

Nº 45  
2001



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA



Corrosión por Corriente  
Alterna de Alambre de  
Acero Galvanizado y  
Zinalco en Agua de Mar

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO  
P R E S E N T A  
TEODORO JUAN GROVAS PEREZ



TESIS CON  
ORIGEN

MEXICO, D. F.

1992



## **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 está 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.

## INDICE

I.- Introducción .....	1
II.- Generalidades .....	2
II.1.- Zinalco .....	2
II.2.- Acero galvanizado .....	3
II.2.1.- Características electroquímicas del zinc .....	3
II.2.2.- Métodos para aplicar un recubrimiento de zinc sobre un sustrato de acero .....	4
II.3.- Características del agua de mar .....	5
II.4.- Recubrimiento de zinc en agua de mar y soluciones de cloruro de sodio .....	8
II.5.- Corrosión por corriente alterna .....	10
III.- Técnica experimental .....	16
III.1.- Determinación del peso de zinc en alambre de acero galvanizado .....	16
III.2.- Determinación de la porción más delgada de un recubrimiento de zinc .....	16
III.3.- Determinación de la corrosión a circuito abierto (sin AC) .....	17
III.4.- Determinación de la corrosión en presencia de corriente AC impresa .....	18
IV.- Resultados experimentales .....	20
IV.1.- Peso del zinc en alambre de acero galvanizado .	20
IV.2.- Porción más delgada del recubrimiento de zinc .	20
IV.3.- Velocidad de corrosión a circuito abierto (sin AC) .....	21

IV.4.- Velocidad de corrosión en presencia de corriente AC impresa .....	23
V.- Discusión .....	31
V.1.- Pruebas de caracterización .....	31
V.2.- Pruebas de pérdida de peso .....	31
VI.- Conclusión .....	36
Bibliografía .....	37
Apéndice .....	40
Apéndice A .....	40
Apéndice B .....	42
Apéndice C .....	43
Apéndice D .....	44
Apéndice E .....	45

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

## I.-INTRODUCCION

La corrosión es un fenómeno químico que tiene lugar entre un material -usualmente un metal- y su medio ambiente, produciendo un deterioro en la estructura y propiedades del mismo, por lo tanto, es necesario conocer la agresividad del medio ambiente sobre los materiales empleados para llegar a tener la evaluación del problema y encontrar medios para controlarlo.

Esto tiene una primordial importancia en la sociedad moderna, ya que ésta requiere del uso de metales y aleaciones para su desarrollo, siendo los anteriores empleados en casi todas las necesidades que llevan a tener bienestar; están presentes en el hogar, en la industria, en instalaciones portuarias, marinas y submarinas, en los sistemas de comunicación, etc., es por ello que el conocimiento de la forma en que el medio ambiente los afecta es tan importante, y consecuentemente prever un uso racional de los recursos disponibles y satisfacer las necesidades sociales; ambos de la mejor manera.

El alambre de acero galvanizado es utilizado como armadura en conductores eléctricos empleados en medios submarinos (ver figura 1) para brindarles una mayor resistencia a los esfuerzos a los que son sometidos. En estas armaduras se han detectado corrientes inducidas o impresas que han llegado a afectar la duración del recubrimiento de zinc en el alambre de acero galvanizado. Un problema concreto es el ocurrido en el cable eléctrico que suministra corriente a la Isla de Cancun, atravesando la Laguna de Nichupté, en el Estado de Quintana Roo; donde la armadura de alambre de acero galvanizado presentó mayor corrosión que la estimada, siendo la causa de este comportamiento la presencia de una corriente alterna.

Este trabajo tiene como objeto evaluar la corrosión del

alambre de acero galvanizado, comparándolo con la corrosión que sufre el Zinalco por medio de la técnica de pérdida peso sin corriente y con corriente alterna impresa de  $3 \text{ mA/cm}^2$  en soluciones de NaCl al 3 % y agua de mar sintética. Se ha encontrado que el alambre de Zinalco presenta un comportamiento similar al alambre de acero galvanizado en ausencia de corriente; con respecto a su comportamiento cuando ésta presente una corriente alterna el alambre de Zinalco presenta una mayor resistencia a la corrosión, aproximadamente el doble, con respecto al alambre de acero galvanizado.

## **CAPITULO II**

### **GENERALIDADES**



## II.- GENERALIDADES.

### II.1.- ZINALCO.

Se conoce que el Zinalco es una aleación de zinc-aluminio-cobre realizada para aminorar la dependencia del país, en lo que al aluminio se refiere, sustituyéndolo por una aleación base zinc que tenga propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, similares a las del aluminio.

Esta aleación pesa el doble que el aluminio, pero tiene el doble de resistencia, con el pueden elaborarse piezas de un espesor menor que las requeridas para el aluminio. Sus propiedades físicas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1  
Propiedades físicas del Zinalco.

TEMPERATURA DE FUSION	694-754 °K
DENSIDAD	5.4*10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup>
MODULO ELASTICO	100 GPa
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	5.9*10 <sup>-6</sup> Ohm <sup>-1</sup>
CONDUCTIVIDAD TERMICA	125.5 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
COEF. DE EXPANSION TERMICA (270-548 °K)	25*10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>

Hasta la fecha, se han realizado estudios del Zinalco en soluciones de cloruro de sodio, en las cuales,

este presenta un comportamiento frente a la corrosión semejante al zinc. El producto de corrosión identificado es el hidroxocloruro de zinc ( $ZnCl_2 \cdot 4Zn(OH)_2$ ) (8).

## II.2.- ACERO GALVANIZADO.

### II.2.1.- Características electroquímicas del zinc.

El zinc es un elemento activo dentro de la serie electroquímica, según pone de manifiesto su potencial electroquímico de equilibrio,  $E_o = -0.77$  V, frente al electrodo estandar de hidrógeno. El hierro tiene un potencial  $E_o = -0.44$  V, es decir, se trata de un material anódico respecto al hidrógeno, pero catódico respecto al zinc.

En estas condiciones, podría pensarse, que el zinc constituye un metal no adecuado para proteger mediante un recubrimiento al hierro, ya que al ser un metal menos noble su tendencia a disolverse es mayor; no obstante, como los potenciales de equilibrio constituyen una información termodinámica, no tienen en cuenta los aspectos de no equilibrio. En realidad, y como consecuencia de la disolución anódica del zinc, tiene lugar la formación de unos productos de corrosión que son bastante adherentes y compactos y que, al depositarse sobre el zinc, ofrecen una resistencia a la difusión iónica y una resistencia eléctrica que frena la velocidad de disolución del zinc llevándola a unos valores inferiores a los del hierro, este por su parte, aún siendo más catódico, y por ello, termodinámicamente más estable, tiene cinética de disolución que no se ve frenada por los productos de corrosión formados, ya que éstos son porosos y no adherentes.

En consecuencia, un recubrimiento anódico como el zinc, constituye un recubrimiento de características electroquímicas adecuadas para la protección del hierro. Además, si se produjera una ruptura en el recubrimiento, con lo que dejaría al desnudo al metal base, tendría lugar la

formación de una pila hierro-electrolito-zinc en la que éste, naturalmente actuará como ánodo, sacrificándose en beneficio del hierro. Los productos de corrosión actuarían entonces de barrera protegiendo la zona catódica siempre que ésta fuera de pequeñas dimensiones, interrumpiendo el circuito electroquímico de la pila (4).

#### 11.2.2.- Métodos para aplicar un recubrimiento de zinc sobre un sustrato de acero.

Los métodos para el recubrimiento del acero por medio de zinc son: galvanización por inmersión en caliente, electrozincado (zincado electrolítico), metalización Sherardización y con pinturas ricas en zinc. Una breve descripción de estos métodos se presenta en seguida:

a) Galvanización por inmersión en caliente.- El recubrimiento de zinc se obtiene por inmersión de las piezas a proteger, debidamente acondicionadas, en un baño de zinc fundido.

b) Electrozincado.- El depósito de zinc es formado por vía electroquímica a partir de sus sales. Se denomina con frecuencia galvanizado. El espesor del zinc conseguido mediante este procedimiento es notablemente inferior y su acabado mucho más brillante. Su resistencia a la corrosión, debido al menor espesor, es también inferior.

c) Metalización (proyección térmica).- Se basa en la proyección de gotas de metal fundido contra la base de acero obteniéndose un recubrimiento poroso de granulos de zinc sobre el material a proteger.

d) Sherardizado.- Es la obtención de un recubrimiento de zinc mediante un proceso de difusión. Para ello se ponen en contacto, en presencia de un producto inerte, polvo de zinc y el material a recubrir calentándose a una temperatura de 360 - 380°C. Se suele emplear para recubrir piezas de tamaño pequeño.

e) Pinturas ricas en zinc.- Pinturas de muy diversa naturaleza y con una alta concentración de zinc, como

pigmento, son empleadas para proteger las superficies metálicas (5).

### II.3.- CARACTERISTICAS DEL AGUA DE MAR.

El agua de mar no es una simple solución de sales en agua, no es tampoco un medio químicamente definido, sino que es sede de perpetuos cambios y transformaciones continuas. Al agua de mar se le puede atribuir una fisiología propia: complica extraordinariamente el estudio de su papel en los fenómenos de corrosión. Cubriendo 2/3 de la superficie de la tierra, es el electrolito natural de mayor concentración salina. Es aproximadamente una solución acuosa de cloruro de sodio al 3.5 %, aunque de formulación bastante más compleja. En su composición participan prácticamente todos los elementos de la corteza terrestre, si bien algunos de ellos en muy pequeña cantidad. Contiene, asimismo, innumerables sustancias orgánicas a concentraciones extremadamente bajas.

La salinidad (cantidad de sal, expresada en gramos, que contiene un kilogramo de agua de mar) en los océanos no suele variar, estando por lo general comprendida entre 33 y 37 partes por mil. El agua de mar, con un contenido salino fijado comúnmente en un 3.5 %, deja un residuo sólido que contiene un 79 % de cloruro de sodio y un 11 % de cloruro de magnesio.

En la tabla 2 se detallan los porcentajes de los principales iones que componen las aguas oceánicas. De todos ellos, el ión cloruro es el más nocivo desde el punto de vista de la corrosión -los cloruros metálicos son en su mayoría productos muy solubles-, unido a su facilidad de deformación y penetración (pequeño volumen iónico) en la red cristalina de las posibles películas pasivas que se forman sobre los metales, explica su gran poder corrosivo.

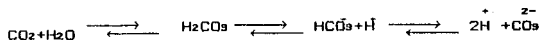
**Tabla 2**  
**Participación de los principales iones**  
**que entran en la composición de las aguas**  
**Oceánicas.**

Cationes	%	Aniones	%
Sodio	30.4	Cloruro	55.2
Magnesio	3.7	Sulfato	7.7
Calcio	1.16	Bromuro	0.19
Potasio	1.1	Acido Bórico	0.07
Estroncio	0.04	Bicarbonato y Carbonato	0.35

Disueltos en el agua de mar se encuentran los gases atmosféricos  $N_2$ ,  $O_2$  y  $CO_2$ . De todos ellos, el oxígeno desempeña un papel primordial en los fenómenos de corrosión, ya que suministra la sustancia principal para que se produzca la reacción catódica:



El dióxido de carbono disuelto en el agua de mar se halla en equilibrio con los iones bicarbonato y carbonato, así como el ácido carbónico e ión hidrógeno:



Este equilibrio tiene una marcada influencia en la

formación de sedimentos calcáreos, de notoria importancia en algunos fenómenos de corrosión, ya que la precipitación de carbonatos de calcio, magnesio y estroncio reduce el acceso del oxígeno a la superficie metálica.

El agua de mar también es un medio tamponado. Por lo general, su pH está comprendido entre 8.1 y 8.3 resultando de un balance entre los iones básicos existentes en el agua de mar y el anhídrido carbónico procedente de la atmósfera. Su resistividad es baja ( $3 \times 10^{-2} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ). Su alto contenido salino la convierte en un excelente electrólito para el funcionamiento de las pilas de corrosión, También sus características físico-químicas la convierten en una solución apta para la vida, que se desarrolla de manera pujante en las más diversas formas de adaptación de la flora y la fauna, mismos que originan incrustaciones, que a su vez, causan varios problemas de corrosión al fijarse a las estructuras o componentes metálicos que trabajan en contacto con el agua de mar.

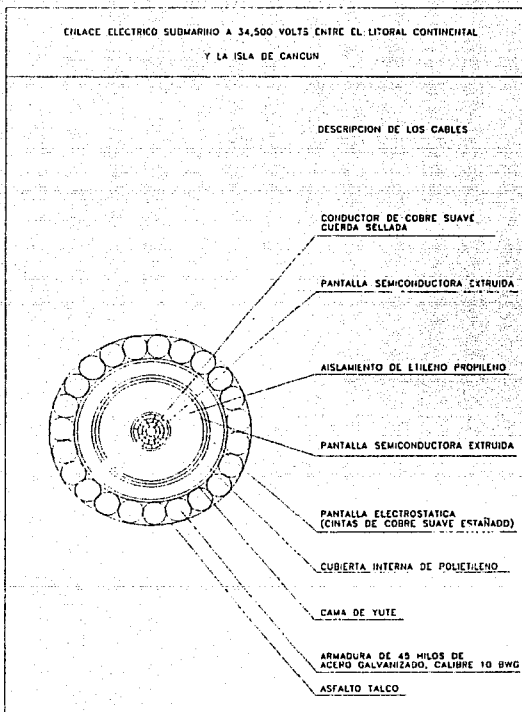
Así pues, la corrosión marina se manifiesta de muy diversas formas. Prácticamente todos los tipos de corrosión pueden ocurrir en el agua de mar. Severa destrucción metálica por altas velocidades de corrosión en un ataque esencialmente uniforme ocurre raras veces en el agua de mar, ya que conocida la fuerte corrosividad del agua de mar se evita la utilización de materiales que tengan frente a este medio fuertes ataques generalizados. Más frecuentemente, la corrosión marina toma la forma de ataque localizado en determinadas zonas del componente metálico, permaneciendo inalterables las restantes: formación de picaduras, corrosión en resquicios (hendiduras), corrosión en forma de tunel, corrosión galvánica, corrosión bajo tensión, ataque por choque, fatiga con corrosión, ataque por cavitación y corrosión preferencial (selectiva) de una determinada fase o constituyente del metal, son las fallas más abundantes(4).

#### II.4.- RECUBRIMIENTO DE ZINC EN AGUA DE MAR Y SOLUCIONES DE CLORURO DE SODIO.

Alambres de acero galvanizado son empleados para soportar y proteger cables submarinos. A estos alambres se les proporciona una protección adicional con recubrimientos de yute y asfalto. el uso del zinc, aparentemente es un factor que alarga la vida de las estructuras sumergidas. Una investigación realizada en armaduras de alambre de acero galvanizado. En un puerto después de un período de inmersión, demuestra que la envoltura de yute con asfalto restringe la libre circulación del agua y permite el estancamiento de la solución cerca de la superficie del alambre que comienza a saturarse de los productos de corrosión del zinc. En otras palabras, la presencia de la cobertura de yute asfaltado promueve la formación de un film protector en el alambre galvanizado.

La exposición de zinc desnudo en agua de mar, en condiciones en las que existe oxígeno disuelto proporciona una gran evidencia de ataque. En una exposición en agua de mar después de cuatro años en el Canal de Bristol, una barra de acero galvanizado presenta una menor pérdida de peso con respecto a otras barras de hierro y zinc, empleadas en la misma prueba. La barra de zinc presenta una capa de productos de corrosión adherente, en su superficie se forman excrecencias y crestas. Recubrimientos de zinc electroplaqueados con un espesor de 0.0005 pulgadas mostró proporcionar una considerable protección con respecto al aluminio y "Duraluminio" en un período de doce meses estando sujetos a brisa marina e inmersiones intermitentes en agua de mar.

En condiciones ordinarias realizando inmersiones continuas en agua de mar, fluyendo esta a baja velocidad, un recubrimiento de zinc proporciona un año de protección por cada milésima de pulgada. Estudios de laboratorio realizados a hojas de zinc inmersas en soluciones de cloruro de sodio



**Figura 1**  
**Corte transversal de un cable**  
**eléctrico submarino.**



mostraron que el mayor ataque ocurrió en soluciones que contenían 0.5 % de cloruro de sodio, mucho mayor que las de una solución que tenga 3 % de cloruro de sodio. Consecuentemente, los resultados obtenidos en estas pruebas de corrosión dependen de las condiciones en que estas son llevadas a cabo.

En la figura 1 se muestra el corte transversal de un cable eléctrico submarino.

#### 11.5.- CORROSION POR CORRIENTE ALTERNA AC.

En el año de 1956, en los Estados Unidos de Norteamérica, empezó a tenerse un especial interés en los efectos producidos por la corriente AC en la corrosión. Al presentarse casos graves de corrosión en tuberías para instalaciones de gas, agua y alcantarillado próximas a las líneas de transmisión. Encontrando que éstas inducen una corriente secundaria sobre las tuberías enterradas y una caída de potencial entre la anterior y el medio circundante (tierra) entre los 5 y 70 V (7).

Esto provocó el interés de los investigadores, que desde entonces realizan investigaciones con diversos materiales. A continuación se presentan algunos de estos trabajos realizados después de 1960:

Gellings(8) reportó que únicamente sistemas con curvas de polarización anódica no lineal se ven influenciadas por la corriente AC mientras que los sistemas con curvas de polarización lineal no mostrarán influencia debida a la corriente AC. Siendo válidos sus análisis para frecuencias menores a los 100 Hz.

Evans(9) muestra lo que probablemente ocurre cuando dos piezas mitad hierro mitad aluminio enterradas en la tierra son unidas por una fuente de corriente AC (ver figura 2); en el medio ciclo cuando la pieza de la izquierda es anódica, el hierro puede sostener el ataque anódico mientras que el aluminio no efectúa debidamente su papel como ánodo; durante

el siguiente medio ciclo el aluminio desempeña un papel más importante como cátodo y provisionalmente como ánodo, la reacción catódica no deposita mucho hierro del disuelto durante el primer medio ciclo. Concluyendo, que si esto es verdad, aluminio y hierro no deben estar en contacto aún cuando una corriente AC este ausente y que el ataque puede comenzar más posiblemente en presencia de corriente AC que en su ausencia.

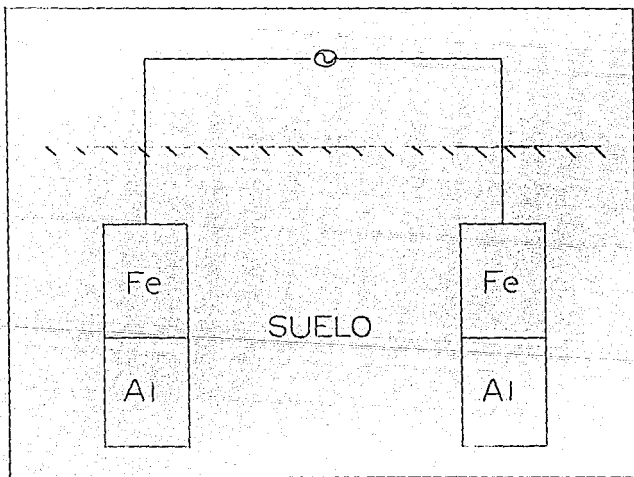


Figura 2  
Probable efecto de corriente AC en  
barras concéntricas de Fe-AL.

Jones<sup>(10)</sup> determinó velocidades de corrosión por el método de pérdida de peso a muestras de aceros al carbon y aceros de baja aleación en una solución de NaCl 0.1 N con y sin una densidad de corriente AC de 30 mA/cm<sup>2</sup> (60 cps) en cada condición, aereada y purgada con N<sub>2</sub>. Encontrando que la velocidad de corrosión no se ve afectada por la corriente AC en la solución aereada y en la solución desaereada encontró que la corriente AC incrementa la velocidad de corrosión en factores de 4 a 6 para estos aceros (ver tabla 3).

Tabla 3  
Velocidad de corrosión por pérdida de peso  
en solución 0.1 N de NaCl.

Aleación	Dens. AC mA/cm <sup>2</sup>	V <sub>corr</sub> mdd	
		Aereada	Desaereada
Cor-ten	30	79.2	13.4
	0	74.8	2.9
Acero al carbon	30	75.8	16.3
	0	77.3	3.0

Este mismo investigador realizó pruebas de corriente DC y con corriente AC para determinar la velocidad de corrosión en el mismo tipo de solución, únicamente en la condición desaereada para ser comparadas. Sus resultados se muestran en la tabla 4. En estas determinaciones se aplica una corriente DC de 15 mA/cm<sup>2</sup>, que es considerada equivalente a una corriente AC de 30 mA/cm<sup>2</sup>. El porcentaje de incremento en la velocidad de corrosión debido a la corriente AC comparado con la velocidad de corrosión debido a la corriente DC es muy bajo, 0.11 % o menor.

Puschel<sup>(10)</sup> estudio la corrosión causada por una

corriente AC inducida en cables enterrados; encontrando que las fallas ocurren generalmente en los alambres que tienen un mayor contacto con la tierra, proponiendo que la corrosión es debida a la rectificación de la corriente AC en la interface alambre/tierra.

Pérezu hace la consideración de que es importante tener en cuenta la presencia de una corriente AC impresa en alambres de acero galvanizado, la cual puede afectar los valores del potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. Concluyendose que existe una marcada tendencia

Tabla 4  
Comparación del incremento de la corrosión  
causado por corriente AC y una corriente DC anódica  
(en solución 0.1 N de NaCl)

Aleación	Velocidad de corrosión mdd sin corriente	de corrosión mdd		%
		30 mA/cm <sup>2</sup> AC	15 mA/cm <sup>2</sup> DC	
Cor-ten	2.9	13.4	13.3852	0.11
Acero al carbon	3.0	16.3	16.2935	0.04

del potencial de corrosión a desplazarse en la dirección positiva (yendo del valor del potencial del Zn al de los intermetálicos Fe-Zn con el transcurso del tiempo).

Hamlinz realizó un estudio cuyo objetivo es verificar conclusiones previas, indicando la mínima influencia de una corriente AC de 60 Hz en tuberías protegidas catódicamente, llegándose a las siguientes conclusiones: frecuencias de 60 y 120 Hz pueden iniciar y acelerar la corrosión de metales por aumento de los

potenciales de ánodos y cátodos; la mayor parte de los metales se convierten catódicamente cuando se les aplica una corriente AC teniendo solo pequeñas áreas anódicas; los metales bajo la influencia de la corriente AC pueden ser protegidos catódicamente, pero usualmente a altas densidades de corriente; si la corriente AC esta presente es necesario efectuar cambios en el diseño de la protección catódica, particularmente si son empleados ánodos galvánicos.

Chinn, efectuó estudios de polarización anódica del acero dulce en soluciones de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (pH 3-9) en presencia de corriente AC. Las mediciones se hicieron dentro del rango de densidades de corriente AC de 0 a  $200 \text{ mA/cm}^2$  y frecuencias de 20 a 6000 Hz. Encontrando que el potencial de corrosión del acero dulce cambia a la dirección activa en presencia de esta. La magnitud del potencial se incrementa con el incremento de la densidad de corriente AC y decrece con el aumento de la frecuencia AC.

Por último, cabe observar, que una corriente AC puede acelerar los procesos de corrosión, haciendo la aclaración de que los mecanismos de aceleración no son bien conocidos, por lo que, es necesario realizar investigaciones en particular para cada metal o aleación en los diferentes medios con los que esten en contacto, mediante diferentes métodos como son: el que se utiliza en este trabajo, pérdida de peso, que sirve para determinar velocidades de corrosión de los metales en estudio que llevan a tener un conocimiento de su comportamiento; o mediante el estudio de mediciones electroquímicas de los procesos anódicos y catódicos que se llevan a cabo simultáneamente sobre la superficie del metal y obtener mediante relaciones de Tafel expresiones para el cálculo de los potenciales de corrosión y corriente de corrosión cuando una corriente AC es impresa en la superficie del metal. La corriente de corrosión es un dato útil para obtener el valor de la velocidad de corrosión.

Se puede concluir que los daños producidos por la

corriente AC dependerá no sólo del tipo de corriente, sino también de las particularidades del proceso corrosivo como son: la densidad de corriente AC, la frecuencia de la corriente AC, el tipo de metal o aleación y la condición del medio.

## **CAPITULO III**

### **TECNICA EXPERIMENTAL**

### III.- TECNICA EXPERIMENTAL.

La técnica experimental consta de cuatro partes a las que son sometidas las muestras de alambre.

Las primeras dos sirven para caracterizar al alambre de acero galvanizado y las dos últimas son generales para el alambre de acero galvanizado y el alambre de Zinalco.

#### III.1.- DETERMINACION DEL PESO DE ZINC EN ALAMBRE DE ACERO GALVANIZADO<sup>1</sup>.

Este método provee de un ensayo estandar para determinación del peso del recubrimiento, para ser comparado con las especificaciones. Un recubrimiento de zinc proporciona protección contra la corrosión en hierro o acero. El grado de protección es proporcional al peso de zinc. Es efectuada de acuerdo con la norma ASTM A90-B1<sup>1</sup>. Consiste en sumergir muestras de alambre en una solución de ácido clorhídrico y determinar el peso que pierden por esta operación en g/m<sup>2</sup>; con base en este valor y usando las tablas contenidas en la norma inferir su espesor en  $\mu\text{m}$ .

Las pruebas se hicieron por quintuplicado para determinar el valor de la incertidumbre de la determinación<sup>2</sup> usó.

#### III.2.- DETERMINACION DE LA PORCION MAS DELGADA DE UN RECUBRIMIENTO DE ZINC<sup>3</sup>.

La determinación se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM A239-73(83). La norma, también llamada método de Preece<sup>3</sup>, tiene poco sentido práctico; siendo

1 ver apéndice A.

2 ver apéndice B.

3 ver apéndice C.



recomendado su uso para la determinación de la porción más delgada del recubrimiento entre muestras de diferente calidad. Esencialmente consiste en una disolución oxidante del zinc por los iones cúpricos de una disolución de sulfato, con depósito de cobre metálico reducido sobre la superficie del acero; el cobre una vez que ha eliminado el zinc de la superficie del acero cementa sobre de esta de modo adherente. Se determina el número de inmersiones de un minuto que soporta el material sin que se produzca el depósito de cobre adherente y la ultima con formación de cobre adherente para tener el número total de inmersiones.

### III.3.- DETERMINACION DE LA CORROSION A CIRCUITO ABIERTO (SIN AC).

Tiene por objeto evaluar la corrosión en alambre de acero galvanizado y alambre de Zinalco al ser sometidos a soluciones salinas de NaCl al 3 % y agua de mar sintética<sup>4</sup>(10).

Para lo cual se hizo el siguiente procedimiento:

- a) Cortar los alambres con una longitud de 8 cm aproximadamente.
- b) Lavarlos con tricloroetileno, enjuagarlos con alcohol etílico y secarlos con una corriente de aire.
- c) Medir su diámetro.
- d) Pesar los alambres.
- e) Efectuar las inmersiones en las soluciones salinas por triplicado (para el alambre de acero galvanizado tres muestras en solución de NaCl al 3 % y tres en agua de mar sintética. El mismo procedimiento se sigue para los alambres de Zinalco).

f) Efectuar las exposiciones ante los medios corrosivos durante 30 días.

<sup>4</sup> ver apéndice D.

<sup>5</sup> ver apéndice E.

g) Después de los cuales se lleva a cabo la limpieza de los productos de corrosión.

h) Determinar la pérdida de peso.

i) con los datos obtenidos, calcular la velocidad de corrosión en mdd.

#### III.4.- DETERMINACION DE LA CORROSION EN PRESENCIA DE AC IMPRESA.

Tiene por objeto evaluar la corrosión en alambre de acero galvanizado y alambre de Zinalco al ser sometidos a soluciones salinas de NaCl al 3 % y agua de mar sintética, en presencia de una corriente AC de  $3 \text{ mA/cm}^2$  (60 cps).

Para éste experimento se montó el equipo mostrado en la figura 3.

El equipo consta de un transformador que convierte la AC de 120 V a 6 V (60 cps); que es conectado a las muestras de alambre inmersos en las soluciones salinas; en una de las ramas es conectado un amperímetro que se utiliza para obtener mediciones de la variación de corriente y una resistencia de 100  $\Omega$ ; por último se conecta a una de las ramas del alambre un electrodo saturado de Calomel, entre los cuales se conecta un voltímetro para obtener lecturas de la variación de voltaje.

El procedimiento es el mismo que el empleado en la determinación de la corrosión a circuito abierto, pero con las siguientes modificaciones:

a) La longitud de los alambres es de 27 cm aproximadamente.

b) Las inmersiones en las soluciones salinas son de 7 días.

c) Y se obtienen lecturas de corriente y voltaje cada 24 Hrs. aproximadamente.

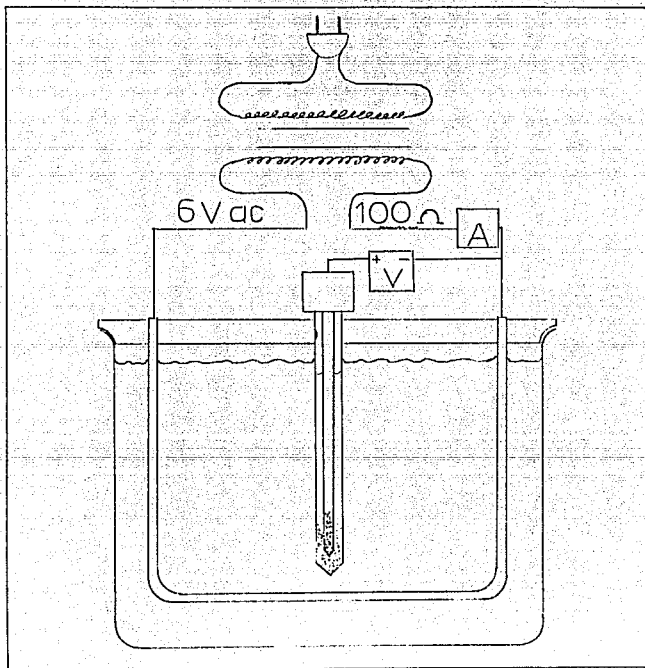


Figura 3

Equipo empleado para la evaluación de la corrosión por pérdida de peso (con A.C. impresa).

## CAPITULO IV

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

#### IV.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los resultados obtenidos se clasifican de la forma siguiente:

##### IV.1.- PESO DEL ZINC EN ALAMBRE DE ACERO GALVANIZADO.

Tabla 5

MUESTRA No.	PESO DEL RECUBRIMIENTO g/m <sup>2</sup> .
1	373.61
2	385.40
3	380.22
4	332.25
5	345.71

Promedio del peso de las muestras =  $\bar{x} = 363.44 \text{ g/m}^2$ .

Incertidumbre =  $\Delta = 29.06 \text{ g/m}^2$ .

Límite de confiabilidad =  $\mu = (363.44 \pm 29.06) \text{ g/m}^2$ .

Espesor del recubrimiento =  $E = 51.46 \text{ }\mu\text{m}$ .

##### IV.2.- PORCION MAS DELGADA DEL RECUBRIMIENTO DE ZINC.

En tres ensayos se obtuvo el depósito de cobre adherente a 8 inmersiones.

##### IV.3.- VELOCIDAD DE CORROSION A CIRCUITO ABIERTO (SIN AC)

A continuación se reúnen los datos obtenidos después de

30 días de exposición. Las pruebas se hicieron por triplicado hasta un total de 12, tal como se explicó en el capítulo anterior.

Datos para el cálculo de la velocidad de corrosión.

Tabla 6

Alambre de acero galvanizado en solución de NaCl al 3 %.

No. de muestra	Tiempo Hrs	Area cm <sup>2</sup>	Pérdida de peso g
1	720	11.30	0.0306
2	720	10.96	0.0334
3	720	10.84	0.0313

Tabla 7

Alambre de acero galvanizado en agua de mar sintética.

No. de muestra	Tiempo Hrs	Area cm <sup>2</sup>	Pérdida de peso g
1	720	11.27	0.0078
2	720	10.37	0.0088
3	720	10.96	0.0071

Tabla 8

Alambre de Zinalco en solución de NaCl al 3 %.

No. de muestra	Tiempo Hrs	Area cm <sup>2</sup>	Pérdida de peso g
1	720	7.51	0.0185
2	720	7.07	0.0163
3	720	6.96	0.0187

Tabla 9  
Alambre de Zinalco en agua de mar sintética.

No. de muestra	Tiempo Hrs	Area cm <sup>2</sup>	Pérdida de peso g
1	720	7.23	0.0042
2	720	7.13	0.0054
3	720	6.94	0.0045

Velocidades de corrosión de alambre de acero galvanizado y alambre de Zinalco; a circuito abierto (sin AC).

Tabla 10

Alambre de acero galvanizado.	
En solución de NaCl al 3 %.	En agua de mar sintética.
mdd.	mdd.
9.04	2.33
10.18	2.84
9.65	2.18

Tabla 11

Alambre de Zinalco.	
En solución de NaCl al 3 %.	En agua de mar sintética.
mdd.	mdd.
8.24	1.92
7.72	2.55
8.95	2.14

IV.4.- Determinación de la corrosión en presencia de AC impresa.

En ésta sección se presentan los datos obtenidos después de 7 días de exposición. Primero se tabulan los datos de la variación del voltaje (vs ECS) y corriente alterna, en función del tiempo; los datos para el cálculo de la velocidad de corrosión ; y los valores de las velocidades de corrosión.

Datos de la variación del voltaje (vs ECS) y corriente AC, en función del tiempo.

Tabla 12  
Alambre de acero galvanizado en solución de NaCl al 3%.

Número de med.	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3		TIEMPO Hrs
	I mA	V mV	I mA	V mV	I mA	V mV	
0	50.76	-1047	53.20	-1036	52.98	-1030	000:00
1	53.19	-1059	53.00	-1053	53.05	-1050	025:45
2	53.96	-1056	54.97	-1050	55.11	-1052	050:45
3	54.76	-1046	54.66	-1044	55.36	-1048	071:05
4	54.18	-1062	54.78	-1047	55.48	-1049	097:05
5	52.01	-1054	52.20	-1047	53.01	-1042	117:05
6	53.20	-1044	53.41	-1043	50.23	-1043	146:15
7	52.53	-1000	53.14	-1040	53.24	-1048	167:15



Tabla 13  
Alambre de acero galvanizado en agua de mar sintética.

Número de med.	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3		TIEMPO Hrs
	I mA	V mV	I mA	V mV	I mA	V mV	
0	53.95	-1039	54.24	-1047	54.40	-1042	000:00
1	53.16	-1041	52.13	-1050	54.05	-1049	025:00
2	55.12	-1067	54.83	-1038	55.73	-1027	049:20
3	51.78	-1055	54.29	-1046	54.61	-1045	073:50
4	53.21	-1037	52.94	-1045	55.20	-1042	093:50
5	53.32	-1050	54.40	-1046	54.30	-1046	120:00
6	53.20	-1039	53.90	-1048	54.30	-1044	144:00
7	53.32	-1041	53.18	-1043	53.18	-1045	164:20

Tabla 14  
Alambre de Zinalco en solución de NaCl al 3 %.

Número de med.	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3		TIEMPO Hrs
	I mA	V mV	I mA	V mV	I mA	V mV	
0	56.27	-1035	54.76	-1046	54.70	-1045	000:00
1	56.25	-0994	56.77	-0995	55.96	-0997	024:35
2	54.50	-0999	55.80	-1001	49.45	-1002	047:10

Tabla 14 (continuación)  
Alambre de Zinalco en solución de NaCl al 3 %.

Número de med.	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3		TIEMPO
	I mA	V mV	I mA	V mV	I mA	V mV	Hrs
3	53.99	-1001	54.18	-1012	40.90	-099B	073:00
4	54.65	-0994	55.10	-0993	51.82	-0993	097:00
5	55.11	-1007	54.56	-1004	46.05	-1004	122:00
6	55.19	-1003	54.58	-1008	55.09	-1008	141:00
7	55.40	-1010	55.30	-1011	55.09	-1099	167:00

Tabla 15  
Alambre de Zinalco en agua de mar sintética.

Número de med.	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3		TIEMPO
	I mA	V mV	I mA	V mV	I mA	V mV	Hrs
0	55.96	-1021	55.50	-1031	56.52	-1021	000:00
1	55.11	-0906	52.57	-0909	55.01	-0927	024:00
2	55.91	-1006	54.07	-1004	55.28	-1006	048:00
3	55.18	-0993	54.85	-0963	54.80	-0996	071:40
4	55.01	-0996	52.48	-0984	55.55	-0998	097:05
5	54.35	-0985	53.91	-0996	55.85	-0992	121:40

Tabla 15 (continuación)  
Alambre de Zinalco en agua de mar sintética.

Número de med.	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3		TIEMPO
	I mA	V mV	I mA	V mV	I mA	V mV	Hrs
6	54.02	-0989	53.75	-0990	53.73	-0991	144:40
7	54.16	-1013	54.54	-1015	55.36	-1015	168:40

Datos para el cálculo de la velocidad de corrosión.

Tabla 16  
Alambre de acero galvanizado en solución de NaCl al 3 %.

No. de muestra	Tiempo Hrs	Area cm <sup>2</sup>	Pérdida de peso g
1	167	33.23	0.0907
2	167	32.33	0.0709
3	167	32.13	0.0718

Tabla 17  
Alambre de acero galvanizado en agua de mar sintética.

No. de muestra	Tiempo Hrs	Area cm <sup>2</sup>	Pérdida de peso g
1	164	33.75	0.0181
2	164	32.86	0.0247
3	164	34.43	0.0249

Tabla 18  
Alambre de Zinalco en solución de NaCl al 3 %.

No. de muestra	Tiempo Hrs	Area cm <sup>2</sup>	Pérdida de peso g
1	167	21.04	0.0255
2	167	21.21	0.0160
3	167	20.78	0.0277

Tabla 19  
Alambre de Zinalco en agua de mar sintética.

No. de muestra	Tiempo Hrs	Area cm <sup>2</sup>	Pérdida de peso g
1	169	25.28	0.0092
2	169	25.62	0.0056
3	169	25.11	0.0070

Velocidades de corrosión de alambre de  
acero galvanizado y Zinalco con AC impresa.

Tabla 20

Alambre de acero galvanizado.	
En solución de NaCl al 3 %.	En agua de mar sintética.
mdd	mdd
39.17	7.82
31.46	10.99
32.06	10.56

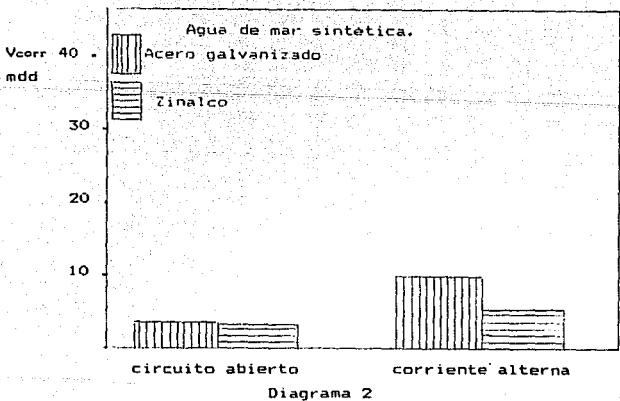
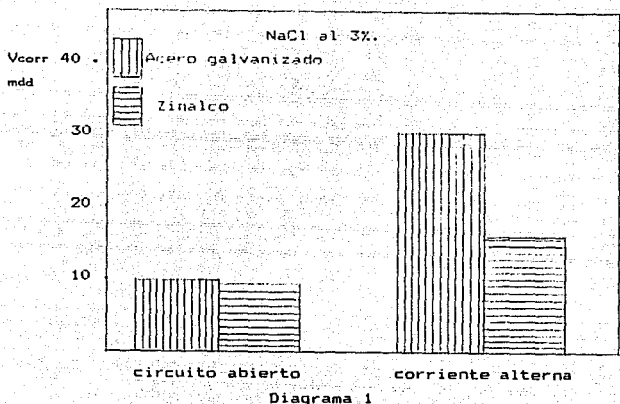
Tabla 21

Alambre de Zinalco.	
En solución de NaCl al 3 %.	En agua de mar sintética.
mdd	mdd
17.42	5.18
10.86	3.12
19.30	3.96

Por último se presenta la tabla 22 y los diagramas 1,2,3 y 4; con la información promediada de los resultados experimentales de las velocidades de corrosión.

Tabla 22

Alambre	V <sub>corr</sub> sin AC. mdd		V <sub>corr</sub> con AC. mdd	
	NaCl 3%.	agua de mar sintética.	NaCl 3%.	agua de mar sintética.
Acero galvanizado	9.63	2.45	29.98	9.79
Zinalco	8.27	2.20	15.86	4.09



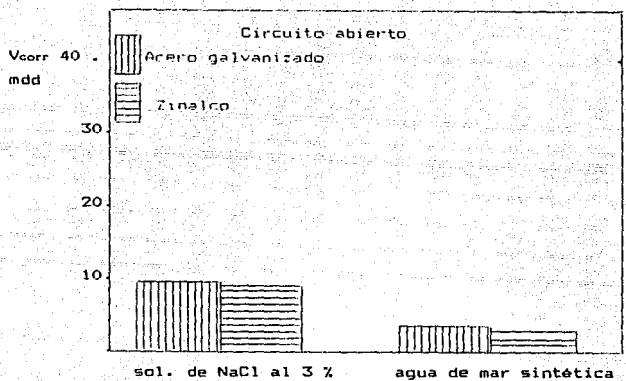


Diagrama 3

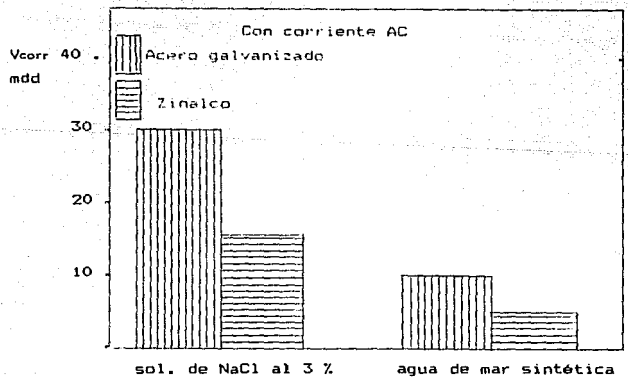


Diagrama 4

## CAPITULO V

## DISCUSION



## V.- DISCUSION.

### V.1.- PRUEBAS DE CARACTERIZACION.

Las especificaciones para alambres de acero galvanizado, utilizados como armaduras para proteger de daños y brindar soporte a cables enterrados y submarinos (cables de comunicación, de poder y de control) constituyen un criterio para la aceptación del recubrimiento.

En este caso, el alambre de acero galvanizado empleado cumple con la norma de calidad establecida por la ASTM<sup>(4)</sup>, ya que su diámetro nominal (4.1 mm) en relación con su peso mínimo por metro cuadrado de recubrimiento (363.44 g/m<sup>2</sup>) sobrepasa el valor establecido por la norma (diámetro nominal 4.19 mm, mínimo peso del recubrimiento de zinc 270g/m<sup>2</sup>).

El ensayo de Preece realizado no es una fuente de información útil ya que 8 inmersiones para cambiar el depósito de zinc por el de cobre sólo es válido en un caso con diferentes espesores. Es imposible con dicha norma establecer la duración del recubrimiento.

### V.2.- PRUEBAS DE PERDIDA DE PESO.

La solución de NaCl al 3 % presentó mayor corrosividad que el agua de mar sintética en ambos alambres, provocando una mayor velocidad de corrosión; tanto en las pruebas de circuito abierto como en las de corriente AC impresa. Esto concuerda con los estudios de laboratorio realizados a hojas de zinc inmersas en soluciones de NaCl (6), que mostraron que el mayor ataque ocurrió en soluciones que contenían 0.5 % de NaCl, mucho mayor que las de una solución con concentración 3 % de NaCl o con los efectuados por Hache<sup>(4)</sup>, que relacionan la velocidad de corrosión del acero con la concentración de NaCl y deduce que trazas de NaCl pueden motivar notable

corrosión en el acero, mientras que las soluciones más concentradas o saturadas son, por lo general, poco agresivas. Por lo tanto, es posible que al ser el agua de mar una solución mucho más compleja y por lo tanto de mayor concentración que la solución de NaCl al 3 % provea de un medio menos favorable para que se lleve a cabo el ataque de las muestras. Observando los diagramas 1 y 2; en las pruebas de circuito abierto la velocidad de corrosión del alambre de acero galvanizado en solución de NaCl al 3 % es aproximadamente 4 veces el valor exhibido en agua de mar sintética; en las pruebas de corriente AC impresa es de 3 veces el valor mostrado en agua de mar sintética. Haciendo lo mismo para el alambre de Zinalco es de 4 y 4 veces respectivamente.

Estudiando los diagramas 3 y 4; se tiene que las velocidades debidas a la corriente AC son mayores que las obtenidas a circuito abierto. En el alambre de acero galvanizado en solución de NaCl al 3 % la relación es 3 a 1 y en el agua de mar es 4 a 1 y con respecto al alambre de Zinalco es 2 a 1 y 2 a 1 respectivamente. De estos resultados se puede decir que el paso de una corriente AC de  $3 \text{ mA/cm}^2$  (60 cps), para ambos tipos de alambre, acelera su velocidad de corrosión al ser expuestos a soluciones de NaCl al 3 % y agua de mar sintética, y además, que el paso de una corriente AC muestra efectos observables sobre la velocidad de corrosión de metales y aleaciones, como lo ha propuesto Jones D. A. en sus estudios sobre los efectos causados por la corriente AC en aceros de baja aleación y aceros al carbon.

Comparando ahora los alambres de acero galvanizado y Zinalco, por medio de los diagramas 3 y 4. en solución de NaCl y agua de mar sintética; se observa que a circuito abierto, en ambas soluciones, presentan aproximadamente igual velocidad de corrosión, por lo que, se puede pensar que el metal atacado es el zinc. Haciendo lo mismo para

las pruebas de corriente AC impresa se obtiene para el alambre de Zinalco una mayor resistencia a la corrosión, aproximadamente el doble en ambas soluciones, debido posiblemente a que el aluminio pasiva fácilmente el ciclo anódico causando rectificación.

La diferencia fundamental entre el acero galvanizado y el Zinalco es la presencia del aluminio en el zinc. De acuerdo con investigaciones recientes (figura 4) el Zinalco en solución de NaCl 0.5 M da lugar a

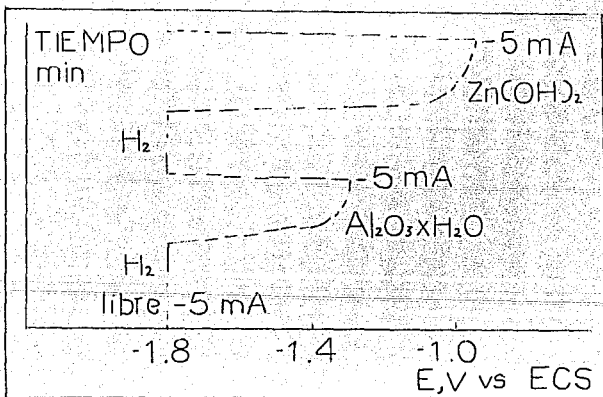


Figura 4  
Curva de carga catódica de un electrodo  
de Zinalco en solución 0.5 M de NaCl.

la formación de  $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ . En base a esta información puede pensarse en el siguiente esquema transversal (figura 5).

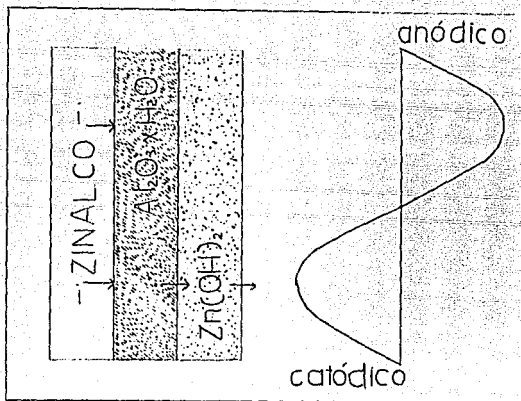


Figura 5

Esquema transversal para la corrosión de Zinalco.

Haring<sup>17</sup> ha estudiado el mecanismo de rectificación electrolytica y presentado una teoría para el aluminio, demostrando que la formación de la película de  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  bloquea el flujo de corriente durante el semiciclo anódico y deja pasar la corriente en el semiciclo catódico. Dado que el aluminio solo se puede oxidar en el semiciclo anódico, la presencia del  $Al_2O_3 \cdot H_2O$  en los productos de corrosión del Zinalco sería responsable de la disminución de la velocidad de corrosión. Esta rectificación natural de la corriente producida por el aluminio en el Zinalco explicaría el buen comportamiento de este material en presencia de corriente AC.

Los valores de los potenciales del Zinalco y el acero galvanizado en presencia de corriente AC son practicamente del mismo orden. De acuerdo al esquema presentado (figura 5) el potencial que se estaría midiendo en ambos caso corresponde al  $Zn(OH)_2$  ya que la película de  $Al_2O_3 \cdot xH_2O$  estaría entre el sustrato metálico y el  $Zn(OH)_2$ .

El buen comportamiento del Zinalco frente al acero galvanizado en presencia de corriente AC se debería entonces a la formación de la película intermedia del  $Al_2O_3 \cdot xH_2O$ , aún cuando el comportamiento electroquímico medido en términos del potencial sería el mismo debido a la formación, en ambos casos, de la película externa de  $Zn(OH)_2$ .

## **CAPITULO VI**

## **CONCLUSION**

## VI.- CONCLUSION.

Cuando existen metales o aleaciones expuestos a medios corrosivos como el agua de mar y se tiene la evidencia de que existe una corriente AC impresa deben realizarse estudios, como el presente, que nos lleven a decidir que metal o aleación es más conveniente emplear.

De este trabajo se puede concluir que el alambre de Zinalco parece presentar mejores propiedades de resistencia a la corrosión en el medio de estudio (agua de mar sintética con presencia de corriente AC impresa).

## BIBLIOGRAFIA



## BIBLIOGRAFIA.

- 1).- Standar Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing; ASTM G 15-89a; Vol. 03.02 (86-89); 1989.
- 2).- Lara Ruiz José; Cinética de la Corrosión de una Aleación 77 % Zn, 22 % Al y 1 % Cu en Agua de Mar; Tesis Facultad de Química, UNAM; (3-5); 1991.
- 3).- Hernández Gómez Blanca Estela; Relación entre la Deformación, Microestructura y Resistencia a la Corrosión del Zinalco; Tesis Facultad de Química, UNAM; (5-6); 1991.
- 4).- González Fernández José A.; Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas; Madrid España; (97-101), (107-108), (520); 1984.
- 5).- Rosalba Urbina Rodríguez; Cromatado del Acero Galvanizado; Tesis Facultad de Química, UNAM; (10-21); 1990.
- 6).- Burns R. M.; Protective Coatings for Metals; sec. ed.; Reinhold Publishing Corporation; (134-132); 1959.
- 7).- Venkatsh S. and Chin D. T.; The Alternating Current Electrode Processes; Israel Journal of Chemistry; Vol. 18, (56-64); 1979.
- 8).- Evans Ulick R.; The Corrosion and Oxidation of Metals; (Scientific Principles and Practical Applications); Edward Arnold (Publishers) Ltd.; (266-267); 1977.
- 9).- Jones D. A.; Effect of Alternating Current on Corrosion of Low Alloy and Carbon Steels; Corrosion-NACE; Vol. 34, No. 12, (428-433) December, 1978.

- 10).- Puschel M. A.; Paper 74/18, NACE Conference, Chicago Illinois; March (4-8); 1974.
- 11).- Pérez L. T.; Comportamiento Electroquímico del Acero Galvanizado en NaCl al 3 %; VI Congreso Nacional de Electroquímica; Soc. Mexicana de Electroquímica; UAG; Guadalajara, Jal.; (39-43); 1991.
- 12).- Hamlin A. W.; Alternating Current Corrosion; Materials Performance-NACE; January, (55-58); 1986.
- 13).- Chin D. T. and Fu T. W.; Corrosion by Alternating Current; Corrosion-NACE; Vol. 35, No. 11, (514-523); 1979.
- 14).- Standard Specification for Zinc-coated (Galvanized) Low-carbon Steel Armor Wire; Vol. 02.03, (70-71); 1989.
- 15).- Venkatachalam S. and Mehendale S. G.; Electrodisolution and Corrosion of Metals by Alternating Currents; J. Electrochem. Soc. India; Vol. 30, No. 3, (231-237); 1981.
- 16).- Genescá J. and Uruchurtu J.; Corrosion Behavior of Zn-Al-Cu Alloy in Sodium Chloride; Revista Afinidad; Tomo XLVIII, No. 432, (115-118); abril 1991.
- 17) Haring H. C.; J. Electrochem. Sci.; 99 (1) (1952) 30.
- 18).- Standard Test Method for Weight of Coating on Zinc Coated (Galvanized) Iron or Steel Articles; ASTM A 90-81, Vol. 03.02, (1.4); 1989.
- 19).- Ramette R. M.; Equilibrio y Análisis Químico; Fondo Educativo Interamericano; (62-63); 1983.
- 20).- Standard Test Method for Locating the Thinnest Spot in a Zinc (galvanized) Coating on Iron or Steel Articles by the Preece Test (Copper Sulfate Dip); ASTM 239-73(1983), Vol. 01.06, (32-34); 1989.

- 21).- Standard Specification for Substitute Ocean Water; ASTM 1141-86, Vol. 11.02, (405-406); 1989.
- 22).- Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens; ASTM G 1-88, Vol. 03.02, (41-47); 1989.

## APENDICE

## APENDICE

### APENDICE A.

Determinación del peso de un recubrimiento de zinc en hierro o acero (resumen de la norma ASTM A 90-81).

Las precauciones a tomar son: tener buena ventilación y no realizar repeticiones del ensayo por periodos prolongados, ya que existe producción de gases tóxicos de HCl y H<sub>2</sub>.

#### Reactivos:

Acido clorhídrico (1+1).- mezclar 500 ml de HCl con 500 ml de agua destilada.

#### Características del alambre:

Este debe tener una longitud mayor de 0.3 m pero preferiblemente 0.6 m.

#### Procedimiento:

Limpiar los alambres.

Pesarlos con una precisión de 0.01 g.

Efectuar la inmersión de cada alambre en la solución de ácido clorhídrico (1+1), durante un periodo de 15 a 30 sg (la solución se puede volver a utilizar hasta que el tiempo de las inmersiones sea prolongado).

Sacar los alambres cuando no se perciba burbujeo de H<sub>2</sub>.

La temperatura durante las inmersiones no debe de exceder de 38°C.

Después del desprendimiento del recubrimiento; el alambre deberá ser enjuagado y sumergido en agua a ebullición, para ser secado posteriormente.

Pesar nuevamente el alambre con la misma precisión utilizada para el peso del alambre con recubrimiento.

Determinar el diámetro del alambre sin recubrimiento con una precisión de 0.01 mm.

Para la determinación de la masa del recubrimiento emplear la siguiente formula:

$$C = ( W_1 - W_2 ) / ( W_2 * ( D * M ) )$$

donde:

C = peso del recubrimiento de zinc g/m<sup>2</sup>.

W<sub>1</sub> = peso original del alambre g.

W<sub>2</sub> = peso del alambre sin recubrimiento g.

D = diámetro del alambre sin recubrimiento mm.

M = 1.96\*10<sup>3</sup> (D en mm).

El espesor es determinado por la tabla X1.1 contenida en la norma. De la cual, por regresión lineal, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$E = ( 0.1416 * C ) - 9.7832*10^{-9}$$

donde:

C = peso del recubrimiento g/m<sup>2</sup>.

E = espesor del recubrimiento μm.

## APENDICE B.

Determinación del intervalo de incertidumbre y límite de confiabilidad.

Esta determinada de acuerdo a la ecuación (B):

$$\Delta = t * S / N^{1/2}$$

donde:

t al 95% = 2.8.

S = la desviación estandar =  $(\sum(x-\bar{x})^2 / N-1)^{1/2}$ .

N = número de valores del conjunto de datos.

x = dato del peso de una muestra g/m<sup>2</sup>.

$\bar{x}$  = promedio del peso de las muestras g/m<sup>2</sup>.

$\Delta$  = incertidumbre g/m<sup>2</sup>.

Entonces el límite de confiabilidad será:

$$\mu = \bar{x} \pm \Delta \quad (\text{g/m}^2)$$

**APENDICE C.**

**Resumen del método de Preece.**

Preparar una solución de  $\text{CuSO}_4$  con 36 partes en peso de cristales de  $\text{CuSO}_4$  en 100 partes de agua destilada (calantar).

Agitar la solución de  $\text{CuSO}_4$  con 0.8 g de  $\text{CuO}$  por litro de solución.

Dejar reposar por 48 horas y filtrar.

Sumergir las muestras por un minuto.

Después de cada inmersión lavar y remover cualquier depósito de cobre sobre el zinc.

El punto final se reconoce por la aparición de un depósito brillante y adherente.



APENDICE D.

Composición química del agua de mar sintética:

COMPUESTO	CONCENTRACION g/l
NaCl	24.53
MgCl <sub>2</sub>	5.20
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.09
CaCl <sub>2</sub>	1.16
KCl	0.695
NaHCO <sub>3</sub>	0.201
KBr	0.101
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.027
SrCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.025
NaF	0.003

La clorinidad de ésta agua es de 19.38.

El pH (después de ser ajustado con una solución 0.1 N NaOH) es de 8.2.

#### APENDICE E.

##### Limpieza de los productos de corrosión.

Para efectuar los ciclos de limpieza se emplearon las siguientes soluciones:

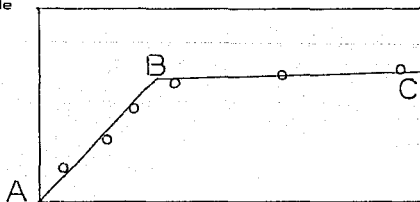
ALAMBRE	SOLUCION
ACERO GALVANIZADO	100 g de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ por 1000 ml de solución.
ZINALCO	100 g de $\text{NH}_4\text{Cl}$ por 1000 ml de solución.

Se efectuan ciclos de limpieza de 2 min.

La temperatura de las soluciones es de  $70^\circ\text{C}$ .

Los datos de número de ciclos contra pérdida de peso se grafican y se obtienen graficos como el que se muestra en la figura 3.

Pérdida de peso



No. de ciclos

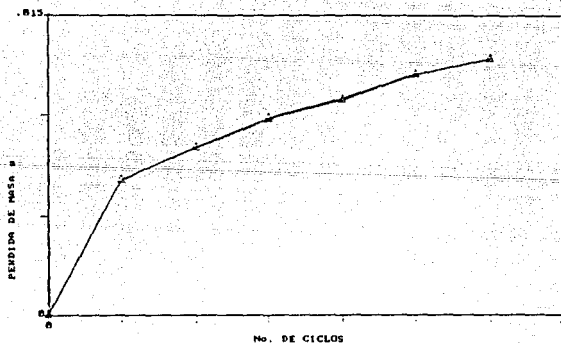
Obtención de pérdida de peso de especies corroídas por repetitivos ciclos de limpieza.

Figura 3

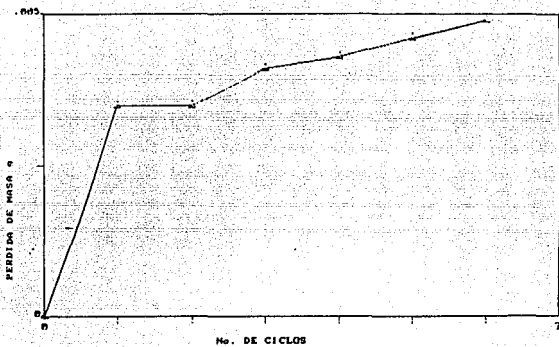
Entonces se puede decir que dos líneas son obtenidas: AB y BC. Las letras pueden corresponder a la corrosión del metal después de remover los productos de corrosión. La pérdida de peso puede corresponder al punto B.

Para minimizar la incertidumbre asociada con la corrosión del metal empleando este método, debe de tomarse la lectura ligeramente adelante del punto B, sobre la línea BC.

A continuación se presenta los gráficos obtenidos al efectuar la limpieza de los productos de corrosión en las muestras sometidas a NaCl al 3 % y agua de mar sintética sin AC y con AC, con fines ilustrativos (gráfica 1 a la 8).

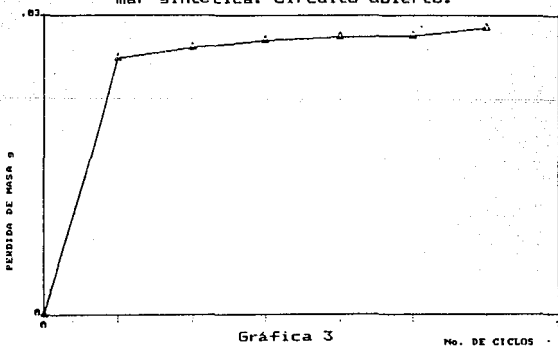


Gráfica 1  
Alambre de acero galvanizado en solución  
de NaCl al 3 %. Circuito abierto.



Gráfica 2

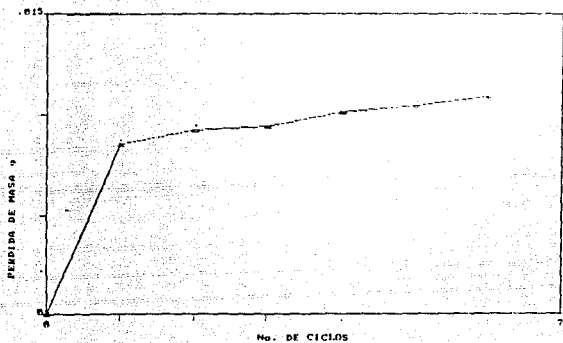
Alambre de acero galvanizado en agua de mar sintética. Circuito abierto.



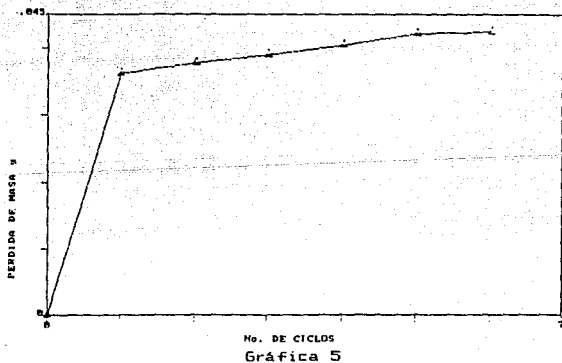
Gráfica 3

Alambre de Zinalco en solución de NaCl al 3%. Circuito abierto.

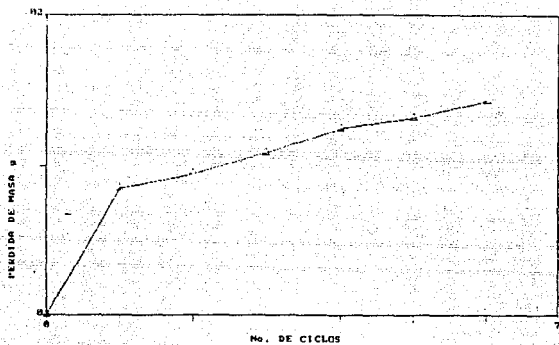
ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



Gráfica 4  
Alambre de Zinalco en agua de mar  
sintética. Circuito abierto.

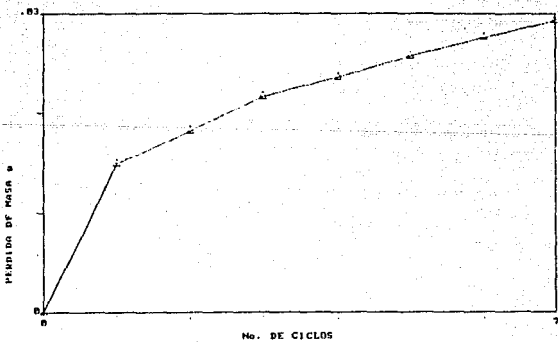


Gráfica 5  
Alambre de acero galvanizado en solución  
de NaCl al 3 %. Con corriente AC.



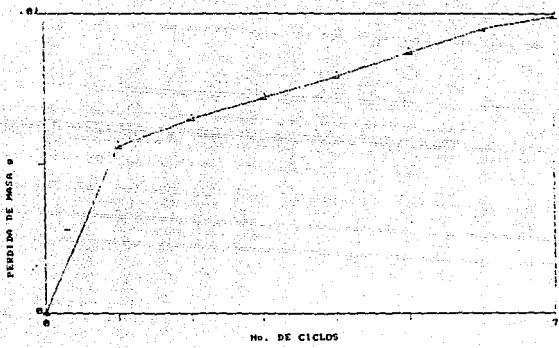
Gráfica 6

Alambre de acero galvanizado en agua de mar sintética. Con corriente AC.



Gráfica 7

Alambre de Zinc en solución de NaCl al 3 %. Con corriente AC.



Gráfica 8  
 Alambre de zinalco en agua de mar  
 sintética. Con corriente AC.