

221

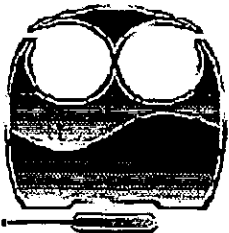


**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

"PROTECCIÓN CATÓDICA POR
ANODOS DE ZINC DE LAS ARMADURAS
METÁLICAS EN CONCRETO".

**TESIS DE LICENCIATURA
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA
P R E S E N T A:
MARÍA DEL CARMEN VADILLO VELÁZQUEZ**



**EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA**

MÉXICO, D.F.

2001.

299486



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente: Dr. Carlos Mauricio Castro Acuña.

Vocal: Dr. Juan Genescá Llongueras.

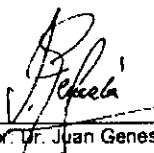
Secretario: Prof. Ana Isabel Carranco Pérez.

1er. Suplente: M. C. Aurora de los Ángeles Ramos Mejía

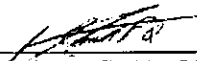
2do. Suplente: Dr. Francisco Javier Garfias Vasquez.

Sitio donde se desarrolló el tema:

Universidad Nacional Autónoma de México.
Facultad de Química.
Edificio D.
Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
Laboratorio de Corrosión y Protección.



Asesor: Dr. Juan Genescá Llongueras



Supervisor Técnico: M.C. José Trinidad Pérez Quiroz



Sustentante: María del Carmen Vadillo Velázquez

“ GRACIAS A DIOS “

Por darme una hermosa Familia y por permitirme llegar al final de este sueño y el comienzo de otros en mi vida”.

“ A MIS QUERIDOS PADRES ”

Carmen Velázquez y Mario Vadillo.

Por encontrar en Uds. un gran ejemplo de amor y de apoyo incondicional en una familia como la nuestra, gracias a ello he podido realizarme en mi vida personal y profesional, por no dejarme desfallecer en los momentos más difíciles y porque son la razón de mi existir. *GRACIAS*

“ A MIS QUERIDOS HERMANITOS “

Gerardo Vadillo y Ernesto Vadillo.

Por el gran amor que les tengo, por la gran paciencia que me tienen, por la gran ayuda que siempre me han proporcionado en todos los ámbitos y porque sé que Uds. algún día no muy lejano cumplirán sus sueños.

“ A MIS ADORADAS TÍA Y PRIMA ”

Esperanza Vadillo y Marcela Loyo.

Por el amor que siempre me han brindado, por el apoyo incondicional otorgado y por ser también un gran ejemplo para mí.

“ A MI PEQUEÑITO SOBRINITO “

Julio Daniel Cureño Loyo.

Por el amor y cariño que te tengo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de ella.

A todos mis Profesores de la Carrera por enseñarme la gran ética educativa.

Al Dr. Joan Genescá por el gran apoyo y paciencia brindada para realizar este trabajo.

Al M.C. Trinidad Pérez por toda la ayuda recibida y por ser un gran amigo.

A las Familias Alfonseca Galván y Zenil Velázquez por ser un ejemplo muy valioso en mi vida.

A mis amigas de toda la vida Edith y Karla gracias por todo.

A la Familia Moreno Villaseñor por el gran cariño que nos tenemos.

A mis amigos del Grupo 421: Laura Gutiérrez, Violeta Jiménez, Ulises, Everardo y Javier Culebro.
Por aquellos viejos tiempos inolvidables.

A mis amigos del Grupo 452: Iván M., Felipe, Lorena y Oscar, Braulio B. y Carmen B., Mayela, Gabriela Choreño y Gabriela Ortiz, Othón y Hugo P., Enrique Rice y Rafael Villar, Miriam y Lulú.
Por los grandes momentos que nunca olvidaré.

A todo el Grupo Remedial.

A mis amigas incondicionales Alejandra B., Celia B., Elena J., Mi Comadre Leticia R., Sandra G. y Fernanda Z. Sé que cuento con Uds.

A Sandra P. Cedillo por la gran amistad que acaba de empezar.

A mi adorado Ahijado Jaime Uriel Martínez Ramírez porque espero ser un gran ejemplo para ti.

A la pequeña Iraís por el agrado de conocerte.

A mi amiguito Francisco Rodríguez por el tiempo que siempre dispones para mí. †

A todos mis amigos y compañeros de la carrera Ivonne F., Lucky, Araceli, Vero J., Dulce S., Marianet C., Omar H. Mi Compadre Erick M., Elias, Ramón, Filiberto, El Grupo de los Tito's, Samuelín, Victor, Eduardo y Alberto S. Antolín

Al grupo de Corrosión Prof. Carlos R., Marco T., José Luis V., Edgar O., Alfredo, Alfonso L., Israel, Miguel Ángel H., Carlos A., Ventura y a mis hermanitos adoptivos Miguel Ángel G., Toño S. y Ricardo O.

Por el apoyo incondicional brindado desde que llegué.

A Iván por todos los momentos que hemos compartido, por el apoyo que siempre me brindaste, por enseñarme tantas cosas bonitas y por una amistad que nunca termine.

El mundo pasa y no de largo
 Y hay quien no se entera que
 Somos los mismos en novedad.
 Me dices: "Cambias...sin embargo
 Tu entusiasmo sigue ahí
 No me has preguntado si me da igual o no...
 Amor te escribo y soy testigo
 De lo que se pierde y voy
 Acostumbrarme aunque me cueste...
 Dame al menos tiempo y que respire
 No es un arte fácil de prometer
 Dame al menos tiempo de despedirme
 Porque en un mundo que va
 A la velocidad del rayo
 Aguanto el vuelo más
 si me agarro de tu mano
 Acompáñame hasta donde pueda llegar
 En este mundo que va
 como la luz del pensamiento
 El mérito está en no quedarme en el intento
 Y aunque no lo quiera ¿qué duda cabe ya?

¿Cuál es

el día más bello?
 la cosa más fácil?
 el obstáculo más grande?
 el error mayor?
 la raíz de todos los males?
 la distracción más bella?
 los mejores profesores?
 la primera necesidad?
 lo que más hace feliz?
 el misterio más grande?
 la persona más peligrosa?
 el sentimiento más ruin?
 el regalo más bello?
 lo más imprescindible?
 la ruta más rápida?
 la sensación más grata?
 el resguardo más eficaz?
 la mayor satisfacción?
 la fuerza más importante?
 las personas más necesarias?
 la cosa más bella de todas?

HOY
 EQUIVOCARSE
 EL MIEDO
 ABANDONARSE
 EL EGOISMO
 EL TRABAJO
 LOS NIÑOS
 COMUNICARSE
 SER UTIL A LOS DEMAS
 LA MUERTE
 LA MENTIROSA
 EL RENCOR
 EL PERDON
 EL HOGAR
 EL CAMINO CORRECTO
 LA PAZ INTERIOR
 EL OPTIMISMO
 EL DEBER CUMPLIDO
 LA FE
 LOS PADRES
 EL AMOR

Quando la vida se te hace canalla
 Y el corazón de pronto te triciona y falla
 Prueba a pensar sólo un minuto
 Que es pasajero.
 Quando la noche se anuncia oscura interminable,
 Profunda y la angustia dura prueba a pensar que n
 Hay nada eterno hoy como siempre
 Todo es un sueño.
 Si alguna duda llamara a tu puerta
 Tira de instinto y pasa de razón experta
 Será así como quieras que sea
 Dale la vuelta.
 Amor entero
 Cada día es grande
 Y lo que hago por ti
 Se que es importante.

MADRE TERESA DE CALCUTA

MIGUEL BOSÉ

| | |
|---|----|
| RESUMEN. | IV |
| INTRODUCCIÓN. | V |
| 1. ANTECEDENTES. | 1 |
| 1.1. EL CONCRETO. | 1 |
| 1.1.1. PERIODOS DE DESPASIVADO DE LA ARMADURA EN EL CONCRETO. | 4 |
| 1.1.1.1. PERIODO DE INICIACION. | 4 |
| 1.1.1.2. PERIODO DE PROPAGACION. | 4 |
| 1.1.2. EFECTO POR AGENTES CORROSIVOS. | 5 |
| 1.1.2.1. LOS CLORUROS. | 5 |
| 1.1.2.2. CARBONATACION. | 6 |
| 1.1.2.3. SULFATOS. | 6 |
| 1.2. CORROSIÓN. | 7 |
| 1.2.1. CELDA GALVÁNICA. | 8 |
| 1.2.1.1. CONVENCION PARA EL FLUJO DE CORRIENTE. | 9 |
| 1.2.2. DIAGRAMAS DE POURBAIX. | 9 |
| 1.2.3. POTENCIALES DE MEDIA CELDA. | 10 |
| 1.2.2.2. CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ACERO DE REFUERZO. | 11 |
| 1.3. PROTECCION CATODICA. | 13 |
| 1.3.1. PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO O GALVÁNICOS. | 13 |
| 1.3.2. PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA. | 14 |
| 1.3.3. LA UTILIDAD DE LOS ÁNODOS. | 15 |
| 1.3.4. COSTOS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA. | 16 |
| 1.3.5. CRITERIOS PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA. | 17 |
| 1.3.5.1. RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN. | 18 |
| 1.4. TRANSFORMADAS DE KRAMERS-KRONIG. | 19 |
| 1.5. PROYECCIÓN TÉRMICA. | 20 |
| 1.5.1. PROYECCIÓN TÉRMICA (ROCIADO TÉRMICO) POR COMBUSTIÓN CONVENCIONAL DE POLVOS. | 22 |
| 1.5.1.1. CONDICIONES DEL SUSTRATO. | 22 |
| 2.1. TÉCNICA EXPERIMENTAL. | 24 |
| 2.1.1. DIAGRAMA DE NYQUIST. | 26 |
| 2.1.2. CÍRCULO DE RANDLES. | 28 |
| 2.1.3. DIAGRAMA DE BODE. | 29 |
| 2.2. MATERIALES. | 30 |
| 2.3. PROCEDIMIENTO. | 31 |
| 3.1. RESULTADOS. | 35 |

| | |
|---|----|
| RESUMEN. | IV |
| INTRODUCCIÓN. | V |
| 1. ANTECEDENTES. | 1 |
| 1.1. EL CONCRETO. | 1 |
| 1.1.1. PERIODOS DE DESPASIVADO DE LA ARMADURA EN EL CONCRETO. | 4 |
| 1.1.1.1. PERIODO DE INICIACION. | 4 |
| 1.1.1.2. PERIODO DE PROPAGACION. | 4 |
| 1.1.2. EFECTO POR AGENTES CORROSIVOS. | 5 |
| 1.1.2.1. LOS CLORUROS. | 5 |
| 1.1.2.2. CARBONATACION. | 6 |
| 1.1.2.3. SULFATOS. | 6 |
| 1.2. CORROSIÓN. | 7 |
| 1.2.1. CELDA GALVÁNICA. | 8 |
| 1.2.1.1. CONVENCIÓN PARA EL FLUJO DE CORRIENTE. | 9 |
| 1.2.2. DIAGRAMAS DE POURBAIX. | 9 |
| 1.2.3. POTENCIALES DE MEDIA CELDA. | 10 |
| 1.2.2.2. CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ACERO DE REFUERZO. | 11 |
| 1.3. PROTECCION CATODICA. | 13 |
| 1.3.1. PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO O GALVÁNICOS. | 13 |
| 1.3.2. PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA. | 14 |
| 1.3.3. LA UTILIDAD DE LOS ÁNODOS. | 15 |
| 1.3.4. COSTOS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA. | 16 |
| 1.3.5. CRITERIOS PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA. | 17 |
| 1.3.5.1. RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN. | 18 |
| 1.4. TRANSFORMADAS DE KRAMERS-KRONIG. | 19 |
| 1.5. PROYECCIÓN TÉRMICA. | 20 |
| 1.5.1. PROYECCIÓN TÉRMICA (ROCIADO TÉRMICO) POR COMBUSTIÓN CONVENCIONAL DE POLVOS. | 22 |
| 1.5.1.1. CONDICIONES DEL SUSTRATO. | 22 |
| 2.1. TÉCNICA EXPERIMENTAL. | 24 |
| 2.1.1. DIAGRAMA DE NYQUIST. | 26 |
| 2.1.2. CIRCUITO DE RANGLES. | 28 |
| 2.1.3. DIAGRAMA DE BODE. | 29 |
| 2.2. MATERIALES. | 30 |
| 2.3. PROCEDIMIENTO. | 31 |
| 3.1. RESULTADOS. | 35 |

| | |
|--|----|
| 3.1.1. MEDICIÓN DE POTENCIALES CON RESPECTO AL ECS DURANTE LA ETAPA DE CURADO. | 35 |
| 3.2. MEDICIÓN DE POTENCIALES DE LAS PROBETAS A Y B CON RESPECTO AL ECS UNA VEZ ADHERIDO EL ZINC POR MEDIO DEL ROCIADO TÉRMICO. | 35 |
| 3.3. MEDICIÓN DEL POTENCIAL DEL PAR GALVÁNICO CON RESPECTO AL ECS. | 35 |
| 3.4. MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE LAS PROBETAS A Y B CON RESPECTO AL ECS EN LA CELDA DE HUMEDAD RELATIVA. | 36 |
| 3.5. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL POTENCIAL DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN. | 39 |
| 3.5. RESULTADOS DE LOS DIAGRAMAS DE LA TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA. | 41 |
| 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS. | 45 |
| 4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LOS POTENCIALES DE LAS PROBETAS A Y B. | 45 |
| 4.1.1. ETAPA DE CURADO. | 45 |
| 4.1.2. ETAPA DE APLICACIÓN DEL ZINC POR ROCIADO TÉRMICO. | 45 |
| 4.1.2.1 VARIACIÓN DEL POTENCIAL DEL HIERRO (Fe). | 45 |
| 4.1.2.2. VARIACIÓN DEL POTENCIAL DEL ZINC (Zn) Y PAR GALVÁNICO (Fe-Zn). | 46 |
| 4.1.3. ETAPA EN LA CELDA DE HUMEDAD RELATIVA. | 48 |
| 4.1.3.1. PROBETA A. | 48 |
| 4.1.3.1.a. POTENCIAL DEL Fe. | 48 |
| 4.1.3.1.b. POTENCIAL DE Zn. | 51 |
| 4.1.3.1.c. POTENCIAL DEL PAR GALVÁNICO. | 52 |
| 4.1.3.2. LA PROBETA B. | 52 |
| 4.1.3.2.a. POTENCIALES DEL Fe. | 52 |
| 4.1.3.2.b. POTENCIAL DEL Zn. | 53 |
| 4.1.3.2.c. POTENCIAL DEL PAR GALVÁNICO. | 55 |
| 4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA. | 56 |
| 4.2.1. PROBETA A. | 56 |
| 4.2.2. EN LA PROBETA B. | 57 |
| 4.3. EXPLICACIÓN. | 58 |
| 5.1. CONCLUSIONES. | 63 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA. | 64 |
| 7. APÉNDICE 1. | 66 |

| | |
|--|----|
| 7. APÉNDICE 2. | 68 |
| 7. APÉNDICE 2.1. RELACION DE PUENTES PROTEGIDOS CATÓDICAMENTE EN EL ESTADO DE FLORIDA. | 68 |
| TABLA DE APÉNDICE 2.1.1. | 69 |
| TABLA DE APÉNDICE 2.1.2. | 76 |
| 7. APÉNDICE 2.2. INVESTIGACIÓN GRAL. DE PRE-DISEÑO PARA EL USO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN SUBESTRUCTURAS DE PUENTES. | 85 |
| 7. APÉNDICE 3. | 89 |
| FIGURA 3.1. DIAFRACTOGRAMA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN DE LA PROBETA B. PARTE INTERNA (CONCRETO-ZINC). | |
| FIGURA 3.2. DIAFRACTOGRAMA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN DE LA PROBETA B. PARTE INTERNA (ZINC). | |

RESUMEN.

El presente trabajo muestra el resultado de aplicar la Protección Catódica a dos probetas de acero de refuerzo en concreto por ánodos de zinc aplicados por la técnica de rociado térmico, en un sistema cerrado y de humedad relativa media.

En este sistema se puede observar el comportamiento frente a la corrosión del acero de refuerzo, el funcionamiento del zinc como ánodo y la Protección Catódica al conectar éstos dos elementos mediante la perturbación de la resistencia del concreto con la adición de sales higroscópicas y la adición de cloruros en el agua de amasado en el concreto –simulando agua de mar-.

Las técnicas que permiten observar el comportamiento del sistema bajo estas perturbaciones son el Potencial Electroquímico y la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica las cuales permiten seguir un comportamiento durante el tiempo de experimentación.

INTRODUCCION.

El reporte Hoar del año de 1971, calculó las pérdidas por corrosión en el Reino Unido en 250 millones de libras esterlinas en el sector de la construcción.

La NACE, en 1985 estimó que en los Estados Unidos de Norteamérica existen 300,000 puentes que requieren protección catódica. Y necesitan aproximadamente \$23.1 billones de dólares tanto para reparaciones como para protección catódica; con lo anterior se rescatarán \$89 billones de dólares.

En 1998, los Estados Unidos de Norteamérica contaban con 575,000 puentes de los cuales 280,000 de ellos sufren de corrosión. Los costos por reparación a nivel interestatal ascendían a \$50 billones de dólares. Actualmente los costos por mantenimiento para las estructuras de concreto reforzado en puentes es de aproximadamente 1.4% a 1.6% del costo de su inversión inicial.

Así mismo en el Reino Unido tiene pérdidas por más de \$620 millones de libras esterlinas por problemas de corrosión en los puentes de las grandes autopistas.

En el caso de España hay 844 casos, de los cuales el 22% son por deformaciones en las estructuras de construcción, 15% son por corrosión y el 2% es por fisuras en las estructuras.

Con relación a Iberoamérica, no se disponen de cifras definidas sólo se sabe que el 4% del Producto Interno Bruto se utiliza para problemas de corrosión.

* O. Trocónis, A. Romero, C. Andrade, P. Helene e I. Díaz, "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado" (Manual DURAR), 2ª. Edición, 1998, pp. 12-13.

De ahí la importancia de estudiar este fenómeno y lo que representa para los países industrializados, los cuales invierten enormes sumas para la investigación y aplicación de métodos para prevenir la corrosión.

La corrosión es un proceso de deterioro o destrucción de las propiedades que tiene un material (generalmente metales), causada por las reacciones electroquímicas con el medio ambiente que le rodea.

El concreto se compone de agregados gruesos, finos, agua, cemento y puede contener otros materiales cementantes o aditivos químicos, estos últimos materiales se pueden encontrar en el Apéndice 1.

Dependiendo del tipo y cantidad de cemento puede proporcionar ciertas propiedades de protección al acero de refuerzo tales como reducir el calor inicial de hidratación, incrementar la resistencia a la reacción alcalí-agregado y al ataque de sulfatos y cloruros - estos de gran importancia -, disminuir la permeabilidad y aumentar la resistencia a la penetración de soluciones agresivas. Este sistema protege al acero de refuerzo proporcionándole una capa protectora conocida como "Capa Pasiva". Cuando uno de estos factores llega a faltar el acero de refuerzo queda desprotegido y entonces se inicia el proceso de corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

Es por este motivo que es necesaria la protección catódica como una técnica electroquímica para el control de la corrosión, la cual consiste en eliminar las zonas anódicas de la superficie metálica convirtiéndolas en una zona catódica. Existen dos maneras de lograr la protección catódica que son por ánodos de sacrificio y por corriente impresa.

OBJETIVOS.

- Realizar la Protección Catódica a dos probetas de acero en concreto utilizando como ánodo de sacrificio Zinc aplicado por la técnica de rociado térmico.
- Estudiar el comportamiento de este sistema en un recinto cerrado con humedad relativa controlada, agregándoles sales higroscópicas sobre el concreto.
- Analizar el comportamiento del sistema Hierro-Concreto-Zinc mediante la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES.

1.1. EL CONCRETO.

La palabra concreto viene del latín "concretus" que significa compuesto ⁽¹⁾.

Este consiste en una mezcla de agregados, cemento, agua y puede tener otros materiales cementantes y/o aditivos químicos.

Los aditivos químicos (ver Apéndice 1) se usan frecuentemente para acelerar o retardar el fraguado, mejorar la trabajabilidad, reducir la cantidad de agua requerida para el mezclado, incrementar la resistencia o modificar otras propiedades del concreto.

Los agregados finos pueden ser arenas o productos de trituración cuyas partículas son generalmente óxidos metálicos o silicatos de tamaño muy pequeño y uniforme, menores a $\frac{1}{4}$ de pulgada. Sirve para llenar los espacios vacíos de la mezcla. Los agregados gruesos consisten en grava, conformada al igual que la arena por óxidos metálicos y silicatos, además de piedras, por lo que el tamaño de las partículas es generalmente mayor de $\frac{1}{4}$ de pulgada y no es uniforme. Estos agregados proporcionan al concreto una resistencia mecánica y la permeabilidad en el impide la penetración de los agentes agresivos.

El cemento es una mezcla de clínker proveniente de la calcinación de contenidos de caliza (CaCO_3) y arcilla (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) con agua; se lleva a una temperatura aproximada de 1500°C en un horno rotatorio con un pequeño porcentaje de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), los cuales se muelen hasta lograr un tamaño de partícula muy fina. Sus principales constituyentes son el silicato tricálcico y aluminato tricálcico (C_3A). Es un cemento hidráulico porque reacciona

químicamente con el agua dando lugar a productos de hidratación insolubles responsables de la solidificación y del desarrollo de la resistencia mecánica. La alta alcalinidad del medio (pH =12 a 13.5) ⁽²⁾, protege al acero de refuerzo formando una película de óxido sobre el acero. Otro material cementante son las puzolanas que son materiales sílicos o sílico-aluminosos que finamente molidos y en presencia de humedad, pueden reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias y formar compuestos con propiedades cementantes. El acero empleado por la industria de la construcción, como refuerzo es un acero estructural que debe poseer determinadas propiedades químicas (composición), físicas (microestructura, dureza), condición superficial (óxido superficial, metalizados, recubrimientos orgánicos), propiedades mecánicas (alta resistencia a la tensión, compresión y torsión).

El concreto por sí sólo tiene una gran resistencia a los esfuerzos de compresión y muy pequeña a los esfuerzos de tracción. Por otra parte, el acero de refuerzo es muy resistente a los esfuerzos de tracción o flexión, por lo que si se emplea el acero como refuerzo en el concreto, se obtiene un material más resistente que el concreto mismo, pero para que éste se considere de buena calidad, también debe ser resistente y durable; es decir, que resista lo mayor posible al deterioro químico de la pasta de cemento, así como a la corrosión del acero embebido en el concreto.

La trabajabilidad es una propiedad del concreto que determina su capacidad de colocación y compactación; es afectada por la granulometría, forma de partículas y proporciones de agregado; la cantidad y calidad de cemento y

otros materiales cementantes, la presencia de aire incluido y aditivos químicos y la consistencia de la mezcla.

La consistencia es la capacidad del concreto fresco para fluir y se mide en términos de revenimiento. Se requieren diferentes revenimientos para los diversos tipos de construcción en concreto. Usualmente se indica el revenimiento en las especificaciones de obra como un intervalo, por ejemplo de 5 a 10 cm, o como un valor máximo que no debe ser rebasado ⁽³⁾.

El requerimiento de agua para la mezcla disminuye conforme aumenta el tamaño máximo de agregados bien graduados y con la inclusión de aire; este requerimiento se reduce en algunas ocasiones con el empleo de ciertos aditivos químicos reductores de agua (Apéndice 1).

Otra de las características importantes del concreto es su alta resistencia a la compresión después de un periodo de 28 días (curado), frecuentemente empleada como parámetro de diseño estructural de la dosificación del concreto y en la evaluación de éste. Los aditivos son generalmente proporcionados para satisfacer la resistencia de diseño a periodos mayores de 28 días.

En la relación agua/cemento (a/c) las diferencias en la resistencia para una determinada relación a/c o agua/materiales cementantes, pueden ser consecuencia de cambios en el tamaño máximo del agregado; granulometría, textura superficial, forma, resistencia y dureza de las partículas del agregado; diferencias en los tipos de cementos; contenido de aire; y el empleo de aditivos químicos, que afectan el proceso de hidratación del cemento o el desarrollo por sí mismos de propiedades cementantes.

El concreto debe ser capaz de soportar exposiciones que puedan privarlo de su durabilidad, en condiciones de congelación y deshielo, humedecimiento y secado, calentamiento y enfriamiento; y ante sustancias químicas, agentes descongelantes y otros. La resistencia se puede mejorar con el uso de componentes especiales: cemento de bajo contenido de álcalis, puzolanas, escorias de alto horno finamente molidas, o agregado seleccionado para evitar la expansión nociva debido a la reacción álcali-agregados que ocurren en algunas áreas cuando el concreto está expuesto a ambientes húmedos y puzolanas para concretos expuestos al agua de mar ⁽⁴⁾.

1.1.1. PERIODOS DE DESPASIVADO DE LA ARMADURA EN EL CONCRETO.⁽⁵⁾

1.1.1.1. PERIODO DE INICIACION.

Es el periodo donde al acero permanece pasivo y al transcurrir un determinado tiempo, el concreto cambia su composición y su estructura ante tales cambios del concreto el acero comienza a perder la pasividad.

1.1.1.2. PERIODO DE PROPAGACION.

Comienza cuando surge el fenómeno de despasivación en el acero de refuerzo, se presenta por la reducción de la alcalinidad o presencia de los iones agresivos en cantidades suficientes en el concreto y esto conducirá al rompimiento de la pasividad del acero de refuerzo, como consecuencia de ello aparece la propagación de la corrosión sobre la armadura.

1.1.2. EFECTO POR AGENTES CORROSIVOS.

1.1.2.1. LOS CLORUROS.

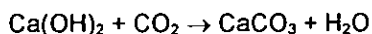
La pérdida de la película pasiva en el acero de refuerzo es debida a la penetración de iones agresivos como los cloruros (Cl^-), que van hacia la intercara concreto-acero. Estos iones pueden ser introducidos de diferentes maneras:

- Como aditivo del concreto, el cual es un acelerante del fraguado y generalmente es agregado en forma de CaCl_2 . Los iones cloruro pueden estar en otros tipos de aditivos como reductores de agua.
- Como contaminante del agua de amasado, ya que existen diferentes tipos de agua en donde varia la concentración de iones cloruro. En algunos casos se utiliza agua de mar para amasar el concreto.
- Los iones cloruro pueden estar presentes en las sales de deshielo utilizadas en los caminos, puentes, carreteras, donde en algunas partes la temperatura es extremadamente baja.
- Cuando se utilizan para el amasado, se crean pilas galvánicas dentro del acero de refuerzo debido a las diferencias en los contenidos de humedad. Las humedades relativas bajas pueden actuar como cátodos, debido a las grandes proporciones de oxígeno disponible, y las zonas relativamente húmedas pueden actuar como ánodos, en los cuales ocurre la corrosión ⁽⁶⁾.

1.1.2.2. CARBONATACION.

El aire normal contiene 0.03% en volumen de bióxido de carbono (CO_2), que reacciona con los productos alcalinos del concreto ⁽⁷⁾ debido a la naturaleza alcalina proporcionada por el cemento. Este proceso es conocido como carbonatación.

El aire entra en contacto directo con la superficie del concreto introduciéndose por los poros y el CO_2 contenido en el aire reacciona con los hidróxidos del medio.



Los productos precipitados durante la reacción del CO_2 con los hidróxidos disminuyen la permeabilidad del concreto y reducen el pH de la solución del poro y por lo tanto aparece un frente de carbonatación separando dos zonas, una hacia la superficie con pH menor a 8 y otra hacia el interior del concreto con pH arriba de 12. Cuando el frente de carbonatación llega al acero de refuerzo, la capa pasiva se vuelve inestable rompiendo la protección que le confería al acero e iniciándose el proceso de corrosión.

1.1.2.3. SULFATOS.

Los iones sulfatos (SO_4^{2-}) son posibles despasivantes del acero de refuerzo en el concreto, debido a que actúan sobre la pasta de concreto provocando la expansión y fractura del mismo y de esta manera propiciar el proceso de corrosión.

1.2. CORROSIÓN.

La corrosión es un proceso de deterioro o destrucción de las propiedades que tiene un material (generalmente metales), causada por las reacciones electroquímicas con el medio ambiente que le rodea.

Algunos metales que utilizamos no se encuentran puros en la naturaleza, sino combinados con otros elementos formando óxidos y sulfuros principalmente, conocidos como menas, por lo que se encuentran en forma estable o con una energía libre positiva o cero. Para reducirlos a forma metálica, es necesario aplicar cierta cantidad de energía, por lo que la corrosión producirá una tendencia del metal a regresar a su estado más estable, es decir, ocasiona que estos regresen a su estado inicial; cuanto más energía se necesite para reducir a un metal, más fuerte será la tendencia para que regrese a su estado más estable y tenderá a corroerse con mayor rapidez.

| ELEMENTO | ESTADO |
|----------|--------------------|
| Potasio | + Activo o - Noble |
| Magnesio | |
| Berilio | |
| Aluminio | |
| Zinc | |
| Cromo | |
| Hierro | |
| Niquel | |
| Estaño | |
| Cobre | |
| Plata | |
| Platino | |
| Oro | -Activo o +Noble |

↑ Mayor requerimiento de energía,
mayor tendencia a la corrosión.

↓ Menor requerimiento de energía,
menor tendencia a la corrosión.

Tabla 1.2. Serie Galvánica.

Todos los metales poseen una tendencia diferente a corroerse en un mismo medio, es decir, algunos son más resistentes que otros. Los metales con

menor tendencia a corroerse son los menos activos o más nobles y se les conoce como metales catódicos; los metales con mayor tendencia a la corrosión son los más activos y menos nobles, se les conoce como metales anódicos.

1.2.1. CELDA GALVÁNICA.

Una celda está constituida por dos metales, uno que actúa como ánodo y otro que actúa como cátodo, unidos por un contacto eléctrico y sumergidos en una solución que funciona como electrólito, Figura 1.2.1.

En forma simple, cuando la pila funciona los procesos de corrosión son semejantes a los de una pila galvánica y se necesita un ánodo donde toma lugar la reacción de oxidación. Ésta es una superficie donde tendrá lugar la corrosión, por lo que al disolverse dicha superficie se liberan electrones, estos posteriormente pasan a través del contacto eléctrico y llegan hasta el cátodo. En el cátodo se lleva a cabo la reacción de reducción y es la superficie en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con los iones presentes en el electrólito llevándose a cabo el proceso de reducción. En el electrólito es donde se transportan los iones y los productos de la corrosión, funcionando sólo como medio de transporte iónico y el contacto eléctrico es la unión metálica entre el ánodo y el cátodo, encargado de transportar los electrones generados por el ánodo. La diferencia de potencial creada entre el ánodo y el cátodo provoca una migración de electrones desde el ánodo al cátodo a lo largo del contacto eléctrico. Si se excluye uno de estos elementos: el ánodo, el cátodo, el contacto eléctrico o el electrólito, entonces no habrá corrosión.

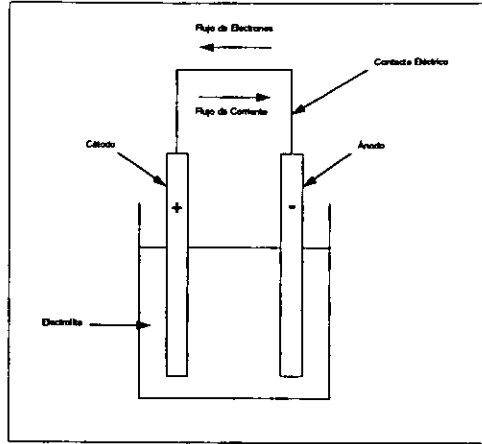


Figura 1.2.1. Celda Galvánica.

1.2.1.1. CONVENCION PARA EL FLUJO DE CORRIENTE.

- ✓ La corriente eléctrica, de acuerdo con la convención, circula desde el polo positivo (+) al polo negativo (-) en un circuito eléctrico.
- ✓ En el electrolito, el transporte de los iones tendrá lugar entonces del ánodo al cátodo.
- ✓ Habrá un consumo y por lo tanto una pérdida de metal en aquellos lugares del ánodo en que la corriente abandone el electrodo para pasar al electrolito.

1.2.2. DIAGRAMAS DE POURBAIX.

Los diagramas de Pourbaix son una representación gráfica de Potencial vs pH, que nos permiten tener una imagen de las reacciones óxido-reducción para un elemento dado en función del pH.

Su objetivo principal es darle una estructura termodinámica a las reacciones electroquímicas en solución acuosa.

Este diagrama indica las diferentes zonas en que el metal pueda encontrarse con respecto a la corrosión, como se muestra en la Figura 1.2.2.

Inmunidad. Es el estado del metal en el cual la corrosión es termodinámicamente imposible en un medio.

Pasivación. Es el estado de un metal en el cual la corrosión en un cierto ambiente está prevenida por modificaciones de su superficie; por ejemplo, la formación de una capa delgada protectora de óxido.

Corrosión. En este dominio tiene lugar la reacción de un metal con su medio lo que resulta en la destrucción continua del metal.

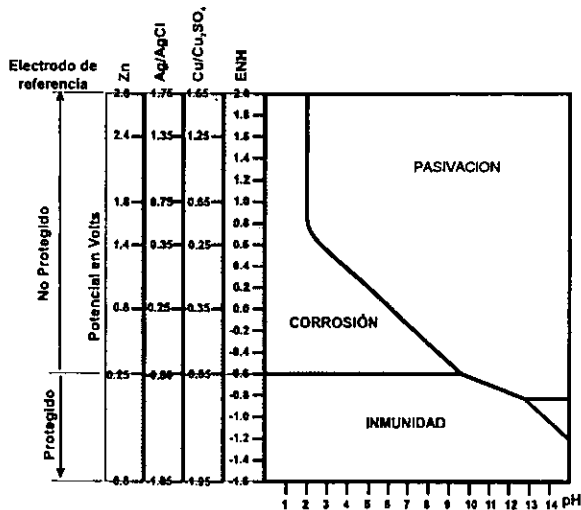


Figura 1.2.2. Diagrama de Pourbaix.

1.2.3. POTENCIALES DE MEDIA CELDA.

Los potenciales de media celda son una herramienta para predecir la condición de corrosión del acero de refuerzo en concreto.

En la práctica, consiste en medir la diferencia de potencial entre el objeto bajo estudio (electrodo de trabajo) y otro que se use como referencia (electrodo

de referencia). En la medición de potenciales no fluye una corriente apreciable entre el metal y el electrolito.

Ya que el mecanismo de corrosión se lleva a cabo en dos semireacciones electroquímicas particulares que son la reacción de oxidación y la reacción de reducción, el potencial que se mide no es el de equilibrio si no el de corrosión o llamado también potencial mixto.

Existe el criterio de la Norma ASTM C876-86, mostrado en la Tabla 1.2.2.1, que relaciona el valor del potencial de corrosión (E_{corr}) con respecto a un electrodo de referencia y su probabilidad de corrosión.

El potencial de corrosión se estudia desde el punto de vista termodinámico, en el cual se obtiene sólo información cualitativa; es decir, que tan factible es que se esté llevando a cabo la corrosión. Este método debe de usarse siempre como complemento de otra técnica.⁽⁶⁾

| ECORR VS ECS (MV) | PROBABILIDAD DE CORROSIÓN (%) |
|-------------------|-------------------------------|
| > -120 mV | 90 que no se presente |
| -120 mV a -270 mV | corrosión incierta |
| -270 mV | 90 que se presente corrosión |

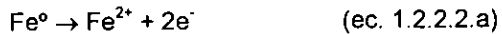
Tabla 1.2.2.1. Norma ASTM C876-86.

1.2.2.2. CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA DEL ACERO DE REFUERZO.

El proceso electroquímico encierra una reacción global de corrosión lo cual es el resultado de dos o más reacciones electroquímicas parciales, que se llevan a cabo en la interfase metal/electrolito. Estas reacciones alejan al metal de su estado de equilibrio llevándolo a la condición de corrosión como resultado de su disolución.

Las grietas o poros del concreto son un camino para los cloruros, éstos llegan a la superficie del acero destruyendo la capa pasiva de la varilla

provocando la formación de macropilas en las zonas anódicas donde el acero queda expuesto dando la siguiente reacción:



Estos electrones se consumen en las zonas catódicas donde existe oxígeno y agua disuelta, produciéndose la siguiente reacción:



El resultado de las reacciones (1.2.2.2.a.) y (1.2.2.2.b.) dan:

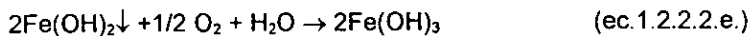


la combinación de los iones Fe^{2+} y OH^- producen el $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (hidróxido ferroso)



Cabe hacer notar que los iones cloruros están presentes, pero no participan en las reacciones electroquímicas.

El hidróxido ferroso es un compuesto inestable el cual puede reaccionar posteriormente para formar el hidróxido férrico, según la siguiente reacción:



este producto final conocido como herrumbre, es color pardo rojizo.

Los cloruros no se agotan en este proceso y como la concentración del Hierro en la superficie es suficiente, la corrosión no se detiene y esto implica el desarrollo de zonas anódicas localizadas a lo largo del acero de refuerzo creando picaduras profundas ⁽⁹⁾.

1.3. PROTECCION CATODICA. ^(8,10)

Es un proceso electroquímico de control de la corrosión empleado como método preventivo para la reparación de estructuras dañadas.

Puede aplicarse en cualquier metal y en la práctica es empleado especialmente para el acero al carbón. Puede ser utilizado en medios como agua de mar, tierras ácidas, concreto y otros medios corrosivos. Existen dos tipos de protección catódica los cuales se mencionan a continuación.

1.3.1. PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO O GALVÁNICOS.

Consiste en una pila galvánica, en la cual el metal que se desea proteger debe de actuar de cátodo y conectado eléctricamente a un metal anódico (menos noble o más negativo) para proteger al metal de interés.

El método se basa en la diferencia que existe en la actividad química de los metales. La serie electromotriz es una tabla con diferentes reacciones electroquímicas de metales a las cuales corresponde un valor particular de potencial respecto a una referencia, en este caso es la reacción de reducción del hidrógeno ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$), cuyo valor de potencial es arbitrario se le asigna un valor de cero. Ver Tabla 1.3.1.

Los metales anódicos que pueden proteger comúnmente al acero referidos a la serie electroquímica son el Zinc, Aluminio, Magnesio y sus aleaciones.

El Zinc (Zn) como ánodo de sacrificio tiene un valor relativamente elevado de su potencial de disolución que le confiere un alto rendimiento de corriente. Se

utiliza en agua de mar, buques, plataformas de petróleo, depósitos de agua, condensadores, etc. ⁽¹⁰⁾

| SISTEMA | REACCIÓN DE EQUILIBRIO | E° (VOLTS VS E.N.H.) |
|---------------------------------|--|----------------------|
| Li ⁺ / Li | Li ⁺ + 1e ⁻ ↔ Li | -3.045 |
| K ⁺ / K | K ⁺ + 1e ⁻ ↔ K | -2.925 |
| Cs ⁺ / Cs | Cs ⁺ + 2e ⁻ ↔ Cs | -2.923 |
| Ba ²⁺ / Ba | Ba ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Ba | -2.90 |
| Sr ²⁺ / Sr | Sr ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Sr | -2.890 |
| Ca ²⁺ / Ca | Ca ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Ca | -2.870 |
| Na ⁺ / Na | Na ⁺ + 1e ⁻ ↔ Na | -2.714 |
| Mg ²⁺ / Mg | Mg ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Mg | -2.37 |
| Al ³⁺ / Al | Al ³⁺ + 3e ⁻ ↔ Al | -1.660 |
| Mn ²⁺ / Mn | Mn ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Mn | -1.18 |
| Cr ²⁺ / Cr | Cr ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Cr | -0.913 |
| V ³⁺ / V | V ³⁺ + 3e ⁻ ↔ V | -0.876 |
| Zn ²⁺ / Zn | Zn ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Zn | -0.762 |
| Cr ³⁺ / Cr | Cr ³⁺ + 3e ⁻ ↔ Cr | -0.74 |
| Fe ²⁺ / Fe | Fe ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Fe | -0.440 |
| Cd ²⁺ / Cd | Cd ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Cd | -0.402 |
| In ³⁺ / In | In ³⁺ + 3e ⁻ ↔ In | -0.342 |
| Co ²⁺ / Co | Co ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Co | -0.277 |
| Ni ²⁺ / Ni | Ni ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Ni | -0.250 |
| Sn ²⁺ / Sn | Sn ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Sn | -0.136 |
| Pb ²⁺ / Pb | Pb ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Pb | -0.126 |
| Fe ³⁺ / Fe | Fe ³⁺ + 3e ⁻ ↔ Fe | -0.036 |
| H ⁺ / H ₂ | 2H ⁺ + 2e ⁻ ↔ H ₂ | 0.000 |
| Cu ²⁺ / Cu | Cu ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Cu | +0.337 |
| Hg ²⁺ / Hg | Hg ²⁺ + 2e ⁻ ↔ 2Hg | +0.789 |
| Ag ²⁺ / Ag | Ag ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Ag | +0.800 |
| Hg ²⁺ / Hg | Hg ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Hg | +0.857 |
| Pd ²⁺ / Pd | Pd ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Pd | +0.987 |
| Pt ²⁺ / Pt | Pt ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Pt | +1.19 |
| Au ³⁺ / Au | Au ³⁺ + 3e ⁻ ↔ Au | +1.50 |

Tabla 1.3.1. Serie Electromotriz.

1.3.2. PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA.

Consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua, para que la estructura a proteger se mantenga en un estado inmune y el polo positivo se conecta con un electrodo auxiliar que cierra el circuito.

En un diagrama de Pourbaix (Ver Figura 1.2.2.), en la zona de inmunidad es necesario conservar un valor de potencial x en el sistema concreto-metal.

Dicho valor se modifica cuando se presenta corrosión en el sistema y puede corregirse o mantenerse en valores adecuados mediante la aplicación de una corriente. Lo que se hace es suministrar electrones mediante una fuente de poder al acero de refuerzo, de tal forma que se favorezca en su superficie la reacción de reducción del oxidante presente en el medio.

Este sistema tiene la característica de utilizar como ánodos a electrodos auxiliares tanto como consumibles. Los electrodos están constituidos por chatarra de hierro, aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, etc.

1.3.3. LA UTILIDAD DE LOS ÁNODOS.

Para los ánodos de sacrificio y ánodos de corriente impresa se necesitan diferentes tipos de materiales.

Algunos ánodos de sacrificio pueden ser usados en la parte exterior de una estructura para polarizarla, como ocurre con los ánodos de zinc y las aleaciones de aluminio; el magnesio tiende a corroerse en agua de mar, la mayor parte de los diseños evitan el uso del magnesio. El zinc es usado normalmente para la protección catódica en agua de mar. La ventaja de este ánodo es el poco peso para las tuberías marinas. El aluminio es usado para las estructuras cerca de la costa porque es ligero.

Los ánodos son usados para proteger tanques, intercambiadores de calor, "offshore" estructuras (lejos de la costa) y estructuras similares.

Los ánodos de corriente impresa se escogen en función de las necesidades del medio en que serán utilizadas.

Un buen ánodo de sacrificio o de corriente impresa debe poseer las siguientes características:

- ✓ Bajo consumo (ánodos de sacrificio).
- ✓ Densidad de corriente elevada (corriente impresa).
- ✓ Pequeñas dimensiones.
- ✓ Baja resistividad.
- ✓ Resistencia mecánica.
- ✓ Facilidad de instalación.

1.3.4. COSTOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

En México no se cuentan con datos estadísticos reales sobre sistemas de protección catódica, es por ello que se hace referencia a otro país.

Los datos que se presentan a continuación son costos promedio en dólares obtenidos del Departamento de Transportación de Florida en Estados Unidos de Norteamérica en el Laboratorio de Investigación de Corrosión, a través del Dr. Iván R. Lasa quien es el especialista en Sistemas de Ingeniería de Protección Catódica.

La Tabla 1.3.4. hace referencia a que tipo y forma de ánodo en la primera columna, el número de puentes a los que se les ha protegido en la segunda columna, los años de servicio del puente se refiere al tiempo de evaluación del primer sistema de este tipo en la tercera columna y los costos por pie cuadrado en la cuarta columna.

También se anexan más datos en el Apéndice 2 sobre la cantidad de puentes que se les ha realizado la protección catódica en el mismo estado, así

como las etapas de investigación general de pre-diseño para el uso de protección catódica en subestructuras de puentes.

| Tipo de Sistema (Ánodo) | No. de Puentes | Años de servicio | \$ / ft ² |
|--------------------------------------|----------------|------------------|----------------------|
| Goma conductora | 3 | 12 | \$ 76.00* |
| Malla de Ti en mortero u hormigón | 4 | 12 | \$ 28.00* |
| Malla de Ti encapsulada para pilotes | 10 | 10 | \$77.00 |
| Malla de Zn encapsulada para pilotes | 26 | 6 | \$65.00 |
| Recubierta de Zn (Rociado Térmico) | 12 | 5-8 | \$24.00 |
| Placas de Zn perforadas | 3 | 9 | \$ 35.00* |

*No incluye costos de reparación de hormigón o servicio eléctrico.

Tabla 1.3.4. Costos de Protección Catódica.

1.3.5. CRITERIOS PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA.

La Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE) sugiere los siguientes criterios para determinar si una estructura de acero se encuentra protegida catódicamente.

- ✓ Un voltaje de -0.85 V respecto al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄) saturado.
- ✓ Un desplazamiento de potencial de al menos 300 mV en sentido negativo (catódico), provocada por la aplicación de la corriente de protección, con el circuito cerrado (la corriente en On).
- ✓ Un desplazamiento de potencial de al menos 100 mV en sentido negativo (catódico), determinado por la interrupción de la corriente y midiendo la caída óhmica, con el circuito abierto (corriente en Off).

- ✓ Un voltaje al menos más negativo (catódico) que el establecido en donde comienza el comportamiento de Tafel, como se observa en la siguiente Figura 1.3.5.

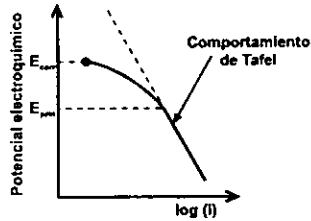


Figura 1.3.5. Potencial vs logaritmo de la corriente.

Para poder comprender el comportamiento de Tafel se hace referencia a la siguiente criterio de Resistencia a la Polarización.

1.3.5.1. RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN DE $\pm 10\text{mV}$. ⁽¹⁾

La resistencia a la polarización, R_p , de un electrodo que se corroe se define como la tangente a la curva de polarización al valor del potencial de corrosión. Ver Figura 1.4.

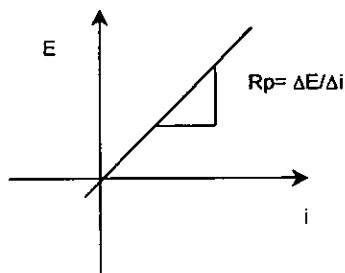


Figura 1.4. Esquema de Resistencia a la polarización.

Un pequeño potencial de barrido, $\Delta E(t)$, definido con respecto al potencial de corrosión ($\Delta E = E - E_{corr}$), es aplicado al metal. Los resultados de la corriente son marcados.

La densidad de corriente de corrosión i_{corr} tiene unidades de mA/cm^2 ; está relacionada con la resistencia a la polarización, R_p , mediante la ecuación de Stern-Geary

$$i_{\text{corr}} = B/R_p$$

donde R_p tiene unidades de $\text{Ohm}\cdot\text{cm}^2$ y B en Volts. El coeficiente de Stern-Geary está relacionado con las pendientes anódicas de Tafel (b_a) y catódicas (b_c) por:

$$B = \frac{b_a \cdot b_c}{2.303(b_a + b_c)}$$

donde las pendientes de Tafel tienen unidades de Volts.

1.4. TRANSFORMADAS DE KRAMERS-KRONIG. ⁽¹²⁾

La derivación de las transformadas (K-K) se basa en tres condiciones generales que debe cumplir un sistema para ser analizado por impedancia:

- 1.- Causalidad.- La respuesta del sistema es debida únicamente a la perturbación aplicada y no contiene componentes significativos de fuentes externas.
- 2.- Linealidad.- La perturbación / respuesta del sistema puede ser descrito por un conjunto de ecuaciones diferencias lineales. En la práctica esta condición requiere que la impedancia debe ser independiente de la magnitud de la perturbación.
- 3.- Estabilidad.- El sistema puede ser estable en el sentido que debe regresar al estado original una vez eliminada la perturbación.

Si las condiciones mencionadas son satisfechas, las transformadas de Kramers-Kronig son resultados puramente matemáticos y no reflejan alguna otra propiedad

física o condición del sistema. Sólo se enfoca a evaluar los datos experimentales que sean reales y no alguna interferencia de agentes externos al sistema.

1.5. PROYECCIÓN TÉRMICA.⁽¹³⁾

Las necesidades de los distintos sectores industriales hacen que la tecnología tenga importantes avances. Uno de ellos es el de los recubrimientos, necesarios para incrementar la vida útil de los distintos sectores públicos como puentes, carreteras, túneles, pilares, etc. Esto se ve reflejado en la modificación de capas externas con ciertas características como la resistencia a la corrosión, oxidación, fricción, erosión, desgaste, fenómenos térmicos, etc.; obteniendo una mayor rentabilidad y seguridad.

Los recubrimientos aplicados por proyección térmica (rociado térmico) consisten en una familia de sistemas de deposición, por medio de los cuales se puede recubrir un sustrato (superficie de un material que se desea cubrir) con una variedad de materiales que son calentados a un estado fundido o semifundido y proyectados contra el sustrato a cierta velocidad para producir una fuerza de enlace satisfactoria para la aplicación. Los materiales empleados como recubrimientos pueden incluir todo tipo y combinación de cerámicos, carburos, plásticos y metales, disponibles en forma de polvo o alambre.

El calor se genera por arco eléctrico o por la combustión de combinaciones de oxígeno / combustible. La temperatura de flama puede variar de 2,760°C (oxígeno/ combustible) a 17,000°C (plasma), dependiendo del proceso de aplicación. La velocidad de proyección de las partículas determina la densidad del recubrimiento y esta velocidad puede ser de 24 a 800 m/s dependiendo del

proceso empleado. Entre más alta sea la velocidad de las partículas el recubrimiento es más denso. Estas características hacen que la proyección térmica sea una de las herramientas de vanguardia en el ámbito de los recubrimientos, en especial para la protección de estructuras.

La proyección térmica implica la proyección de partículas en estado fundido o semifundido hacia el sustrato. Las partículas, al impactarse sobre el sustrato pueden aplanarse adquiriendo forma laminar o de hojuelas, o fragmentarse parcialmente en gotas más pequeñas. La formación del recubrimiento tiene una estructura orientada, las laminillas se encuentran paralelas a la superficie del sustrato. La homogeneidad del recubrimiento es función de la interacción de las partículas al momento de impactarse con el sustrato (adquirir adherencia) y la interacción entre laminillas (cohesión).

Las partículas en estado fundido o semifundido reaccionan con la atmósfera durante su trayectoria y sufren cierto grado de oxidación; normalmente en la frontera entre las laminillas.

Al momento del impacto, algunas de las partículas pueden estar sin fundir dando al recubrimiento heterogeneidades y porosidad adicional al proceso. El corto tiempo de residencia de las partículas en la zona de la flama puede provocar heterogeneidades en el recubrimiento debido a una alimentación no uniforme. Uno de los puntos importantes de este proceso es la superficie del sustrato para determinar la fuerza de adherencia entre el recubrimiento y el sustrato.

1.5.1. PROYECCIÓN TÉRMICA (ROCIADO TÉRMICO) POR COMBUSTIÓN CONVENCIONAL DE POLVOS METÁLICOS.

Debido a la alta temperatura de la flama oxiacetilénica (3,000°C), el acetileno es el gas combustible más comúnmente utilizado para el rociado por flama. También se pueden utilizar otros gases combustibles como propano, hidrógeno, gas natural, etc.

En la pistola marca METCO de combustión convencional de polvo y alambre, el material de alimentación se suministra con un alimentador de polvos o un contenedor abierto por la base, dentro de un flujo de aire comprimido o gas, el cual lo suspende y entrega a la flama donde se calienta a un estado fundido o semifundido y entonces se proyecta hacia la superficie del sustrato.

La velocidad de las partículas es baja (24 - 36 m/s) y la calidad del recubrimiento es inferior a los obtenidos en otros sistemas, en lo que se refiere a porosidad y fuerza de enlace. Es posible mejorar la calidad de los recubrimientos usando aire comprimido para acelerar las partículas fundidas y reducir la temperatura en la periferia de la flama.

1.5.1.1. CONDICIONES DEL SUSTRATO.

El objetivo de la preparación del sustrato es proveer de una máxima adherencia al recubrimiento. En la práctica se tiene que remover y limpiar la superficie del sustrato que pudiera tener óxidos e imperfecciones; con el propósito de incrementar el espesor del recubrimiento se tiene que aumentar el área superficial y la rugosidad para proveer puntos de anclaje que mejoran la adherencia.

Para la eliminación de grasas, óxidos, polvo y suciedad en general, se recurre a distintos métodos físicos, químicos y mecánicos, según sea el caso. Para obtener una superficie a metal blanco, rugosa y totalmente limpia se recurre a utilizar solventes, decapantes ácidos, cepillado manual o mecánico, por granalla, flameado, etc. El método para lograr una preparación apropiada para la metalización es el chorreado; si se utiliza con perdigones ("shot-blasting") la superficie queda relativamente suave con pequeños perfiles, en cambio si se realiza con arena ("sand-blasting") o granalla angular afilada ("grit-blasting") el metal quedará rugoso, con altos desniveles (picos y valles). Actualmente se recomienda el uso de granalla.

CAPÍTULO 2

TÉCNICA EXPERIMENTAL

2.1. TÉCNICA EXPERIMENTAL.

Espectroscopia de Impedancia Electroquímica. ^(14, 16, 17 y 18) (Electrochemical Impedance Spectroscopy).

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (E.I.E.) es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión.

Experimentalmente consiste en aplicar una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. No obstante, en ciertas circunstancias, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. Así, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial y tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. A esta relación de valores de impedancia y frecuencia se le denomina "espectro de impedancias".

Estos espectros de impedancias se analizarán por medio de circuitos eléctricos que combinan diferentes elementos, tales como resistencias (R), capacitancias (C), inductancias (L), etc. Este tipo de combinaciones se les conoce como "Circuitos Eléctricos Equivalentes".

La Impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), en circuitos de corriente alterna (CA).

En circuitos de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencial (E) está dada por la ley de Ohm.

$$E = I * R$$

donde

E.- Potencial en unidades de Volts.

I.- Corriente en unidades de Amperes.

R.- Resistencia en unidades de Ohms.

Cuando se trata de una señal alterna la expresión cambia a:

$$E = I * Z$$

donde

Z.- Es la Impedancia de un sistema electroquímico con unidades de Ohms.

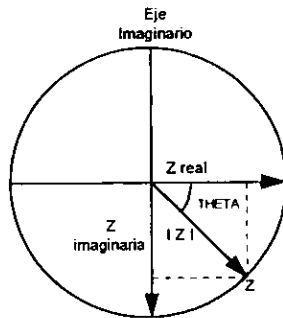


Figura 2.1. del Vector Impedancia .⁽¹⁵⁾

Esta Impedancia en un circuito de corriente alterna (CA), depende de la frecuencia de la señal que es aplicada.

La frecuencia es definida como el número de periodos por segundo y la unidad de la frecuencia es el Hertz (Hz)⁽²⁴⁾.

El desarrollo matemático de la técnica de E.I.E. permite describir la impedancia de un sistema en términos de un componente real y un componente imaginario.

La impedancia de un sistema electroquímico está definida por la magnitud $|Z|$ y ángulo de fase θ .

El vector de impedancia se expresa como:

$$Z(\omega) = Z'(\omega) + j Z''(\omega)$$

donde

$j = \sqrt{-1}$, es la unidad imaginaria

$\omega = 2\pi f$; f es la frecuencia

$$Z' = |Z| \cos \theta \quad (\text{componente real})$$

$$Z'' = |Z| \sin \theta \quad (\text{componente imaginaria})$$

La Impedancia a una frecuencia dada se puede simbolizar por medio de un punto ubicado al final del vector. Por lo tanto, las mediciones a varias frecuencias pueden ser representadas por un conjunto de puntos en el plano complejo. Esta representación se conoce como el Diagrama de Nyquist.

2.1.1. DIAGRAMA DE NYQUIST.

Es una representación gráfica de Z'' vs Z' , la cual da información acerca de la resistencia de la solución (R_s) óhmica del sistema - en esta Tesis se mencionará como Resistencia del electrolito (R_e) -, la Resistencia a la transferencia de carga (R_t o R_p) y la capacitancia de la interfase metal-electrolito (C_{dc}); éstos son de gran utilidad para determinar la velocidad de corrosión.

Los procesos sencillos de transferencia de carga dan un semicírculo sobre el eje de resistencia (eje real), mientras que para procesos más complicados presentan dos o más semicírculos. En el límite de frecuencias altas, la intersección de la

curva con el eje Z' corresponde al valor de la resistencia del electrolito o de la solución (R_e)

El límite de frecuencias bajas se presenta con la suma de la resistencia del electrolito (R_e) y la resistencia a la transferencia de carga (equivalente a la resistencia a la polarización (R_p)); es decir, el diámetro del semicírculo equivale a la resistencia a la transferencia de carga (R_t).

En el máximo de la semicircunferencia $1/\omega C_d L = R_t$, permite calcular la capacidad de la doble capa (interfase metal-electrolito), representado por la Figura 2.1.1.a.

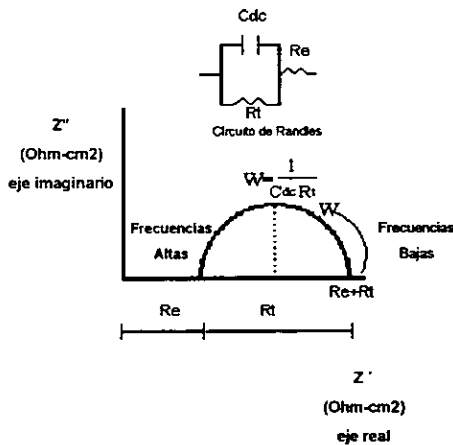


Figura 2.1.2.a. Diagrama de Nyquist de un circuito de Randles.

En la Figura 2.1.1.b. aparece una región controlada por la transferencia de carga (semicírculo) y una región controlada por difusión (línea recta de pendiente igual a 45°).

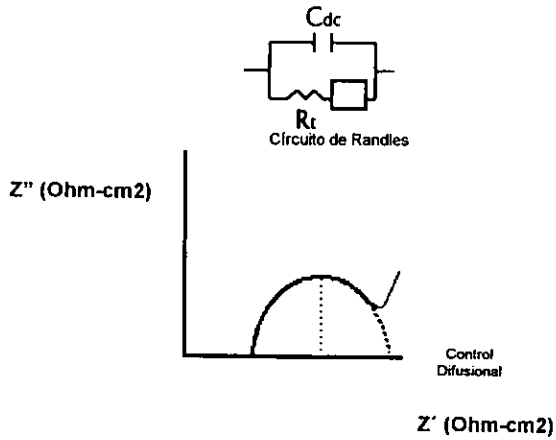


Figura 2.1.1.b. Diagrama de Nyquist controlado por Difusión.

La velocidad de una reacción electroquímica puede estar influenciada por la difusión de alguna sustancia hacia adentro o de un producto hacia fuera de la superficie del electrodo en estudio. Esta situación ocurre más a menudo cuando la superficie del electrodo está cubierta con productos de la reacción, componentes de la solución que se adsorben o recubrimientos preparados. A la impedancia para la cual dominan los efectos de difusión se le llama impedancia de Warburg.

En el circuito de Randles la resistencia a la transferencia de carga se encuentra en serie con la impedancia de Warburg.

2.1.2. CIRCUITO DE RANGLES.

Es una herramienta para determinar si la Impedancia es un componente significativo del circuito en estudio. En la parte lineal de un diagrama de Bode,

puede identificar la presencia de una Impedancia de Warburg, si su pendiente es de $\sqrt{-1}$.

Si el proceso de corrosión lleva consigo la formación de la película superficial, el circuito equivalente es más complicado e incluye una pseudo capacidad o pseudo inductancia, originada por la dependencia del recubrimiento con el potencial, mostrada en la Figura 2.1.2.

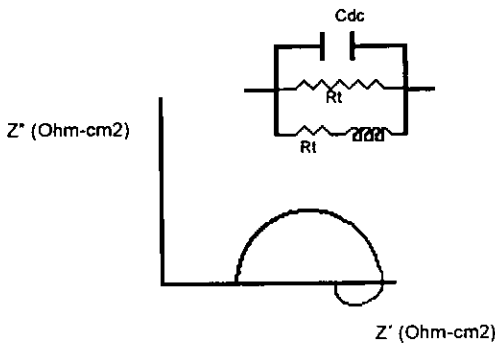


Figura 2.1.2. Diagrama de Nyquist mediante una pseudo inductancia.

2.1.3. DIAGRAMA DE BODE.

Es la variación del valor absoluto de la impedancia Z con respecto a la frecuencia, generalmente graficado en escala logarítmica. La presencia de resistencias en el circuito provocan mesetas horizontales, mientras que los capacitores arrojan pendientes negativas. Estos diagramas también ofrecen información acerca de la resistencia del electrolito (R_e) y de la resistencia a la transferencia de carga (R_t) a altas y bajas frecuencias. La extrapolación de la línea recta de pendiente menos uno (-1) con el eje $|Z|$ arroja el valor de la capacidad de la doble capa (C_{dc}). $|Z| = 1/C_{dc}$, presentada en la Figura 2.1.3.

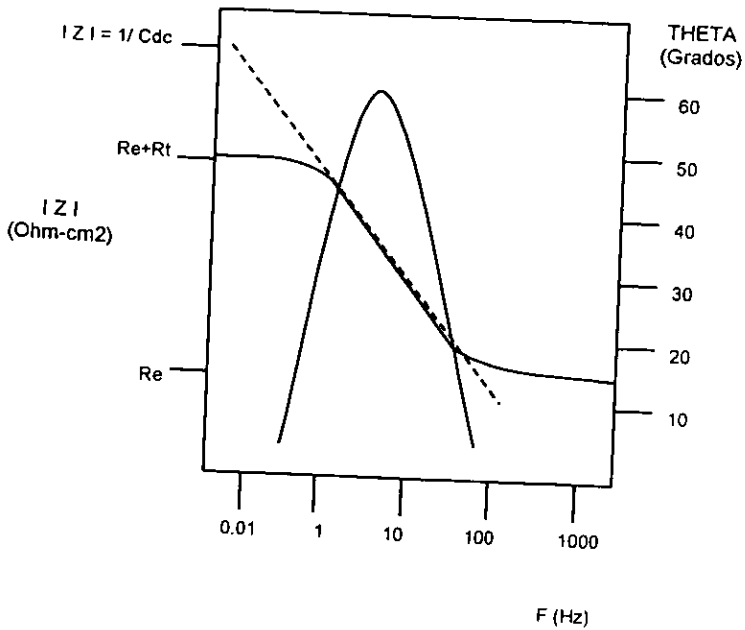


Figura 2.1.3 Diagrama de Bode.

2.2. MATERIALES.

Para la preparación de las probetas se utilizaron los siguientes materiales:

- ✖ Varillas de acero de refuerzo (acero al carbón) en posición vertical 6 y 4 en posición horizontal de 3/8 de pulgada.
- ✖ Solución de NaCl al 3% en peso.
- ✖ Grava (agregado grueso, malla 8).
- ✖ Arena (agregado fino, malla 70).
- ✖ Cemento portland puzolánico.
- ✖ Malla de acero inoxidable No. 316

Proyección Térmica:

- * Polvo de Zinc, malla 200.
- * Pistola METCO.

Celda de Humedad Relativa:

- * Recipiente de plástico.
- * Solución de LiCl sobresaturada. ⁽¹⁹⁾
- * Higrómetro.
- * Solución de LiNO₃ al 3% en peso (sal higroscópica).

Equipo utilizado durante la experimentación:

- * Electrodo Saturado de Calomelanos (ESC).
- * Multímetro.
- * Resistencia de 100Ω.

Para la técnica de E.I.S.:

- ☐ Equipo Gamry DSP conectado a una computadora con su respectivo software.

2.3. PROCEDIMIENTO.

Para el desarrollo de esta tesis, se realizó un diseño de molde para la realización de las probetas de concreto, tal como se muestra en el arreglo experimental de la Figura 2.3.a.

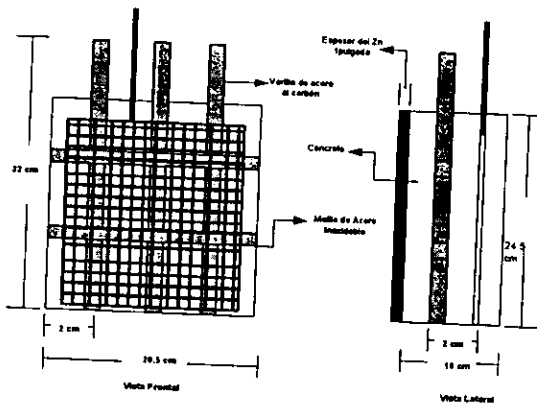


Figura 2.3.a. Dimensiones de la Probeta.

Las dimensiones de las probetas fueron de 20.5cm X 24.5cm X 10cm, con las varillas de refuerzo de 32cm de largo (varilla vertical), 20cm (varilla horizontal) amarradas entre sí formando un enrejado.

Para la preparación del concreto se utilizó una solución de NaCl al 3% en peso, agregado grueso y fino, cemento y una relación agua/cemento de aproximadamente 0.45, como indica la norma ACI 211.1 ⁽⁴⁾.

Este concreto se dejó secar durante un periodo de 3 días. Transcurrido ese tiempo se desmoldaron cada una de las probetas tratando de no maltratarlas, para evitar cuarteaduras o alguna fractura de las mismas. Se realizó el curado de éstas durante 6 días (sumergidas en agua de la llave); iniciándose desde este momento la medición del potencial de la varilla de acero.

Al concluir el tiempo de curado se dejaron secar las probetas durante un día. Se preparó una de las superficies del concreto mediante un "sandblastado" según la norma SSPC-SP10 y NACE No.2, que consiste en aplicar granalla cerámica a presión para proporcionarle un anclaje entre el recubrimiento (Zinc) y sustrato

(concreto). La proyección térmica se llevó a cabo mediante la pistola METCO bajo las siguientes condiciones: ⁽¹³⁾ un flujo de oxígeno-acetileno (50-50), distancia entre la flama y la superficie del concreto (aprox. 5 pulgadas), polvo de zinc (ánodo de sacrificio para la protección catódica) y una inclinación de los "jets" (conductores de aire) para evitar el sobrecalentamiento del sustrato, quedando finalmente como se muestra en la Figura 2.3.b.

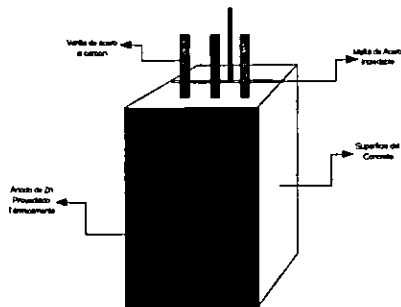


Figura 2.3.b. Probeta Terminada.

La construcción de la Celda de Humedad Relativa consta de un recipiente de plástico para la instalación de las probetas presentada en la Figura 2.3.c.

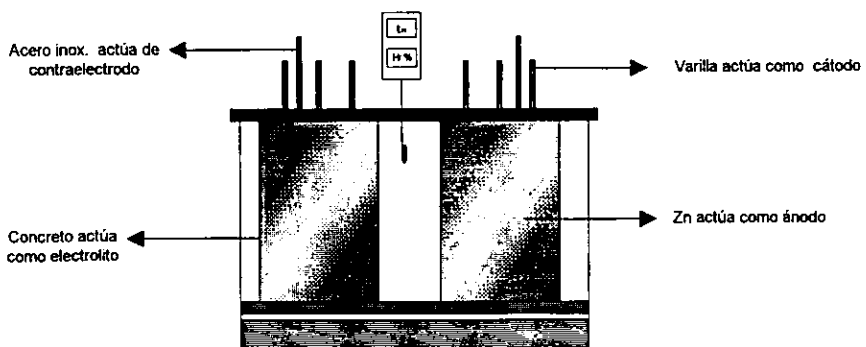


Figura 2.3.c. Celda de Humedad Relativa.

En ella se genera la humedad deseada la cual se controla con la ayuda de un higrómetro. Una vez preparada la celda se colocaron las probetas de concreto en su interior asegurándose que el recipiente estuviese perfectamente sellado, permitiendo realizar las mediciones de humedad relativa, potencial (Fe, Zn y Par Galvánico) e Impedancia (Fe, Zn y Par Galvánico) para cada probeta.

Una vez instalado el sistema con las condiciones mencionadas de humedad, las probetas se mantuvieron en observación durante 32 días, seguido por un periodo de 11 días durante los cuales se inyectó la sal Higroscópica. Finalizando este periodo se suspende la inyección de las sales y nuevamente se vuelve a inyectar las sales hasta cumplir un plazo de 60 días de experimentación dentro de la Celda de Humedad Relativa.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. RESULTADOS.

3.1.1. MEDICIÓN DE POTENCIAL CON RESPECTO AL ELECTRODO DE CALOMEL SATURADO (ECS) DURANTE LA ETAPA DEL CURADO.

| Tiempo | Día 1 | Día 2 | Día 3 | Día 4 | Día 5 | Día 6 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Probetas | Pot.(V) | Pot.(V) | Pot.(V) | Pot.(V) | Pot.(V) | Pot.(V) |
| Probeta A | -0.442 | -0.690 | -0.656 | -0.535 | -0.424 | -0.325 |
| Probeta B | -0.432 | -0.606 | -0.658 | -0.602 | -0.510 | -0.325 |

Tabla 3.1.1. Valores de potencial del Fe medidos durante la etapa de curado.

3.2. MEDICIÓN DE POTENCIAL DE LAS PROBETAS A Y B CON RESPECTO AL ECS, UNA VEZ ADHERIDO EL ZINC POR MEDIO DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO.

| Tiempo | Potencial | Probeta A | Probeta B | Potencial | Probeta A | Probeta B |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Día | Hierro | (V) | (V) | Zinc | (V) | (V) |
| Día 7 | Pot. Fe | -0.358 | -0.445 | Pot. Zn | -0.370 | -0.530 |
| Día 8 | Pot. Fe | -0.425 | -0.375 | Pot. Zn | -0.419 | -0.553 |
| Día 9 | Pot. Fe | -0.493 | -0.358 | Pot. Zn | -0.501 | -0.375 |
| Día 10 | Pot. Fe | -0.413 | -0.323 | Pot. Zn | -0.873 | -0.337 |
| Día 11 | Pot. Fe | -0.539 | -0.342 | Pot. Zn | -0.566 | -0.369 |
| Día 12 | Pot. Fe | -0.503 | -0.306 | Pot. Zn | -0.528 | -0.342 |
| Día 13 | Pot. Fe | -0.478 | -0.290 | Pot. Zn | -0.482 | -0.350 |
| Día 14 | Pot. Fe | -0.449 | -0.323 | Pot. Zn | -0.447 | -0.400 |
| Día 15 | Pot. Fe | -0.405 | -0.295 | Pot. Zn | -0.408 | -0.368 |

Tabla 3.2.a. Valores de potencial del Zn medidos durante la etapa de rociado térmico.

3.3. MEDICION DE POTENCIALES DEL PAR GALVÁNICO CON RESPECTO AL ECS.

| Tiempo | Potencial | Probeta A | Probeta B |
|--------|-------------|-----------|-----------|
| Día | Fe- Zn | (V) | (V) |
| Día 7 | Pot. Par G. | -0.325 | -0.477 |
| Día 8 | Pot. Par G. | -0.409 | -0.451 |
| Día 9 | Pot. Par G. | -0.593 | -0.368 |
| Día 10 | Pot. Par G. | -0.805 | -0.440 |
| Día 11 | Pot. Par G. | -0.591 | -0.342 |
| Día 12 | Pot. Par G. | -0.516 | -0.302 |
| Día 13 | Pot. Par G. | -0.511 | -0.296 |
| Día 14 | Pot. Par G. | -0.449 | -0.330 |
| Día 15 | Pot. Par G. | -0.409 | -0.298 |

Tabla 3.3.b. Valores de potencial medidos del Par Galvánico.

3.4. MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE LAS PROBETAS A Y B CON RESPECTO AL ECS EN LA CELDA DE HUMEDAD RELATIVA.

| Tiempo (Días) | Pot. Fe (V) | Probeta A (V) | Probeta B (V) | Tiempo (Días) | Pot. Fe (V) | Probeta A (V) | Probeta B (V) |
|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|---------------|
| 16 | Pot. Fe | -0.743 | -0.370 | 46 | Pot. Fe | -0.723 | -0.475 |
| 17 | Pot. Fe | -0.728 | -0.378 | 47 | Pot. Fe | -0.702 | -0.474 |
| 18 | Pot. Fe | -0.697 | -0.392 | 48 | Pot. Fe | -0.696 | -0.473 |
| 19 | Pot. Fe | -0.716 | -0.402 | 49 | Pot. Fe | -0.710 | -0.477 |
| 20 | Pot. Fe | -0.766 | -0.406 | 50 | Pot. Fe | -0.697 | -0.469 |
| 21 | Pot. Fe | -0.760 | -0.418 | 51 | Pot. Fe | -0.715 | -0.480 |
| 22 | Pot. Fe | -0.722 | -0.428 | 52 | Pot. Fe | -0.698 | -0.480 |
| 23 | Pot. Fe | -0.717 | -0.438 | 53 | Pot. Fe | -0.688 | -0.468 |
| 24 | Pot. Fe | -0.714 | -0.435 | 54 | Pot. Fe | -0.673 | -0.468 |
| 25 | Pot. Fe | -0.688 | -0.432 | 55 | Pot. Fe | -0.714 | -0.461 |
| 26 | Pot. Fe | -0.649 | -0.427 | 56 | Pot. Fe | -0.649 | -0.455 |
| 27 | Pot. Fe | -0.671 | -0.431 | 57 | Pot. Fe | -0.695 | -0.445 |
| 28 | Pot. Fe | -0.653 | -0.429 | 58 | Pot. Fe | -0.648 | -0.433 |
| 29 | Pot. Fe | -0.648 | -0.438 | 59 | Pot. Fe | -0.659 | -0.426 |
| 30 | Pot. Fe | -0.657 | -0.442 | 60 | Pot. Fe | -0.685 | -0.420 |
| 31 | Pot. Fe | -0.635 | -0.443 | 61 | Pot. Fe | -0.651 | -0.419 |
| 32 | Pot. Fe | -0.656 | -0.442 | 62 | Pot. Fe | -0.631 | -0.415 |
| 33 | Pot. Fe | -0.651 | -0.443 | 63 | Pot. Fe | -0.646 | -0.411 |
| 34 | Pot. Fe | -0.649 | -0.444 | 64 | Pot. Fe | -0.663 | -0.408 |
| 35 | Pot. Fe | -0.652 | -0.449 | 65 | Pot. Fe | -0.659 | -0.404 |
| 36 | Pot. Fe | -0.657 | -0.455 | 66 | Pot. Fe | -0.610 | -0.402 |
| 37 | Pot. Fe | -0.598 | -0.455 | 67 | Pot. Fe | -0.647 | - |
| 38 | Pot. Fe | -0.665 | -0.465 | 68 | Pot. Fe | -0.592 | - |
| 39 | Pot. Fe | -0.651 | -0.464 | 69 | Pot. Fe | -0.616 | - |
| 40 | Pot. Fe | -0.668 | -0.463 | 70 | Pot. Fe | -0.552 | - |
| 41 | Pot. Fe | -0.698 | -0.463 | 71 | Pot. Fe | -0.563 | - |
| 42 | Pot. Fe | -0.712 | -0.465 | 72 | Pot. Fe | -0.571 | - |
| 43 | Pot. Fe | -0.724 | -0.470 | 73 | Pot. Fe | -0.548 | - |
| 44 | Pot. Fe | -0.697 | -0.477 | 74 | Pot. Fe | -0.549 | - |
| 45 | Pot. Fe | -0.701 | -0.472 | 75 | Pot. Fe | -0.538 | - |

Tabla 3.4.a. Valores de Potencial del Fe medidos en la Celda de Humedad Relativa.

| Tiempo (Días) | Pot. Zn (V) | Probeta A (V) | Probeta B (V) | Tiempo (Días) | Pot. Zn (V) | Probeta B (V) |
|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| 16 | Pot. Zn | -0.743 | -0.613 | 46 | Pot. Zn | -0.493 |
| 17 | Pot. Zn | -0.731 | -0.711 | 47 | Pot. Zn | -0.495 |
| 18 | Pot. Zn | -0.698 | -0.729 | 48 | Pot. Zn | -0.493 |
| 19 | Pot. Zn | -0.717 | -0.707 | 49 | Pot. Zn | -0.529 |
| 20 | Pot. Zn | -0.788 | -0.644 | 50 | Pot. Zn | -0.517 |
| 21 | Pot. Zn | -0.760 | -0.641 | 51 | Pot. Zn | -0.539 |
| 22 | Pot. Zn | -0.723 | -0.620 | 52 | Pot. Zn | -0.543 |
| 23 | Pot. Zn | -0.719 | -0.602 | 53 | Pot. Zn | -0.542 |
| 24 | Pot. Zn | -0.713 | -0.582 | 54 | Pot. Zn | -0.546 |
| 25 | Pot. Zn | -0.687 | -0.565 | 55 | Pot. Zn | -0.549 |
| 26 | Pot. Zn | -0.649 | -0.547 | 56 | Pot. Zn | -0.548 |
| 27 | Pot. Zn | -0.671 | -0.537 | 57 | Pot. Zn | -0.544 |
| 28 | Pot. Zn | -0.653 | -0.526 | 58 | Pot. Zn | -0.537 |
| 29 | Pot. Zn | -0.648 | -0.527 | 59 | Pot. Zn | -0.534 |
| 30 | Pot. Zn | -0.658 | -0.524 | 60 | Pot. Zn | -0.523 |
| 31 | Pot. Zn | -0.634 | -0.519 | 61 | Pot. Zn | -0.516 |
| 32 | Pot. Zn | -0.657 | -0.515 | 62 | Pot. Zn | -0.508 |
| 33 | Pot. Zn | -0.650 | -0.509 | 63 | Pot. Zn | -0.501 |
| 34 | Pot. Zn | -0.647 | -0.506 | 64 | Pot. Zn | -0.449 |
| 35 | Pot. Zn | -0.652 | -0.507 | 65 | Pot. Zn | -0.495 |
| 36 | Pot. Zn | - | -0.455 | 66 | Pot. Zn | -0.489 |
| 37 | Pot. Zn | - | -0.460 | 67 | Pot. Zn | - |
| 38 | Pot. Zn | - | -0.475 | 68 | Pot. Zn | - |
| 39 | Pot. Zn | - | -0.476 | 69 | Pot. Zn | - |
| 40 | Pot. Zn | - | -0.478 | 70 | Pot. Zn | - |
| 41 | Pot. Zn | - | -0.478 | 71 | Pot. Zn | - |
| 42 | Pot. Zn | - | -0.479 | 72 | Pot. Zn | - |
| 43 | Pot. Zn | - | -0.484 | 73 | Pot. Zn | - |
| 44 | Pot. Zn | - | -0.493 | 74 | Pot. Zn | - |
| 45 | Pot. Zn | - | -0.489 | 75 | Pot. Zn | - |

Tabla 3.4.b. Valores de Potencial del Zn medidos en la Celda de Humedad Relativa.

| Tiempo (Días) | Pot. Fe-Zn (V) | Probeta A (V) | Probeta B (V) | Tiempo (Días) | Pot. Fe Zn (V) | Probeta B (V) |
|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 16 | Pot. Par G. | -0.738 | -0.429 | 46 | Pot. Par G. | -0.479 |
| 17 | Pot. Par G. | -0.732 | -0.473 | 47 | Pot. Par G. | -0.480 |
| 18 | Pot. Par G. | -0.700 | -0.494 | 48 | Pot. Par G. | -0.478 |
| 19 | Pot. Par G. | -0.716 | -0.485 | 49 | Pot. Par G. | -0.489 |
| 20 | Pot. Par G. | -0.797 | -0.490 | 50 | Pot. Par G. | -0.481 |
| 21 | Pot. Par G. | -0.764 | -0.492 | 51 | Pot. Par G. | -0.498 |
| 22 | Pot. Par G. | -0.723 | -0.490 | 52 | Pot. Par G. | -0.497 |
| 23 | Pot. Par G. | -0.719 | -0.494 | 53 | Pot. Par G. | -0.489 |
| 24 | Pot. Par G. | -0.713 | -0.486 | 54 | Pot. Par G. | -0.492 |
| 25 | Pot. Par G. | -0.688 | -0.470 | 55 | Pot. Par G. | -0.486 |
| 26 | Pot. Par G. | -0.649 | -0.465 | 56 | Pot. Par G. | -0.479 |
| 27 | Pot. Par G. | -0.671 | -0.463 | 57 | Pot. Par G. | -0.472 |
| 28 | Pot. Par G. | -0.653 | -0.460 | 58 | Pot. Par G. | -0.460 |
| 29 | Pot. Par G. | -0.649 | -0.464 | 59 | Pot. Par G. | -0.454 |
| 30 | Pot. Par G. | -0.659 | -0.465 | 60 | Pot. Par G. | -0.447 |
| 31 | Pot. Par G. | -0.636 | -0.464 | 61 | Pot. Par G. | -0.442 |
| 32 | Pot. Par G. | -0.657 | -0.462 | 62 | Pot. Par G. | -0.443 |
| 33 | Pot. Par G. | -0.651 | -0.463 | 63 | Pot. Par G. | -0.435 |
| 34 | Pot. Par G. | -0.648 | -0.461 | 64 | Pot. Par G. | -0.429 |
| 35 | Pot. Par G. | -0.653 | -0.464 | 65 | Pot. Par G. | -0.425 |
| 36 | Pot. Par G. | - | -0.470 | 66 | Pot. Par G. | -0.421 |
| 37 | Pot. Par G. | - | -0.464 | 67 | Pot. Par G. | - |
| 38 | Pot. Par G. | - | -0.467 | 68 | Pot. Par G. | - |
| 39 | Pot. Par G. | - | -0.467 | 69 | Pot. Par G. | - |
| 40 | Pot. Par G. | - | -0.467 | 70 | Pot. Par G. | - |
| 41 | Pot. Par G. | - | -0.467 | 71 | Pot. Par G. | - |
| 42 | Pot. Par G. | - | -0.467 | 72 | Pot. Par G. | - |
| 43 | Pot. Par G. | - | -0.464 | 73 | Pot. Par G. | - |
| 44 | Pot. Par G. | - | -0.480 | 74 | Pot. Par G. | - |
| 45 | Pot. Par G. | - | -0.476 | 75 | Pot. Par G. | - |

Tabla 3.4.c. Valores de Potencial del Fe-Zn medidos en la Celda de Humedad Relativa.

3.5. RESULTADOS DE LA VARIACIÓN DEL POTENCIAL DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN.

POTENCIAL DEL Fe vs ECS

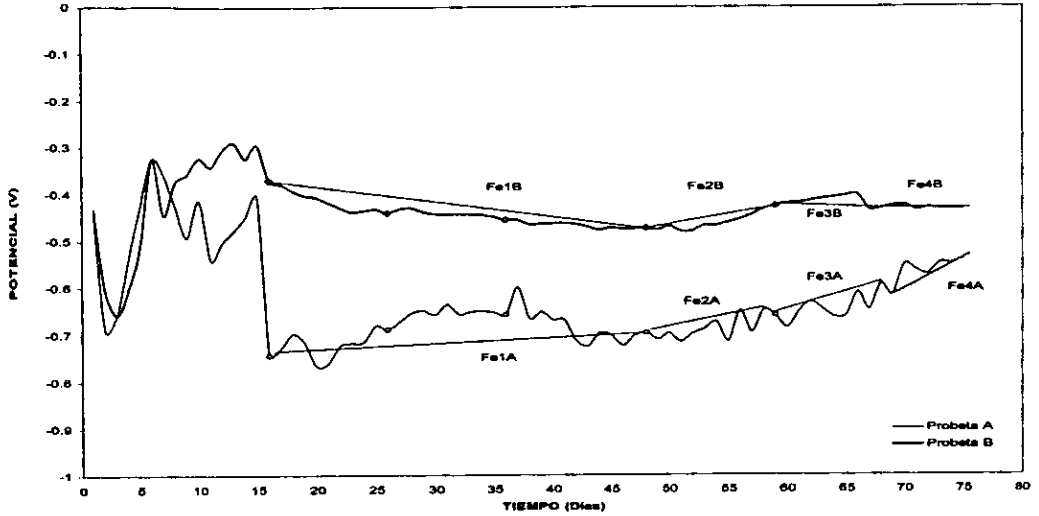


Figura 3.6.a. Comportamiento de Potencial del Fe.

POTENCIAL DEL Zn vs ECS

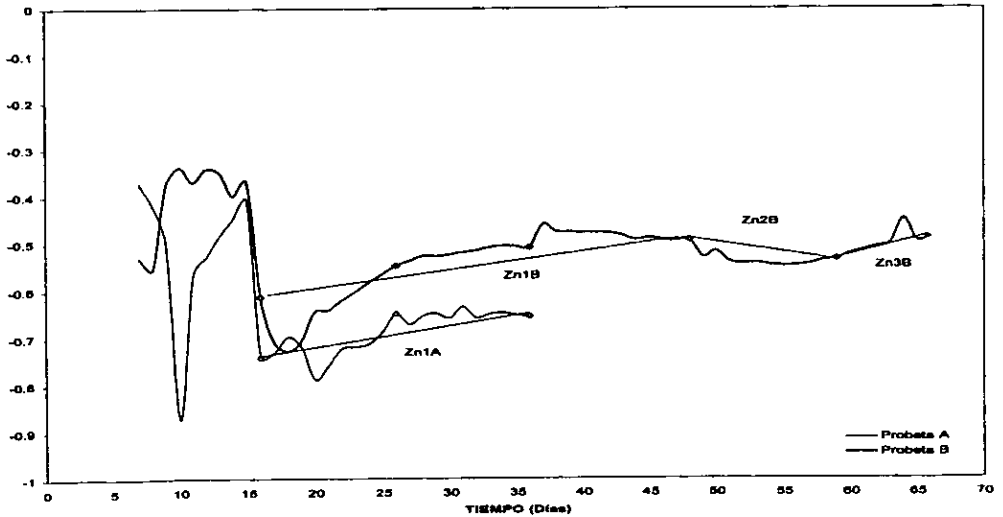


Figura 3.6.b. Comportamiento de Potencial del Zn.

POTENCIAL DEL PAR GALVÁNICO vs ECS

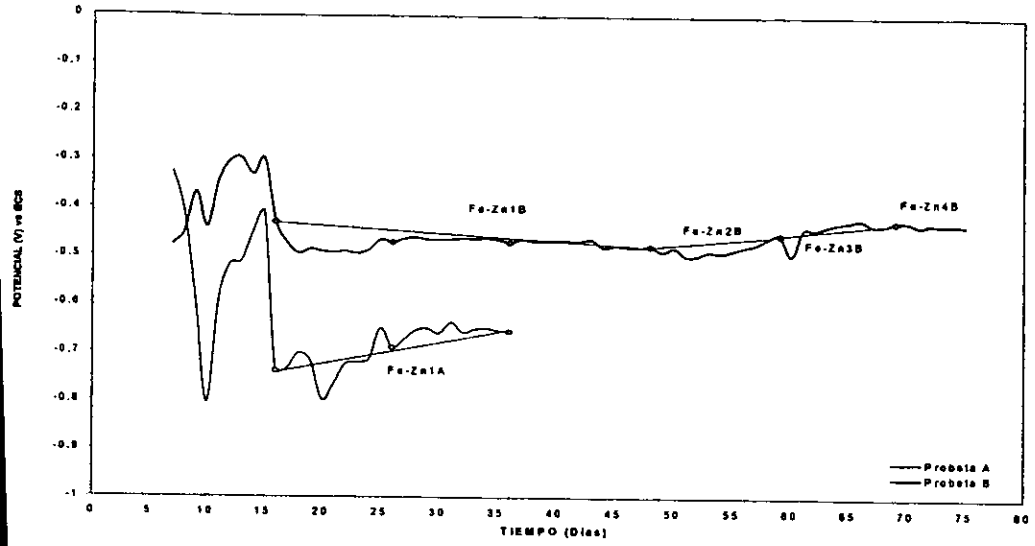


Figura 3.6.c. Comportamiento de Potencial del Par Galvánico.

3.6. RESULTADOS DE LOS DIAGRAMAS OBTENIDOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.

A partir del día 16 en la técnica de E.I.E. se cuenta como día 1 hasta terminar la experimentación .

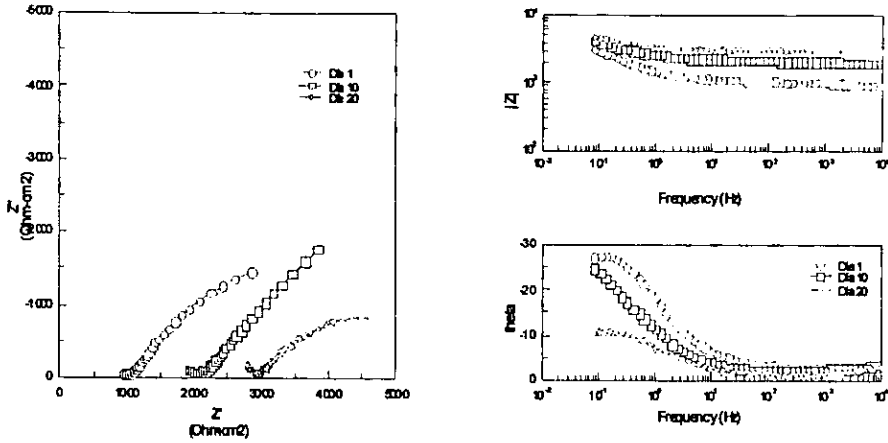


Figura 3.7.a. Diagrama de impedancia para el Fe de la Probeta A para los días 1,10 y 20.

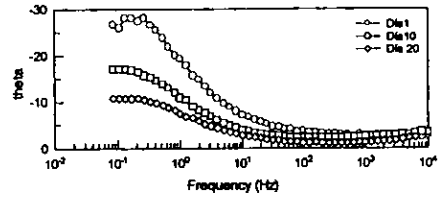
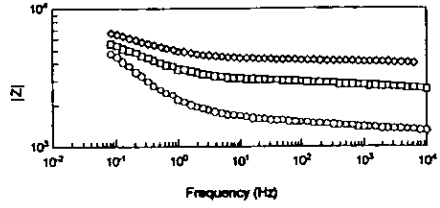
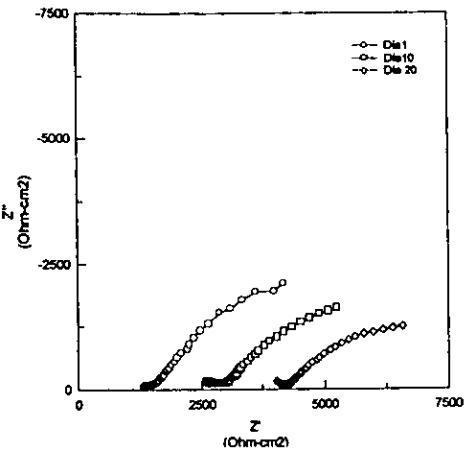


Figura 3.7.b. Diagramas de Impedancia para el Zn de la Probeta A para los días 1, 10 y 20.

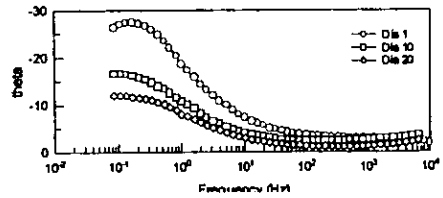
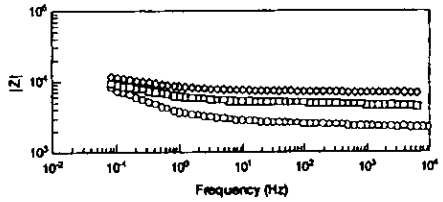
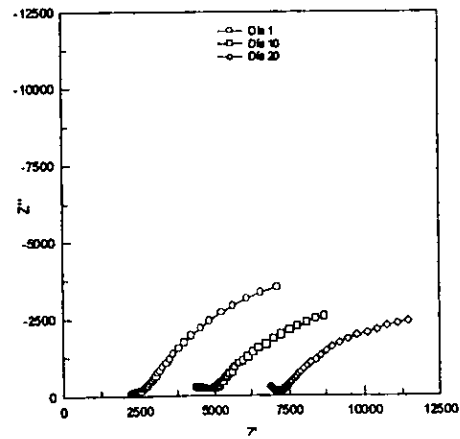


Figura 3.7.c. Diagramas de Impedancia para el Par Galvánico de la Probeta A para los días 1, 10 y 20.

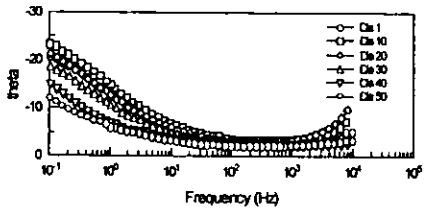
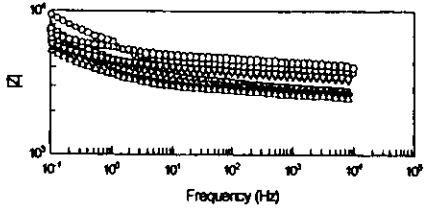
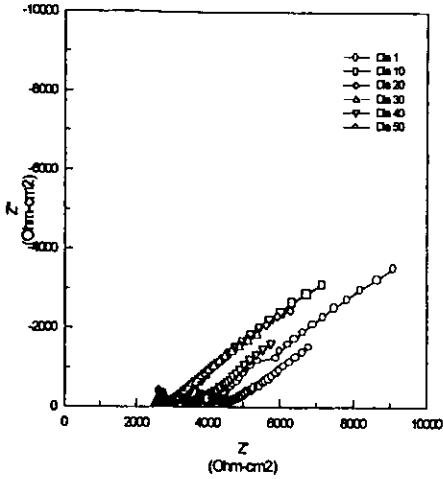


Figura 3.7.d. Diagramas de Impedancia para el Fe Probeta B para los días 1, 10, 20, 30, 40 y 50.

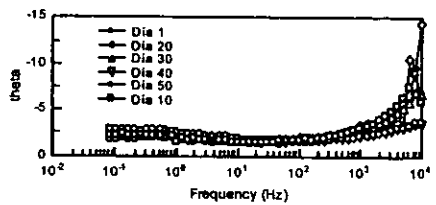
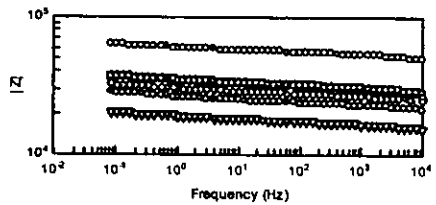
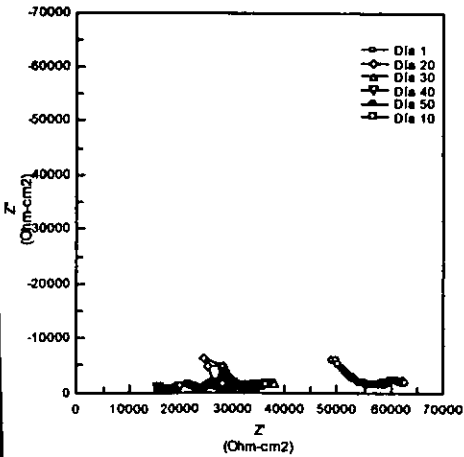
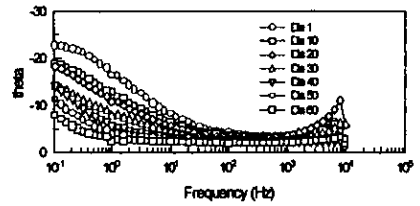
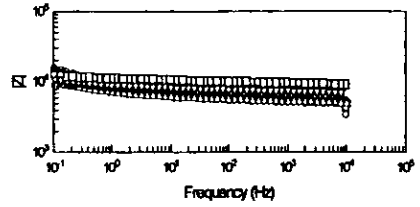
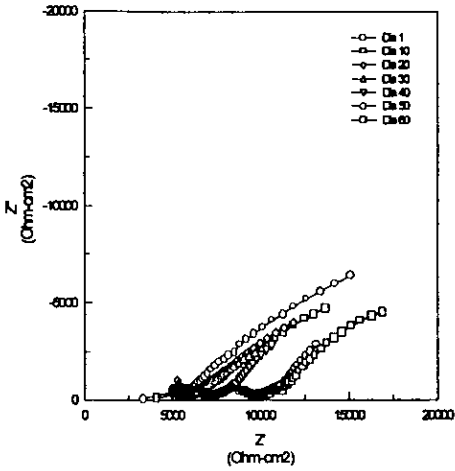


Figura 3.7.e. Diagramas de Impedancia para el Zn Probeta B para los días 1, 10, 20, 30, 40, 50.



3.7.f. Diagramas de Impedancia para el Par Galvánico Probeta B para los días 1, 10, 20, 30, 40, 50 y 60.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LOS POTENCIALES DE LAS PROBETAS A Y B.

Estos resultados se presentan en las Figuras 3.5.a, 3.5.b. y 3.5.c.

4.1.1. ETAPA DE CURADO.

En general, la Probeta A presenta un valor de potencial de $-0.442V$ para el acero (Fe) y la probeta B un valor de $-0.432V$ a partir de una etapa inicial comprendida del 1ero. al 6o. día, volviéndose más activas al transcurrir el tiempo y posteriormente, los potenciales tienden a ser menos negativos; es decir, muestran una tendencia hacia la pasivación.

4.1.2. ETAPA DE APLICACIÓN DEL Zn POR ROCIADO TÉRMICO.

En el 7o. día se comenzó y terminó el proceso de rociado térmico del Zinc de las Probetas A y B, reiniciando la medición del potencial del Fe y comenzando la medición del Zn y el Par Galvánico concluyendo hasta el día 15. Figura 3.5.b.

4.1.2.1 VARIACIÓN DEL POTENCIAL DEL HIERRO (Fe).

Como se puede observar en la Figura 3.5.a., del 7o. al 15o. día, las Probetas A y B presentaron comportamientos contrarios. En la Probeta A en términos de la serie Galvánica, se encuentra en un estado activo presentando una tendencia con el tiempo hacia potenciales menos negativos en cambio, la Probeta B siguió con una tendencia hacia potenciales más negativos. El Diagrama de Pourbaix del Sistema Fe-H₂O puede ayudar a ubicar los potenciales, haciendo unos cálculos para convertir los datos de la escala de ECS a Electrodo Normal de

Hidrógeno ($\text{ENH}=\text{ECS}+0.244$) encontrándose éstos en su mayoría en la zona de pasivación para los dos casos, ver Figura 4.1.2.1.

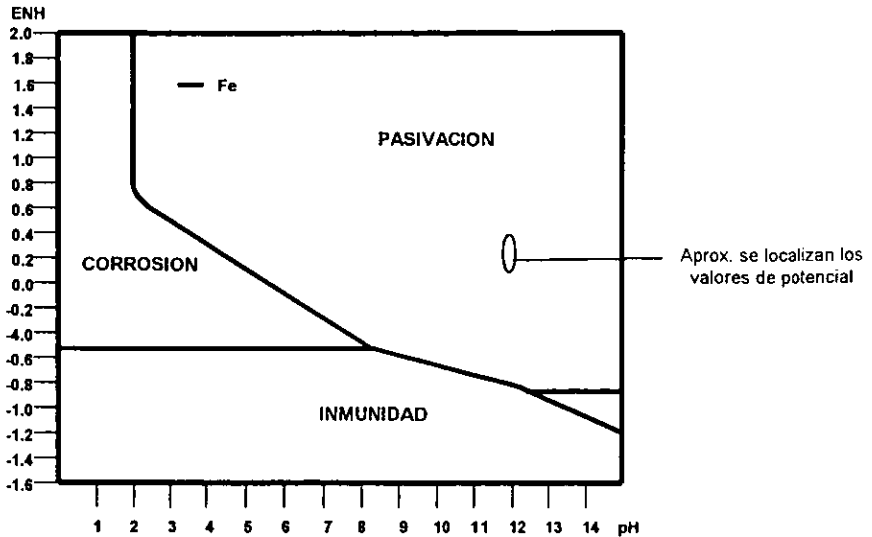


Figura 4.1.2.1. Diagrama de Pourbaix para el Fe.⁽²⁰⁾

4.1.2.2. VARIACIÓN DEL POTENCIAL DEL ZINC (Zn) Y PAR GALVÁNICO (Fe-Zn).

Observando las Figuras 3.5.b. y 3.5.c. para el Zn de los días 7 al 15, las Probetas A y B siguieron un comportamiento contrario.

Los potenciales del Zn de la Probeta A presentan una tendencia inicial hacia valores más positivos en este periodo y el Par Galvánico de esta misma probeta siguió con un comportamiento similar. En el Diagrama de Pourbaix para el Zinc de la Figura 4.1.2.2.a., estos valores de potencial se encuentran en la zona

de corrosión y para el caso del Par Galvánico Figura 4.1.2.2.b. en la zona de no protección.

Respecto a la Probeta B, al haber transcurrido dos días los potenciales del Zn se vuelven más positivos o se pasivan ligeramente; esto ocurre también para el caso del Par Galvánico. En la misma Figura 4.1.2.2.a. del Diagrama de Pourbaix se localizan los potenciales en la zona de corrosión para el Zn y en la zona de no protección para el Par Galvánico Figura 4.1.2.2.b.

Los valores de potencial para las Probetas A y B coinciden en un mismo rango aproximado en el Diagrama de Pourbaix del Fe, Zn y Fe-Zn.

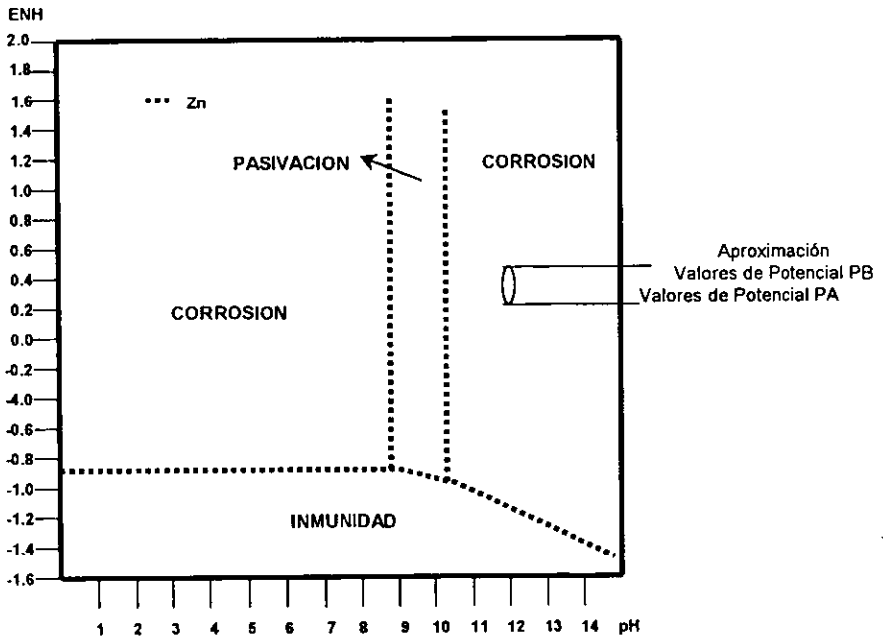


Figura 4.1.2.2.a. Diagrama de Pourbaix del Zn.⁽²⁰⁾

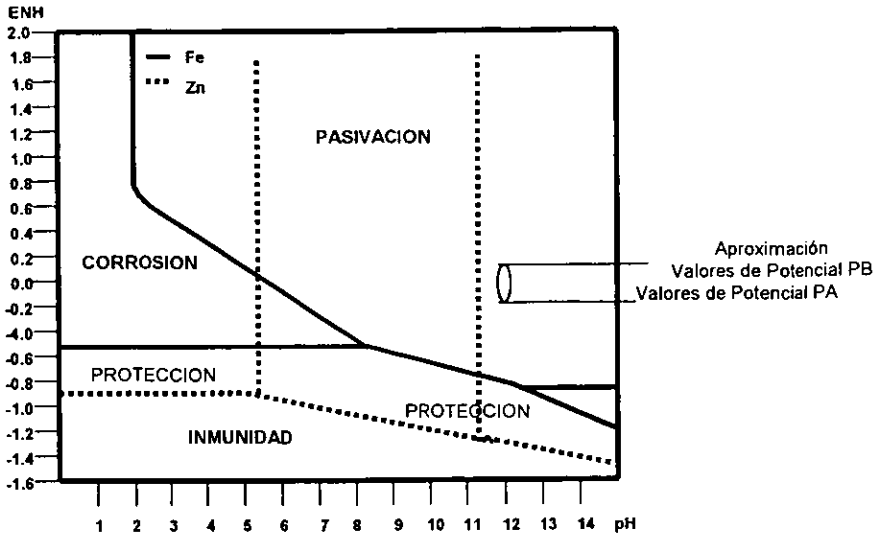


Figura 4.1.2.2.b. Diagrama de Pourbaix de Fe-Zn. ⁽²⁰⁾

4.1.3. ETAPA EN LA CELDA DE HUMEDAD RELATIVA.

La Humedad Relativa se mantuvo de 50% durante la experimentación.

4.1.3.1. PROBETA A.

4.1.3.1.a. POTENCIAL DEL Fe.

En la Figura 3.5.a. se puede observar el comportamiento del potencial de la armadura metálica del Fe, el cual fue seguido desde la denominada "Etapa de Comportamiento" comprendido en los días 16 al día 47, en esta etapa se observan 3 intervalos de 11 días cada uno, "Inyección de las Sales Higroscópicas" de los días 48 al 58, "Suspensión de las Sales" en los días 59 al 68 y el "Reinicio de la inyección de las Sales" que van del día 69 al día 75. En este periodo, en el día 67 se conectó permanentemente el Fe con el Zn para crear el Par Galvánico hasta finalizar el experimento.

Los valores de potencial del Fe para esta probeta con respecto al Electrodo de Calomel Saturado se registraron entre -0.743V al comienzo y de -0.539V al concluir la experimentación.

En esta misma Figura, el acero permaneció siempre en estado activo de acuerdo a la Tabla 4.1.3.1.⁽⁵⁾ mostrando una tendencia a ser menos negativo después de terminada la experimentación, lo que sugiere que se presentó un 90% de corrosión según lo marca la norma ASTM C876-86. (Ver Tabla 1.2.2.1.) en toda la experimentación.

| | |
|------------------------|---|
| Estado pasivo | 0.200 V y -0.700 V vs ECS con suficiente O_2 $-0.100\text{ V a } -0.200\text{ V vs ECS}$ |
| Corrosión por picadura | $-0.200\text{ V y } -0.500\text{ V vs ECS}$ |
| Corrosión | $-0.450\text{ V a } -0.600\text{ V vs ECS}$ |
| Estado activo | O_2 limitado $-0.850\text{ V a } -1.000\text{ V vs ECS}$ |

Tabla referida 4.1.3.1. Potencial de Corrosión del Fe con respecto al ECS.

En la "Etapa de Comportamiento" esta Probeta presenta valores de potencial comprendidos entre -0.743V hasta -0.702V con respecto ECS. La tendencia general es hacia valores más positivos como lo marca la línea de tendencia "Fe1A" de la misma Figura y encontrándose en un intervalo entre Estado activo y de Corrosión, como se ilustra en la Tabla 4.1.3.1.

En esta Figura se observan los potenciales de los días 16 de -0.743V , día 26 de -0.688V y día 36 de -0.657V marcados en la gráfica.

Este comportamiento podría explicar alguna de las siguientes posibilidades: la depolarización catódica de la relación del oxígeno o por la polarización anódica del Fe, lo cual se puede observar a través de un Diagrama de Evans- Tafel, Figuras

4.1.3.1.c. POTENCIAL DEL PAR GALVÁNICO.

Para el Par Galvánico su comportamiento es similar al del Zn. Sus potenciales se encuentran en un intervalo de -0.738V a -0.655V con respecto al ECS y teniendo una línea de tendencia positiva. Haciendo referencia con el Diagrama de Pourbaix de la Figura 4.1.2.2.b., se localizan en la zona de no protección. Al perder contacto con el Zn no se puede seguir la medición del Par Galvánico y por lo tanto se suspendió. Esto se puede observar en la Figura 3.5.c.

4.1.3.2. PROBETA B.

4.1.3.2.a. POTENCIAL DEL Fe.

Esta Probeta presentó valores de potencial al inicio de la experimentación de -0.370V y al concluir de -0.433V con respecto al ECS, con una ligera tendencia a mostrar potenciales más estables. De acuerdo a la Tabla 4.1.3.1. estos potenciales corresponden a la posibilidad de ser Corrosión por picadura.; esto corresponde a un 90% de probabilidad de que se presente la Corrosión, para lo cual el potencial debe ser mayor a -0.270V según lo marca la Norma ASTM C876-86 de la Tabla 1.2.2.1.

Los potenciales del Fe en la denominada "Etapa de Comportamiento" de la Figura 3.5.a. se encuentran en un intervalo de -0.370V a -0.474V con respecto ECS, con los días 16 -0.370V , día 26 -0.440V y día 36 -0.455V se observa una tendencia hacia potenciales más negativos (ver línea "Fe1B"). En esta etapa lo que se puede observar es que se presentan cambios notorios en el potencial cuando se introduce a la Celda de Humedad Relativa, debido que se presenta la

retiene el agua y por consiguiente el oxígeno disuelto en la misma, lo cual podría facilitar la reacción cátodica del oxígeno, ya sea por la depolarización de la reacción cátodica o por la polarización de la reacción anódica del Fe, como se ilustra en las Figura 4.13.1.a.I. y 4.1.3.1.a.II.

Cuando se llega a la etapa de "Suspensión de las Sales", los potenciales del Fe toman valores que van de -0.659V a -0.592V con respecto ECS, como se ilustra en la Tabla 4.1.4.1. y por la línea de tendencia "Fe3A" que se vuelve más positiva; lo que podría explicarse como debido a una polarización anódica del Fe.

En la etapa "Reinicio de la Inyección de las Sales" se puede observar en esta misma Figura que el potencial de corrosión se encuentra en el intervalo de potencial con valores comprendidos entre -0.616V a -0.538V con respecto ECS como se ilustra en la Tabla 4.1.4.1. y muestra una clara tendencia hacia potenciales menos negativos denotado por la línea de tendencia "Fe4A" positiva.

4.1.3.1.b. POTENCIAL DE Zn.

En la Figura 3.5.b. los valores de potencial del Zn se ubican en un periodo del día 16 al día 21. Este último día se perdió el contacto eléctrico con el Zn. Los potenciales de corrosión se encuentran en un intervalo de -0.743V a -0.655V con respecto al ECS y presentan una línea de tendencia positiva, denotada por "Zn1A". Situando estos valores de potencial en un Diagrama de Pourbaix convirtiendo los valores de ECS a ENH, como ya se mencionó anteriormente, éstos se ubican en la zona de corrosión de la Figura 4.1.2.2.a.

posibilidad de que el concreto sea menos poroso o con un grado de porosidad bajo.

Cuando se pasa a la siguiente etapa de "Inyección de Sales Higroscópicas" la línea de tendencia denominada como "Fe2B" es positiva, estos valores de potencial son más positivos y van desde $-0.473V$ a $-0.433V$ con respecto al ECS.

En la siguiente etapa de "Suspensión de las Sales" los potenciales siguen una tendencia hacia valores ligeramente más negativos que los anteriores, sus valores van de $-0.426V$ a $-0.402V$ con respecto ECS, denotada por la línea de tendencia "Fe3B". Para el día 52 se conecta permanentemente el Fe con el Zn para formar el Par Galvánico lo cual se manifiesta en la Figura 3.5.a. en un cambio notorio de potencial. Para una mejor visualización los valores cambian de color en dicha Figura.

Posteriormente se llega a la última etapa de "Reinicio de la Inyección de las Sales" los valores de potencial se encuentran entre $-0.426V$ a $-0.433V$ con respecto al ECS mostrando una estabilización, denotada por la línea de tendencia llamada "Fe4B". En ese momento es cuando se encuentra conectado el Par Galvánico, marcada por otro color en la Figura.

4.1.3.2.b. POTENCIAL DEL Zn.

En lo que se refiere al potencial del Zn, ver Figura 3.5.b., comienza con valores de $-0.613V$ y finaliza con valores de $-0.489V$. Para el día 52 se conecta el Par Galvánico. Se presenta una clara tendencia hacia valores de potencial más

positivos, mientras permanece en la celda de Humedad Relativa controlada con tendencia a descender al pasar el tiempo.

Situando estos valores de potencial en el Diagrama de Pourbaix de la Figura 4.1.2.2.a. para dar un panorama o una idea general en donde puede estar localizado el Zn, éste se localiza en la zona de corrosión. Una manera de corroborar que el Zn se está corroyendo es por la aparición de cristales adheridos al Zn como el óxido de Zinc (ZnO). En el Apéndice 3 se muestran los Diafractogramas de los análisis de los productos de corrosión al igual que los compuestos, efectuados por la técnica de Rayos X.

Para la "Etapa de Comportamiento" la introducción de las probetas en la Celda de Humedad Relativa se refleja durante los primeros días por una ligera activación, los potenciales que presenta van desde $-0.613V$ a $-0.474V$ con respecto ECS, observando los potenciales los días 16 $-0.613V$, día 26 $-0.547V$ y día $-0.509V$ la línea de tendencia es positiva, marcada por "Zn1B".

Para la etapa de "Inyección de Sales Higroscópicas" se manifiesta una ligera activación en el valor de potencial denotado por la línea de tendencia negativa "Zn2B" y por sus valores de potencial que se encuentran entre $-0.493V$ a $-0.537V$ con respecto ECS.

Para la etapa de "Suspensión de las Sales" los valores de potencial se registran del día 59 de $-0.534V$ hasta el día 66 de $-0.489V$ con respecto ECS que cambia hacia valores menos negativos y con una clara tendencia positiva denotada por la línea "Zn3B".

4.1.3.2.c. POTENCIAL DEL PAR GALVÁNICO.

Los potenciales del Par Galvánico son semejantes al comportamiento del Fe ya mencionado anteriormente. En general y tal como se observa en la Figura 3.5.c. el sistema presenta una gran sensibilidad a los cambios. Una muestra de ello es el momento cuando se introduce la Probeta a la Celda de Humedad Relativa cambiando el potencial del Fe-Zn el cual se vuelve un poco menos activo que en la Probeta A y al transcurrir el tiempo de experimentación tiende a estabilizar los valores de potencial hacia valores menos negativos.

Los puntos a destacar para las diferentes etapas en las que se encuentra el sistema son: para la "Etapa de Comportamiento" los días 16 con valor de potencial de $-0.429V$, día 26 $-0.470V$ y día 36 $-0.470V$; "Inyección de las Sales higroscópicas" día 48 $-0.478V$; "Suspensión de las Sales" día 59 $-0.454V$ y el "Reinicio de la inyección de las Sales" día 69 $-0.426V$.

De acuerdo al criterio que establece la NACE en la sección 1.3.4. antes mencionada, no se alcanzan las recomendaciones estipuladas para la Protección Catódica cuando se hace la conexión del Fe con el Zn, debido a los potenciales registrados durante la experimentación y por la tendencia que presenta en dicha Figura.

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA PARA LAS PROBETAS A Y B.

Todos los resultados fueron validados por la Transformada de Kramers-Kronig.

4.2.1. PROBETA A.

En el diagrama de Nyquist para el Fe de la Figura 3.7.a. se observa que en función del tiempo se aprecia la formación de un semicírculo. Extrapolando el mismo hacia valores de frecuencia baja hasta interceptar el eje X, se obtienen un valor aproximado de R_p o R_{tc} de $6,000 \text{ Ohm-cm}^2$, el cual al introducirlo en la ecuación de Stern-Geary, $J_{corr} = B/R_p$, y suponiendo un valor de $0.026V$ para B permite calcular un valor para la velocidad de corrosión de $4.3 \mu A/cm^2$.

Comparándola con la Tabla 4.2.1. se encuentra en un nivel de corrosión muy elevada.

| $V_{Corrosión} (\mu A/CM^2)$ | NIVEL DE CORROSIÓN |
|------------------------------|--------------------|
| < 0.1 | Despreciable |
| 0.1 - 0.5 | Moderado |
| 0.5 - 1 | Elevada |
| > 1 | Muy elevada |

Tabla 4.2.1. Clasificación de los valores de $V_{Corrosión}$ en términos de vida útil. ⁽²²⁾

El diagrama de Bode de la misma Figura presenta, al principio, un comportamiento capacitivo, denotado por una pequeña pendiente negativa. Al pasar el tiempo tiene una clara tendencia a ser resistivo por la línea horizontal que presenta; es decir, donde se iguala la resistencia del electrolito y la resistencia a la transferencia de carga o resistencia a la polarización. También

esto es visible en el diagrama del ángulo de fase que decrece con el transcurso del tiempo.

Estos mismos efectos se presentan también en los diagramas para el Zn y el Par Galvánico de las Figuras 3.7.b. y 3.7.c.

Las pruebas de Impedancia se realizaron durante 20 días, al cabo de los cuales perdió por completo el contacto con el Zn.

4.2.2. EN LA PROBETA B.

En el diagrama de Nyquist del Fe de la Figura 3.7.d. se puede ver que muestran un aumento de la resistencia del electrolito (concreto) al paso del tiempo, su R_t o R_p aproximado es de $10,000 \text{ Ohm-cm}^2$ que al sustituirla en la ecuación de Stern-Geary con la misma B, se obtiene una velocidad de corrosión de $2.6 \mu\text{A/cm}^2$, encontrándose en la Tabla 4.2.1 en un nivel de corrosión muy elevado.

En el diagrama de Bode de la misma Figura su comportamiento es ligeramente capacitivo. Al transcurrir el tiempo tiende a ser resistivo, no afectándole la inyección de las sales y suspensión de las mismas; esto se comprueba con la disminución del ángulo de fase a bajas frecuencias.

Para el diagrama de Nyquist del Zn, Figura 3.7.e., observando con detenimiento la resistencia del electrolito del día 1 al 30, aumenta aproximadamente a $30,000 \text{ Ohm-cm}^2$, del 30 al día 40, correspondiente a la etapa de "Inyección de las Sales Higroscópicas", la resistencia del electrolito disminuye aproximadamente hasta $10,000 \text{ Ohm-cm}^2$; en la siguiente etapa de suspensión, la resistencia aumenta escasamente la mitad de lo desplazado.

Este efecto se puede apreciar en el diagrama de Bode de la misma Figura en donde aumenta y disminuye la resistencia del electrolito.

El comportamiento que siempre presenta el Zn es de tipo resistivo, y no es que se encuentre pasivado o que sea inactivo, sino que el medio no permite de forma adecuada el paso de la corriente iónica.

Para el sistema del Par Galvánico de la Figura 3.7.f. el diagrama de Nyquist se observa que al transcurrir el tiempo la resistencia del electrolito va aumentando; en los días 50 al 60 se conecta permanentemente el Fe con el Zn y se observa la clara formación de un semicírculo, extrapolando su valor para bajas frecuencias se obtiene un valor aproximado de R_p de 34,000 Ohm-cm², el cual al introducirlo a la ecuación de Stern- Geary da un valor de la velocidad de corrosión pequeña.

En el diagrama de Bode de la misma Figura se nota la clara tendencia de ser un sistema resistivo, aún con o sin la inyección de las sales denotado por la disminución del ángulo de fase. Este comportamiento es muy semejante al del Fe.

4.3. EXPLICACIÓN.

El comportamiento que tiene este sistema experimental se puede comprender mejor mediante el diagrama de Evans de la Figura 4.3.a. y a través de la ecuación de densidad de corriente límite de difusión.

$$J_L = n \cdot F \cdot D \frac{C_{O_2}}{\delta}$$

donde

J_L .- Densidad de corriente límite (A/cm²).

n.- No. de electrones.

F.- Constante de Faraday.

D.-Coeficiente de Difusión (mol/dm^3).

C_{O_2} - Concentración de oxígeno.

δ .- Espesor de la capa límite límite (cm).

La densidad de corriente límite es proporcional a la concentración de oxígeno en este caso, si ésta disminuye, entonces la densidad de corriente también.

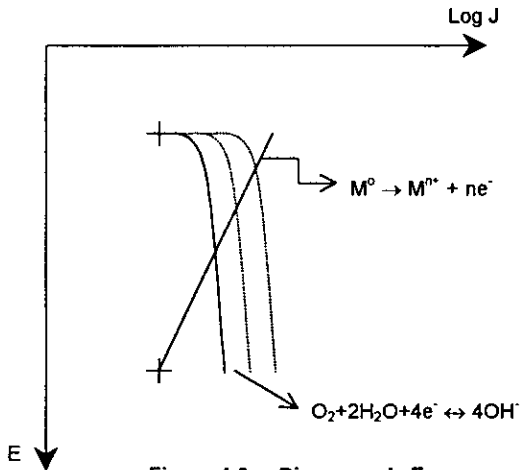


Figura 4.3.a. Diagrama de Evans

En esta Figura se ilustra la influencia que tiene la concentración del oxígeno controlado por Difusión en el concreto, en el proceso anódico debido a que la cantidad de oxígeno dentro del electrolito controla el sistema aunque éste cuente con cierta humedad. Es por esto que en la mayoría de los diagramas de impedancia el comportamiento que se encuentra es de carácter resistivo en las interfases Fe-concreto y concreto- Zn.

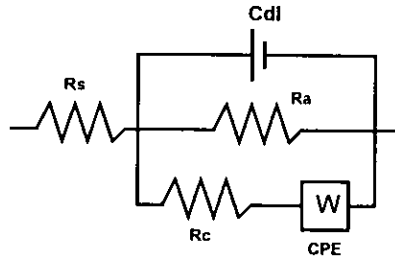


Figura 4.3.b. Circuito Equivalente.

Donde:

R_s .- Resistencia del Electrolito.

C_{dl} .- Doble capa electroquímica.

R_a .- Resistencia anódica.

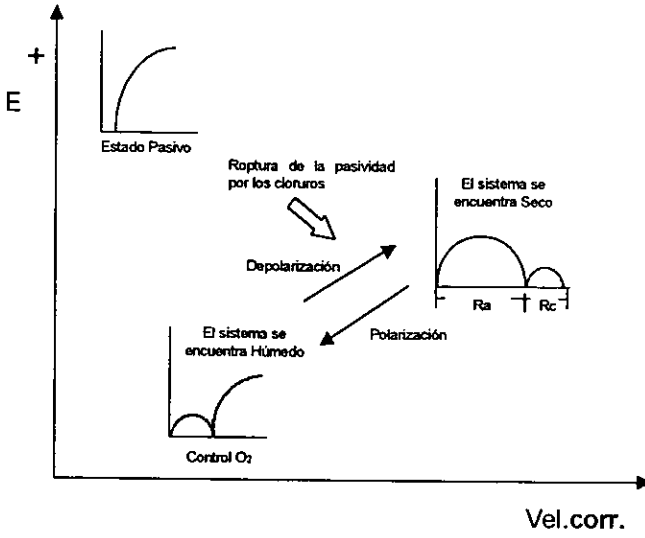
R_c .- Resistencia catódica.

CPE .- Elemento de fase constante.

Una posible explicación para los resultados experimentales obtenidos en cuanto a los valores de potencial de la armadura metálica de acero, es que la velocidad de corrosión del acero determinada a partir de los valores de R_p obtenidos por espectroscopía de impedancia electroquímica y la forma propia de los diagramas de impedancia, se presentan en el diagrama de la Figura 4.3.c. En lo que se refiere a la impedancia se propone un criterio eléctrico equivalente⁽²³⁾ Figura 4.3.b. que toma en consideración los procesos anódico y catódico, a través de sus correspondientes resistencias a la transferencia de carga. R_a y R_c , respectivamente, acompañado en lo que se refiere al proceso catódico de un elemento de fase constante, CPE , que actúa como un elemento de Warburg

y cuyo significado físico correspondería al proceso de reducción del oxígeno, controlando en este caso por difusión.

Según el diagrama propuesto⁽²³⁾, Figura 4.3.c., los valores de potencial más positivos (o menos negativos) corresponderían a velocidades de corrosión de la armadura metálica pequeñas y a diagramas de Impedancia, Bode, que representarían parcialmente un semicírculo, característico de un estado pasivo. Una vez rota la pasividad metálica por el efecto de los iones cloruro presentes en el concreto, el comportamiento del sistema depende de las condiciones de Humedad Relativa prevalecientes. Cuando el sistema acero-concreto se encuentra limitado, el control del proceso de naturaleza difusional, lo ejerce el oxígeno. En este caso se obtienen valores de potenciales muy negativos y valores de corrosión pequeños. Por el contrario cuando el sistema se seca, la reacción catódica se depolariza y como consecuencia el potencial del acero de refuerzo se vuelve más positivo y la velocidad de corrosión aumenta, observándose en el diagrama de Impedancia dos semicírculos correspondientes a los procesos de activación de las reacciones anódica y catódica.



4.3.c. Potencial vs Velocidad de Corrosión.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES.

- ☑ El comportamiento de las dos Probetas estudiadas si bien difieren en cuanto a los valores de potencial, siguen la misma tendencia debido a la porosidad del concreto.
- ☑ El efecto de mantener las probetas de concreto en una atmósfera de Humedad Relativa controlada se reflejan en valores de potencial negativos, encontrándose éstos en un diagrama de Potencial vs pH en la zona de pasivación.
- ☑ La adición de un agente higroscópico produce una activación del potencial del acero de refuerzo y una disminución de la resistencia del concreto.
- ☑ La técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica ha permitido seguir el proceso de la Protección Catódica cuando se conecta el Hierro con el Zinc (Fe-Zn). Sin embargo, la respuesta obtenida ha sido de naturaleza resistiva lo que hace difícil su interpretación.
- ☑ Se propone un modelo teórico-práctico que engloba información del potencial, velocidad de corrosión y diagramas de Impedancia Electroquímica, basados en uno de los circuitos eléctricos equivalentes propuestos para el estudio del sistema acero-concreto.
- ☑ En cuanto a los costos de protección catódica, mediante el proceso de rociado térmico es el más económico respecto a otro tipo de sistema (ánodo) presentados en la Tabla 1.3.4.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

1. P.Castro, R.Castillo, J.Carpio, J.Genescá, P.Helene, W.López, E. Pazini y M.Sanjuán, "Corrosión en Estructuras de Concreto Armado", México D.F. (1998).
2. "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México 1992, pág. 188.
3. ASTM C4.
4. "Proporcionamiento de Mezclas, Concreto Normal, Pesado y Masivo, ACI 211.1, pp. 13-14.
5. P. Castro, "Difusión y Corrosión por Iones Cloruro en el Concreto Reforzado", Tesis de Doctorado UNAM, México D.F. 1995, pp18, 20-21.
6. "Elaboración, Colocación y Protección del Concreto en Climas Fríos y Calurosos ACI 305 y ACI 306", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., pág. 66.
7. G. Mays, "Durability of Concrete Structures, Investigation, Repair, Protection", London 1992.
8. J. Ávila, J. Genescá, "Más allá de la Herrumbre", La Ciencia desde México No.9, Ed. Fondo de Cultura Económica, México 1989.
9. W.T. Scannell, "Assessment of Physical Condition of Concrete Bridge Components", Concorr Inc., Concrete Corrosion Specialists, July 1996, pp.9-13.
10. R. H. Heidersbach, "Cathodic Protection", Metals Handbook, 9a. Edition, ASTM International, 1987, Vol. 9, pp. 466-469.
11. ASTM G59-97, Standard Test Method of Conducting Potenciodynamic Polarization Resistance Measurements, pág. 230.
12. D. D. Macdonald, "Some Advantages and Pitfalls of Electrochemical Impedance Spectroscopy", Corrosion Science, 46 (3) 238 (1990).
13. J.T. Pérez, "Evaluación Electroquímica de Ánodos de Zinc Aplicados por Rociado Térmico sobre Concreto Armado", Tesis de Licenciatura, UNAM, México D.F. 1998, pp. 16-32.
14. J. Mendoza, R. Durán, J. Genescá, "Espectroscopía de Impedancia Electroquímica en Corrosión", I.M.P. & UNAM, México D.F. (2001).

15. J. Genescá, Notas "Fundamentos de Corrosión", UNAM, México D.F. 2001.
16. D.C. Silverman, "Primer on the AC Impedance Technique", Electrochemical Techniques for Corrosion Engineering, NACE 1986, pp.73-78.
17. "Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS), Application Note AC-1, EG&G Princeton Applied Research, pp. 1-10.
18. A. A. Sagües, "Impedancia Electroquímica para la Medición de Corrosión de Acero en Hormigón Armado". Comunicación privada.
19. ASTM E104-85, "Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions", pp. 572-574.
20. M. Pourbaix, "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", Ed. Pergamon Press Ltd., Great Britain 1966, pp. 314, 409 y 413.
21. Y. L. Tyler, B. Erlin, "A Proposed Simple Test Method for Determining the Permeability of Concrete", Portland Cement Association Research and Development Laboratories, Skokie, Illinois, September 1961.
22. O. Trocónis, A. Romero, C. Andrade, P. Helene e I. Díaz, "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado (Manual DURAR), 2a. Edición, (1998), pp. 134, 119-120.
23. "Corrosion of Metals in Concrete", Proceedings of the Corrosion 87 Symposium, NACE, Houston (1987). pág. 48.
24. H. Rieger, "Corriente Alterna", Ed. Siemens Aktiengesellschaft, España (1987), pág. 11.

CAPÍTULO 7

APÉNDICE

APÉNDICE 1.

Se presenta a continuación los diferentes tipos de aditivos químicos que pueden ser introducidos en el concreto al momento de su fabricación. Esta tabla da referencia a las normas ASTM que utilizan para el tipo de aditivo que se requiera.

| Tipo de Aditivo | Efecto Deseado | Material |
|--|---|--|
| Acelerantes. (ASTM C 494, Tipo C) | Aceleran el fraguado y el desarrollo de la resistencia a un periodo temprano. | Cloruro de Calcio (ASTM D 98) Trietanolamina, tiocianato de sodio, nitrito de calcio, nitrato de calcio. |
| Exclusores de aire. | Disminuyen el contenido de aire. | Ésteres insolubles al agua de ácido carbónico y bórico, silicones. |
| Aditivos inclusores de aire. (ASTM C 260) | Mejoran la Congelación en los ambientes en que existe Congelación-deshielo, productos químicos descongelantes, sulfatos y reactividad a los álcalis. Mejoran la trabajabilidad. | Sales de resinas de madera (resina Vinsol), algunos detergentes sintéticos, sales de ácidos de petróleo, sales de hidrocarburos sulfonatados, ácidos grasos y resinosos y sus sales. |
| Reductores de reactividad con los álcalis. | Reducen la expansión provocada por la reactividad de los álcalis. | Puzolanas (ceniza volante, humo de sílice), escoria de alto horno, sales de litio y de bario y agentes inclusores de aire. |
| Aditivos para unir | Mejoran la unión. | Hule, cloruro de polivinilo, acetato de polivinilo, acrílicos, copolímero de butadienoestireno. |
| Inhibidores de la corrosión. | Reducen el avance de la corrosión del acero en un ambiente con cloruros. | Nitrito de calcio, nitrito de sodio, benzoato de sodio, algunos fosfatos o fluosilicatos, fluoaluminatos. |
| Aditivos a prueba de humedad. | Retardan la penetración de la humedad en el concreto seco. | Jabones de calcio o estereato de amonio u oleato, estereato butilo y productos de petróleo. |
| Aditivos minerales finamente divididos. | | |
| Cementantes | Propiedades hidráulicas y sustitución parcial del cemento. | Escoria de alto horno granulada molida (ASTM C 989), cemento natural, cal hidráulica hidratada (ASTM C 141) |
| Puzolanas | Actividad puzolánica, mejoran la trabajabilidad, la plasticidad, la resistencia a los sulfatos; reducen la reactividad con los álcalis, la permeabilidad y el calor de hidratación, sustitución parcial del cemento, y relleno. | Tierras diatomáceas, horstenos opalinos, arcillas, pizarras, tufas volcánicas, pumicitas (ASTM C 618, clase N); cenizas volantes, (ASTM C 618, clases F y C), humo de sílice. |
| Puzolánicos y cementantes. | Los mismos que en las categorías de cementantes y puzolánicos. | Cenizas volantes con contenidos altos de calcio (ASTM C 618, clase C), escoria de alto horno granulada molida (ASTM C 989). |
| Nominalmente inertes. | Mejoran la trabajabilidad. | Mármol, dolomita, cuarzo y granito. |

| Tipo de Aditivo | Efecto Deseado | Material |
|--|---|--|
| Fungicidas, germicidas e insecticidas. | Inhiben o controlan el crecimiento de bacterias y hongos. | Fenoles polihalogenados, emulsiones de dieldrin y compuestos de cobre. |
| Formadores de gas. | Provocan expansión antes de que se presente el fraguado. | Poivo de aluminio, jabón de resina y goma vegetal o animal y saponina. |
| Agentes para morteros (lechadas) | Ajustan a propiedades de los morteros (lechadas) para aplicaciones específicas. | Vea los aditivos inclusores de aire, acelerantes, retardantes y agentes para la trabajabilidad. |
| Impermeabilizantes. | Disminuyen la permeabilidad. | Humo de sílice, cenizas volantes (ASTM C 618), escoria sólida (ASTM C 989), puzolanas naturales, reductores de agua y Látex. |
| Ayudas de bombeo. | Mejoran la capacidad de bombeo. | Polímeros orgánicos y sintéticos, floculantes orgánicos; emulsiones orgánicas de parafina, alquitrán, asfalto, acrílicos; puzolanas naturales (ASTM C 618, clase N), cenizas volantes (ASTM C 618, clase F y C), cal hidratada (ASTM C 141). |
| Retardantes (ASTM C494, tipo B). | Retardan el tiempo de fraguado. | Lignia, Bórax, azúcares, ácido tartárico y sales. |
| Superplastificantes* (ASTM C 1017, tipo 1). | Concreto con mayor fluidez y disminuyen la relación agua-cemento. | Condensadores de formaldehido de melamina sulfonados, Condensadores de formaldehido de nafteleno sulfonados y Lignosulfonatos. |
| Superplastificantes* y retardantes (ASTM C 1017, tipo2). | Concreto con mayor fluidez y disminuyen la cantidad de agua. | Vea los aditivos superplastificantes y también los reductores de agua. |
| Reductores de agua (ASTM C 494, tipo A). | Reducen la demanda de agua al menos 5%. | Lignosulfonatos, ácidos carboxílicos hidroxilados, Carbohidratos (también tienden a retardar el fraguado, por lo que a menudo se les agrega un acelerante). |
| Reductores de agua y acelerantes (ASTM C 494, tipo E). | Reducen el agua (mínimo 5%) y aceleran el fraguado. | Vea los aditivos reductores de agua, tipo A (se agraga un acelerante). |
| Reductores de agua y retardantes (ASTM C 494, Tipo D). | Reducen el agua (mínimo 5%) y aceleran el fraguado. | Vea los aditivos reductores de agua, Tipo A. |
| Reductores de agua-dealto rango (ASTM C 494, Tipo F) | Reducen la demanda de agua (mínimo 12%). | Vea los aditivos superplastificantes. |
| Reductores de agua-de alto rango-y retardantes (ASTM C 494, Tipo G). | Reducen la demanda de agua (mínimo 12%) y retardan el fraguado. | Vea los aditivos superplastificantes y también los reductores de agua. |
| Agentes para la trabajabilidad. | Mejoran la trabajabilidad. | Aditivos inclusores de aire, aditivos minerales finamente divididos, excepto el humo de sílice y reductores de agua. |

*A los superplastificantes también se les conoce como reductores de agua de alto rango o plastificantes. Estos aditivos a menudo cubren simultáneamente las especificaciones ASTM C 494 y C 1017.

Tabla 1. Clasificación de los Aditivos para el Concreto. ⁽²⁾

APÉNDICE 2.

En este apéndice se presenta una relación de los puentes que han sido protegidos catódicamente y una investigación de un pre-diseño para el uso adecuado de la protección catódica en subestructuras en puentes, a través del Departamento de Transportación del Estado de Florida en Estados Unidos de Norteamérica en el Laboratorio de Investigación de Corrosión a través del Dr. Iván Lasa.

2.1. RELACIÓN DE PUENTES PROTEGIDOS CATÓDICAMENTE EN EL ESTADO DE FLORIDA.

La información que se presenta mantiene la información original en la consecutivas hojas y contiene el nombre del puente y año de construcción, información local (3ª columna), tipo de estructura (4ª columna), año en que se instalo la protección catódica (5ª columna), costos de instalación (6ª columna), costo anula de mantenimiento (7ª columna). Tabla de Apéndice 2.1.1.

La Tabla de Apéndice 2.1.2. que se presenta contiene el nombre del puente y año de construcción (1ª columna), Ingeniero de Proyecto (2ª columna), información local (3ª columna), tipo de puente (4ª columna), año en que se instaló la protección catódica (5ª columna), programa de monitoreo (6ª columna) y tipo de sistema (7ª columna).

Tabla de Apéndice 2.1.1. Relación de Puentes Protegidos Catódicamente en el Estado de Florida, E.U.

| Bridge Name/ Number/ Year of Construction | Historic Designatio n | Location | Substructure Type/Bridge Length | Year C.P. Installed | Installation Cost | Annual Maint. Cost of C.P. | Performan ce Rating (1-5) | Type of System / Anode / Magnitude of Project |
|--|-----------------------------|--|--|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--|
| Gandy/ No. 100068/ 1967 RML | No | U.S. 92 Tampa Bay | Pile bents, pile footers w/ round col./ 13,770 ft. | 1991 | \$34.00/sq. ft. | \$5,900 | 5 | Impressed current / Titanium mesh anode encapsulated in structural concrete with remote monitoring / Major reconstruction of one of the main piers. Included cathodic protection to prevent corrosion of existing and new reinforcement. 858 sq.ft. of C.P. installed |
| Buckman/ No. 720343/ 1970/71 RML | No | S.R. 9 (I-295) over St. Johns River, Jacksonville | Pile bents, pile footers w/ square col./ 16,301.9 ft. | 1990 | \$35.00/sq. ft. | \$6,100 | 5 | Impressed current / Titanium mesh anode encapsulated structural concrete with remote monitoring / Major reconstruction of one of the main piers. Included cathodic protection to prevent corrosion of existing and new reinforcement. 1,111 sq.ft. of C.P. installed |
| | | | | 1995 | \$30.00/sq. ft. | | 4 | Sacrificial / Srayed Zinc C.P. / Applied to 2,400 sq.ft. On selected beam and diaphragms as part of major widening and rehabilitation project. |
| Dunn's Creek/ No. 720057/ 1965 - RML - SOLAR RML - STANDARD MD -ENSER | No | S.R.105 Jacksonville | Pile bents/ 1,100 ft. | 1995 | \$3,000.00 Per pile | \$7,300 | 5 | Impressed current /Titanium mesh pile jacket C.P. (6 ft. Long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring. / Rehabilitation of 120 piles and 5 pile caps. |
| Moncrief River/ No. 720352/ 1967 RML | No | S.R. 111 Jacksonville | Pile bents/ 584.0 ft. | 1995 | \$3,000.00 Per pile. | \$6,900 | 5 | Impressed current /Titanium mesh pile jacket C.P. (6 ft. Long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring. / Rehabilitation of 111 piles. |
| Ribault River/ No. 720272/ 1961 RML | No | S.R. 115 Jacksonville | Pile bents/ 740.0 ft. | 1992 | \$2,357.00 Per pile | \$6,200 | 5 | Impressed current /Titanium mesh pile jacket C.P. (4 ft. Long jackets) on pre-cast pilings with remote monitoring. / Rehabilitation of 40 piles in shallow water areas of the bridge. |

| | | | | | | | | |
|---|----|-----------------------------|--|------|------------------------|------------------------|----|--|
| | | | | | \$2,257.00 Per pile | | 5 | Impressed current /Conductive Rubber Anode C.P. (4 ft. Long jackets) on pre-cast pilings with remote monitoring. / Rehabilitation of 26 piles in deep water areas of the bridge. |
| Broward River/ No. 720056/ 1949 | No | S.R. 105 Jacksonville | Pile bents/ one bascule pier/ 590.9 ft. | 1985 | n/a | \$7,000 | 3* | Impressed current /Conductive Coating C.P. on Standard Pilings with Remote Monitoring |
| MD | | | | 1993 | In House | | 5 | Impressed current /Titanium Mesh Pile Jacket C.P. on (6 ft. Long jackets) on Standard Pilings with Remote Monitoring (experimental). |
| | | | | 1994 | In House | | 5 | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P. (6 ft. Long jackets) on Standard Pilings with Remote Monitoring (experimental). |
| | | | | 1998 | | \$3,050.00 Per pile | 5 | Impressed current /Titanium Mesh Pile Jacket C.P. (6 ft. Long jackets) on Standard Pilings with Remote Monitoring and Remote Rectifier Adjustment/Replacing conductive coating system on 57 piles. |
| Verte Allen Pope/ No.780090/ 1976 RML | No | S.R. 207 Crescent Beach | Pile bents, pile footers w/ round col/ 2,980.0 ft. | 1988 | \$15.40 Per sq.ft. | \$5,900 | 5 | Impressed current /Titanium Mesh Anode Structural Encapsulation C.P. with Remote Monitoring/ Rehabilitation of 8 footers with severe structural damage. C.P. Installed in addition to the structural repairs. |
| Bryant Patton Bridges/ 490003/490004 1964 RML | No | G1A - St. George Island | Pile bents, pile footers w/ square col/ 5,993.5 ft. (03) 7,1115.5 ft. (04) | 1995 | \$29.00 Per sq.ft. | \$5,300 | 4 | Sacrificial/ Zinc Sheet, Bulk Zinc Anode C.P. On Pre-Stressed Pilings/ Rehabilitation of 160 piles. Approximately 9,579.0 sq.ft. of concrete protected. Cost per sq.ft. includes cost of additional bulk anode per pile plus zinc sheet anode. |
| | | | | | \$15.00 Per sq.ft. | | 4 | Sacrificial / Zinc sprayed anode on piles above tidal area/ |
| Howard Frankland / No. 150107/ 1959 | No | I-275 Over Tampa Bay, Tampa | Pile bents, pile footers w/ square col/ 15,871.7 ft. | 1987 | \$25.00 Per sq.ft. | \$7,500 | 5 | Impressed current/Titanium Mesh Gunite Encapsulation C.P. on Footers with Remote Monitoring. |

| | | | | | | | | |
|---|----|-------------------------|--|----------------------------|------------------------|---------|---|---|
| RML -- SACRIFICIAL RML -- PIER 160 MD -- ENSER | | | | 1992 | \$42.00 Per sq.ft. | | 4 | Sacrificial/ Zinc Sheet, Bulk Zinc Anode C.P. On Pre-Stressed Pilings/ Rehabilitation of 62 piles. Approximately 1,984.0 sq.ft. of concrete protected. Cost per sq.ft. includes cost of additional bulk anode per pile plus zinc sheet anode. |
| | | | | 1992 | \$12.00 Per sq.ft. | | 3 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on piles above tidal area and no selected pile caps/ Approximately 126,189.0 sq.ft. of concrete protected. |
| | | | | 1993 | n/a | | 5 | Impressed current/ Conductive Rubber C. P. on Pre-Stressed Pilings/ 6 piles |
| | | | | | | | 5 | Impressed current/ Titanium Mesh Pile Jacket C. P. on Pre-Stressed Pilings/ 10 piles/ Both systems with remote monitoring. Experimental project funded by FHWA. |
| | | | | Under Constructi on2001 | | | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on selected pile caps/ Approximately 40,000 sq.ft. of concrete protected. Metalizing applied to new deteriorated caps and 2,000 ft of remetaling localized spalls on previous metalized caps. |
| | | | | 2001 | | | | Sacrificial cathodic protection pile jackets with submerged bulk anodes. 45 piles protected. Some of the new jackets replace the old zinc sheet anode installed in 1992. |
| Julia Tuttle/ No. 870375-870376/ 1966 RML | No | I-195 Miami | Pile bents, 180.7 ft. (375) 164.8 ft. (376) | 1990 | \$30.00 per sq.ft | \$5,300 | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode Underdeck and Caps applied to pile caps and underdeck/ Approximately 4,500 sq. ft. of protected concrete. |
| | | | | 2000 | \$25.00 per sq.ft | | 4 | Re-metalize Pile caps and selected spalls on underdeck. |
| Indian Key/ No. 900095/ | No | U. S. 1 Florida Keys | Drilled shafts w/ round columns/ 2,460.6 ft. | 1991 | \$25.00 Per sq. ft. | \$5,300 | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 225 sq. ft. of protected concrete. |
| Long Key/ No. 900094/ 1979 RML - Zc sheets | No | U. S. 1 Florida Keys | (segmental bridge) inverted pile caps mounted on drilled shafts w/ V-shape supports/ | 1991 | \$25.00 Per sq.ft. | \$5,300 | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure pier caps/ Approximately 3,000 sq. ft. of protected concrete. |

| | | | | | | | | |
|--|----|----------------------|---|------|---------------------|---------|---|--|
| | | | 11,811.7 ft. | 1995 | \$10,000.00 each | | 4 | Sacrificial/ Zinc Anode Plates Over Bearing Pads/ Installed on 6 bearing pads between pad and structure. Jacking of structure required for anode installation and concrete repair. |
| | | | | 1998 | \$25.00 Per sq. ft. | | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure pier caps/ Approximately 3,000 sq. ft. of protected concrete.. on Substructure. |
| | | | | | \$5,900.00 ea | | 4 | Sacrificial/ Zinc Anode Plates Over Bearing Pads/ Installed on 5 bearing pads between pad and structure. Jacking of structure required for anode installation and concrete repair. |
| Seven Mile / No. 900101/ 1979 | No | U. S. 1 Florida Keys | (segmental bridge) Drilled shafts w/ round columns, precast box piers on high elev. Spans | 1991 | \$25.00 per sq. ft. | \$5,300 | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 3,200 sq. ft. of protected concrete. |
| | | | | 1995 | \$20.00 per sq. ft. | | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 5,000 sq. ft. of protected concrete. |
| | | | 36,952.1 ft. | 1998 | \$25.00 per sq. ft. | | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 6,800 sq. ft. of protected concrete. |
| | | | | 2000 | \$26.00 per sq. ft. | | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 20,000 sq. ft. of protected concrete. Work included remetalizing some areas originally metalized on 1991 or 1995 and which original zinc has been depleted. |
| Bahia Honda/ No. 900018-45/ 1972 (2 Bridges) | No | U. S. 1 Florida Keys | Pile bents, pile footers w/ round col./ 7,951.1 ft. | 1991 | \$30.00 per sq. ft. | \$5,300 | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 250 sq. ft. of protected concrete./ One column and one footer protected as an experimental evaluation. Anode on footer deteriorated in short time due to proximity with the tidal waters. |
| Niles Channel/ No. 900117/ 1979 | No | U.S. 1 Florida Keys | (segmental bridge) Drilled shafts w/ round columns/ | 1988 | \$30.00 per sq. ft. | \$5,300 | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 325 sq. ft. of protected concrete./ Installed as experimental evaluation. |
| | | | 1,557.7 ft. | 1991 | \$20.00 Per sq. ft. | | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 3,000 sq. ft. of protected concrete. |

| | | | | | | | | |
|---|-----|---------------------------------|---|------|------------------------|---------|-----|--|
| | | | | 1995 | \$25.00 Per sq. ft. | | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 4,000 sq. ft. of protected concrete. |
| Sunset Island Bridge/ No. 876710/ RML | Yes | 29th Street / Miami | Pile Bents | 1999 | \$25.00 Per sq. ft. | \$5,300 | 4 | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on bridge underdeck/ Approximately 3,760 sq. ft. of protected concrete. |
| Royal Park/ No. 930022/ 1959 | Yes | Palm Beach | Arch type foundation, two bascule piers/ 1,055.5 ft. | 1997 | | \$5,300 | 4 | Sacrificial / Bulk Zinc Anodes, Zinc Mesh Sheets C. P. on Bascule Counterweight Sprayed Zinc C. P. on Substructure/ Complete rehabilitation of bridge substructure. |
| Banana River/ No. 700069/ 1967 MD | No | S.R. 520 Cocoa Beach | Pile bents, two chann. Piers footers w/ square col/ 1,055.5 ft. | 1997 | \$3,900.00 Per pile | \$6,800 | 5 | Impressed current/ Titanium Mesh Pile Jacket C. P. (8 ft. long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring / Rehabilitation of 105 piles. |
| San Pablo / No. 720044/ 1967 MD | No | S.R. 10 Jacksonville | Pile bents, pile footers w/ round col/ 2,350.1 ft. | 1998 | \$3,699.00 Per pile | \$5,900 | N/A | Impressed current / Titanium mesh pile jacket C. P. (6 ft. long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring / Rehabilitation of 11 piles/ Includes a photovoltaic power supply to provide the C. P. current (included in same contract as Mathews Bridge). |
| Mathews Bridge No. 720076/ 1953 MD | No | S.R. 10 Jacksonville | Pile bents, pile footers w/ square col/ 7,375.3 ft. | 1998 | \$3,699.00 Per pile | \$8,300 | N/A | Impressed current/ Titanium mesh pile jacket C.P. (6 ft. long jacket) on standard pilings with remote monitoring and remote rectifier Adjustment/ Rehabilitation of 195 piles. Night work required. |
| District 1 | No | Tamps. St. Petersburg. Sarasota | Twelve bridges under same contract | 1997 | | \$0 | N/A | Sacrificial / Zinc Mesh Anode Pile Jacket. On standard and pre-stressed pilings (selectd piles on each bridge. |
| Bridge of Lions No. 780074/ 1927 RML | Yes | S.R. A1A St. Augustine | Arch type foundation, two bascule piers/ 5,070.2 ft. | 1998 | \$3,300.00 | \$5,300 | N/A | Sacrificial / Zinc Mesh Anode Pile Jacket. On 14 inch H piles/ Rehabilitation of 12 piles of a crutch bent support. |
| Indian River West Relief/ No. 700142-078 MD | No | S.R. 404 Melbourne | Pile bents/ 171.9 ft. (078) 171.9 ft. (142) | 1998 | | \$5,900 | N/A | Impressed current/ Titanium mesh pile jacket C. P. (6 ft. long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring and remote rectifier Adjustment/ Rehabilitation of 36 piles. Night work required. |
| Turnbull Creek/ No. 790086/ 1957 RML | No | U.S. 1 Oak Hill | Pile bents/ 179.8 ft. | 1998 | \$2,000.00 Per pile | \$4,400 | 5 | Sacrificial/ Zinc Mesh Anode Pile Jacket (4 ft. long jackets) on pre-stressed pilings/ Rehabilitation of 36 piles. |

| | | | | | | | | |
|--|-----|---|--|-----------------------------|-------------------------|---------|---|---|
| Ancoite River | No | U.S. 19 Tarpon Springs | H-pile bents/ n/a | 1995 | In House | \$5,300 | 5 | Sacrificial/ Submerged Bulk Zinc Anodes on Steel H-piles/ Rehabilitation of 40 piles on two parallel bridges. |
| Phillips Inlet Bdg/ RML | No | U.S. 98 Panama City | Pile Bents | 1998 | \$4,980.00 per pile | \$4,400 | 5 | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P. (6 ft. Long jackets)/ Rehabilitation of 28 Standard Pilings. |
| Crane Creek Bdg/ No.700006 /1987 MD | No | U.S. 1 Melbourne | Pile Bents/ 331 ft. | 1999 | \$3,100.00 Per pile | \$4,400 | 5 | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P. (6 ft. Long jackets) on pre-stressed piles/ Rehabilitation of 46 piles. |
| Sykes Creek Bdg/ 700108/ 1980 MD | No | S.R. 528 Cocoa | Pile Bents/ 325 ft | 1999 | \$3,600.00 | \$5,900 | 5 | Impressed current/ Titanium mesh pile jacket C. P. (6 ft. long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring and remote rectifier Adjustment/ Rehabilitation of 8 piles/ Includes the removal of old standard pile jackets. |
| Haulover Creek Bdg/ No.720063/ 1978 MD | No. | S.R. 105 Jacksonville | Pile Bents/ 224 ft. | 2000 | \$ 9,500.00 per pile | \$4,000 | | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P with Structural Reinforcement (approx. 15 ft. Long jackets)/ Rehabilitation of 42 Standard Pilings/ Jackets extend from 1 ft. below mudline to 8 ft. above high tide. Cost includes the removal of existing pile jackets which also extended to mudline and the new steel reinforcement. |
| Eugallie Bdg/ No.700008/ 1960 MD | No | U.S. 1 Melbourne | Pile Bents/ 227 ft. | 2000 | \$ 2725.00 Per/Pile | \$4,000 | | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P on pre-stressed Piles (6 ft. Long jackets)/ Rehabilitation of 72 Standard Pilings/ Jackets extend from MLW to 6 ft. above. |
| 79th Street Causeway/ 870554; 870082; 870085; 870551/1971 RML | No | NE 79th Street - Miami | Pile Bents/na | 2000 | \$7,00.00 per pile | \$4,000 | | Sacrificial zinc mesh pile jacket on standard and pre-stressed piles with submerged bulk anode / Work consisted of installing C.P. pile jackets on selected piles (20 piles total) on four different bridges located along the causeway. Work was performed under same contract for other major restoration work. |
| Apalachicola Bay Bridge/490032/198 6 | No | US 98 (SR 30) Apalachicola | Pile Bents/14,175 ft. | Under construct ion 2001 | | | | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P on pre-stressed Piles (6 ft. Long jackets)/ Rehabilitation of 311Pre-stressed Pilings/ Jackets extend from MLW to 6 ft. above. Installed to protect structurally cracked piles. |
| Bennet Causeway over Indian River / Bridge No. 700110 / 1968/ MD | No | SR 528 over Indian River - Cocoa Beach | Pile Bents and Footers/ 2,296 ft | Design Phase 2001 | | | | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P on pre-stressed Piles (6 ft. Long jackets)/ Rehabilitation of 24Pre-stressed Pilings/ Jackets extend from MLW to 6 ft. above. |

| | | | | | | | | | |
|--|-----|--|---|-------------------------|--------------------|-------|---|--|--|
| | | | | | | | | | Sacrificial/ Ten bulk anodes installed on crashwall to protect cracked wall from corrosion. |
| Courtney Campbell Bridge/ 100301 / 1972 | No | SR 60 over Tampa Bay - Tampa | Pile Bents and Footers/ ft | Design Phase 2001 | | | | | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P on pre-stressed Piles (length of jackets varies)/ Rehabilitation of 27Pre-stressed Piling./ Jackets extend from below water to approximately 6 ft above. |
| | | | | | | | | | Sacrificial/ zinc sprayed anode on beams and columns/ Approximately 2,000 sq.ft. of anode |
| Allen Creek Bridge/ Bridge No. 150036 / 1951 | No | U.S. 19/ Tampa | Pile Bents / 755 ft | Design Phase 2001 | | | | | Sacrificial/ zinc sprayed anode on beams/ Approximately 900 sq.ft. of anode |
| Sebastian Inlet Bridge/ Bridge No. 880005 / 1968 | No | U.S.A1A/Melbourne | Round columns supported on square footers / 1,575.8 ft | Under construction 2001 | | | | | Impressed current/ Titanium Mesh Anode Structural Encapsulation C.P. with remote monitoring/ Rehabilitation of six footers with severe structural damage on three piers. / C.P. installed in addition to structural repairs. |
| Channel five Bridge/ Bridge No. 900098 / 1979 | No | U.S.1 Florida Keys | Pre-cast box piers supported on square footers and drilled shafts | Under Construction 2001 | \$26.00 per sq.ft. | | | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure footers. Approximate 500 square feet of anode. Anode is installed in addition to concrete restoration. |
| Callosahatchee River Bridge. Bridge No. 120034 | No. | I-75 over Callosahatchee River/ Lee County | Round columns supported on square footers w two crashwalls / 1,000 ft | Design Phase 2000 | | | | | Sacrificial/ Zinc bulk anodes installed on two crashwalls for corrosion control of cracked concrete. |
| Radio Tower/ 1997 RML | No | U.S. 1 Bunnell | N/A | 1997 | N/A | \$400 | 5 | | Sacrificial / Underground Magnesium Anodes/ Installed on one drilled shaft type tower foundation with solar powered remote monitoring/ Installed by Contractor immediately after construction to prevent corrosion due to deficient fabrication of the foundation. |
| Traffic Signal Mast/ 1998 RML | No | Cocoa Beach | N/A | 1998 | N/A | \$400 | 5 | | Sacrificial / Underground Magnesium Anodes/ Installed on two drilled shaft type traffic mast foundation/ Installed by Contractor immediately after construction to prevent corrosion due to deficient fabrication of the foundation. |

Tabla de Apéndice 2.1.2. Relación de Puentes Protegidos y Monitoreados en el Estado de Florida, E.U.

| Bridge Name/ Number/ Year of Construction | SMO Project Engineer | Location | Substructure Type/Bridge Length | Year C.P. Installed | Monitoring Schedule | Type of System / Anode / Magnitude of Project |
|---|-------------------------|---|---|---------------------|--|---|
| Gandy/ No. 100068/ 1987 | R. Langley | U.S. 92 Tampa Bay | Pile bents, pile footers w/ round col./ 13,770 ft. | 1991 | 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year. | Impressed current / Titanium mesh anode encapsulated in structural concrete with remote monitoring / Major reconstruction of one of the main piers. Included cathodic protection to prevent corrosion of existing and new reinforcement. 858 sq.ft. of C.P. installed |
| Buckman/ No. 720343/ 1970/71 | R. Langley | S.R. 9 (I-295) over St. Johns River, Jacksonville | Pile bents, pile footers w/ square col./ 16,301.9 ft. | 1990 | 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year. | Impressed current / Titanium mesh anode encapsulated structural concrete with remote monitoring / Major reconstruction of one of the main piers. Included anodic protection to prevent corrosion of existing and new reinforcement. 1,111 sq.ft. of C.P. installed |
| | | | | 1995 | | Sacrificial / Strayed Zinc C.P. / Applied to 2,400 sq.ft. On selected beam and diaphragms as part of major widening and rehabilitation project. |
| Dunn's Creek/ No. 720057/ 1965 | R. Langley= Solar | S.R.105 Jacksonville | Pile bents/ 1,100 ft. | 1995 | Solar Test ----- 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year.----- | Impressed current / Titanium mesh pile jacket C.P. (8 ft. Long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring. / Rehabilitation of 120 piles and 5 pile caps -- ----- |
| | R. Langley= Stand. | | | | Standard C.P. ----- - 1) On-site monitoring every three months. | Experimental solar power test on Bents 2 through 5. |
| | M.Duncan= Enser | | | | ENSER Test ----- 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring 4 months. | Experimental ENSER power supply test on Bents 6 and 7. |

| | | | | | | |
|-----------------------------------|------------|-------------------------|---|------|--|---|
| Moncrief River/ No. 720352/ 1967 | R. Langley | S.R. 111 Jacksonville | Pile bents/ 564.0 ft. | 1995 | 1) On-site monitoring and inspection every three months. | Impressed current /Titanium mesh pile jacket C.P. (6 ft. Long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring. / Rehabilitation of 111 piles. |
| Ribault River/ No. 720272/ 1961 | R. Langley | S.R. 115 Jacksonville | Pile bents/ 740.0 ft. | 1992 | 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year. | Impressed current /Titanium mesh pile jacket C.P. (4 ft. Long jackets) on pre-cast pilings with remote monitoring. / Rehabilitation of 40 piles in shallow water areas of the bridge. |
| | | | | | | Impressed current /Conductive Rubber Anode C.P. (4 ft. Long jackets) on pre-cast pilings with remote monitoring. / Rehabilitation of 26 piles in deep water areas of the bridge. |
| Broward River/ No. 720056/ 1949 | M. Duncan | S.R. 105 Jacksonville | Pile bents/ one bascule pier/ 590.9 ft. | 1985 | Impressed Current Sys. ----- 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year. | Impressed current /Conductive Coating C.P. on Standard Pilings with Remote Monitoring |
| | | | | 1993 | | Impressed current /Titanium Mesh Pile Jacket C.P. on (6 ft. Long jackets) on Standard Pilings with Remote Monitoring (experimental). |
| | | | | 1994 | Sacrificial Experimental Jackets ----- 1) On-site monitoring and inspection every four months. | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P. (6 ft. Long jackets) on Standard Pilings with Remote Monitoring (experimental). |
| | | | | 1998 | | Impressed current /Titanium Mesh Pile Jacket C.P. (6 ft. Long jackets) on Standard Pilings with Remote Monitoring and Remote Rectifier Adjustment/Replacing conductive coating system on 57 piles. |
| Verte Allen Pope/ No.780090/ 1976 | R. Langley | S.R. 206 Crescent Beach | Pile bents, pile footers w/ round col./ 2,980.0 ft. | 1988 | 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year. | Impressed current /Titanium Mesh Anode Structural Encapsulation C.P. with Remote Monitoring/ Rehabilitation of 8 footers with severe structural damage. C.P. installed in addition to the structural repairs. |

| | | | | | | |
|--|---|--------------------------------|--|----------------------------|--|---|
| Bryant Patton Bridges/ 490003/490004 1964 | R. Langley | G1A - St. George Island | Pile bents, pile footers w/ square vcol / 5,993.5 ft. (03) 7,1115.5 ft. (04) | 1995 | 1) On-site monitoring and inspection once a year. | Sacrificial/ Zinc Sheet, Bulk Zinc Anode C. P. On Pre- Stressed Piling/ Rehabilitation of 160 piles. Approximately 9,579.0 sq.ft. of concrete protected. Cost per sq.ft. includes cost of additional bulk anode per pile plus zinc sheet anode. |
| | | | | | | Sacrificial / Zinc sprayed anode on piles above tidal area/ |
| Howard Frankland / No. 150107/ 1959 | R. Langley Sacrificial and Pier 160 | I-275 Over Tampa Bay, Tampa | Pile bents, pile footers w/ square col/ 15,871.7 ft. | 1987 | Pier 160 ----- 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site insp. once a year. | Impressed current/Titanium Mesh Gunite Encapsulation C. P. on Footers with Remote Monitoring. |
| | | | | 1992 | Sacrificial System ----- 1) On-site monitoring and inspection once a year. | Sacrificial/ Zinc Sheet, Bulk Zinc Anode C. P. On Pre- Stressed Piling/ Rehabilitation of 62 piles. Approximately 1,984.0 sq.ft. of concrete protected. Cost per sq.ft. includes cost of additional bulk anode per pile plus zinc sheet anode. |
| | | | | 1992 | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on piles above tidal area and no selected pile caps/ Approximately 126,189.0 sq.ft. of concrete protected. |
| | | | | 1993 | | Impressed current/ Conductive Rubber C. P. on Pre- Stressed Piling/ 8 piles |
| | M. Duncan = Enser | | | | ENSER Test ----- 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site inspection every three months. | Impressed current/ Titanium Mesh Pile Jacket C. P. on Pre-Stressed Piling/ 10 piles/ Both systems with remote monitoring. Experimental project funded by FHWA. |
| | | | | Under Construction 2000 | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on selected pile caps/ Approximately 40,000 sq.ft. of concrete protected. Metalizing applied to new deteriorated caps and 2,000 ft of remetaling localized spalls on previous metalized caps. |

| | | | | Under Construction 2000 | | |
|---|---------------------------|----------------------|--|----------------------------|---|--|
| Julia Tuttle/ No. 870375-870376/ 1966 | R. Langley | J-195 Miami | Pile bents, 160.7 ft. (375) 164.8 ft. (376) | 1990 | 1) On-site monitoring and inspection once a year. | Sacrificial cathodic protection pile jackets with submerged bulk anodes. 45 piles protected. Some of the new jackets replace the old zinc sheet anode installed in 1992. |
| | | | | 2000 | | |
| Indian Key/ No. 900095/ | | U. S. 1 Florida Keys | Drilled shafts w/ round columns/ 2,460.6 ft. | 1991 | 1) On-site inspection once a year. | Re-metalize Pile caps and selected spalls on underdeck. |
| Long Key/ No. 900094/ 1979 | R. Langley Zinc Sheets | U. S. 1 Florida Keys | (segmental bridge) inverted pile caps mounted on drilled shafts w/ V-shape supports/ | 1991 | 1) On-site inspection once a year. | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure pier caps/ Approximately 3,000 sq. ft. of protected concrete. |
| | | | 11,811.7 ft. | 1995 | | Sacrificial/ Zinc Anode Plates Over Bearing Pads/ Installed on 6 bearing pads between pad and structure. Jacking of structure required for anode installation and concrete repair. |
| | | | | 1998 | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure pier caps/ Approximately 3,000 sq. ft. of protected concrete.. on Substructure. |
| | | | | | | Sacrificial/ Zinc Anode Plates Over Bearing Pads/ Installed on 5 bearing pads between pad and structure. Jacking of structure required for anode installation and concrete repair. |

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

| | | | | | | |
|--|--|----------------------|---|------|------------------------------------|--|
| Seven Mile / No. 900101/ 1979 | | U. S. 1 Florida Keys | (segmental bridge) Drilled shafts w/ round columns, precast box piers on high elev. Spans | 1991 | 1) On-site inspection once a year. | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 3,200 sq. ft. of protected concrete. |
| | | | | 1995 | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 5,000 sq. ft. of protected concrete. |
| | | | 36,952.1 ft. | 1998 | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 6,800 sq. ft. of protected concrete. |
| | | | | 2000 | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 20,000 sq. ft. of protected concrete. Work included remetalizing some areas originally metalized on 1991 or 1995 and which original zinc has been depleted. |
| Bahia Honda/ No. 900016-45/ 1972 (2 Bridges) | | U. S. 1 Florida Keys | Pile bents, pile footers w/ round col./ 7,951.1 ft. | 1991 | 1) On-site inspection once a year. | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 250 sq. ft. of protected concrete./ One column and one footer protected as an experimental evaluation. Anode on footer deteriorated in short time due to proximity with the tidal waters. |
| Niles Channel/ No. 900117/ 1979 | | U.S. 1 Florida Keys | (segmental bridge) Drilled shafts w/ round columns/ | 1988 | 1) On-site inspection once a year. | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 325 sq. ft. of protected concrete./ Installed as experimental evaluation. |
| | | | 1,557.7 ft. | 1991 | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 3,000 sq. ft. of protected concrete. |
| | | | | 1995 | | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on substructure round column supports/ Approximately 4,000 sq. ft. of protected concrete. |

| | | | | | | |
|-----------------------------------|------------|---------------------------------|---|------|--|--|
| Sunset Island Bridge/ No. 876710/ | R. Langley | 29th Street / Miami | Pile Bents | 1999 | 1) On-site inspection once a year. | Sacrificial/ Zinc sprayed anode on bridge underdeck/ Approximately 3,760 sq. ft. of protected concrete. |
| Royal Park/ No. 930022/ 1959 | | Palm Beach | Arch type foundation, two bascule piers/ 1,055.5 ft. | 1997 | 1) On-site inspection once a year. | Sacrificial / Bulk Zinc Anodes, Zinc Mesh Sheets C. P. on Bascule Counterweight Sprayed Zinc C. P. on Substructure/ Complete rehabilitation of bridge substructure. |
| Banana River/ No. 700069/ 1967 | M. Duncan | S.R. 520 Cocoa Beach | Pile bents, two chann. Piers footers w/ square col/ 1,055.5 ft. | 1997 | 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year. | Impressed current/ Titanium Mesh Pile Jacket C. P. (8 ft. long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring / Rehabilitation of 105 piles. |
| San Pablo / No. 720044/ 1967 | M. Duncan | S.R. 10 Jacksonville | Pile bents, pile footers w/ round col/ 2,350.1 ft. | 1998 | 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year. | Impressed current / Titanium mesh pile jacket C. P. (8 ft. long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring / Rehabilitation of 11 piles/ Includes a photovoltaic power supply to provide the C. P. current (Included in same contract as Mathews Bridge). |
| Mathews Bridge No. 720076/ 1953 | M. Duncan | S.R. 10 Jacksonville | Pile bents, pile footers w/ square col/ 7,375.3 ft. | 1998 | 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year. | Impressed current/ Titanium mesh pile jacket C.P. (8 ft. long jacket) on standard pilings with remote monitoring and remote rectifier Adjustment/ Rehabilitation of 195 piles. Night work required. |
| District 1 | | Tampa, St. Petersburg, Sarasota | Twelve bridges under same contract | 1997 | | Sacrificial / Zinc Mesh Anode Pile Jacket. On standard and pre-stressed pilings (selectd piles on each bridge. |
| Bridge of Lions No. 780074/ 1927 | R. Langley | S.R. A1A St. Augustine | Arch type foundation, two bascule piers/ 5,070.2 ft. | 1998 | 1) On-site inspection once a year. | Sacrificial / Zinc Mesh Anode Pile Jacket. On 14 inch H piles/ Rehabilitation of 12 piles of a crutch bent support. |

| | | | | | | |
|--|------------|------------------------|---|----------------------------|--|---|
| Indian River West Relief/ No. 700142-078 | M. Duncan | S.R. 404 Melbourne | Pile bents/ 171.9 ft. (076) 171.9 ft. (142) | 1998 | 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a year. | Impressed current/ Titanium mesh pile jacket C. P. (6 ft. long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring and remote rectifier Adjustment/ Rehabilitation of 38 piles. Night work required. |
| Turnbull Creek/ No. 790086/ 1957 | R. Langley | U.S. 1 Oak Hill | Pile bents/ 179.8 ft. | 1998 | 1) Remote monitoring on a weekly basis 2) On-site monitoring and inspection once a Year. | Sacrificial/ Zinc Mesh Anode Pile Jacket (4 ft. long jackets) on pre-stressed pilings/ Rehabilitation of 38 piles. Experimental test on Bent 2 - jacket form removed from Piles 1 and 2. |
| Ancotte River | | U.S. 19 Tarpon Springs | H-pile bents/ n/a | 1995 | | Sacrificial/ Submerged Bulk Zinc Anodes on Steel H-piles/ Rehabilitation of 40 piles on two parallel bridges. |
| Phillips Inlet Bdg/ | R. Langley | U.S. 98 Panama City | Pile Bents | 1998 | 1) On-site monitoring and inspection once a Year. | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P. (6 ft. Long jackets)/ Rehabilitation of 28 Standard Pilings. |
| Crane Creek Bdg/ No.700006 /1987 | M. Duncan | U.S. 1 Melbourne | Pile Bents/ 331 ft. | 1999 | 1) On-site monitoring and inspection once a Year. | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P. (6 ft. Long jackets) on pre-stressed piles/ Rehabilitation of 46 piles. |
| Sykes Creek Bdg/ 700108/ 1980 | M. Duncan | S.R. 528 Cocoa | Pile Bents/ 325 ft | 1999 | 1) Remote monitoring on a weekly basis. 2) On-site monitoring and inspection once a Year. | Impressed current/ Titanium mesh pile jacket C. P. (6 ft. long jackets) on pre-stressed pilings with remote monitoring and remote rectifier Adjustment/ Rehabilitation of 8 piles/ Includes the removal of old standard pile jackets. |
| Haulover Creek Bdg/ No.720063/ 1978 | M. Duncan | S.R. 105 Jacksonville | Pile Bents/ 224 ft. | 2000 | 1 On-site monitoring and inspection once a Year. | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P. with Structural Reinforcement (approx. 15 ft. Long jackets)/ Rehabilitation of 42 Standard Pilings./ Jackets extend from 1 ft. below mudline to 8 ft. above high tide. Cost includes the removal of existing pile jackets which also extend to mudline and the new steel reinforcement. |
| Eugatlie Bdg/ No.700008/ 1960 | M. Duncan | U.S. 1 Melbourne | Pile Bents/ 227 ft. | Under Construction 2000 | 1) On-site monitoring and inspection once a Year. | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P on pre-stressed Piles (6 ft. Long jackets)/ Rehabilitation of 72 Standard Pilings./ Jackets extend from MLW to 6 ft. above. |

| | | | | | | |
|--|------------|--|---------------------------------|-------------------------|---|---|
| 79th Street Causeway/ 870554; 870082; 870085; 870551/1971 | R. Langley | NE 79th Street - Miami | Pile Bents/na | Under Construction 2000 | 1) On-site monitoring and inspection once a Year. | Sacrificial zinc mesh pile jacket on standard and pre-stressed piles with submerged bulk anode / Work consisted of installing C.P. pile jackets on selected piles (20 piles total) on four different bridges located along the causeway. Work was performed under same contract for other major restoration work. |
| Apalachicola Bay Bridge/490032/ 1986 | | US 98 (SR 30) Apalachicola | Pile Bents/14,175 ft. | Under construction 2000 | 1) On-site monitoring and inspection once a Year. | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P. on pre-stressed Piles (6 ft. Long jackets)/ Rehabilitation of 311 Pre-stressed Pilings / Jackets extend from MLW to 6 ft. above. Installed to protect structurally cracked piles. |
| Bennet Causeway over Indian River/ No. 700110/ 1968 | M. Duncan | SR 528 over Indian River - Cocoa Beach | Pile Bents and Footers/2,296 ft | Design Phase 2001 | | Sacrificial /Zinc Mesh Pile Jacket C.P. on pre-stressed Piles (6 ft. long jackets)/ Rehabilitation of 24 Pre-stressed Pilings / Jackets extend from MLW to 6 ft. above. |
| | | | | | | Sacrificial/ Ten bulk anodes installed on crashwall to protect cracked wall from corrosion. |
| Courtney Campbell Bridge/ 100301/ 1972 | | SR 60 over Tampa Bay - Tampa | Pile Bents and Footers/ ft | Design Phase 2001 | | Sacrificial/Zinc Mesh Pile Jacket C.P. on pre-stressed Piles (length of jackets varies)/ Rehabilitation of 27 Pre-stressed Pilings / Jackets extend from below water to approximately 6 ft above. |
| | | | | | | Sacrificial/ zinc sprayed anode on beams and columns/ Approximately 2,000 sq. ft. of anode. |
| Allen Creek Bridge /No. 150036/ 1951 | | U.S. 19 Tampa | Pile Bents / 755 ft | Design Phase 2001 | | Sacrificial/ zinc sprayed anode on beams/ Approximately 900 sq. ft. of anode. |

| | | | | | | |
|---|------------|--------------------|---|-------------------------|---|--|
| Sebastian Inlet Bridge/ No. 880005/1968 | | U.S.A1A Melbourne | Round columns supported on square footers / 1,575.8 ft | Design Phase 2001 | | Impressed current/ Titanium Mesh Anode Structure Encaosulation C.P. with remote monitoring/ Rehabilitation of six footers with severe structural damage on three piers./ C.P. installed in addition to structural repairs. |
| Channel five Bridge/ No. 900098/ 1979 | | U.S.1 Florida Keys | Pre-cast box piers supported on square footers and drilled shafts | Under Construction 2001 | | |
| Radio Tower/ 1997 | R. Langley | U.S. 1 Bunnell | N/A | 1997 | 1) On-site monitoring and inspection once a Year. | Sacrificial / Underground Magnesium Anodes/ Installed on one drilled shaft type tower foundation with solar powered remote monitoring/ Installed by Contractor immediately after construction to prevent corrosion due to deficient fabrication of the foundation. |
| Traffic Signal Mast/ 1998 | R. Langley | Cocoa Beach | N/A | 1998 | 1) On-site monitoring and inspection once a Year. | Sacrificial / Underground Magnesium Anodes/ Installed on two drilled shaft type traffic mast foundation/ Installed by Contractor immediately after construction to prevent corrosion due to deficient fabrication of the foundation. |

2.2. INVESTIGACIÓN GENERAL DE PRE-DISEÑO PARA EL USO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN SUBESTRUCTURAS DE PUENTES.

Los sistemas de protección catódica presentan un compendio de factores y condiciones físicas de la estructura al ser evaluados con anterioridad a la selección y diseño.

ETAPAS DE INVESTIGACIÓN.

- 1.- Investigación de literatura e historia de deficiencias de la estructura.
- 2.- Caracterización general de condiciones existentes en la estructura.
- 3.- Caracterización detallada de componentes estructurales.
- 4.- Evaluación de las alternativas de reparación.

I. INVESTIGACIÓN DE LITERATURA

- 1.- Reportes de construcción y rehabilitaciones previas.
- 2.- Eficacia de reparaciones efectuadas anteriormente.
- 3.- Publicaciones de instituciones de investigación relativas al tipo de deterioro presente.
- 4.- Entrevistas con personal asociado con la estructura.

II. CARACTERIZACIÓN GENERAL.

- 1) Identificación de condiciones típicas existentes.
 - a. Componentes más afectados.
 - b. Componentes con posible deterioro futuro.
 - c. Otros problemas presentes.
- 2) Muestreo para mensura de cloruros y carbonatación.
 - a. En todos los componentes afectados
 - b. En localidades representativas de la estructura

c. A varias elevaciones

3) Mensuras de potencial de voltaje.

- a. Se identifican áreas de posible mayor corrosión (ASTM 876).
- b. Es importante en la selección del tipo de protección catódica.

4) Mensuras de hormigón □dad eléctrica del hormigón.

- a. Se identifican áreas con mayor posibilidad de corrosión.
- b. Es importante la selección del tipo de protección catódica.

5) Identificación de la frecuencia y magnitud de grietas, y delaminaciones en el hormigón.

- a. Se cuantifica la cantidad de deterioro que necesita corrección.

6) Evaluación petrográfica.

- a. Se identifica si la protección catódica es aplicable al tipo y condición del hormigón.
- b. Se identifican otros problemas del hormigón.

III. CARACTERIZACIÓN DETALLADA.

1) Removido de hormigón delaminado en muestras representativas.

- a. Permite la inspección visual del arreglo actual de la armadura.
- b. Se determina la existencia de posibles problemas estructurales.

2) Evaluación física de la armadura.

- a. Mensura de área seccional.
- b. Se procede con una determinación final relativa a preocupaciones estructurales.

3) Mensura de continuidad eléctrica.

a. Influye en la selección de protección catódica como alternativa de reparación.

b. Necesario para el estimado de costos.

VI. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.

1) Identificación de los objetivos principales de reparación.

a. Para proveer uso seguro de la estructura.

b. Para satisfacer el periodo de vida útil especificado.

c. Para satisfacer otros objetivos establecidos por el propietario.

2) Determinación de reparación mínima.

a. ¿Es necesario reemplazar el componente estructural?

b. Es necesario instalar protección catódica.

c. Es necesario instalar protección catódica y refuerzo estructural.

d. Reparación no es necesaria.

3) Selección del tipo de protección catódica de mayor efectividad.

a. Sistema de corriente impresa.

b. Sistema de protección galvánica.

4) Factores de consideración para la selección del sistema de protección catódica.

A. Tipo de ánodo aplicable (sistema)

a. voltaje necesario.

b. vida de servicio útil.

c. aplicable a la geometría de la estructura.

B. Suplidor de corriente.

a. ¿Es necesario para la operación del ánodo?

b. Tipo de suplidor.

C. Método de instalación.

- a. Nivel de dificultad de instalación.
- b. Preparación de sustrato.
- c. Corrección de continuidad eléctrica.

D. Monitoreo periódico.

- a. Personal adiestrado disponible.
- b. Monitoreo remoto.
- c. Itinerario de monitoreo.

E. Costos.

- a. Instalación inicial.
- b. Mantenimiento durante vida de servicio.
- c. Monitoreo.

APÉNDICE 3.

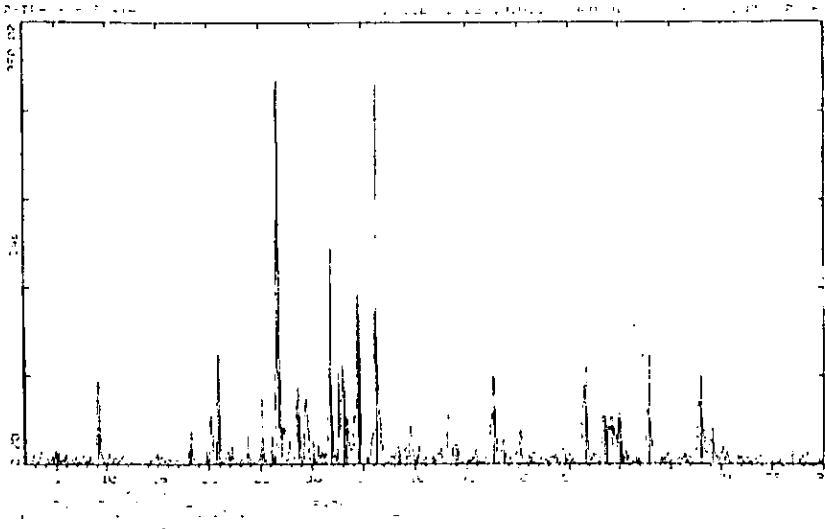


Figura 3.1. Diafractograma de Productos de Corrosión de la Probeta B.
Parte Interna (Concreto-Zinc).

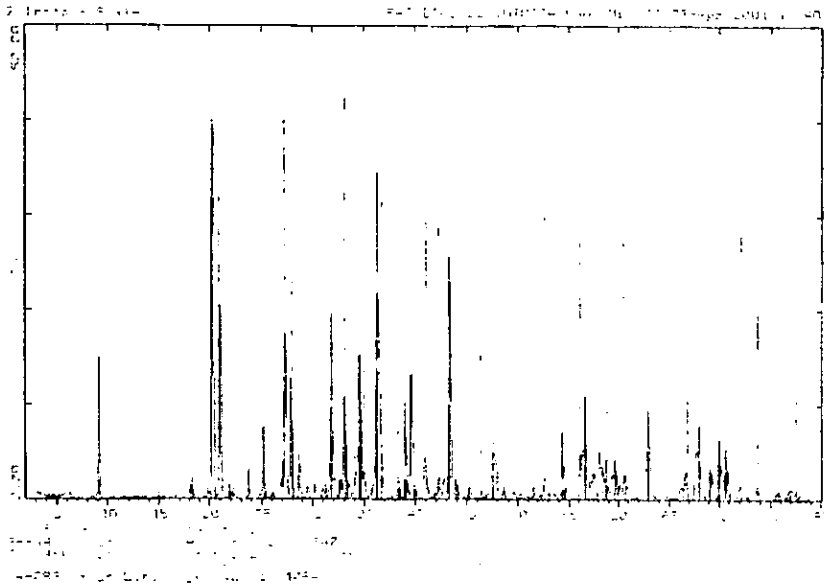


Figura 3.1. Diafractograma de Productos de Corrosión de la Probeta B.
Parte Externa (Zinc).