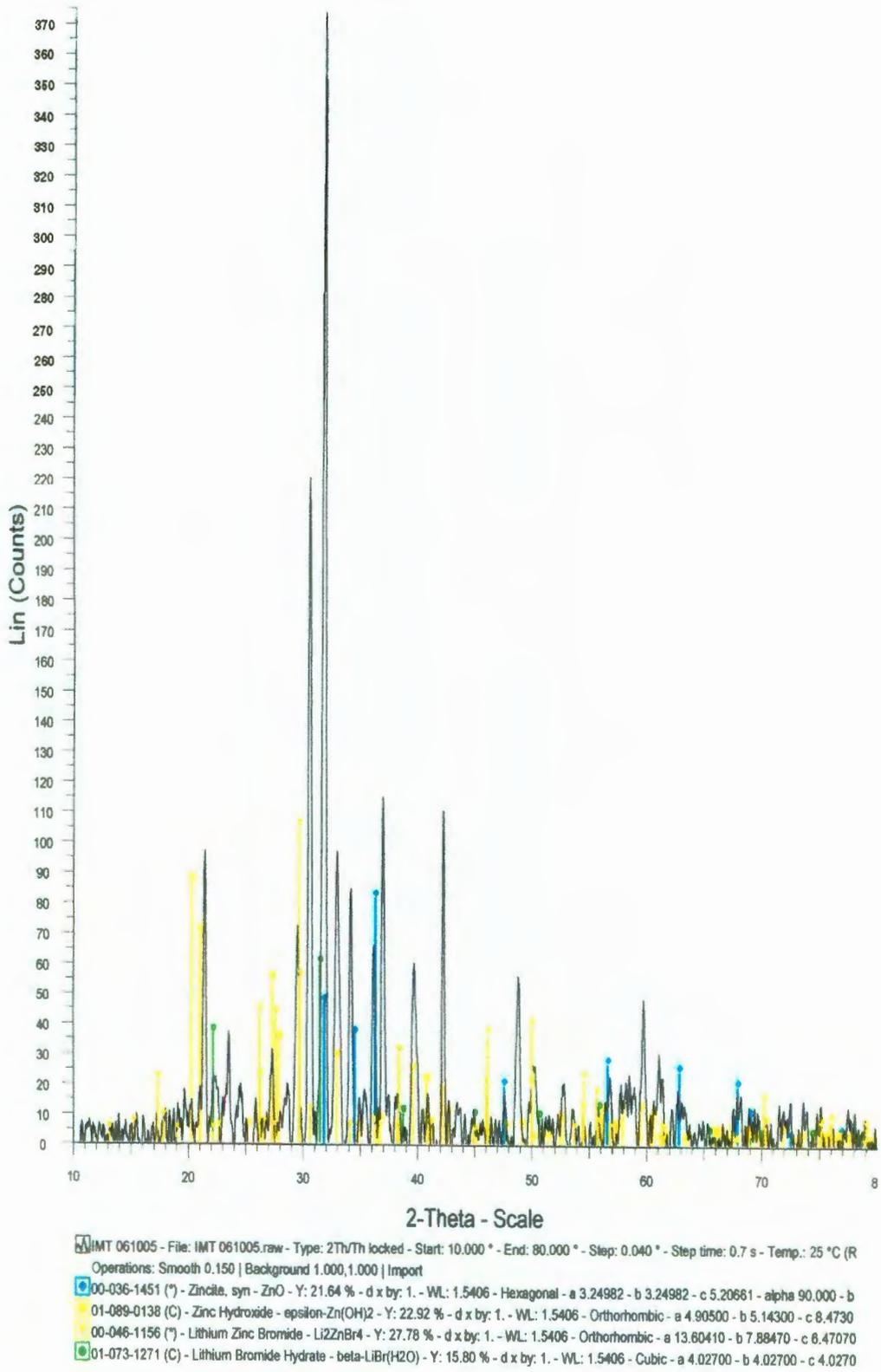


Figura 29. Resultados del análisis de difracción de R-X

VII. DISCUSION

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

VII.1 Concreto

La evaluación de las propiedades mecánicas del concreto se realizó, con la prueba de resistencia a la compresión, la cual mostró que el concreto en el cual 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 obtenidos como se estableció en el cuadro 7 muestran que las probetas con cloruros tienen una más alta resistencia que las probetas sin cloruros, esto debido a que los cloruros absorben más humedad durante el curado y por lo tanto aumenta su resistencia.

VII.2 Potenciales de media celda

La medición de potenciales es utilizada para todos los sistemas donde se evalúa la protección catódica, NACE establece que con un potencial de -850 mV vs el electrodo de Cu/CuSO_4 (ECS), el ánodo de sacrificio ejerce protección catódica sobre el sistema. En este trabajo se analizaron las 3 etapas, que se citan a continuación.

VII.2.1 Etapa "A" Antes de colocar el ánodo

En esta etapa en las probetas sin cloruros, Figuras 16 a 18, se puede observar que los potenciales obtenidos son de alrededor de $-0,200$ V vs Cu/CuSO_4 , lo que nos 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 3 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 Figuras 19 a 21, se puede observar que los potenciales en la etapa "A", son de alrededor de $-0,500$ V vs Cu/CuSO_4 lo que indica que la varilla se esta

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 3 probetas.

VII.2.2 Etapa "B" Reparación y colocación del ánodo en el concreto.

En esta etapa se simuló la reparación del concreto, esto 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 colocar el ánodo de sacrificio sobre la sección 1 se comenzó a medir el potencial de dicho ánodo, esto se realizó a partir del día 40 para las probetas SCL y a partir 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 4 de las seis probetas. En la sección 1 de la probeta 1 SCL se registraron potenciales de hasta $-0,800\text{ V vs Cu/CuSO}_4$ y en las 4,5 CCL de hasta $-0,850\text{ V}$, esto fue causado por la diferencia de potencial que existe entre la varilla de refuerzo y el ánodo de sacrificio que como se puede observar en las figuras 16 a 21 el ánodo tiene un potencial de $-1,20\text{ V vs Cu/CuSO}_4$ que es el potencial del Zn. Todas 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 $-0,200\text{ V vs Cu/CuSO}_4$ hasta $-1,000\text{ V vs Cu/CuSO}_4$ para las probetas SCL y desde $-0,500\text{ V vs Cu/CuSO}_4$ hasta $-1,100\text{ V vs Cu/CuSO}_4$, en las probetas CCL, lo que nos indica que existe una pequeña sobre protección en todas las probetas de acuerdo a 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 obtenidos 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 mas positivos el ánodo también tendió hacia valores mas 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 mas positivo, aproximadamente 0, 150 V vs Cu/Cu SO₄ más positiva la sección 5 que la 1 en las probetas SCL y aproximadamente -0, 250 V vs Cu/CuSO₄ mas 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 5 secciones de varilla, en la cual los valores de la sección 5 son los mas positivos y va en descenso la protección, pues la sección 1 es la mas protegida y la 5 la que por el potencial medido ya se esta corroyendo. En el caso de la probeta 3SCL todas las secciones aun permanecen activas en toda la viga de concreto pues tuvieron un potencial de -0,800 V vs Cu/CuSO₄, 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 mas 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 probetas sin cloruros pues entre mas 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 mostrados en el cuadro 9 donde se muestran los valores promedio de los últimos 179 días de monitoreo.

Estos tienen una 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) lo que puede indicar que el ánodo se pasivó y dejó de ejercer protección catódica a la varilla de refuerzo.

Los resultados obtenidos los últimos días de monitoreo, muestran que el ánodo tiene el mismo comportamiento en las 6 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.

VII.3 Corriente

En las Figuras 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 existe 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 probeta 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 la probeta 3SCL fue 50 μ A. Las probetas 1 y 2 mostraron un comportamiento muy similar, pero la probeta 3 tuvo mayor variación pero, como ya se dijo, puede ser debido 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, tienen un promedio de 40 μA , la probeta 6CCL drena una corriente de 8 μA , que se mantuvo constante a lo largo del experimento, mientras que en la probeta 4CCL, existe una gran variación en los valores como lo podemos observar en la Figura 25. Las graficas de corriente muestran la cantidad de corriente drenada por el ánodo, donde se puede observar 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 3 donde es mayor para las secciones 4-5 y para las probetas con cloruros, la corriente drenada es menor para las últimas secciones, como se observa en las Figuras 25 a 27.

VII.4 Curvas de depolarización

Las curvas de depolarización para las probetas sin cloruros, en las 3 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/CuSO₄ en dirección negativa, es decir con potenciales mas positivos, la diferencia a las 4 horas de potencial es de alrededor de -0,200 V vs Cu/CuSO₄, lo que comprueba según lo que establece la NACE que la estructura se encuentra protegida. Al comparar los cuadros 16, 18 y 20 se observó que en la probeta 1SCL no existe gran variación en las 3 mediciones que se realizaron pues se tiene una diferencia promedio de -0, 200 V vs Cu/CuSO₄, en la probeta 2SCL se observa que en la ultima medición la diferencia de potencial es -0,400 V vs Cu/CuSO₄ mientras que en la primera fue de -0,260 V vs Cu/CuSO₄, esta diferencia se observa debido a que 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/CuSO₄ y en la última medición fue de -0,270 V vs Cu/CuSO₄, 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/CuSO₄, la probeta 4CCL muestra que no se encuentra protegida a

los 212 días y ninguno de los otros experimentos demuestran lo contrario manteniendo una diferencia de potencial de $-0,075$ V vs Cu/CuSO₄, lo que indica como lo muestra la Figura 19 que el ánodo estaba perdiendo ya su capacidad de ejercer protección a la varilla de refuerzo. La probeta 5CCL tiene una tendencia en los 3 experimentos realizados, a disminuir su protección obteniendo a los 312 días una diferencia de potencial de $-0,028$ V vs Cu/CuSO₄ y la Figura 20 muestra que el ánodo comenzó a dejar de mantener su potencial de protección paulatinamente. La probeta 6 CCL es la única probeta con cloruros que cumple el criterio de protección en el primer experimento, ya que en la última realización mostró potenciales de -0.200 V vs Cu/CuSO₄, y como se muestra en la Figura 21 el ánodo mostró también paulatinamente una disminución de potencial. De acuerdo al criterio establecido por la NACE de $-0,100$ V vs Cu/CuSO₄ 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 sin cloruros es mayor, que para las probetas con cloruros, debido a la humedad y acción de los cloruros sobre la varilla de refuerzo.

VII.5 Velocidad de corrosión

Los resultados obtenidos en esta prueba que se muestran en los cuadros 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 el cuadro 5 de este trabajo. Es por ello que los ánodos protegieron a las varillas de refuerzo debido al medio corrosivo en que se encontraban embebidas las varillas en el concreto.

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

VII.6 Lixiviación y difracción de R-X

En esta etapa donde analizamos los productos de lixiviación, las Figuras 16 a 21 muestran que el potencial del ánodo comenzó 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 comienza a tener valores de potencial mas positivos, mientras que el la 3SCL, el ánodo mantiene aun una protección sobre la varilla de refuerzo. En las probetas CCL, el ánodo en la probeta 4CCL comenzó a pasivarse justo cuando la varilla comenzó a registrar valores de potencial mas positivo, mientras 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 Figura 28 mientras que los resultados de R-X muestran 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 expenden en el mortero poroso del ánodo y este a su vez salio 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.

VIII. 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, ya que se requiere un gran número de ánodos para proteger efectivamente una estructura reparada, lo que hace que el costo de la reparación sea 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, por efecto del bromuro de litio.

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

IX. BIBLIOGRAFIA

- Andrade, C.,** Alonso, C., Gulikers, A., Polder R., Cigma, R., Vennesland, Ø., Salta, M., Raharinaivo, A., Elsener, B. **2004.** 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.
- ASM HANDBOOK, 1998.** Corrosion Vol: 13, 15-45, 77-123, 466-477
- 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
- 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
- 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
- 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.
- 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
- 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.
- 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.

- 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.
- Ávila, J., Genescá, J., 2002.** Más allá de la Herrumbre I; 3ª. Edición, La ciencia para todos. México: 25-86.
- Ávila, J., Genescá, J., 2003.** Más allá de la Herrumbre II; 3ª. Edición, La ciencia para todos. México: 48-81
- Bosch R. W. 2005.** 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.
- Brown, Michael. Sharp, Stephen. 2005.** Effectiveness of sacrificial anodes in high-resistivity shotcrete repairs. Report final Virginia Transportation Research Council.
- Castro, P. y Moreno E. 2003.** 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.8.
- Castro, P. y Moreno E. 2003.** CONPAT 2003, Mérida Yucatán México, Vol. II: Patología: XII.25-XII.32, II.169-II.175, II.1-II.7, II.153-II.160.
- Castro, P. y Moreno E. 2003.** CONPAT 2003, Mérida Yucatán México, Vol. III: Recuperación: VII.9-VII.16, VII.41-VII.48.
- Durar, 2002.** Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, 3ra. Edición. CYTED: 18-60, 88-92, 112-117, 124-128, 135.
- Feliu, S., González, J. A., Miranda, J. M., Feliu, V. 2005.** Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures. CORROSION SCIENCE: Vol. 47: 217-238.
- González, J. A., Miranda, J. M., Birbilis, N., Feliu, S. 2005.** Electrochemical Techniques for Studying Corrosion of Reinforcing Steel: Limitations and Advantages. CORROSION: Vol. 61: 37-50.
- Helene, P., Pereira, F. 2003.** Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón Reparación, Refuerzo y Protección. 1ra. Edición., Degussa, Sao Paulo: 39-49, 131, 147, 341-375, 730-741.

- Koch, G. H., Brongers, P. H., Thompson, N. G., Virmani, Y.P., Payer, J. H. 2002.** Corrosion cost and preventive strategies in the united status. MATERIALS PERFORMANCE: Supplement to Materials Performance: 2-11
- Lasa, Ivan. 2002.** State Materials Office Corrosion Research Laboratory. State of Florida Department Of Transportation, documento # 00-124.
- Moreno, M., Morris, W., Alvarez M. G., Duffó, G. S. 2004.** Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: Effect of carbonation and chloride content. CORROSION SCIENCE: Vol. 46: 2681-2699.
- Neville, A. 1999.** Tecnología del Concreto. 1ra Edición., IMCYC, México: 75-121, 167-183, 187-197, 406-410.
- Pérez, J. T. 2001.** 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, DF. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias: 34-35.
- Rodríguez, L. M., Genescá, J., Uruchurtu, J., Hernández, I. 1999.** Corrosividad Atmosférica., 1ra. Edición., Plaza y Valdés, S. A de C. V. México: 5-38
- Sagüés, A.A., Pech – Canal M. A., Shahid Al– Mansur A. K. M. 2003.** Corrosion macrocell behavior of reinforcing steel in partially submerged concrete columns. CORROSION SCIENCE: Vol.45: 7-32.
- Sagüés, A.A., Balakrishna, V., Powers, R.G., 2005.** 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.
- Torres, Andres. Martínez, Miguel. 2001.** Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Publicación Técnica # 181. Secretaria Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.
- Trejo, D., Monteiro, P. J. 2005.** 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.

- Uhlig, H. 1970.** Corrosión y Control de la corrosión. Séptima edición, Editorial URMO, España: 92-125, 155-165.
- Vadillo, M. C. 2004.** Seguimiento del proceso de la corrosión del acero de refuerzo en pilotes de concreto. México. D. F. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias: 1-9, 22-27.
- Vaysburd, A. 2001.** Galvashield embedded galvanic anodes for repair of concrete. Concrete Innovations Appraisal Service (CIAS): CIAS REPORT: 01-1
- Whitmore, D., 2003.** Corrosion Protection Systems, Vector Corrosion Technologies.
- Whitmore, D., Abbott, S. 2003.** NACE CORROSION 2003, Houston Texas, paper 03301:1-8
- Wittmore, D. 2005.** www.vector-corrosion.com
- Beaudette, M. 2001.** www.norcure.com
- Yadav, A. P. Nishikata, A., Tsuru, T. 2004.** Degradation mechanism of galvanized steel in wet-dry cyclic environment containing chloride ions. CORROSION SCIENCE: Vol.46: 361-376.

X. ANEXOS

ANEXO I

X.1 Análisis de los materiales

X.1.1 Análisis del agregado grueso

La muestra fue tomada de la Cañada, Querétaro, Qro.

Fue adquirida el 10 de Febrero del 2004 y se identifico como 100204-02. Se realizó el cuarteo mecánico para obtener 2 muestras de 28 Kg cada una.

Una muestra se utilizó para realizar análisis granulométrico, pasando el agregado por las mallas: $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$, 4, 10, 20, 40, 70, 100 y 200.

El análisis de la muestra se presenta en la Figura 30.

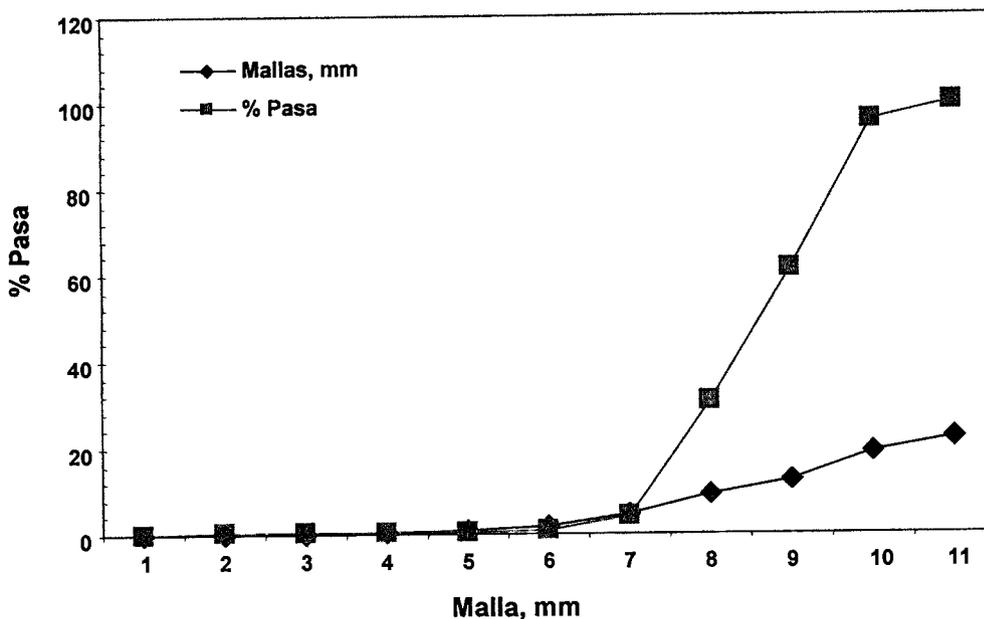


Figura 30. Grafica de análisis granulométrico

La otra muestra se utilizó para realizar las pruebas de Densidad específica, Absorción, Contenido de humedad, Peso volumétrico suelto y compactado. Los resultados se muestran en el cuadro 24.

Cuadro 24. Resultados del agregado grueso

Prueba	Resultado
Densidad Especifica	2,63 g/ml
Absorción	1,92 %
Peso volumétrico suelto	1,682 Kg/m ³
Peso volumétrico compacto	1,767 Kg/m ³
Tamaño máximo	3/8"

X.1.2 Análisis del agregado fino

Al agregado fino (arena), se le realizó análisis granulométrico, módulo de finura, Absorción, Densidad Especifica, Peso volumétrico suelto y compactado. Los resultados se muestran en el cuadro 25.

Cuadro 25. Resultados del agregado fino

Prueba	Resultado
Densidad Especifica	2,2 g/ml
Absorción	5,1 %
Peso volumétrico suelto	1, 191 Kg/m ³
Peso volumétrico compacto	1,250 Kg/m ³
Modulo de Finura	3,05

Con estos resultados de los agregados se realizó el cálculo para realizar una mezcla con una relación a/c de 0,50, con revenimiento de 80-100 mm. La cantidad de agregados se muestra en el cuadro 26.

Cuadro 26. Cantidad de agregados para realizar concreto con una relación a/c 0,50.

Agregado	Cantidad
Agua	225 kg/m ³
Grava	777,48 Kg/m ³
Arena	613,80 Kg/m ³
Cemento	441,18 Kg/m ³

Se calculó el volumen de las vigas y cilindros que se colaron para estimar la cantidad de agregados de acuerdo al volumen necesitado.

El volumen de las vigas individuales es de $9,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ y el volumen de los cilindros individuales es $1,5708 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

En total se colaron 6 vigas de concreto y 8 cilindros. La cantidad de material utilizado se muestra en el cuadro 27.

Cuadro 27. Cantidad de agregados para las probetas coladas.

Agregado	Cantidad
Agua	14,96 Kg/m ³
Grava	51,70 Kg/m ³
Arena	40,81 Kg/m ³
Cemento	29,34 Kg/m ³

Esta cantidad se dividió en dos para realizar dos mezclas por separado, ya que a una mezcla se le agregó 3% en peso de cloruros por peso de cemento, para evaluar los dos ambientes con y sin cloruros.

Se pesaron 440,1 g de NaCl que se agregó a la mezcla de cloruros.

Las probetas se dejaron 48 horas en los moldes y después se desmoldaron y colocaron en cámaras de humedad relativa controlada.

Se removió el concreto de la sección 1 de cada probeta para colocar encima de está el ánodo de sacrificio, una vez terminado se realizó la reparación de las probetas con mortero.

El mortero se realizó con 3 Kg de arena y 1 Kg de cemento y 500 ml de agua.

Para la reparación de las probetas con cloruros se reparó con un mortero que contiene 0,2% de Cl⁻, realizando el mortero con 3 Kg de arena, 1 Kg de cemento, 2g de NaCl y 500 ml de agua.