



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN
ATMOSFÉRICA MEDIANTE LA TÉCNICA DEL
ALAMBRE SOBRE TORNILLO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A:

JUAN ARMANDO ORTIZ VALERA

DIRECTOR DE TESIS

Dr. VÍCTOR HUGO JACOBO ARMENDÁRIZ



CD. UNIVERSITARIA

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Dedicatoria.

A mis padres Rosita y Armando quienes han trabajado, soportado y dado tanto por mí y mis hermanos, quiero reconocer que el llegar hasta este punto es un logro de ustedes únicamente, al igual, sepan que me llena de orgullo ser su hijo y que no pasa un día sin que agradezca a Dios el que sigan estando a mi lado, pero sobretodo, doy gracias por el inmenso amor que me dan.

A mis hermanos, por que cada uno es mi contraparte y con su energía, disciplina, ternura y travesuras me complementan y enseñan cosas a diario. Gracias por compartir y acompañarme siempre.

Finalmente a mis abuelos, dondequiera que estén sepan que siempre están en mi corazón, gracias por sus consejos, comprensión y ternura, y como quisiera que estuvieran aquí para compartir este paso conmigo.

Índice.

Evaluación de la Corrosividad Atmosférica mediante la Técnica del Alambre sobre Tornillo

	PÁGINAS.
CAPÍTULO 1. Corrosión Atmosférica	1
1.1 Introducción al concepto de la corrosión	1
1.2 Corrosión Atmosférica: definición, costos y problemática	7
1.3 Factores que influyen en la Corrosión Atmosférica	8
1.4 Clasificación de Atmósferas Corrosivas	17
CAPÍTULO 2. Monitoreo de la Corrosión Atmosférica	19
2.1 Introducción	19
2.2 Ensayos de Laboratorio	20
2.3 Ensayos de Campo	30
CAPÍTULO 3. Desarrollo Experimental	36
3.1 Introducción	36
3.2 Fabricación de Probetas y Pupitres	37
3.3 Instalación de los Racks ó Pupitres	40
3.4 Evaluación de Probetas Expuestas	44
CAPÍTULO 4. Análisis de Resultados	48
4.1 Introducción	48
4.2 Índice de Corrosividad Atmosférica	48
4.3 Imágenes a Bajos Aumentos	57
CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	64

Prólogo.

La corrosión es un inconveniente inevitable que pertenece a la rama de estudio del deterioro de los metales, en particular, los usados en ingeniería y una de las posibles razones por las cuales se llega a la falla de un elemento tecnológico. Por estas razones la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) de la Facultad de Ingeniería se ha dedicado al estudio de este fenómeno, así como, a su efecto en la falla de elementos y su prevención.

Este trabajo se suma a los esfuerzos dentro de este campo, enfocándolo al uso y evaluación de una prueba *in situ* de corta duración conocida como ensayo CLIMAT o alambre sobre tornillo, la cual dependiendo de los resultados podrá presentar un interesante uso. De igual forma se intenta vincular los resultados, con otras pruebas generadas dentro de la unidad.

El contenido de este trabajo se divide en cuatro capítulos, los dos primeros se enfocan a una introducción sobre la corrosión en particular la atmosférica, y las formas en que actualmente se estudian sus efectos y velocidad mediante diversas técnicas. Los dos últimos explican el desarrollo experimental y los resultados obtenidos por su uso.

Quisiera reconocer por todos los recursos que la UDIATEM ha puesto a mi disposición para realizar este trabajo, así como al M. en I. O. Medina en la construcción de las probetas y al Ing. J. Roviroza por el maquinado de los tornillos, al Ing. F. Sánchez por su ayuda con CAPACA, al M. en I. C. González por su ayuda con las sustancias decapantes y sugerencias y al Biol. G. Álvarez por su ayuda con el microscopio electrónico, así como a todos aquellos que auxiliaron en la colocación de las estaciones de monitoreo.

Adicionalmente quisiera agradecer a mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México y particularmente a la Facultad de Ingeniería por todo lo que me han dado y por ser, desde que tengo uso de razón, mi segunda casa. A todos los integrantes de la UDIATEM, empezando por el Dr. Ortiz, nuestro jefe y el Dr. Víctor Jacobo además de los M. en I. Ignacio Cueva, Efraín Ramos, Edgar Ramírez, Lázaro Morales y Agustín Bravo, a los Ings. Roberto

Cisneros, Jorge Romero, Osvaldo Ruiz, David Martínez y Francisco Sánchez, al Biol. Germán Álvarez así como al prestador de servicio social Adrián Esteban Ortiz y a todos los que en su momento han pertenecido a ella, a quienes les agradezco su ayuda y paciencia en todo momento pero sobre todo por su amistad.

Capítulo 1.

Corrosión Atmosférica

1.1 INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE CORROSIÓN.

Concepto de corrosión

Por lo general, se estudia el fenómeno de la corrosión por sus efectos en los diferentes metales, en los productos generados y en particular en el caso de la ingeniería por la alteración, degradación y destrucción de este tipo de materiales y con esto la incapacidad para funcionar bajo las sollicitaciones expuestas. En la literatura su definición percibe varios aspectos del proceso por lo que integrando estos, quedaría como un fenómeno superficial y espontáneo mediante el cual los metales vuelven a un estado más bajo y estable de energía, que es como se encuentran en la naturaleza, esto es combinándose con otros elementos y formando lo que son los minerales. Es preciso mencionar que el término solo es aplicable a los metales ya que para los polímeros y cerámicos el usado es el de degradación.

El fenómeno puede darse por medio de procesos químicos (corrosión química) o electroquímicos (corrosión húmeda) siendo el proceso más común el electroquímico y por tanto el más importante y estudiado. Para que exista una celda electroquímica es necesario disponer como mínimo con lo siguiente [1] (figura 1.1):

- a) Dos electrodos (ánodo y cátodo).
- b) Debe existir un potencial eléctrico entre los dos electrodos.
- c) Se debe contar con un conductor metálico que conecte a el ánodo y al cátodo.
- d) Los electrodos deben estar sumergidos en un electrolito.

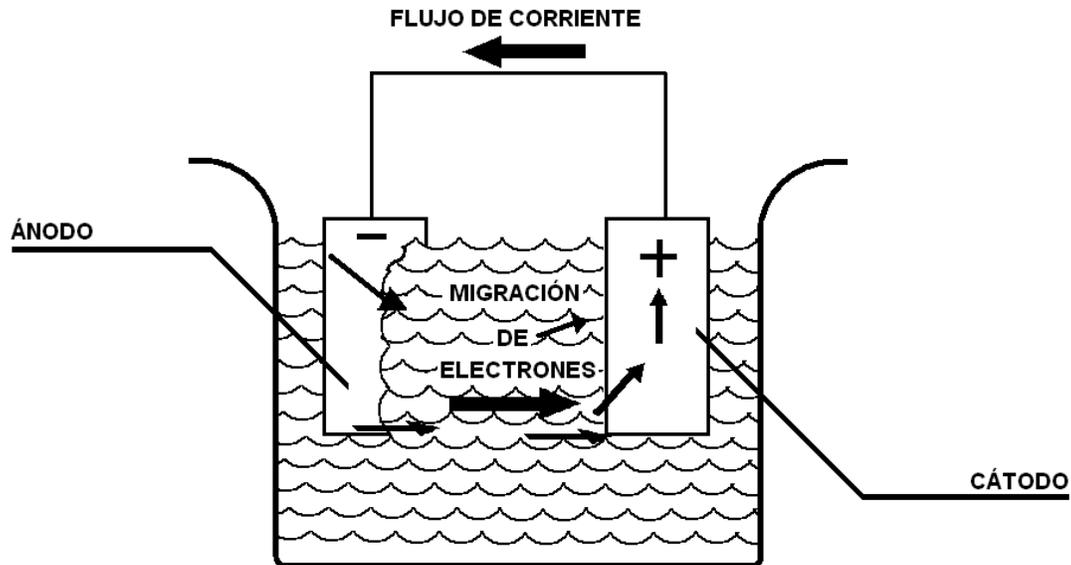


Figura 1.1 Diagrama de una celda electroquímica y partes que la componen [1].

Llamando *ánodo* a la parte que se diluye o corroe (ya que se liberan electrones producto del paso del metal en forma de iones al electrolito), *electrolito* a la sustancia que conduce electricidad (por medio de los iones presentes) y *cátodo* a la superficie en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito.

Finalmente hay que hacer notar que las reacciones entre los electrodos y el electrolito se dan en una pequeña región entre estos (de micras de espesor) llamada *interfase* y en muchos casos la resistencia del metal a largo plazo está influenciada por lo que ocurre en esta zona.

Termodinámica de la corrosión

Por medio de la termodinámica se pueden realizar balances de energía para prevenir que tan factible es que se corroa o no un metal en una situación específica en que se encuentre. Una simple y primera aproximación para darse cuenta de la ocurrencia del fenómeno lo da la cantidad de energía necesaria para convertir un mineral en metal, de esto se puede decir que mientras mayor energía se suministre mayor será la tendencia a corroerse del metal obtenido (tabla 1.1a).

Una forma más cualitativa de hacer esto es por medio de la *Serie Galvánica* que se obtiene de comparar parejas de diferentes metales sumergidos en un mismo electrolito (agua de mar) donde los metales se van ordenando de acuerdo a su mayor o menor tendencia a corroerse (tabla 1.1b)

Pero para obtener de forma cuantitativa estas tendencias es necesario medir la energía en un determinado sistema, se puede hacer en los términos de lo que se llama energía libre, ya que ésta en una reacción química es directamente proporcional al potencial generado en la celda electroquímica. Midiendo este potencial y bajo condiciones estándares de temperatura (25 °C), presión (atmosférica estándar) y concentración del electrolito de un mol/dm³ (con sales del mismo metal), se construye la *Serie Electromotriz*, donde como es imposible medir el potencial absoluto de un metal se usa como patrón el potencial medido en una reacción de equilibrio para el hidrógeno, con esto se puede referenciar cada metal, donde mientras más negativos sean los potenciales referenciados mayor será la tendencia a sufrir corrosión (tabla 1.1c).

Tabla 1.1 (a) Posiciones relativas de algunos metales en cuanto a la energía requerida para convertir sus minerales (b) Serie Galvánica [1] (c) Serie electromotriz de potenciales estándar de electrodo [2].

Mayor requerimiento de energía	Potasio Magnesio Berilio Aluminio Zinc Cromo Hierro Níquel Estaño Cobre Plata
Menor requerimiento de energía	Platino Oro

(a)

Extremo base (Noble) ↑↑	Platino Oro Plata Acero inoxidable Titanio Níquel (estado pasivo) Monel Bronce Cobre Latón Níquel (estado activo) Estaño Plomo Acero o Hierro
Extremo activo ↓↓	Aluminio, Cadmio Zinc Magnesio

(b)

Reacción de equilibrio	E_H^0 (Volts)
Noble	
$Au^{2+} + 2e^- \Rightarrow Au$	1.70
$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \Rightarrow H_2O$	1.23
$Pt^{2+} + 2e^- \Rightarrow Pt$	1.20
$Hg^{2+} + 2e^- \Rightarrow Hg$	0.85
$Ag^+ + e^- \Rightarrow Ag$	0.80
$Cu^{2+} + 2e^- \Rightarrow Cu$	0.34
$2H^+ + 2e^- \Rightarrow H_2$	0.00 (por definición)
$Pb^{2+} + 2e^- \Rightarrow Pb$	- 0.13
$Ni^{2+} + 2e^- \Rightarrow Ni$	- 0.25
$Cd^{2+} + 2e^- \Rightarrow Cd$	- 0.40
$Fe^{2+} + 2e^- \Rightarrow Fe$	- 0.44
$Cr^{3+} + 3e^- \Rightarrow Cr$	- 0.70
$Zn^{2+} + 2e^- \Rightarrow Zn$	- 0.76
$Ti^{2+} + 2e^- \Rightarrow Ti$	- 1.63
$Al^{3+} + 3e^- \Rightarrow Al$	- 1.66
$Mg^{2+} + 2e^- \Rightarrow Mg$	- 2.38
Activo	

(c)

Sin embargo la *Serie Electromotriz* posee limitaciones, ya que solo se refiere a cuando el metal va a tender a corroerse, que es el estado activo y no considera el efecto de película alguna de óxido en la superficie metálica (dependiendo del metal ésta puede ser protectora o no) y que se le llama estado pasivo. Además hay que considerar todos los equilibrios de todas las reacciones que pueden llevarse a cabo entre el metal y el agua, así como las concentraciones que son afectadas por estas reacciones químicas y que provocan un cambio en el pH ($pH = -\log[H^+]$) del electrolito y que dio lugar hace algunas décadas como resultado que el investigador *Marcel Pourbaix* representara gráficamente estos resultados en función del potencial y del pH a través de unos diagramas que llevan su mismo nombre. En estos las regiones delimitadas por las líneas que representan las reacciones son clasificadas respecto a su conducta y son: la zona de inmunidad, de pasivación y de corrosión (figura 1.2).

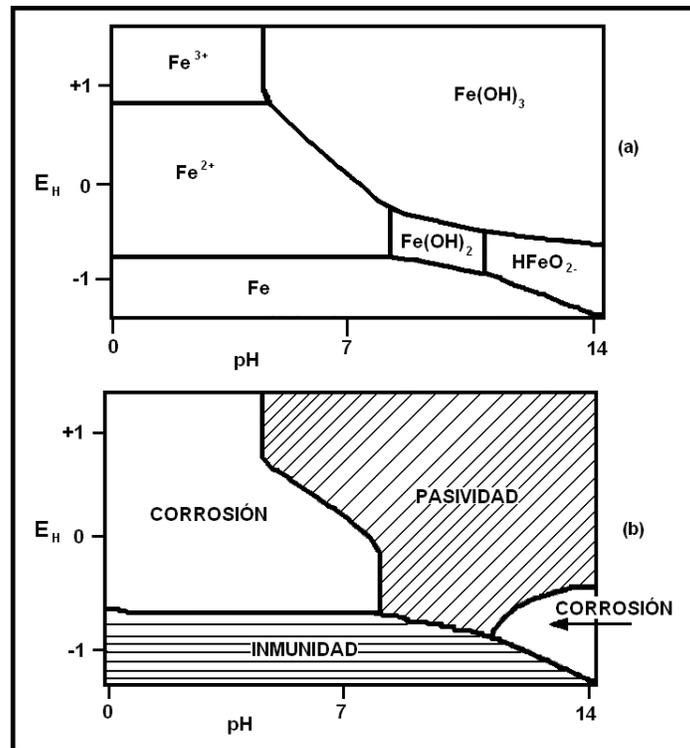


Figura 1.2 Diagrama de Pourbaix para el hierro. (a) Productos en equilibrio termodinámico. (b) Clasificación de las diferentes zonas del diagrama [1].

Cinética del proceso corrosivo

Esta permite predecir con que velocidad se va a corroer cierto metal, dicho de otra manera que cantidad de metal en un cierto tiempo se está disolviendo en el medio donde se encuentra, es decir que tan difícil es que el proceso se lleve a cabo, a pesar de que la termodinámica diga que el proceso es espontáneo y ocurrirá según los balances de energía. Esta velocidad se puede expresar en términos de corriente eléctrica, ya que se define como el cambio de la carga en una unidad de tiempo; siendo la interfase la zona donde se lleva a cabo.

Considerando un metal homogéneo sumergido dentro de un electrolito con una sal del mismo metal, aparentemente no habrá corrosión ya que la velocidad con que pierde y gana electrones el metal en la interfase metal-electrolito será la misma, con lo cual se dice que el sistema está en equilibrio. Así pues, ésta se puede modificar de dos formas, una es aplicando un potencial o corriente eléctrica para sacar del equilibrio al sistema, la otra forma es haciendo insuficiente el abastecimiento de reactivos que tienen parte en el proceso.

Finalmente la cinética corrosiva se puede cuantificar por medio de dos métodos, uno es a través del uso de técnicas electroquímicas, por medio de la cuales experimentalmente se obtienen datos en los que a un metal en las condiciones antes descritas, se le aplica un potencial eléctrico, el cual se varia para que el metal pase de una etapa en la que es reducido a una en la que pasa a ser oxidado, y obteniéndose como respuesta valores de densidad de corriente. Al resultado de graficar estos datos se le conoce como diagrama de Evans (figura 1.3) y a las ecuaciones que lo describen se les conoce como ecuaciones de Tafel.

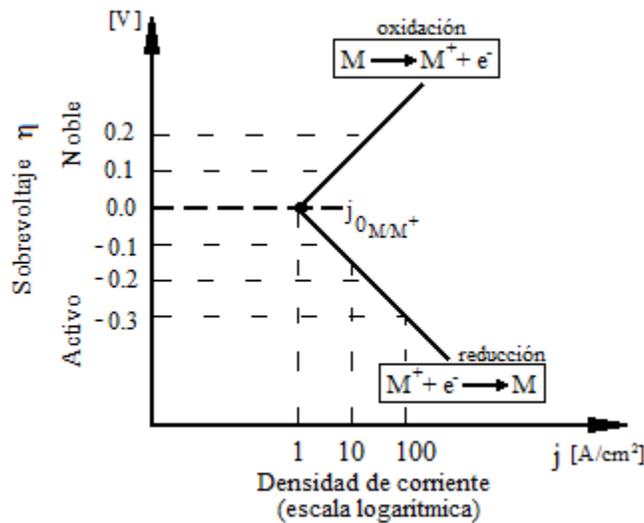


Figura 1.3 Diagrama de Evans para un metal cualquiera generado a partir de la aplicación de un potencial eléctrico (sobrepotencial de activación) [3].

El otro método para conocer la velocidad de corrosión como densidad de corriente es realizando una transformación, conociéndose las unidades de pérdida de peso que ha sufrido el material, por medio de la ley de Faraday (ecuación 1.1).

$$v_c = J(MA)/nF \quad (1.1)$$

Donde v_c representa la velocidad de corrosión en μ /año, MA es la masa atómica, n es la valencia, F es la constante de Faraday (96500 coulomb/mol) y J la densidad de corriente.

1.2 CORROSIÓN ATMOSFÉRICA: DEFINICIÓN, COSTOS Y PROBLEMÁTICA.

Este tipo de corrosión es el que se da a partir de la interacción de los metales con las características de la atmósfera de una cierta zona y adquiere gran importancia ya que casi todos los sistemas construidos por el hombre están bajo los efectos de ésta.

Otro aspecto en el que se refleja la gran importancia de los efectos del ambiente es en el ámbito económico y los costos que se generan por ésta, ya que si estos por corrosión en general, según reporta la literatura están entre el 2 y 5% del producto interno bruto (PIB) para los países industrializados como Estados Unidos o la Comunidad Económica Europea, la corrosión atmosférica representa un 50% de estas cantidades. Tomando como ejemplo el año de 1999 que reporta como PIB la cantidad de alrededor 8,000 billones de dólares [4] y suponiendo que se pierde por efectos de corrosión el 2%, esta cantidad sería de aproximadamente 174.178 billones de dólares de los cuales a la atmósfera se le tendría que echar la culpa de 87 billones de dólares, lo cual es una cifra bastante considerable, como para ser despreciable y hacer caso omiso al fenómeno que lo genera.

La problemática de su estudio, modelado y simulación en el laboratorio radica en la cantidad y complejidad de la interacción de las variables involucradas en el proceso que son de carácter tanto químico, físico y electroquímico, en el mismo camino está lo que duran las diferentes etapas por las que pasa el fenómeno ya que algunas etapas pueden durar picosegundos, por ejemplo la reacción instantánea del metal con una molécula de agua del ambiente y la formación minúscula de un óxido, como otras pueden durar incluso décadas, debido a que cuando los productos de corrosión ya no varían en el tiempo esto representa que la velocidad de disolución y reformación está en equilibrio, entonces éstos alcanzan un espesor constante, como se ilustra en la figura 1.4. El tiempo requerido para lograr un estado estable de corrosión puede tomar varios años o hasta décadas.

Por esto es que el estudio de la corrosión atmosférica y el análisis de sus efectos en mucho siguen siendo de tipo experimental.

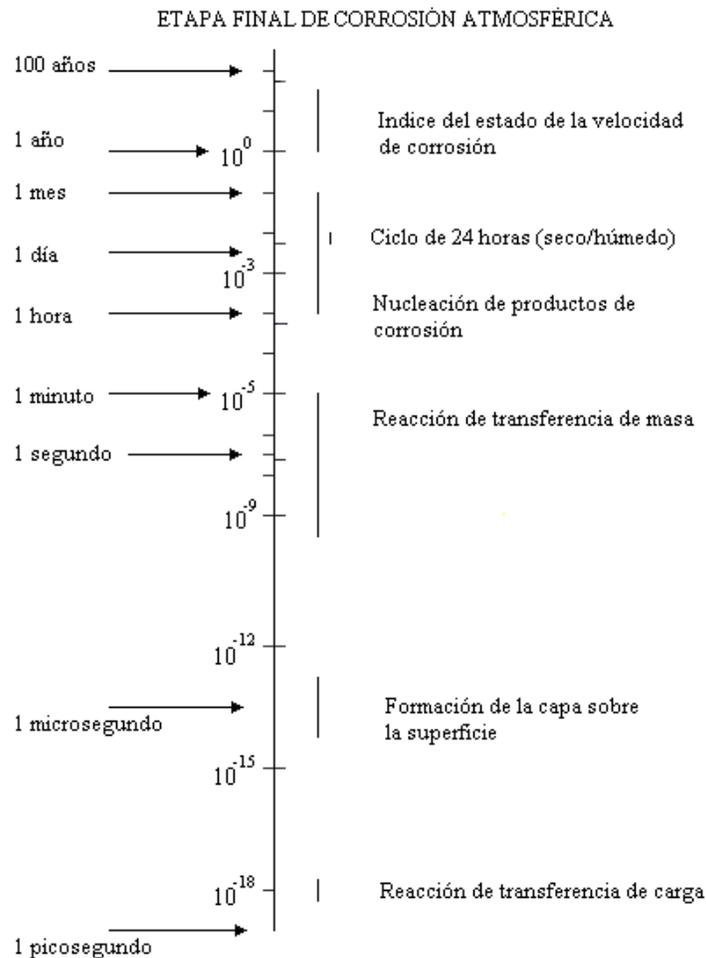


Figura 1.4 Ordenes de magnitud de los periodos requeridos para el desarrollo de los fenómenos característicos de la corrosión atmosférica [5].

1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.

Como se mencionó existen muchas variables ambientales que influyen y su interacción es muy compleja, sin embargo se ha observado que las más importantes son las siguientes:

1. Ciclos de humedad.
2. Contaminantes gaseosos presentes en el aire. Composición y concentración.
3. Partículas suspendidas. Composición, tamaño y concentración.
4. Variación de temperatura.

Ciclos de humedad

El término ciclos de humedad se refiere a la relación que guardan la humedad relativa con otros factores ambientales, para que se logre formar una capa de agua sobre alguna superficie metálica.

La importancia de la humedad es que representa una fuente de electrolitos así como un disolvente para los contaminantes atmosféricos (que depende de factores como la velocidad del viento, la composición superficial de la capa líquida, las variaciones diarias de las condiciones atmosféricas, etc.) y los productos de corrosión. El término humedad relativa en el ambiente expresa la cantidad de vapor de agua presente en el aire con relación a la concentración de saturación y por lo general se considera que si ésta es menor al 70% la corrosión en un metal es despreciable.

De los ciclos de humedad depende lo que llaman *tiempos de humectación*, que no son otra cosa, que cuanto tarda en formarse y cuanto dura una capa de electrolito en el metal expuesto. Esta capa puede ser de espesores muy pequeños (de micras), en los cuales, algunos autores creen que no existe corrosión alguna, pues se considera que la composición del electrolito variará en forma importante lo cual repercutirá en la evolución de las reacciones, de esto se puede pensar que en sentido estricto no es verdadera la nulidad de corrosión. De igual forma esta capa puede ser de espesor considerable, tanto que a simple vista se detecta la condensación del agua en la superficie, cuando se da esto se considera como si el metal estuviera sumergido en el electrolito y al cual se le supone como una fuente inagotable para las reacciones. Pero como no permanece esta capa constante, la variación en su espesor y de su composición a lo largo de un día hacen que el pH pueda alterarse y ser más o menos agresivo para el material.

La formación del depósito de agua en el metal depende de la humedad relativa, el tiempo de exposición y a la naturaleza del sustrato, es decir, que la película de óxido que se forme en la superficie sea dura, no conductora de electricidad, no porosa y no se disuelva en el electrolito.

La forma en que se lleva a cabo la absorción de agua en el metal puede ser de forma iónica, ya sea con los hidróxidos que se forman con el metal como resultado de la reacción instantánea con el agua, lo que provoca una superficie menos reactiva con la atmósfera (figura 1.5) y también puede ser que la adsorción se lleve a cabo con las heterogeneidades del material por irregularidades y defectos presentes en éste, los cuales pueden ser límites de grano, dislocaciones, inclusiones, etc. y que se caracterizan por tener un mayor nivel de energía. La atracción del agua por este tipo de zonas, se debe a que cada una de sus moléculas es un pequeño dipolo, donde sus cargas positiva y negativa no coinciden, por lo que la atracción se da con estas zonas energéticamente más altas. Así es que por estas razones la adsorción del agua por parte de la superficie es heterogénea, con lo que los productos de reacción se pueden formar como islas que varían su espesor en la superficie. Las características en la adsorción del agua por parte de una superficie metálica dependen de las propiedades de ésta como lo son el acabado superficial o la rugosidad [5].

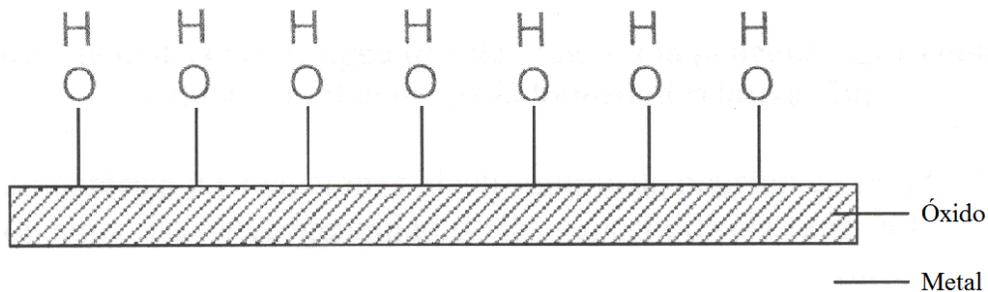


Figura 1.5 Descripción esquemática del acomodo de los iones hidróxido en la superficie formada por óxidos [5].

Contaminantes gaseosos de la atmósfera

Existen muchos componentes a los que se consideran contaminantes atmosféricos, por ser ajenos a la composición natural del aire, siendo los fenómenos de tipo fotoquímico de especial importancia para explicar las transformaciones que se producen en diversos constituyentes atmosféricos. Por suerte solamente algunos gases tienen efectos corrosivos, siendo en particular ocho los de mayor influencia (CO_2 , O_3 , NH_3 , NO_2 , H_2S , SO_2 , HCl , ácidos orgánicos) [5].

- Bióxido de carbono (CO₂) -

Se trata de un constituyente normal de la atmósfera. Es absorbido por los vegetales como parte del proceso de fotosíntesis, sobre todo en la época de crecimiento de los vegetales (primavera), para luego ser devuelto a la atmósfera durante el decaimiento de la vegetación (otoño). Una situación cíclica similar ocurre con los océanos, ya que éstos absorben el CO₂ en condiciones de baja temperatura y lo retornan al calentarse. Así que la fotosíntesis y la respiración son los procesos metabólicos que ha utilizado la Tierra por miles de años para hacer que circule. Se estima que en condiciones naturales el CO₂ tarda alrededor de 300 años para completar este ciclo.

Las actividades desarrolladas por el hombre representan tan solo un 3% del total generado. Sin embargo, esta cantidad está fuera del equilibrio, esto es, no existen sumideros suficientes para que se neutralice. La mayor parte del CO₂, producto de actividades antropogénicas, es generado por procesos de combustión.

Este gas de baja reactividad con una elevada duración en la atmósfera, además de ser un promotor del efecto invernadero (en los últimos 40 años su concentración se ha incrementado en forma regular del orden de 0.5 % anual). Su incremento no influye de manera significativa en la agresividad del ambiente, ya que el ácido carbónico se clasifica como débil respecto a la cinética de la corrosión.

- Ozono (O₃) -

A temperatura y presión ambientales el ozono es un gas de olor picante e incoloro. Es uno de los iniciadores de las transformaciones gaseosas junto con el radical hidróxido. El ozono es un producto de la fotoquímica atmosférica, su fuente dominante es la fotólisis del dióxido de nitrógeno.

El ozono es asimismo muy sensitivo a la radiación ultravioleta de tal forma que puede dar lugar a un átomo de oxígeno que al combinarse con una molécula de agua forma radicales hidroxilo (OH).

El hidroxilo es el reactivo más vigoroso en la atmósfera, de lo que se deriva el efecto del ozono en la agresividad del ambiente. Éste, por sí, es menos activo que el OH[•], además de no ser soluble en agua, sin embargo pequeñas cantidades de O₃ pueden disolverse en gotas o capas de agua de

tal forma que se dé lugar a las reacciones antes expuestas. Su concentración generalmente es del orden de 100ppb. Asimismo estudios experimentales han demostrado que en presencia de SO_2 actúa como un acelerador de la corrosión en el cobre.

- Amoníaco (NH_3) -

Es el único gas atmosférico de carácter básico, razón por la que neutraliza a los componentes ácidos. Tanto los ecosistemas como el mar emiten este gas, sin embargo su ciclo global está dominado por las fuentes antropogénicas. Su fuente principal es la agricultura y los excrementos animales así como la combustión de biomasa (quema de pastos y de bosques para abrirlos al cultivo).

El NH_3 se caracteriza por ser muy soluble en el agua, por lo que se puede presentar como depósito húmedo, y al combinarse con el $(\text{SO}_4)^{2-}$ da lugar al sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$. La elevada solubilidad del amoníaco da lugar a importantes variaciones de su concentración en atmósfera, ya que en áreas urbanas puede variar de 1 hasta 50 ppb.

- Óxidos de Nitrógeno (NO_x) -

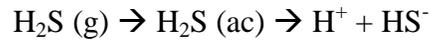
Se han desarrollado un amplio número de trabajos de investigación relacionados al efecto de los óxidos de nitrógeno en la corrosión atmosférica, sobre todo de acero, cobre y zinc. Su fuente principal la representan los procesos de combustión a elevadas temperaturas, durante los cuales el NO_x es formado, siendo rápidamente oxidado en presencia de O_3 .

Dado que las fuentes principales del NO_2 son las mismas que para el CO_2 (combustión), su distribución geográfica es coincidente, encontrándose las mayores concentraciones en las áreas altamente industrializadas (Sudeste asiático, Europa y Norteamérica). En estas áreas urbanas la concentración de NO_2 puede alcanzar los 300ppb durante periodos de smog fotoquímico intenso. El dióxido de nitrógeno es prácticamente insoluble en el agua, por lo que no es precipitado a través de gotas, rocío o películas de agua que se formen en las superficies, el único sumidero lo representa la reacción con el radical OH^\cdot para formar ácido nítrico.

Desde el punto de vista del deterioro éste acelera la corrosión del cobre, plata y afecta al oro.

- *Ácido sulfhídrico (H₂S)* -

Se trata de un producto de la degradación anaeróbica de los componentes orgánicos de azufre. Sus fuentes por tanto son naturales o debidas a la combustión de hidrocarburos, el uso de hornos de coque y fabricación de papel entre otras. Se trata de un compuesto ligeramente soluble en agua, de acuerdo a:

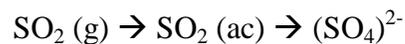


Donde el ión HS⁻ es un agente corrosivo activo con la cinética corrosiva.

- *Óxidos de Azufre (SO_x)* -

Se trata de los gases más importantes para la corrosión atmosférica (se generan durante la combustión y en la refinación de piritas). Su control es factible desde el punto de vista tecnológico por lo que se han limitado sus emisiones sobre todo en países altamente industrializados, por otra parte su concentración se ha venido incrementando en regiones de rápida industrialización con nulos o reducidos controles en las emisiones (economías emergentes o países en vías de desarrollo). Su concentración varía sensiblemente de región a región y aún dentro de una misma zona urbana.

El dióxido de azufre es moderadamente soluble en agua, de acuerdo a:

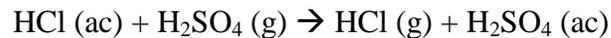
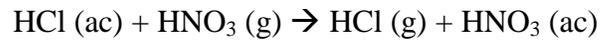


De manera similar cuando se deposita en una superficie reacciona con el radical OH⁻ (en fase gaseosa), formando así H₂SO₄.

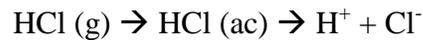
El ácido sulfúrico se disuelve en el agua en donde se disocia en forma iónica. Otra contribución de estos es su colaboración a la formación de la llamada lluvia ácida.

- *Ácido Clorhídrico (HCl)* -

Se origina en la brisa marina de la cual se libera por la presencia de ácidos fuertes:



Este ácido presenta una solubilidad similar al nítrico por lo que tiende a disolverse con relativa facilidad en las gotas o en películas superficiales o aún en el rocío, disociándose para formar ión cloro el cual es un agente corrosivo activo.



- *Ácidos orgánicos* -

Los más comunes (fórmico HCOOH y acético CH₃COOH) son corrosivos a la mayoría de los metales industriales. Sus fuentes principales son la combustión incompleta de madera, de vegetación en general y las reacciones fotoquímicas del *smog*. No existen datos de su concentración y distribución, se considera que en áreas urbanas alcanzan valores de 1 a 10 ppb. Son altamente solubles en agua, en donde se disuelven parcialmente.

Finalmente, como se puede observar existe bastante diversidad de efectos por estos contaminantes, las diferentes fuentes que los suministran, de las diferentes formas en que reaccionan entre si y de las formas en que se diluyen. Por lo general se considera que la rapidez de depositación de estos gases depende de la concentración de estos y de las condiciones atmosféricas. La eficiencia de estos depende de que tan solubles sean en el agua y a mayor humedad relativa más se disolverán, aun aquellos poco afines a este caso. Se consideran a los cloruros y a los óxidos de azufre como los más agresivos para el fenómeno de corrosión.

Partículas suspendidas

Éstas son producto de la condensación de gases de baja volatilidad seguida de coalescencia (figura 1.6) y también provienen por efectos mecánicos como el desgaste (partículas de grandes dimensiones).

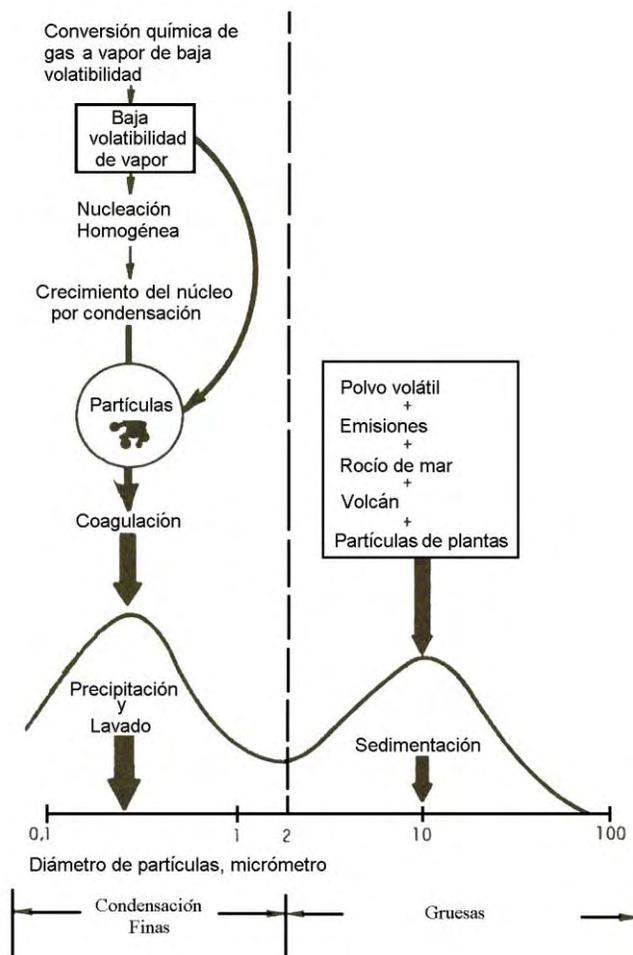


Figura 1.6 Mecanismo de formación y distribución de tamaños de aerosoles atmosféricos provenientes de diferentes fuentes [5].

Las partículas se depositan cuando entran en contacto con la superficie, siendo las más pequeñas más susceptibles al movimiento del aire en comparación con una de gran tamaño, con esto se obtiene que alcanzan una mayor de velocidad en el depósito.

Las partículas pueden ser de origen:

1. Natural, por ejemplo polvos, polvos o cenizas volcánicas, sales del mar.
2. Antropogénicas, por ejemplo de tráfico vehicular, actividades de la construcción, actividades industriales.

Las partículas gruesas de origen natural tienen un mayor impacto a nivel global que las antropogénicas, ya que éstas solo tienen importancia a nivel local.

Su importancia en los fenómenos corrosivos radica en su comportamiento higroscópico con lo cual en presencia de humedad aumentan su tamaño, por ejemplo con 90% de humedad relativa pueden incrementar su radio en un 50% y por tanto su volumen en un 300%, con esto se tendría que prácticamente se ha depositado en la superficie metálica un gota de agua tan grande que se consideraría sumergido en el electrolito y el cual no solo representa un sumidero para gases contaminantes también aunque no son totalmente solubles en agua representarían de igual forma un sumidero para las sustancias y componentes que la conforman.

Variación de la temperatura

La variación de la temperatura esta íntimamente ligada a la velocidad con la que la corrosión ocurre, siendo proporcionales, con lo que se tiene que si aumenta una la otra lo hará de igual manera, ya que favorece que con un menor porcentaje de humedad se condense agua en un metal que se encuentre a una menor temperatura. Para el caso de la corrosión atmosférica se presentan características muy particulares, dado que el rango de variación de la temperatura está muy delimitado, esto por las características geográficas del lugar. También influye de forma directa en el espesor que la capa de condensado pueda alcanzar, ya que si es muy alta puede llegar a evaporarla. Finalmente se considera que para temperaturas ambientales iguales o menores a 0 °C se congela la capa de condensado y con esto los procesos electroquímicos no pueden continuar. Pero no hay que tomar literalmente el concepto anterior ya que la temperatura de congelación dependerá de la concentración de sales, pudiendo existir la película de depósito en estado líquido aún a temperaturas del orden -5 °C.

1.4 CLASIFICACIÓN DE ATMÓSFERAS CORROSIVAS

Habiendo mencionado todos los efectos a considerar de los factores más importantes que dan lugar al fenómeno de la corrosión atmosférica, lo siguiente es ver en que tipos de zonas ambientales se conjuntan, como se desarrollan y de que tipo es su agresividad. Para poder clasificar de acuerdo a esto, a partir de estas características se elaboró una muy sencilla pero útil tipología para señalar con que tipo de zona va a interactuar un metal, las cuales pueden presentar combinaciones. Ésta se describe a continuación:

- a) **Industrial.-** Se caracteriza por las emisiones de la industria pesada, en particular por presentar todo tipo de contaminación por azufre en forma de dióxido de azufre principalmente, el cual proviene en su mayoría de la combustión. Así como concentraciones importantes de cloruros, fosfatos y nitratos.
- b) **Urbano.-** Este tipo de ambiente es similar al industrial con bajo nivel de emisiones producto de la industria pesada, sus contaminantes provienen también de la combustión de materiales fósiles fundamentalmente producidas por fuentes móviles, así como las características antropogénicas. Los contaminantes más usuales son NO_x (NO + NO₂) y SO_x, principalmente.
- c) **Marino.-** Se caracteriza por tener altas concentraciones de cloruros. La concentración de NaCl en este ambiente se mantiene superior a los 15 mg/m² -día, no importando el nivel de SO₂ que se presente. La corrosividad se puede ver incrementada por la existencia de industria en la zona, así como también por la temperatura y la dirección de los vientos dominantes.
- d) **Rural;** Se caracteriza por la presencia de contaminantes provenientes del empleo de fertilizantes y la descomposición de materia orgánica lo cual da como resultado la activación de otros mecanismos de corrosión, debido a la presencia de iones amonía, nitratos, etc.

Desde el punto de vista de los contaminantes se podría hacer referencia a atmósferas marino-industrial, por ejemplo Acapulco, Veracruz, Tampico ó Coatzacoalcos, o referir que zonas del sur

de la ciudad de México (por ejemplo ciudad universitaria) se pueden caracterizar por una atmósfera rural a pesar de estar en plena zona metropolitana [3].

Capítulo 2.

Monitoreo de la Corrosión Atmosférica

2.1 INTRODUCCIÓN.

Desafíos del estudio de la corrosión atmosférica

Como se ha evidenciado, el estudio y cuantificación de la corrosión atmosférica representa un enorme reto debido a la gran cantidad de variables que interactúan, la relación entre éstas, los distintos periodos de tiempo que tardan las diversas reacciones por las que atraviesa el fenómeno, además de que, dependiendo del material que se encuentre expuesto, la respuesta a los diferentes ambientes cambia. Por esta razón la tarea de formular una expresión analítica que describa el fenómeno es una labor que hasta el momento no se ha podido lograr y debido a esto todas las investigaciones y los resultados se determinan de manera experimental, no existiendo para esta labor una prueba que sea de tipo universal.

Este tipo de pruebas de monitoreo experimental son usadas para determinar la resistencia a la corrosión de materiales y/o recubrimientos sobre los cuales no exista referencia en la literatura ó para determinar el tipo de protección más adecuado para las condiciones ambiente de exposición en las que se encuentren. En contraste con esto, se considera que para cualquier equipo lo más adecuado para conocer los parámetros mencionados seria conocer su historia de servicio desde su instalación hasta el momento en que surgió una falla provocada por corrosión, sin embargo, al proceder de esta forma no se cumple con la tarea de disminuir el posible ataque corrosivo y por ende de prolongar lo mas posible la vida de funcionamiento óptimo, a su vez para cuestiones de estudio se requerirían periodos de tiempo demasiado largos lo cual es impráctico en la realización de cualquier investigación. A partir de esto se hace notar la necesidad de tener información que vaya más allá de evaluar efectos una vez que un sistema no cumplió con tiempos y labores para los cuales fue pensada, siendo al mismo tiempo cercana a la realidad [6].

Con esta idea surgen, en función del objetivo que se desee evaluar, los llamados ensayos de corrosión y se pueden englobar en dos grupos [1]:

- Ensayos de laboratorio (acelerados).
- Ensayos de campo (de larga duración).

2.2 ENSAYOS DE LABORATORIO.

Tipos de ensayos

Este tipo de pruebas tiene por objetivo simular aceleradamente los efectos ocasionados por la corrosión, esto puede hacerse, modificándose la transferencia de carga en la interfase metal-electrolito (aplicando un potencial eléctrico) o abasteciendo de manera importante con reactivos que se consumen durante el proceso.

Es decir, los ensayos de este tipo pueden realizarse estableciéndose solamente para cierto parámetro y evaluar de que manera afecta una reacción ó para condiciones ambientales de ensayo lo más cercanas a la realidad que se quiera estudiar, pudiendo realizarse esto de una manera extraordinariamente fácil o extraordinariamente difícil según la naturaleza del medio estudiado.

Según las técnicas que se utilicen para la alteración del medio y cuantificación de los efectos producidos, estas pruebas se dividen en cuatro grupos [6]:

- Ensayos en cámara.
- Ensayos de inmersión.
- Ensayos a alta temperatura/alta presión.
- Ensayos electroquímicos.

Ensayos en Cámara

Este tipo de pruebas se refieren a los ensayos que se llevan a cabo en cámaras cerradas, donde las condiciones de exposición son controladas de forma tal que se puedan acelerar algunas situaciones específicas cercanas a simular tanto como sea posible los mecanismos de corrosión de

una zona en específico de interés. Es decir, es necesario establecer los parámetros que aceleren los daños y verificar que los mecanismos por los que se llega a un ataque corrosivo sigan los mismos pasos como si se tratara de condiciones de servicio. En general, este tipo de pruebas son comparativas con equipos que estuvieron en servicio hasta que fallaron por algún daño por corrosión [6].

Los testigos que serán sometidos a este tipo de cámaras llevan una preparación previa de acuerdo con el tipo de evaluación que va a ser realizada, dependiendo esto principalmente del criterio del evaluador. Una vez preparado el espécimen, éste se debe colocar en un ángulo entre 15 y 30° con respecto a la vertical, preferentemente paralelo al flujo principal de los gases reactantes. Se necesita poner especial atención para que los especímenes no tengan contacto entre ellos, o con algún material que sea capaz de modificar el proceso corrosivo. También deberá permitirse el libre flujo de los gases reactantes entre los especímenes, se promoverá que pueda haber una deposición de dichos gases en las piezas, por otra parte la solución que ha estado en contacto con un testigo no deberá caer en otro, es decir, los productos de lo que se ha inyectado en la cámara y que se depositen en una probeta, no deben caer en otra.

Las condiciones que se deben mantener durante el tiempo del ensayo consisten principalmente en el atomizado de una solución salina al 5% \pm 1% en masa, siendo lo más empleado una a base de cloruro de sodio, y de la cual por hora se introducen de 1 a 2 ml; a su vez la temperatura en el interior debe conservarse en un rango de 35 \pm 1.1 -1.7°C. Además, se puede inyectar aire, lo cual se realiza a diferentes temperaturas y presiones para conservar las condiciones dentro de la cámara.

Esta prueba se encuentra estandarizada, tanto en su uso como en la construcción de la cámara, por la norma ASTM B117 (figura 2.1). Sin embargo, existen modificaciones en cuanto al tipo y concentración de soluciones utilizadas en esta práctica, denominándose a cada una de diversas formas como:

- Cámara de niebla salina (ácido acético) (norma ASTM G85 Anexo A1).
- Niebla salina (SO₂) (norma ASTM G85 Anexo A4).
- Cámara acelerada de cobre de niebla salina (ácido acético) (norma ASTM B-368).
- Cámara de gases.



Figura 2.1 Cámara de origen comercial para la realización de ensayos con niebla salina.

Sin embargo, para esta última, al ser de uso muy reciente como alternativa de prueba acelerada de corrosión, no tiene una especificación o norma y de allí que pueda encontrarse en la literatura diferentes arreglos de éstas [3].

Por ejemplo dentro del grupo de trabajo de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales UDIATEM, se ha diseñado y construido la Cámara de Pruebas Aceleradas de Corrosión Atmosférica (CAPACA), en un principio con el objetivo de reproducir los efectos que ejerce el ambiente en componentes electrónicos. Lo que caracteriza a este ensayo, es que está diseñado para inyectar tres de los principales gases contaminantes de la atmósfera para los cuales se tienen normas de calidad bien establecidas como son el dióxido de azufre, ozono y óxido de nitrógeno contando además con humedad y la posibilidad de controlar la temperatura. Las pruebas se programan a través de una interfase gráfica en una computadora que se comunica y obtiene información del interior de la cámara mediante una tarjeta controladora [7].



Figura 2.2 Cámara de Pruebas Aceleradas de Corrosión Atmosférica (CAPACA) diseñada por el grupo de trabajo de la UDIATEM [7].

Ensayos de Inmersión

Los ensayos de inmersión son los más usados dentro de la industria, y se encuentra estandarizada por la norma ASTM G31 para probetas total y parcialmente inmersas así como por la norma ASTM G44 para ensayos de inmersión intermitente, donde se introduce el espécimen por un tiempo, luego se saca, se seca y se vuelve a introducir en la solución de prueba y se repite la operación durante un “n” número de veces.

Lo mas común al operar esta práctica es la utilización de un matraz de 5 bocas con una capacidad de 500 a 5000 ml, dependiendo el uso de la prueba. Este matraz debe estar totalmente sellado en la parte del tubo condensador y conteniendo en su interior un mecanismo que soporte las probetas. Este puede contar con instrumentos que introduzcan aire, regulen y midan la temperatura, etc (figura 2.3).

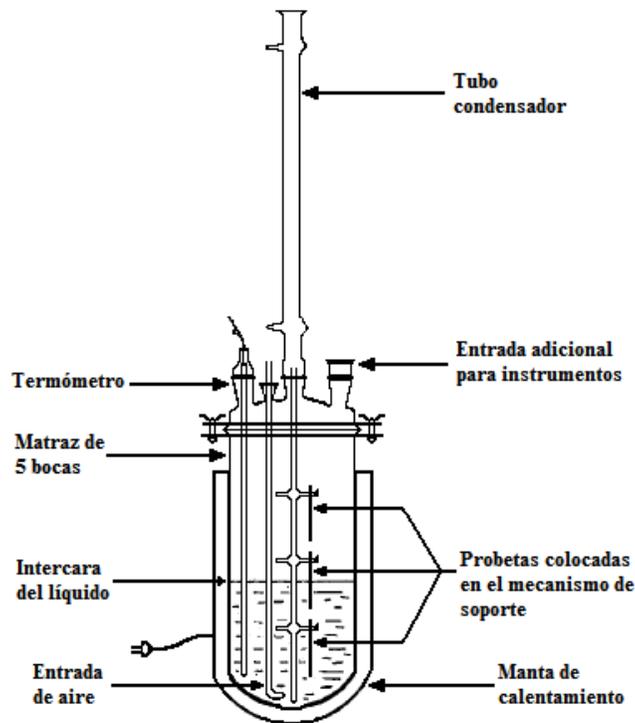


Figura 2.3 Vista de un matraz de 5 bocas listo y distribución de sus instrumentos para realizarse una prueba de inmersión (norma ASTM G31).

El tamaño y espesor de las probetas dependen del propósito del ensayo, naturaleza del material y aparatos usados; aunque lo más deseado es que tengan un área grande y espesor pequeño, siendo las más utilizadas las de geometría circular con las siguientes dimensiones: 38 mm de diámetro con 3 mm de espesor y con 8 u 11 mm de diámetro del orificio de montaje.

El empleo de esta técnica es muy flexible, es decir sus parámetros no son totalmente rígidos dependiendo de los resultados deseados. Como ejemplo de esto se puede mencionar que existe total libertad para el uso de las soluciones dentro de las cuales se efectúa la inmersión, solamente depende del criterio y objetivos del evaluador y que únicamente la norma pide que la composición se controle lo más posible así como que el volumen de la solución se conserve constante en el caso de que se evapore. En el mismo sentido, se usa la temperatura que a juicio del evaluador sea la mejor, simplemente la que se emplee debe ser controlada en un margen de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, a menos de que se trate de una prueba donde se pretenda evaluar a temperatura ambiente y para lo cual se debe usar la más alta anticipada para los meses de verano. En el caso del inyectado de aire, solo se utiliza si la prueba así lo establece en su desarrollo experimental, aunque por lo general con la atmósfera natural inherente al proceso es más que suficiente.

La duración de esta práctica también depende de la naturaleza de la misma, sin embargo, ya sea que se prevea o bien estudios anteriores indiquen rangos de corrosión que vayan de moderados a bajos, la norma emplea en estos casos una ecuación con la cual se establece las horas de duración del ensayo.

Los resultados que se obtienen al finalizar estos ensayos es la medición del porcentaje de pérdida de masa sufrida por cada probeta [6].

Ensayos a Alta Temperatura/Presión

En este tipo de ensayo lo que se utiliza es la variación de la temperatura y la presión de los gases de prueba para observar como es la respuesta corrosiva del material en exposición. Este tipo pruebas se utilizan sobre todo para evaluaciones de procesos industriales.

Ensayos Electroquímicos

Al ser la corrosión un fenómeno de naturaleza electroquímica, no es de sorprender que medir las propiedades eléctricas de la interfase de un material metálico en cierta solución, sea una de las mejores formas de monitorear los efectos producidos por ésta.

Los estudios realizados por esta técnica se basan en la modificación del movimiento de cargas en la interfase metal-electrolito, es decir, supóngase una celda electroquímica con electrodos metálicos cualesquiera y se desea estudiar el efecto de usar un electrolito, que tiene como componente un contaminante atmosférico, y para lo cual lo que se realiza es aplicar cierto potencial eléctrico a uno de los electrodos (polarización), y por medio de esto se saca de equilibrio la velocidad con que ganaba y perdía electrones cada uno de los electrodos en su interfase. Con esto la celda en cuestión queda con un sobrepotencial, que es la diferencia entre el potencial de polarización y el de equilibrio. Por esta razón se habla de una modificación de velocidad de corrosión por sobrepotencial (η) de transferencia de carga.

Para poder realizar una polarización es necesario definir un electrodo de trabajo (T), en el cual se llevará a cabo la reacción electrolítica de interés, igualmente se necesita, para cerrar el circuito, de un electrodo auxiliar o contraelectrodo (C). Finalmente, se necesita de un electrodo de

referencia (R) que permita comparar y por ende obtener la medida del potencial en T y mantenga constante el potencial en el tiempo, utilizando un voltímetro electrónico de alta impedancia. Con estos elementos y mediante la utilización de un instrumento electrónico conocido como potencióstato (figura 2.4), él cual permite aplicar un potencial constante o variable, positivo o negativo, respecto al electrodo de trabajo y del que se obtienen resultados realizando barridos de las respuestas según las excitaciones que se hayan efectuado, y contando con tecnologías de cómputo y programas, se pueden obtener en forma inmediata el análisis de los datos obtenidos durante el experimento [2].

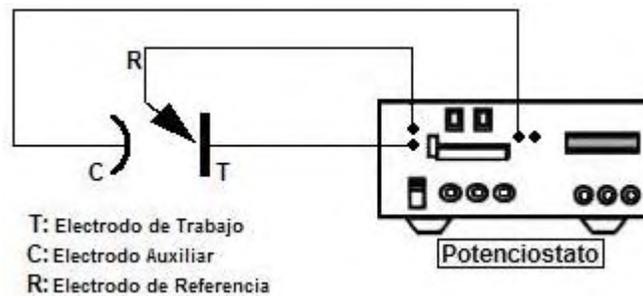


Figura 2.4 Diagrama de un potencióstato y sus electrodos de funcionamiento [2].

Dependiendo del tipo de potencial que se aplique, ya sea constante o variable, esta gama de ensayos se divide en dos:

- Técnicas electroquímicas de corriente directa.
- Técnicas electroquímicas de corriente alterna.

- *Técnicas electroquímicas de corriente directa* -

En este tipo de técnicas se realiza una polarización del material, lo cual se provoca por medio de la aplicación de un potencial o una corriente eléctrica directa a un electrodo, y dependiendo de que tan agresivo sea el potencial aplicado, pueden evaluarse los datos obtenidos mediante dos técnicas, las cuales actualmente son las más usadas; estas son:

- Técnica de Extrapolación de Tafel o de Intersección.
- Técnica de Resistencia a la Polarización.

Técnica de Extrapolación de Tafel o de Intersección [8]

Para llevar a cabo esta técnica se efectúan las polarizaciones de los electrodos con valores de ± 0.300 mV, por esta razón son llamadas como de alto campo. En este caso para obtener un análisis, se aprovecha la dependencia lineal, que existe a partir de los valores antes mencionados de voltaje, entre el sobrepotencial “ η ” y la velocidad de corrosión expresada en términos de el logaritmo de la densidad de corriente “ j ” o corriente por unidad de área que circula a través del electrodo, tal relación describe la ecuación de una recta con una pendiente positiva para el proceso anódico y una negativa para el proceso catódico, las cuales se pueden calcular por medio de las ecuaciones de Tafel. De este modo, se puede encontrar a que potencial se activarán las reacciones de pasivación y oxidación además de la velocidad a las que se llevarán a cabo. Toda esta información se puede visualizar mediante los llamados diagramas de Evans. Finalmente se mencionarán algunas ventajas y desventajas que se obtienen de su uso (tabla 2.1).

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas que representa el uso de la práctica de Extrapolación de Tafel con respecto a las demás técnicas electroquímicas.

Ventajas	Desventajas
1. Tienen una amplia aplicabilidad en la práctica para obtener respuestas a diversos medios. 2. Se obtiene una velocidad de corrosión instantánea para cada variación de potencial.	1. Este tipo de pruebas son destructivas. 2. Por las elevadas polarizaciones aplicadas, se puede dar lugar a modificaciones de la superficie lo cual puede afectar el comportamiento lineal entre η y j . 3. En algunos sistemas es muy difícil distinguir donde empieza la tendencia lineal.

Técnica de Resistencia a la Polarización [8]

Con esta técnica se usan potenciales de polarización de alrededor de 20 mV, por lo que es llamada también como una técnica de bajo campo. Esta establece una relación entre la densidad de corriente de corrosión (j_{corr}) y la resistencia a la polarización del electrodo usado, por lo cual mediante una analogía con la ecuación de la ley de Ohm se determina la ecuación gobernante de este tipo de análisis y que queda expresada como $j_{corr} = B/R_p$. Donde B hace alusión a la relación

existente entre las pendientes de Tafel. A continuación se enlistarán algunas observaciones en pro y en contra de su uso (tabla 2.2).

Tabla 2.2 Algunas ventajas y desventajas que representa el uso de la práctica de Resistencia a la Polarización con respecto a las demás técnicas electroquímicas.

Ventajas	Desventajas
1. Es una técnica no destructiva pues emplea bajas perturbaciones. 2. Se obtiene una velocidad de corrosión instantánea.	1. Es necesario que el potencial sea estable. 2. Es necesario seleccionar una velocidad de barrido adecuada. 3. Se necesita conocer de antemano las pendientes de Tafel para el sistema o en consecuencia llevar a cabo un ensayo de extrapolación de Tafel primero. 4. En sistemas donde el electrolito sea altamente resistivo, no es muy recomendable su uso.

- Técnicas electroquímicas de corriente alterna -

Este tipo de técnicas realizan una polarización del material por medio de la aplicación a un electrodo de un potencial o una corriente eléctrica alterna y la respuesta se va obteniendo a diferentes frecuencias. Actualmente, las técnicas mas usadas para evaluar mediante el uso de potencial alterno son:

- Técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.
- Técnica de Ruido Electroquímico.

Técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica [8]

Esta es una técnica que utiliza muy pequeñas amplitudes de señales, razón por lo que no existen grandes perturbaciones al sistema en estudio, debido a esto es que los potenciales usados comúnmente están en un rango entre los 5 mV a los 50 mV con frecuencias de 0.001 Hz a 100,000 Hz [6]. Por medio de ésta, se determina la resistencia en términos de la aplicación de corriente alterna o lo que es lo mismo la impedancia donde la parte real indica la resistencia del

circuito (que es la suma de la resistencia del electrodo y del electrolito) y la imaginaria, que en este tipo de sistemas siempre es negativa, indica una capacitancia por parte del electrodo en la interfase metal-electrolito. Con los resultados obtenidos lo que usualmente se realiza es representar las reacciones por medio de un circuito eléctrico equivalente. En la tabla 2.3 se muestran las ventajas y desventajas para este tipo de análisis.

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas que representa el uso del ensayo de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica con respecto a las demás técnicas electroquímicas.

Ventajas	Desventajas
1. Es una técnica no destructiva pues emplea bajas perturbaciones. 2. Se pueden obtener circuitos equivalentes de las reacciones que se llevan a cabo en la interfase metal-electrolito.	1. No cualquier sistema se puede representar mediante un circuito equivalente. 2. Es necesario seleccionar una velocidad de barrido adecuada. 3. En sistemas donde el electrolito sea altamente resistivo, es imposible obtener la resistencia de la interfase.

Técnica de Ruido Electroquímico [8]

En el caso de esta técnica el sistema no se perturba y lo que se mide son las variaciones espontáneas en corriente y potencial, producidas por las micropilas que se forman sobre la interfase metal-electrolito. Esta se ha empleado para determinar la velocidad de corrosión, calculando la resistencia de ruido “ R_r ” y que es comparable con la resistencia a la polarización. También se ha comprobado que este tipo de ensayo es muy útil para caracterizar y predecir ataques de corrosión localizada. A pesar de todas sus ventajas y aplicaciones, todavía no existen métodos estandarizados ni consenso total en la base teórica para la interpretación de los datos arrojados por este tipo de prueba, siendo el mejor recurso de validación la utilización de otra técnica de evaluación de la corrosión como patrón de comparación, siendo especialmente viable cuando se estudia corrosión uniforme. En la tabla 2.4 se muestran algunas de las ventajas y desventajas provenientes de su utilización.

Tabla 2.4 Algunas ventajas y desventajas que representa el uso del ensayo de Ruido Electroquímico con respecto a las demás técnicas electroquímicas.

Ventajas	Desventajas
1. Es una técnica no destructiva pues emplea bajas perturbaciones. 2. Se pueden realizar pruebas para el caso de corrosión localizada.	1. No existen reglas generales para su análisis.

2.3 ENSAYOS DE CAMPO.

Justificación de su utilización

Este tipo de pruebas tiene la ventaja de exponer las muestras a las condiciones reales a las que se someten los materiales (en forma de placas planas), teniendo como desventaja los periodos prolongados de exposición, esto es, una hora de prueba equivale a una hora de servicio real, siendo por lo general pruebas de 1 a 2 años de duración. Por esta condición son imprácticos para efectos de control de calidad, sin embargo en la actualidad se siguen empleando.

Existen otros ensayos de menor duración, alrededor de 3 meses, conocidos como técnica de alambre sobre tornillo y que consisten en la formación de un par galvánico (se juntan dos metales con diferente potencial), sin embargo en la actualidad estos no se han usado mucho a pesar de que la información que brindan es bastante fidedigna.

Los resultados obtenidos mediante este par de prácticas se cuantifican como la cantidad de masa pérdida durante la exposición.

- Análisis de la corrosividad atmosférica mediante probetas “placas planas” -

El uso de esta prueba se encuentra regulado por medio de la norma ASTM G 50, en la cual se establece que se deben colocar en un número de sitios representativos de las diferentes atmósferas, así como se recomienda atender una serie de factores, que ayudarán en su estructuración y garantizan la confiabilidad de resultados:

1. La estación de prueba no se deberá instalar próxima y opuesta a la dirección del viento de cualquier lugar que pueda ser una fuente importante de contaminación. La ubicación deberá realizarse en lugares donde las condiciones de contaminación sean generales.
2. Los testigos por lo general tienen una medida de 100 x 150 mm, pudiéndose variar estas de acuerdo con el propósito del estudio.
3. Las estructuras de soporte o racks donde son colocadas las muestras, se instalan a 30° con respecto a la horizontal, siendo esta posición práctica común en América, mientras que en países europeos lo común es una inclinación de 45°. Cuando se hacen ensayos con esta posición, es preferible apoyar las muestras por el extremo inferior, para asegurarse que los productos solubles de los porta muestras, no se vean arrastrados por la acción de la lluvia sobre muestras que se encuentran en exposición. Se debe tomar toda clase de precauciones, para evitar la acumulación de agua de lluvia en el punto por donde las muestras están sujetas a los apoyos.
4. Si un máximo de exposición a la luz del sol es deseada, las probetas deberán ser expuestas en un ángulo igual al de la latitud del sitio en cuestión.
5. La convención utilizada para la orientación de los especímenes es que las muestras expuestas en el hemisferio norte se ponen de cara al sur y aquellas que se exponen en el hemisferio sur se ponen de cara al norte [3].

- Análisis de la corrosividad atmosférica mediante probetas “alambre sobre tornillo” -

Esta técnica representa una importante herramienta en el estudio de los metales expuestos a la agresividad de la atmósfera.

Este ensayo fue introducido por los Laboratorios Bell Telephone para realizar estudios de corrosión galvánica en la atmósfera y posteriormente desarrollada por la compañía ALCAN para predecir en un tiempo de 90 días la resistencia al ataque atmosférico del aluminio, en particular cuando se encuentra en contacto con otros metales.

En la actualidad este ensayo es conocido como ensayo CLIMAT (por las iniciales en inglés de “*Classification of Industrial and Marine Atmospheres*”), debido a su uso para clasificar las atmósferas marinas e industriales.

Sin embargo, su uso no se limita simplemente a la clasificación de atmósferas, esta prueba también brinda valiosa información para el diseño, materiales, recubrimientos y medidas

protectoras de elementos metálicos en sitios donde la corrosión atmosférica no es conocida o para la localización de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos; y a través de los datos arrojados en varios países se han podido elaborar mapas de corrosividad [9].

La información recabada con ésta, consiste básicamente en evaluar la pérdida de peso que experimente un alambre (de comportamiento anódico) enrollado alrededor de las roscas de un tornillo (de comportamiento catódico o noble respecto al alambre), siendo expuestos a cierta atmósfera. En la práctica estandarizada por la norma ASTM G116 se reporta para el alambre un diámetro de 0.875mm, mientras que para el tornillo esta medida es 1.27cm con un paso de rosca de 13 hilos por pulgada; sin embargo se encuentran reportados, tanto en literatura como en publicaciones, el uso de alambre con diámetro de 1mm, a la vez que el tornillo mide 1cm [10] [11]. Se usa 1m de alambre, enrollándose aproximadamente unos 80cm en el tornillo, lo que supone la mitad del tornillo enroscado. Para comenzar a construir las probetas se deben limpiar residuos grasos y pesar el alambre, el cual posteriormente se bobina al tornillo, esto debe realizarse utilizando guantes, como precaución para no contaminar la superficie del alambre. Los extremos del alambre por lo general se fijan al tornillo catódico con la ayuda de dos tornillos de latón, los cuales a su vez, deben ser pintados para evitar posibles efectos galvánicos no deseados. Concluido esto, las probetas se insertan en un pupitre de exposición, el cual debe contener como mínimo 3 probetas del mismo par galvánico.

Para realizar la instalación de pupitres al ambiente, se debe considerar que los arreglos alambre-tornillo se exponen verticales según la norma ó en algunos estudios realizados, 45° respecto a la horizontal [11] [12]. Terminado el tiempo de la prueba, se desenrolla el alambre del tornillo, y después de retirar los residuos producto de la corrosión mediante una limpieza ya sea por medios químicos, mecánicos o ambos, se determina la pérdida de peso expresada como porcentaje del peso inicial y que queda expresado en la ecuación 2.1.

$$\text{porcentaje de pérdida de peso (\%)} = \frac{\text{masa perdida} - \text{masa inicial}}{\text{masa inicial}} \quad (2.1)$$

Considerando que lo único que desea cuantificarse es la pérdida de masa producto de la corrosión galvánica, es necesario colocar probetas construidas con tornillos de plástico, según la norma

debe ser nylon 66, y que restan el efecto de hendiduras. Por este motivo, para calcular el porcentaje de masa pérdida durante la prueba, debe tomarse la diferencia de peso entre los alambres alrededor de las probetas de plástico y las metálicas.

Tomando en cuenta lo anterior, al porcentaje de pérdida de peso calculado se le denomina Índice de Corrosividad Atmosférica (I.C.A.), del cual, a partir de estudios en diferentes tipos de atmósferas, se determinaron rangos los cuales fueron asignados considerando la masa pérdida. En la tabla 2.5 se muestran los valores asignados a cada tipo de atmósfera.

Tabla 2.5 Rangos de valores del Índice de Corrosividad Atmosférica con respecto a los ambientes de exposición [12].

Tipo de Atmósfera	I.C.A.
Marina	0.4 – 9.0
Industrial	0.15 – 1.8
Rural	0.0 – 0.3

Lo que hace de esta práctica ser de corta duración de exposición es la conjunción de varios efectos que contribuyen a acelerar los procesos corrosivos, siendo el primero de estos, el ataque generado por la interacción del área del alambre con el medio ambiente donde se encuentre colocado. El segundo es el fenómeno conocido como corrosión en grietas o hendiduras y que es generado en los resquicios que existen en la unión entre el alambre y el tornillo. Finalmente esta la corrosión galvánica generada por el contacto entre las superficies del par de distintos metales, favorecido por la alta relación superficie/masa que muestra el alambre.

Las ventajas de estos ensayos, es que aun siendo de corta duración, confiable y reproducible, al mismo tiempo se realiza sin perder información real del fenómeno corrosivo propio de los ensayos in situ o de servicio, además de su fácil traslado y colocación.

A pesar de todas estas cualidades, su uso y publicación de trabajos relacionados con el empleo de esta prueba es aun escaso.

Las desventajas que representa el uso de estas pruebas es que el material anódico debe encontrarse comercialmente en forma de alambre y el catódico en forma de tornillo, así como

también lo representa encontrar las medidas y composición química que marca la norma. Además de que previamente se debe conocer si el par galvánico a construir cumple con los efectos deseados, también es necesario tomar en cuenta que puede existir alguna interferencia al comportamiento requerido por el par, resultante del proceso de manufactura por el cual se hayan obtenido los materiales. Otro inconveniente radica en que, al terminar el tiempo de exposición, si el alambre está partido en alguna zona, la probeta debe ser descartada; si además esto se presenta en la triada de los pares bimetálicos expuesta en un lugar, la prueba debe ser desechada y realizar de nuevo la prueba, ya sea con un menor tiempo de exposición o cambiando la combinación tornillo-alambre.

A continuación se muestran algunas de las combinaciones metálicas (sin especificar la clasificación de la aleación de acuerdo a alguna norma) mas comúnmente utilizadas para la construcción de las probetas (tabla 2.6):

Tabla 2.6 Algunas combinaciones para construir probetas “alambre sobre tornillo” [10].

Alambre	Tornillo
Aluminio	Hierro ó Acero Cobre Plástico (roscado) Plástico (espiral)
Zinc	Hierro ó Acero Cobre Plástico (roscado) Plástico (espiral)
Hierro ó Acero	Cobre Plástico (roscado) Plástico (espiral)

En estudios realizados se ha encontrado que el par alambre de aluminio enrollado en tornillo de acero proporciona una buena respuesta en atmósferas marinas, de igual forma el par alambre de aluminio en tornillo de cobre presenta bastante sensibilidad respecto a atmósferas marinas e industriales. De acuerdo a la utilización de estos pares es posible determinar el Índice de

Corrosividad Marina o I.C.M. (par aluminio-acero) y el Índice de Corrosividad Industrial o I.C.I. (par aluminio-cobre) [12].

Capítulo 3.

Desarrollo Experimental

3.1 INTRODUCCIÓN.

Etapas del Desarrollo Experimental

En el caso particular de este experimento, se han definido las etapas que lo guiarán a su culminación, las cuales se muestran en la figura 3.1. Sin embargo, aunque existe un orden de actividades y las varias ventajas que representa el uso estandarizado de esta técnica, se debe tener especial cuidado de las tareas y adecuaciones que se tienen al llevar a cabo su aplicación, por los cuales, se pueden presentar alteraciones en los resultados obtenidos, siendo estos no siempre mencionados en las normas o trabajos previos.

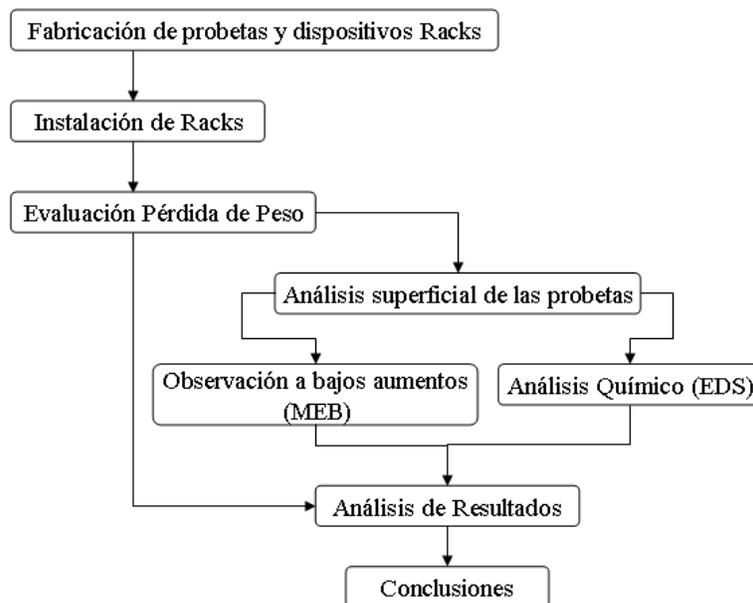


Figura 3.1 Diagrama de flujo de las etapas realizadas para llevar a cabo el ensayo “Alambre sobre Tornillo”.

Las actividades efectuadas para cada una de las etapas se mencionan y describen a grandes rasgos a continuación:

- Fabricación de probetas y pupitres de instalación para realizar el ensayo “Alambre sobre Tornillo” dentro de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería (UNAM).
- Instalación de los pupitres con tornillos en varias zonas del Distrito Federal, del Estado de México y del Estado de Morelos,
- Exposición de pupitres a ensayos acelerados dentro de la Cámara de Pruebas Aceleradas de Corrosión Atmosférica (CAPACA).
- Evaluación del porcentaje de pérdida de peso sufrida por las probetas colocadas a la atmósfera después de 90 días de exposición.
- Observación a bajos aumentos de las probetas evaluadas, mediante el uso del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

3.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS Y PUPITRES.

Los materiales considerados para construir las probetas fueron, para el alambre, un aluminio 1100 y para la fabricación de los tornillos de acero una aleación AISI 1010, a la par de utilizarse para elaborar estas mismas piezas pero en cobre una aleación CA110, siendo estos los únicos metales claramente especificados dentro de la norma que estandariza la práctica. Además hay que agregar que para la elaboración de los tornillos de plástico se perfiló según la misma norma el uso de nylon 66, que es conocido comercialmente como nylamid (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Arreglos alambre sobre tornillo contemplados para efectuar las pruebas de exposición.

Alambre	Tornillo
Aluminio	Acero de bajo carbono Cobre Nylamid

El inconveniente para usar los materiales mencionados, fue la disponibilidad comercial de cada uno de estos, ya que se consiguieron alambre de aluminio comercial ó 1100 y barras de cobre electrolítico 99.9% puro, que es de manera comercial el cobre CA110, y del acero solo se encontraron barras de aleación AISI 1018 cold rolled (Tabla 3.2). Es importante mencionar que el aluminio vendido comercialmente trae un tratamiento de anodizado, el cual garantiza la pasivación del material y por tanto mayor resistencia al ambiente.

Tabla 3.2 Composición química de los metales usados para la construcción de probetas [13].

Acero AISI 1018					
Elemento	C	Fe	Mn	P	S
%	0.14 - 0.2	98.81 – 99.26	0.6 – 0.9	≤ 0.04	≤ 0.05

Aluminio 1100					
Elemento	Al	Cu	Mn	Si + Fe	Zn
%	99.0	0.05 – 0.2	≤ 0.05	≤ 0.95	≤ 0.1

Cobre Electrolítico			
Elemento	Cu	O	Otro
%	99.9	0.04	0.06

De las barras de acero y cobre se cortaron pedazos de aproximadamente 12 cm, los cuales fueron maquinados para obtener los tornillos, esto se realizó con tornos pertenecientes a los Laboratorios de Ingeniería Mecánica, éstos al final del proceso de corte cuentan con una cuerda nominal de 13 hilos por pulgada, que corre a lo largo de aproximadamente 10 cm. Para los fabricados en nylamid se siguió el mismo procedimiento, el único cambio es que fueron elaborados mediante máquinas de control numérico dentro de los mismos laboratorios. Para su posterior identificación cada uno de estos tornillos fue grabado en la zona inferior de la parte sin maquinar. El alambre fue cortado en pedazos con una longitud entre los 100 y los 102 cm aproximadamente y diámetro de 1.6 mm ó cercano a 1/16 de pulgada.

Una vez acabado esto, se procedió a desengrasar cada uno de los componentes de las probetas, siendo utilizados guantes para su manejo, buscando evitar cualquier posibilidad de contaminación durante su manipulación, de hecho también fueron utilizados en las posteriores etapas de construcción y armado. La limpieza de los residuos grasos se encuentra estandarizada por medio de la norma ASTM G1, realizándose esto para los tornillos metálicos por medio de limpieza ultrasónica y sumergidos en acetona, mientras que los tornillos de nylamid simplemente se sumergieron en alcohol. Al final todas estas piezas fueron secadas por medio de aire caliente. Para los alambres estos residuos fueron removidos manualmente con un algodón impregnado con acetona.

Una vez limpios los tornillos, son pesados en una báscula con precisión de 0.1 mg, para posteriormente proceder a enrollar el alambre sobre cada uno de éstos. A diferencia de lo marcado por la norma para esta práctica, en lugar de usar tornillos y tuercas de latón recubiertos con laca para sujetar el alambre embobinado al tornillo, se prefirió realizar esta acción a través de pequeños cinchos de plástico y evitar formar otro posible par galvánico.

El procedimiento de pesado se realizó de la siguiente manera; primero se pesaron por triplicado todos los tornillos por separado, una vez obtenido esto se pesaron una sola vez, debido a la nula variación de lecturas obtenidas, dos cinchos de plástico, con los cuales se fijaría un pedazo de alambre en un tornillo. Finalmente se adquirieron por triplicado los pesos de cada uno de los armados finales de tornillo-alambre-cinchos de plástico. A partir de esto se obtuvo el peso de cada alambre “*P_i*”, mediante la resta de los pesos del tornillo y de los cinchos de plástico, al del armado final. Cabe aclarar el hecho de que, para las piezas, se hayan tomado por triplicado sus pesos se debe a razones puramente estadísticas. También, debe hacerse mención que para evitar su contaminación antes de la exposición, fueron guardados individualmente en bolsas de plástico con cierre hermético. De esta manera se obtuvieron 30 dispositivos alambre-tornillo, por cada material.

Para la construcción de los racks ó pupitres se usaron rejillas de plástico de 15 x 22.5 cm, las cuales contaban con elementos unitarios de 1.5 x 1.5 cm. Para asegurar una total fijación de los tornillos en la celdilla correspondiente, se necesitó colocar pequeños pedazos de manguera y para

algunos se enrolló un poco de cinta de aislar, en ambos casos en el extremo del tornillo sin maquinado alguno, disponiéndolos de forma vertical respecto de la rejilla y evitando cualquier apantallamiento por parte de los mismos tornillos (figura 3.2).



Figura 3.2 Armado final de las estaciones a exponerse en diversas zonas para realizar la prueba del alambre sobre tornillo.

3.3 INSTALACIÓN DE LOS RACKS O PUPITRES.

Una vez contando con los ocho pupitres, a partir de un breve análisis cualitativo se escogieron los sitios donde se instalarían estos (figura 3.3). Esta selección se hizo tomando en cuenta que características tenían en común los lugares de exposición, comparativamente, con la clasificación de atmósferas corrosivas y dependiendo de esto se realizó la elección para tener atmósferas tipo industrial, urbana y rural (tabla 3.3).

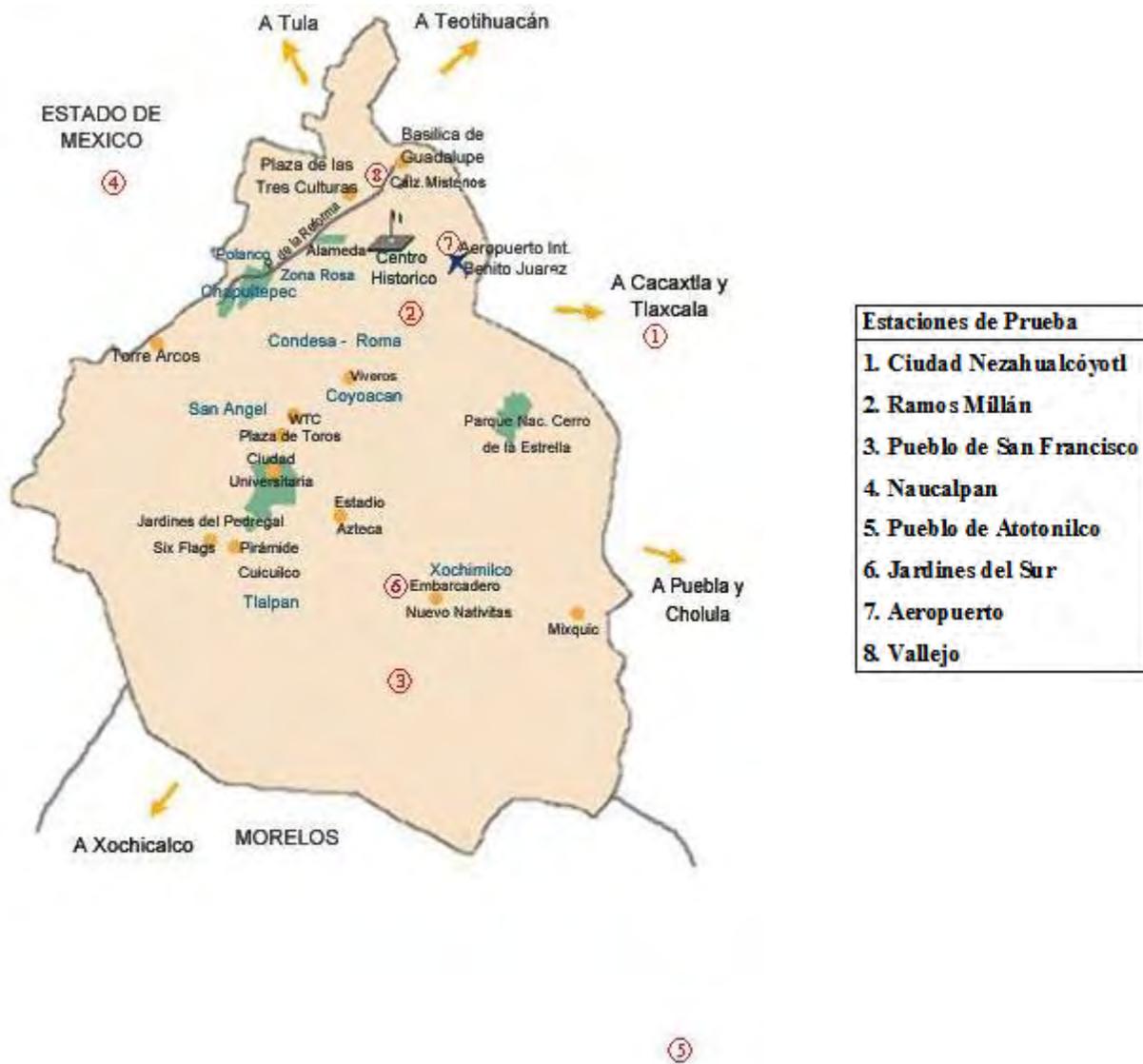


Figura 3.3 Localización de las estaciones de prueba.

Tabla 3.3 Número de cada rack o pupitre, con el nombre de identificación y ubicación de cada estación de monitoreo armada, así como la atmósfera tipo en la cual se conceptualizo la zona al momento de realizar la prueba.

No Rack	Nombre de id. rápida	Ubicación	Atmósfera tipo
1	Neza	Calle Poniente 3 Col. La Perla, Cd. Netzahualcóyotl, Edo. de México, cerca del metro Pantitlán	Industrial
2	Ramos Millán	Calle Sur 169 Col. Gabriel Ramos Millán, Del. Iztacalco, cercano al Palacio de los Deportes	Urbana
3	San Francisco	Calle Constitución No 19 Pueblo de San Francisco Tlalnepantla, Del. Xochimilco, cercano a la autopista México-Cuernavaca	Rural
4	Naucalpan	Zona Industrial de Naucalpan	Industrial
5	Atotonilco	Pueblo de Atotonilco, Edo. de Morelos, dentro del Valle de Cuautla	Rural
6	Jardines del Sur	Calle Pérgolas Col. Jardines del Sur, Del. Xochimilco, cercano al Deportivo Xochimilco	Urbana
7	Aeropuerto	Calle Cairo Col. Romero Rubio, Del. Venustiano Carranza, cercano al Aeropuerto de la Cd. de México	Urbana
8	Vallejo	Calle Río Blanco Col. Industrial, Del. Gustavo A. Madero, cercano al metro Potrero	Industrial

Así que, una vez encontrándose en el sitio de instalación para cada pupitre, estos se acomodaron de forma tal que los tornillos estuviesen en posición vertical con respecto al piso y con el mayor cuidado, para no tocar y contaminar las probetas. Igualmente se buscó que estos se encontrasen en un lugar descubierto donde fueran al mínimo obstruidos por alguna construcción u objeto, esto para asegurar que quedaran a total acción del ambiente. Es necesario mencionar que una vez colocados los pupitres en las ocho estaciones, estos fueron expuestos durante un periodo de 90 días que abarcaron del 5 de septiembre al 9 de diciembre de 2007.

Cámara de Pruebas Aceleradas de Corrosión Atmosférica (CAPACA)

Primeramente se debe aclarar que el objetivo perseguido al usar la cámara de pruebas aceleradas (CAPACA), era el de correlacionar el porcentaje de pérdida de peso obtenido al introducir probetas alambre sobre tornillo y dejarlos en una prueba a la que se les sometía un cierto número

de ciclos, así, si posteriormente se desea evaluar la corrosividad en cierto lugar, mediante el uso de la técnica alambre sobre tornillo, con los datos obtenidos se tendría una relación del número de ciclos necesarios para llevar a cabo una prueba acelerada, como si este se encontrase en la zona a evaluar.

De este modo se llevaron a cabo pruebas, en los que se dejaban racks un cierto número de ciclos, siguiendo para programar cada ciclo la metodología usada para pruebas aceleradas de corrosión atmosférica en macro-componentes electrónicos [7] y que se menciona a continuación.

El procedimiento para llevar a cabo la prueba comenzaba, antes de activar los ciclos, encendiéndose el humidificador, en el cual se empleó agua destilada. Con esto se logra elevar el interior de la cámara hasta una humedad relativa (70% HR aprox.) de trabajo para la simulación (tabla 3.4). Una vez logrado este valor, se procederá a la puesta en marcha de los ciclos.

Un ciclo de trabajo, una vez contando con la humedad relativa necesaria, consiste en elevar la temperatura hasta un valor $T_1 = 40^{\circ}\text{C}$, este valor se mantiene constante durante un tiempo $t = 3$ minutos y posteriormente se disminuirá la temperatura hasta $T_2 = 5^{\circ}\text{C}$ de igual forma se mantendrá constante por el mismo periodo de tiempo $t = 3$ minutos, con lo cual concluye el ciclo (tabla 3.4). Es de mencionarse que al mismo tiempo que se realiza lo anterior, por prueba se inyectan gases contaminantes, los cuales son el dióxido de nitrógeno, el cual se inyecta un flujo de $100\text{ cm}^3/\text{min}$ durante 3 segundos, así como dióxido de azufre, el cual se encuentra dentro de la cámara con una concentración de 90 ppm. Esta concentración de gases esta normada y es cien veces la máxima encontrada en un atmósfera industrial para garantizar un deterioro acelerado.

Tabla 3.4 Condiciones de exposición por ciclo de variables como la temperatura y humedad al interior de CAPACA [7].

Variable	Estado	
	Calentamiento	Enfriamiento
Temperatura °C	$T_1=40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	$T_2= 5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
Humedad relativa (%)	$30 \pm 1 \%$	$90 \pm 1 \%$
Tiempo para cada evento	50 %	50 %
(Relativa al tiempo total de un ciclo)	10 minutos	10 minutos

Se considera que el comportamiento ideal de las variables temperatura y humedad contra el tiempo dentro de la cámara es de tipo trapezoidal, con lo que cuando la temperatura llegue a su valor máximo, la humedad relativa estará en su mínimo y viceversa.

Finalmente, debe mencionarse que los pupitres que se introdujeron para llevarse a cabo pruebas, fueron expuestos a ensayos con una duración de 30, 60, 90 y 120 ciclos, siendo la razón del límite de exposición superior, el que, a 120 ciclos los experimentos realizados para evaluar macro-componentes electrónicos, y en particular discos duros de computadora, los cuales para dicho lapso reportarán daños muy severos.

3.4 EVALUACIÓN DE PROBETAS EXPUESTAS.

Limpieza y Evaluación de las Probetas Expuestas

Terminados los 90 días de exposición, se retiraron los pupitres de las estaciones de monitoreo para hacer la limpieza de los productos de corrosión y hacer los análisis pertinentes a la prueba, de nueva cuenta, el retiro de éstas se realizó con sumo cuidado para evitar cualquier contaminación que altere los resultados que se obtengan.

Para comenzar se desenrollaron los alambres de cada dos de las tres probetas que constituían un pupitre, para lo cual se tuvieron que cortar los cinchillos de plástico con los cuales se sujetaban estos sobre el tornillo. Debe hacerse notar que como práctica común se usaron en todo momento guantes de látex, así como para los pasos posteriores de limpieza y pesaje.

En base a la norma ASTM G1, se seleccionaron las sustancias decapantes de los óxidos estandarizadas para los tres metales manejados durante la prueba (tabla 3.5).

Tabla 3.5 Sustancias estandarizadas para la limpieza de productos de corrosión utilizadas en este experimento según la norma ASTM G1.

Metal	Componentes de la Solución		Duración del Baño
Acero	Ácido Clorhídrico (HCl)	1 litro	25 minutos aprox. A temperatura ambiente
	Trióxido de Antimonio (Sb ₂ O ₃)	20 gr.	
	Cloruro Estanoso (SnCl ₂)	50 gr.	
Aluminio	Ácido Crómico (CrO ₃)	20 gr.	5 a 10 minutos A 80°C aprox.
	Ácido Fosfórico (H ₃ PO ₄)	50 ml.	
	Agua Destilada	950 ml.	
Cobre	Ácido Clorhídrico (HCl)	500 ml.	1 a 3 minutos A temperatura ambiente
	Agua Destilada	500 ml.	

Así que para realizar la limpieza de los elementos, se procedió a sumergir los alambres en la solución decapadora del aluminio y los tornillos a la solución correspondiente ya fueran de cobre o acero, y con los cuales, para obtener una mejor limpieza, en un menor tiempo de baño, se realizó un cepillado con un pequeño cepillo de uso dental (figura 3.4). Es importante señalar que debido a los vapores expedidos por las soluciones a base de ácido clorhídrico, se trabajó en una campana extractora en todo momento.

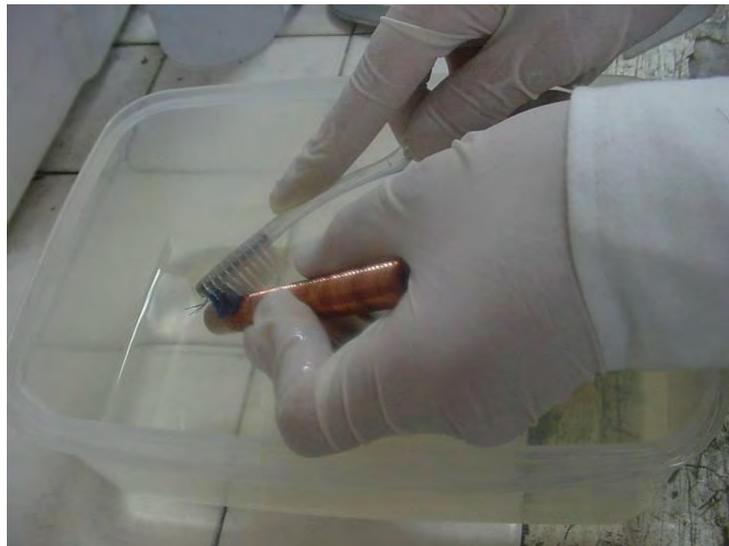


Figura 3.4 Proceso de limpieza para un tornillo metálico.

Cumplido el tiempo de baño, se enjuagó cada pieza con un chorro de agua destilada, para después rociarlos con alcohol y secarlos mediante una pistola de aire caliente.

Contando con los alambres y tornillos limpios, se realizó por triplicado, el último pesaje necesario para cada una de las piezas, tanto alambres como tornillos, con excepción de los compuestos por nylamid. A partir de esto se obtuvo de cada alambre un peso “*Pf*” con una precisión de 0.1 mg.

Finalmente a partir de los datos recopilados a lo largo del ensayo (“*Pi*” y “*Pf*”) y ocupando la ecuación 3.1, se puede obtener para las distintas estaciones el porcentaje de pérdida de peso experimentada durante el tiempo de exposición y por tanto, el Índice de Corrosividad Atmosférica. Esto no solo se aplicará a lo arrojado por la pérdida sufrida por los alambres, como marca la norma ASTM G116, sino también por la de los tornillos.

$$I.C.A. = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (3.1)$$

Observación a Bajos Aumentos

El objetivo perseguido con esto, era el de observar, de que manera se llevaba a cabo, de forma cualitativa, la degradación de las probetas en exposición al ambiente.

Para hacer esto, por cada rack expuesto al ambiente, se conservó una probeta, la cual con los depósitos formados durante el tiempo de prueba, fue usada, para ser observada a bajos aumentos, empleando para esta tarea un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), en el Laboratorio de Microscopia Electrónica de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica. Para esto únicamente se seleccionaron, al azar, probetas de tres diferentes estaciones, siendo únicamente utilizadas las constituidas por tornillos metálicos (cobre y acero) y las cuales resultaron pertenecer, según el nombre asignado de identificación rápida, a los sitios de Neza, Ramos Millán y San Francisco.

Debido a las dimensiones de la cámara del Microscopio Electrónico de Barrido, se debió preparar la probeta para ser observada. Por tal motivo se procedió a realizar un corte, el cual se realizó

mediante una cortadora de disco abrasivo y aproximadamente se hizo en la zona central de prueba de cada probeta, con lo que se obtuvieron pequeñas muestras de alrededor de 1.5 cm de alambre enrollado al tornillo. Debido a la naturaleza del corte mediante disco abrasivo, para evitar una posible contaminación con partículas del disco o del propio alambre o tornillo, se enrolló alrededor un plástico protector, sujetado con un poco de cinta adhesiva, los cuales se retiraron antes de ser observadas dentro del microscopio.

Finalmente, para ser vistas a bajos aumentos, se desenrollaron aproximadamente de una y media a dos vueltas del alambre sobre el pedazo de tornillo y se les dió una última limpieza con un chorro de aire comprimido. Adicionalmente en algunos puntos de interés, se realizó análisis químico, mediante espectrometría de rayos x (EDS), así como la adquisición de imágenes.

Es necesario mencionar que solo se observaron tres probetas, debido a que, no hubo diferencias entre lo observado en estas, lo cual de haberse presentado, hubiera ocasionado el corte y observación de los restantes especímenes.

Capítulo 4.

Análisis de Resultados

4.1 INTRODUCCIÓN.

En una simple inspección visual lo primero a resaltar, fue el grado de formación de productos de corrosión por parte de los tornillos de acero, en contraste, con lo poco o nulo de estos para el caso de los alambres de aluminio así como de los tornillos de cobre.

Sin embargo, lo único que puede indicar el grado de ataque de cada material en cada sitio y periodo de tiempo de exposición es el análisis cuantitativo de porcentaje de pérdida de peso, el cual se realizará de acuerdo a la ecuación 3.1. El objetivo perseguido al observar los arreglos mediante microscopia electrónica de barrido, es el de obtener imágenes que proporcionen indicios del inicio y desarrollo de los productos atmosféricos de corrosión y además si estos muestran cierta variación de una estación a otra.

4.2 ÍNDICE DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA.

Evaluación de las Probetas Expuestas al Ambiente

A continuación se mostrará un resumen de los datos obtenidos como resultado de la prueba alambre sobre tornillo en las distintas estaciones instaladas. Estos corresponden a lo obtenido por el par aluminio-cobre ó Al/ Cu (tabla 4.1 y figuras 4.1 y 4.2) y por el par aluminio- acero ó Al/Ac (tabla 4.2 y figuras 4.3 y 4.4).

Tabla 4.1 Datos del Índice de Corrosividad Atmosférica para las 8 estaciones instaladas por 90 días y evaluados tanto para los alambres como para los tornillos, para el par Al/Cu (aluminio-cobre).

No Rack	Estación (Nom. Id. Ráp.)	I.C.A. (Alambre Al) % Promedio de Pérdida de Peso	I.C.A. (Tornillo Cu) % Promedio de Pérdida de Peso
1	Neza	0.00671	0.01921
2	Ramos Millán	0.00760	0.01191
3	San Francisco	0.01103	0.00634
4	Naucalpan	0.00547	0.00711
5	Atotonilco	0	0.01181
6	Jardines del Sur	0.02741	0.00812
7	Aeropuerto	0	0.01627
8	Vallejo	0.02582	0.00726

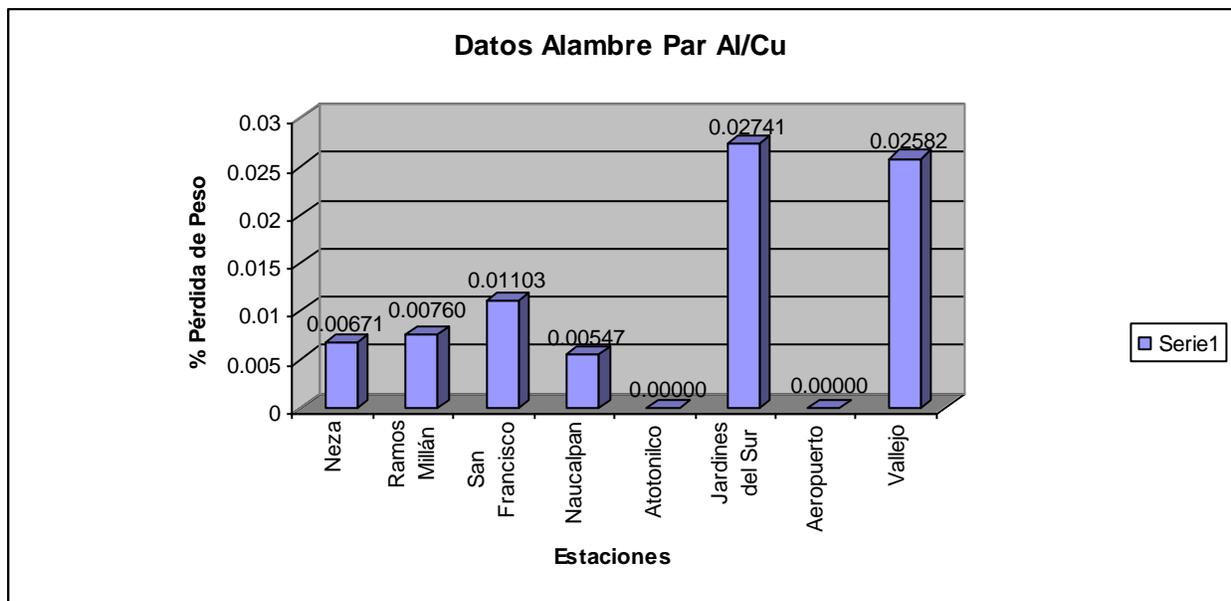


Figura 4.1 Gráfica comparativa del porcentaje de peso perdido por el alambre en el par Al/Cu. El mayor registro de estos es en la estación 6 correspondiente a Jardines del Sur.

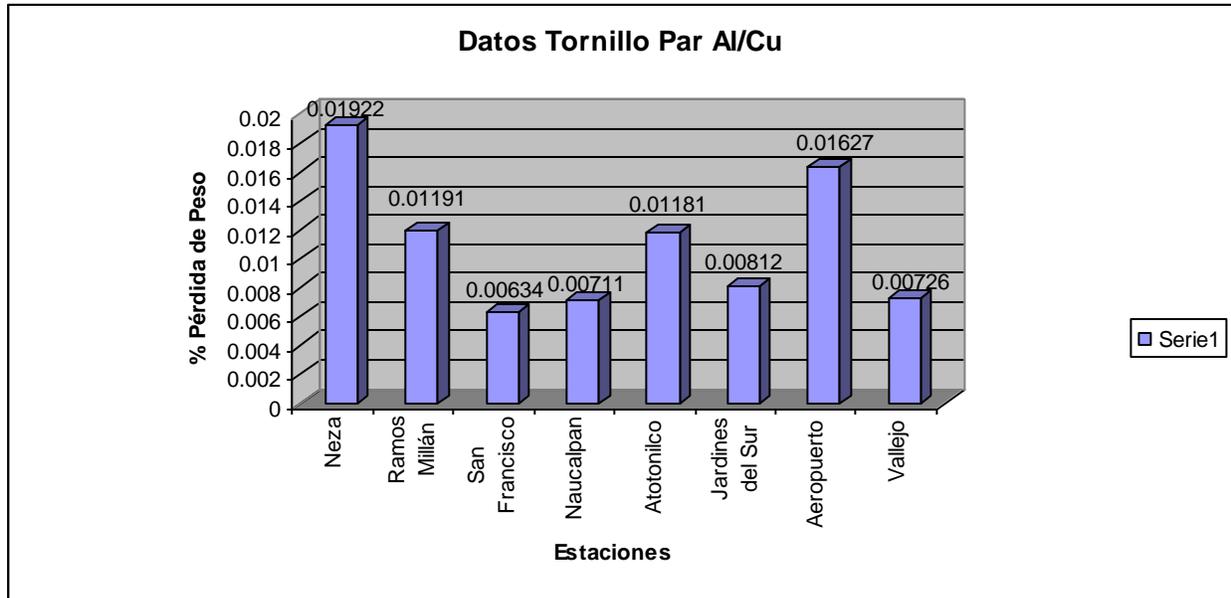


Figura 4.2 Gráfica comparativa del porcentaje de peso perdido por el tornillo en el par Al/Cu. El mayor registro de estos se da en la estación 1 correspondiente a Neza.

Tabla 4.2 Datos del Índice de Corrosividad Atmosférica para las 8 estaciones instaladas por 90 días y evaluados tanto para los alambres como para los tornillos, para el par Al/Ac (aluminio-acero).

No Rack	Estación (Nom. Id. Ráp.)	I.C.A. (Alambre Al) % Promedio de Pérdida de Peso	I.C.A. (Tornillo Ac) % Promedio de Pérdida de Peso
1	Neza	0.0554	0.2323
2	Ramos Millán	0.0287	0.1949
3	San Francisco	0.0290	0.1685
4	Naucalpan	0.0241	0.2137
5	Atotonilco	0.0256	0.1270
6	Jardines del Sur	0.0381	0.1925
7	Aeropuerto	0.0285	0.1770
8	Vallejo	0.0284	0.2121

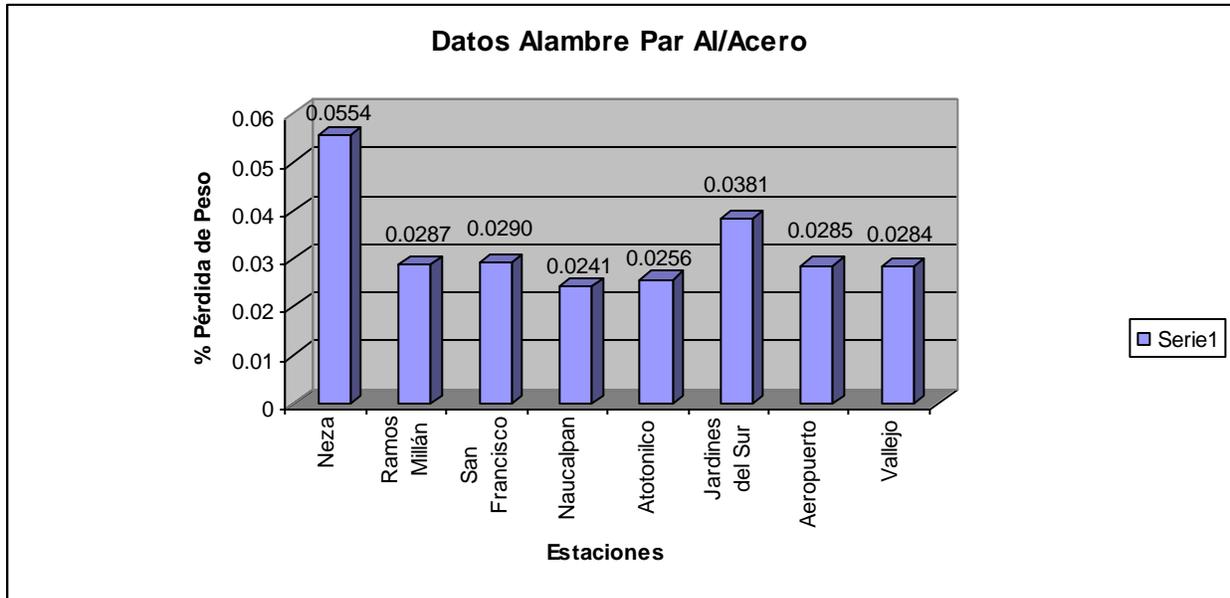


Figura 4.3 Gráfica comparativa del porcentaje de peso perdido por el alambre en el par Al/Ac. El mayor se registra en la estación 1 correspondiente a Neza.

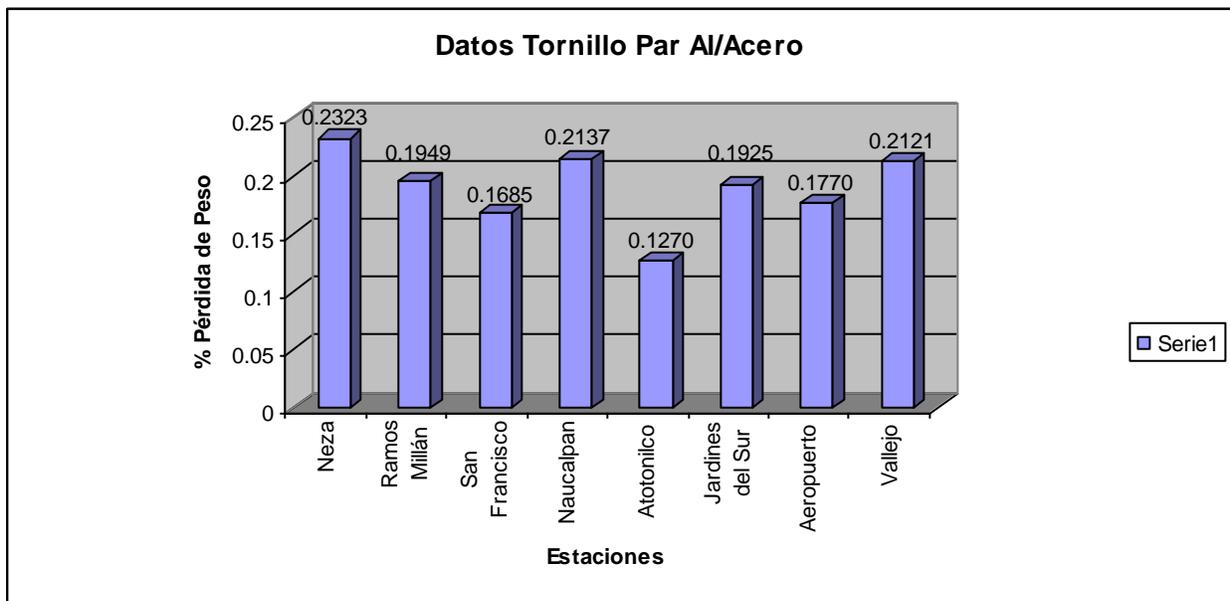


Figura 4.4 Gráfica comparativa del porcentaje de peso perdido por el tornillo en el par Al/Ac. El mayor registro de estos se da en la estación 1 correspondiente a Neza.

En general la prueba muestra demasiadas variaciones en los resultados y valores por debajo, en ambos casos, fuera de lo esperado, cosa que se puede verificar con mayor notoriedad en el par

aluminio-cobre ó Al/Cu, para el cual en la evaluación mediante el alambre se nota que en dos estaciones la respuesta es nula, además de que se debe a los bajos porcentajes de pérdida de peso obtenidos, se necesita agregar que en la estación Aeropuerto se reportó una inconsistencia en la respuesta obtenida por el alambre. Dejando de lado lo anterior, el par aluminio-acero ó Al/Ac es el que presenta una mejor respuesta y en particular los tornillos de acero son en los que se muestra un mayor porcentaje de pérdida de peso. A partir de los datos, se registran las estaciones de acuerdo a la agresividad atmosférica presentada, en general la mayor se presenta para la estación Neza (tabla 4.3).

Tabla 4.3 Estaciones de exposición de acuerdo a la agresividad presentada en los alambres y tornillos usados y los pares galvánicos construidos.

Agresividad Atmosférica	Par aluminio-cobre (Al/Cu)		Par aluminio-acero (Al/Ac)	
	Alambre (Al)	Tornillo (Cu)	Alambre (Al)	Tornillo (Ac)
Ambiente más agresivo ↑	Jardines del Sur	Neza	Neza	Neza
	Vallejo	Aeropuerto	Jardines del Sur	Naucalpan
	San Francisco	Ramos Millán	San Francisco	Vallejo
	Ramos Millán	Atotonilco	Ramos Millán	Ramos Millán
	Neza	Jardines del Sur	Aeropuerto	Jardines del Sur
	Naucalpan	Vallejo	Vallejo	Aeropuerto
	Aeropuerto	Naucalpan	Atotonilco	San Francisco
	Atotonilco	San Francisco	Naucalpan	Atotonilco
Ambiente menos agresivo ↓				

Para tener un criterio que generalice lo arrojado por la tabla 4.3, que tomando en cuenta la posición que ocupa cada estación respecto a su agresividad ambiental y que de acuerdo con esta se les asigne un puntaje de agresividad atmosférica, por ejemplo, en el caso del alambre de aluminio para el par aluminio-cobre, se asignaría para Jardines del Sur 8 puntos, para Vallejo 7 puntos, para San Francisco 6 puntos y así sucesivamente para las demás. Una vez realizado esto para cada alambre y tornillo de cada arreglo y sumando todos los puntos obtenidos para cada estación, se obtendría un listado ordenado de acuerdo a el nivel de agresividad por puntaje asignado (tabla 4.4).

Tabla 4.4 Orden de las estaciones de acuerdo al puntaje obtenido por el nivel de agresividad en todos los distintos componentes de los arreglos alambre-tornillo.

Nivel de Agresividad Ambiental	Estación	Puntaje Obtenido
1	Neza	28
2	Jardines del Sur	23
3	Ramos Millán	21
4	Vallejo	19
5	Aeropuerto	16
6	San Francisco	15
7	Naucalpan	13
8	Atotonilco	9

De acuerdo con esta tabla la estación de mayor agresividad, efectivamente sería Neza, mientras que la de menor correspondería a Atotonilco. Algunos resultados parecieran no tener lógica de acuerdo a la atmósfera tipo en la que se encuentran, por ejemplo el segundo lugar que ocupa Jardines del Sur, lo cual podría tener su origen en el alto nivel de lluvias registrado en parte del periodo de exposición y que junto a la variación que se registra de la temperatura, darían como consecuencia tiempos de humectación más elevados y por ende una mayor propensión a presentarse la corrosión, sin olvidar el efecto de los contaminantes característicos de cada región.

Evaluación de las Probetas Simuladas en CAPACA

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos como porcentaje de pérdida de peso para las probetas que fueron simuladas dentro de la Cámara de Pruebas Aceleradas de Corrosión Atmosférica a diferentes periodos ó ciclos de prueba. Estos datos corresponden a lo generado por el par aluminio-cobre ó Al/ Cu (tabla 4.5 y figuras 4.5 y 4.6) y por el par aluminio- acero ó Al/Ac (tabla 4.6 y figuras 4.7 y 4.8).

Tabla 4.5 Datos del Índice de Corrosividad Atmosférica de las pruebas realizadas en CAPACA y su correspondencia con los diferentes ciclos de duración de estas, siendo evaluados tanto para los alambres como para los tornillos, para el par Al/Cu (aluminio-cobre).

No de Ciclos	I.C.A. (Alambre Al) % Promedio de Pérdida de Peso	I.C.A. (Tornillo Cu) % Promedio de Pérdida de Peso
30	0.00061	0.01161
60	0.13127	0.01539
90	0.08030	0.01875
120	0.16880	0.03379

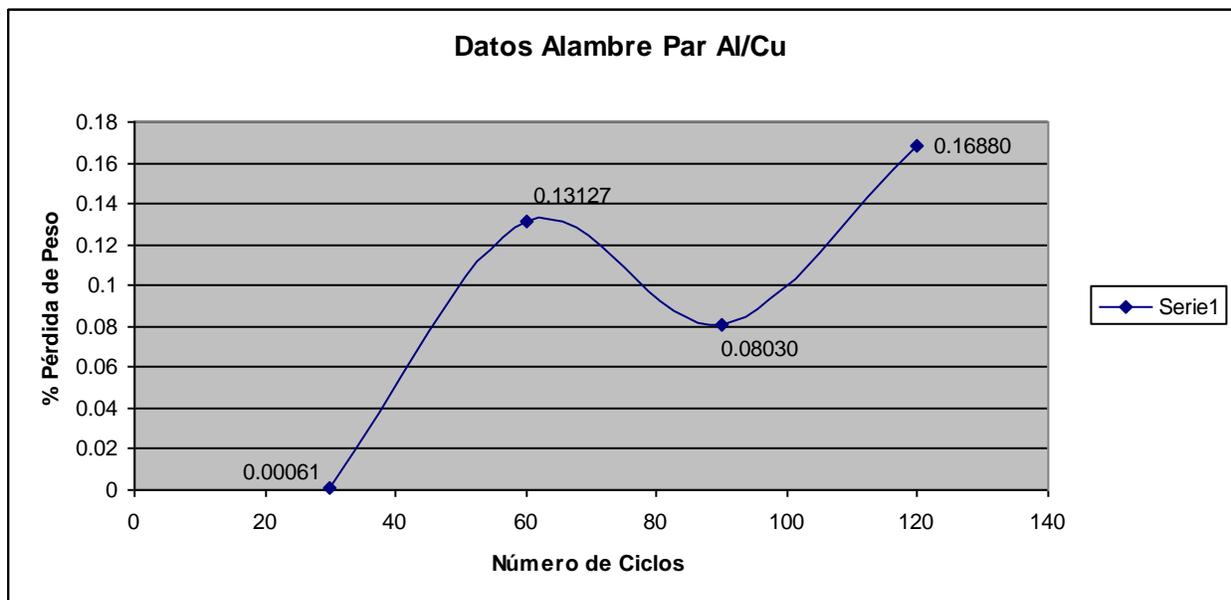


Figura 4.5 Gráfica que muestra el comportamiento sufrido como porcentaje de peso perdido por el alambre en el par Al/Cu a 30, 60, 90 y 120 ciclos. Los registros presentan un comportamiento que oscila entre valores bajos y altos a lo largo de la prueba, siendo el más alto el obtenido a 120 ciclos.

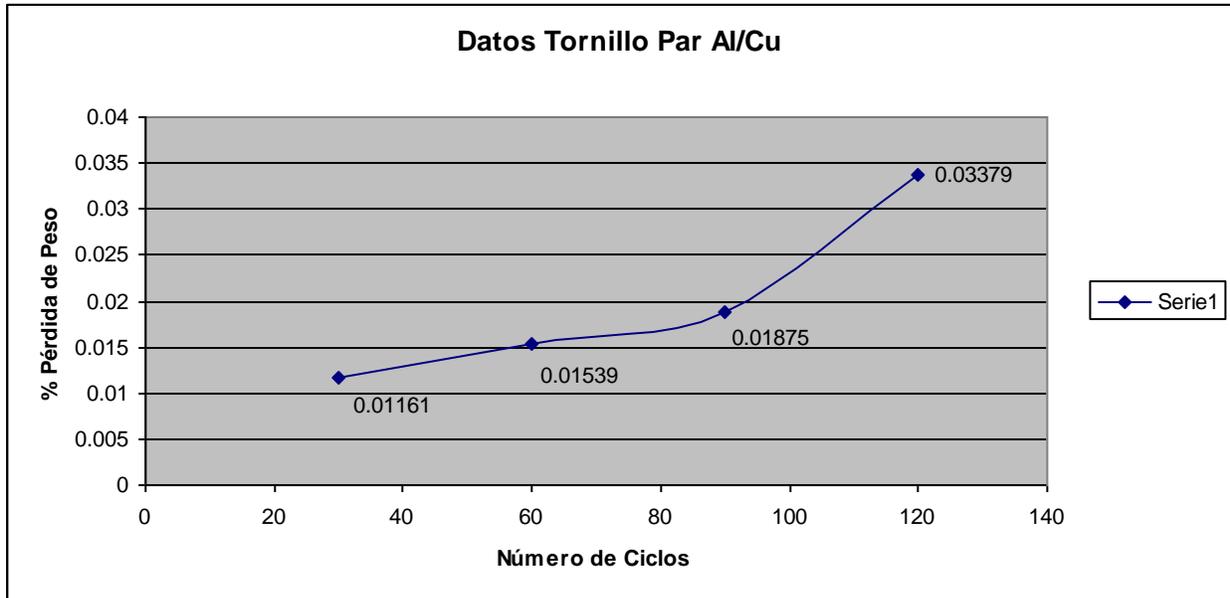


Figura 4.6 Gráfica que muestra el comportamiento sufrido como porcentaje de peso perdido por el tornillo en el par Al/Cu durante la prueba. Estos datos presentan un crecimiento progresivo a lo largo de los ciclos de duración, el cual tiene su valor máximo a los 120 ciclos.

Tabla 4.6 Datos del Índice de Corrosividad Atmosférica de las pruebas realizadas en CAPACA y su correspondencia con los diferentes ciclos de duración de estas, siendo evaluados tanto para los alambres como para los tornillos, para el par Al/Ac (aluminio-acero).

No de Ciclos	I.C.A. (Alambre Al)	I.C.A. (Tornillo Ac)
	% Promedio de Pérdida de Peso	% Promedio de Pérdida de Peso
30	0.0560	0.0963
60	0.0857	0.0826
90	0.0249	0.0794
120	0.0465	0.1462

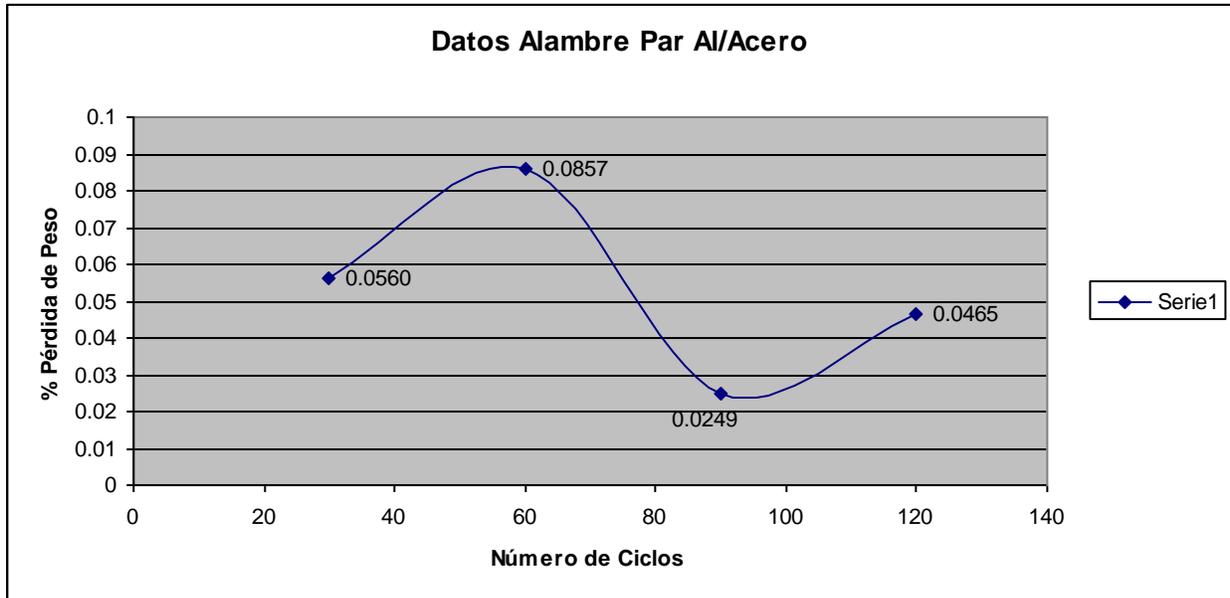


Figura 4.7 Gráfica que muestra el comportamiento sufrido como porcentaje de peso perdido por el alambre en el par Al/Ac durante el tiempo dentro de la cámara. Se observa un comportamiento que oscila entre valores bajos y altos a lo largo de la prueba, donde el mayor se registra a los 60 ciclos.

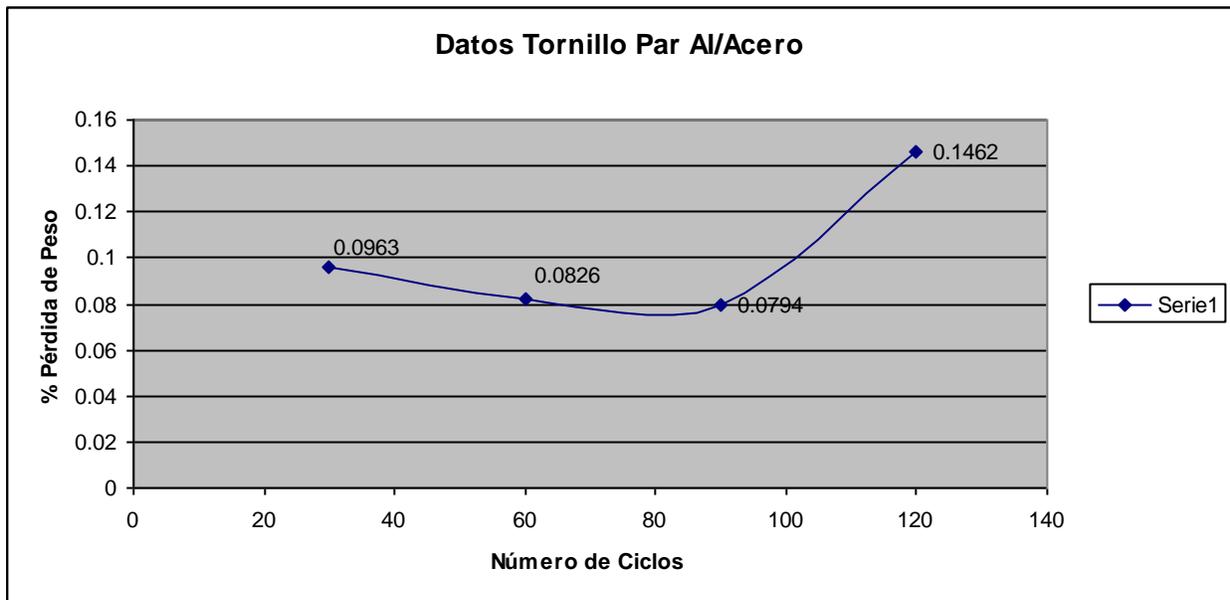


Figura 4.8 Gráfica que muestra el comportamiento sufrido como porcentaje de peso perdido por el tornillo en el par Al/Ac, a lo largo de una prueba en CAPACA. Este modelo presenta un decrecimiento progresivo y al final un crecimiento súbito. Se tiene un valor máximo a los 120 ciclos.

El objetivo perseguido durante estas pruebas de simulación de agresividad atmosférica, era el de modelar el comportamiento de las probetas con el fin de hallar una función del porcentaje de pérdida de peso contra número de ciclos. Como resultado de esto se obtienen funciones que no siguen la misma tendencia, existe un parecido mínimo en las elaboradas para los alambres, pero en general no hay un comportamiento en común. Además, con excepción de la elaborada para el tornillo de cobre, todas tienen una pérdida menor a mayores ciclos y al final registran un gran incremento a los 120 ciclos. Lo hipotéticamente esperado, era la construcción de gráficas con un crecimiento de pérdida de peso al principio muy acelerada y que rápidamente toma una tendencia suave, tal y como se observa en una de tipo logarítmica y que son lo reportado comúnmente en la literatura para probetas con larga exposición ambiental.

Por último es necesario señalar que los datos obtenidos mediante las probetas que contaban en su armado con un tornillo de nylamid no fueron utilizados, ya que estos se expusieron como una guía para verificar el control, y dado que los resultados generados con estos presentan una falta de consistencia, no representan fuente fidedigna de información.

4.3 IMÁGENES A BAJOS AUMENTOS.

A través de estas imágenes, se intenta observar la zona de contacto y áreas cercanas entre el alambre y el tornillo y analizar que fue lo que sucedió entre estas durante el tiempo de exposición al ambiente.

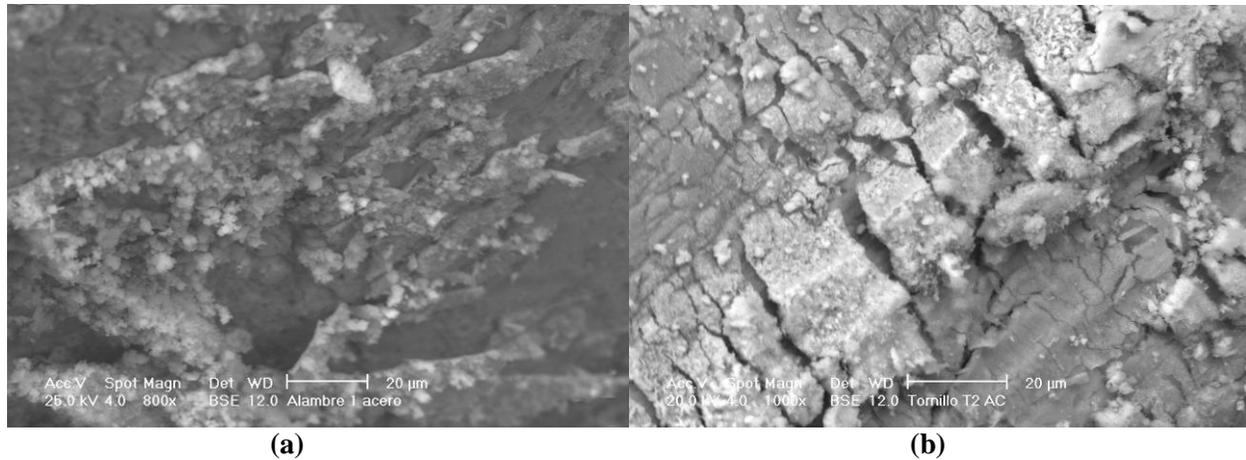
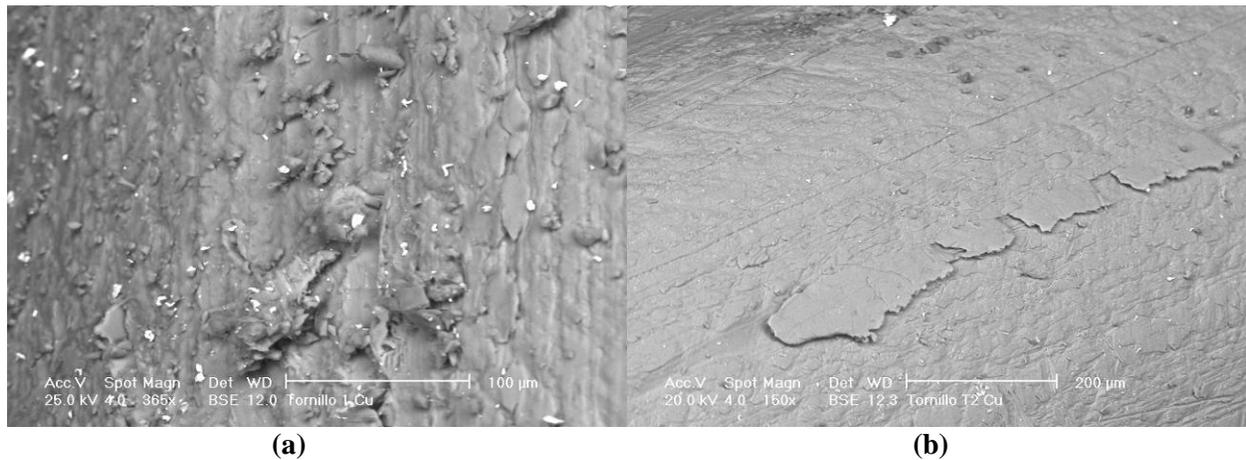
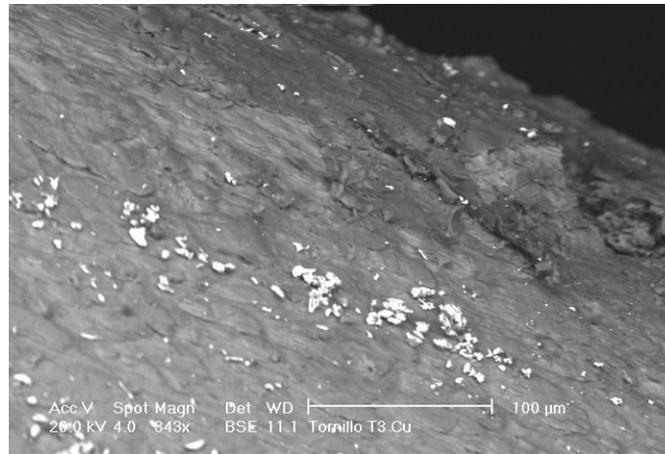


Figura 4.9 Imágenes del alambre de aluminio en la zona de contacto con el tornillo de acero y que pertenecen a las estaciones (a) Neza, (b) Ramos Millán. Se observa un crecimiento y adherencia respectivamente de depósitos de óxido de hierro y en menor medida de óxido de aluminio en su superficie.

Tabla 4.7 Composición química correspondiente a los depósitos observados en la figura 4.9.

Elemento	Wt %	At %
O K	4.75	11.7
Al K	27.89	40.75
Fe K	67.36	47.55
Total	100	100



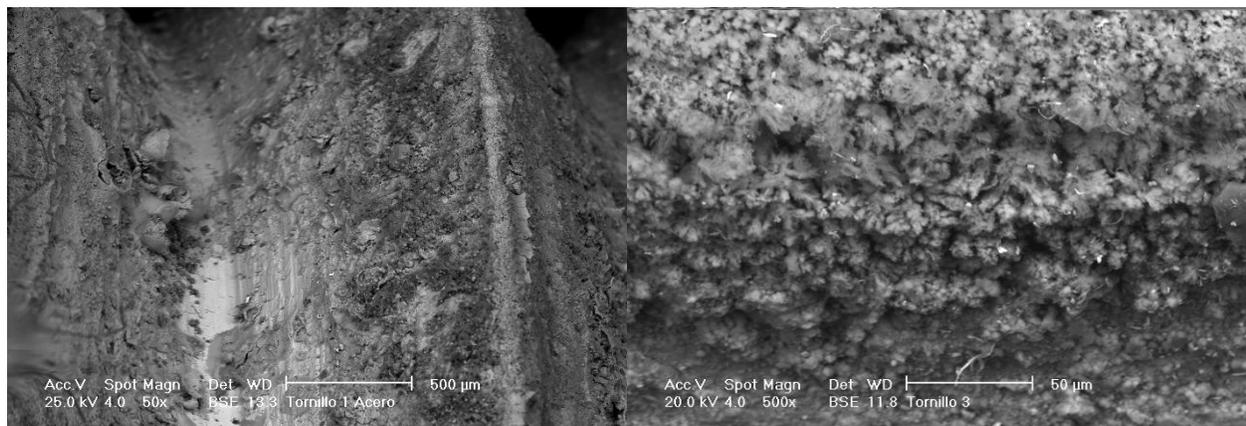


(c)

Figura 4.10 Imágenes del alambre de aluminio en la zona de contacto con un tornillo de cobre y que pertenecen a las estaciones (a) Neza, (b) Ramos Millán y (c) San Francisco. Se observa el desprendimiento de los depósitos de óxido de aluminio, propios del alambre, de su superficie.

Tabla 4.8 Composición química correspondiente a los depósitos observados en la figura 4.10.

Elemento	Wt %	At %
O K	0.98	1.73
Al K	88.69	92.45
Ca K	2.24	2.24
Cu K	8.08	3.58
Total	100	100



(a)

(b)

Figura 4.11 Imágenes del tornillo de acero en la zona de contacto con el alambre de aluminio y que pertenecen a las estaciones (a) Neza, (b) San Francisco. Se observa el crecimiento de depósitos de óxido de hierro en las zonas expuestas al ambiente y en menor medida donde hubo contacto con el alambre.

Tabla 4.9 Composición química correspondiente a los depósitos observados en la figura 4.11.

Elemento	Wt %	At %
O K	19.11	39.85
Al K	15.91	19.68
Fe K	64.98	40.47
Total	100	100

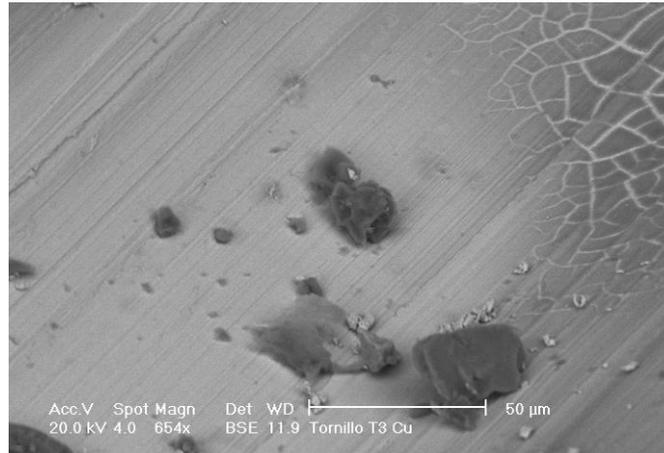


Figura 4.12 Imágen del tornillo de cobre en la zona de contacto con el alambre de aluminio. Se observan pequeños depósitos de óxido de aluminio sobre la superficie del tornillo.

Tabla 4.10 Composición química correspondiente a los depósitos observados en la figura 4.12.

Elemento	Wt %	At %
O K	15.14	34.84
Al K	18.03	24.62
Ca K	1.72	2.26
Cu K	65.11	38.28
Total	100	100

A partir de las imágenes mostradas de los alambres en contacto con el acero, se puede ver que en lugar de desprender sus óxidos, se están adhiriendo a ellos herrumbre de los tornillos, lo cual señala que el par galvánico cambió. Esto se debe a que la capa pasiva formada por el aluminio es menos activa o más catódica que el hierro y sus óxidos.

De las imágenes del alambre en contacto con cobre, es tal como se esperaba y no sorprende de ninguna manera el desprendimiento observado por parte de los productos del alambre y la fijación de algunos de estos en el tornillo de cobre.

En el tornillo de acero se observa una importante formación de depósitos, los cuales como señala el análisis químico provienen de su propia degradación, en mayor medida del material en contacto con el ambiente.

Respecto a los análisis químicos es pertinente señalar que debido a la capacidad del espectrómetro de rayos x, las lecturas obtenidas para el oxígeno, son aproximaciones y solo indican la presencia de este elemento y es de donde se deriva la variación entre estos datos.

Como comentario final, respecto a los análisis químicos en los que se muestra pequeñas cantidades de calcio (Ca), estos tienen su explicación en partículas de minerales que se encuentran en el ambiente.

Conclusiones.

El trabajo presentado es una primera experiencia, que acerca a la UDIATEM al trabajo con este tipo de prueba y del cual a pesar de manejarse con sumo cuidado, arroja resultados que no son del todo satisfactorios tomando en cuenta que éstos no están dentro de los rangos reportados en la literatura y además resultan heterogéneos entre lo arrojado por los alambres y por los tornillos, siendo la causa más probable de la mala respuesta obtenida el anodizado poseído por el aluminio del alambre manejado comercialmente. Sin embargo, es rescatable lo arrojado en particular por los tornillos de acero, siendo estos datos los más coherentes y de mayor pérdida en las estaciones instaladas. Respecto de las pruebas aceleradas de corrosión dentro de CAPACA, solamente el tornillo de cobre responde con lo esperado, por lo cual es sugerible no emitir conclusión alguna hasta no obtener pares bimetálicos que expuestos al ambiente respondan coherentemente. Lo observado mediante las imágenes arroja buenos indicios de la forma en que estaba sucediendo el proceso de degradación entre el alambre y el tornillo.

A partir de los resultados obtenidos del ensayo

- La zona con mayor índice de corrosividad atmosférica y por tanto de mayor agresividad es el de la estación correspondiente a Cd. Nezahualcoyotl.
- El par aluminio-acero (Al/Ac), resultó ser el que mayor sensibilidad proporciona, lo que se refleja sobre todo en los resultados de pérdida obtenidos a partir del tornillo de acero.

De lo observado durante el desarrollo del experimento

- Los resultados obtenidos mediante las probetas expuestas al ambiente se encuentran muy por debajo del rango contemplado en la literatura, además de ser muy heterogéneos entre si, por lo cual no es pertinente hacer una clasificación de acuerdo a las atmósferas corrosivas tipo. Se podría contemplar entonces un error al momento de realizar la limpieza de los productos, siendo en particular problemáticos los del alambre de aluminio, los cuales tienen como característica que dificulta esta labor el ser translucidos. Sin

embargo en varios casos esta tarea se realizó dos veces en forma acorde con la norma y no se obtuvieron mejores resultados en la balanza.

- Tomando en cuenta lo anterior y considerando además lo obtenido mediante los ensayos acelerados en CAPACA, no es factible realizar una relación entre el número de ciclos contra el porcentaje perdido de masa, hasta no tener probetas que proporcionen información fidedigna en campo.
- Una labor correctiva para obtener mejores resultados sería el de lijar la superficie del alambre de aluminio antes de embobinarse en un tornillo, esto con la idea de eliminar la capa de pasivación formadas por el particular óxido del aluminio e intentar obtener una superficie más activa. Otra acción se podría el dar un alivio a los esfuerzos provocados en los tornillos producto de su maquinado, teniendo en mente que el potencial estándar de electrodo sea homogéneo en todo el material. También un acabado superficial más fino, diferente al obtenido directamente por el maquinado para generar los hilos del tornillo sería recomendable, para disminuir en lo posible depósitos de agua y por consiguiente mayor deterioro sobre el tornillo.
- A partir de los datos e imágenes del par aluminio-acero y considerando las mismas condiciones de los materiales usados, un buen ensayo sería usar alambre de acero en tornillos de aluminio, los cuales podrían proporcionar información en zonas de exposición tipo rural, industrial y urbana. En una de tipo marina no daría buenas lecturas, debido a lo susceptible de la capa pasiva del aluminio a corrosión por picaduras, esto producto de los cloruros en el ambiente en este tipo de zonas.
- Finalmente, se puede decir que esta prueba es muy susceptible a cualquier manejo y cambio, respecto a lo estipulado por norma, lo cual arroja resultados fuera de lo previamente obtenido.

Bibliografía.

Libros, Artículos y Tesis

- [1] Ávila, J., Genescá, J., “Mas allá de la herrumbre”, La Ciencia desde México No 9, Fondo de Cultura Económica, 1987.
- [2] Medina, O., “Análisis de Deterioro por Corrosión Microbiológica de un Acero de Bajo Carbono”, Tesis de Maestría, UNAM F.I., México D. F., 2006.
- [3] Cerrud, S., Jacobo, V., Ortiz, A., Shouwenaars, R., “Corrosión y Protección”, UNAM F.I., UDIATEM, México D. F., 2003.
- [5] Ortiz, A., “Simulación Acelerada de la Corrosión Atmosférica en Equipo Electrónico”, Tesis Doctoral, UNAM F.I., México D. F., 2004.
- [6] Roberge, P. R., “Handbook of Corrosion Engineering”, McGraw-Hill, 1999.
- [7] Cueva, I., “Desarrollo y Validación de Pruebas Aceleradas de Corrosión Atmosférica en Macro-Componentes Electrónicos”, Tesis de Maestría, UNAM F.I., México D. F., 2004.
- [8] Genescá, J., “Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión”, UNAM F.Q., México D.F., 2002.
- [9] Mariaca, R. L., Genescá, J., Uruchurtu, Ch. J., Corrosividad Atmosférica, Plaza y Valdez Editores-UNAM, 1999.
- [10] Genescá, J., Más allá de la Herrumbre III. Corrosión y Medio Ambiente, La Ciencia desde México 121, Fondo de Cultura Económica, 1994.

[11] Hernández, P., Corrosión Atmosférica en Materiales Ingenieriles: Aplicación de la Técnica Alambre sobre Tornillo, Tesis de Licenciatura, 1992.

[12] Elizarraras, D., Estimación de la Corrosión Atmosférica en la Ciudad de México por la Técnica Alambre sobre Tornillo, Tesis de Licenciatura, 1995.

Páginas de Internet

[4] <http://www.opinamos.com/stats/mundo/eua.shtml>, <http://web.worldbank.org/> 2001 World Development Indicators database, World Bank, 04/11/2001

[13] <http://www.matweb.com>, Searchable Database of Material Properties by Automation Creations 19996-2008.

Normas

De la American Society for Testing and Materials (ASTM).

- ASTM G1 - 03 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.

- ASTM G31 - 72(2004) Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals.

- ASTM G50 - 76(2003) Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals.

- ASTM G116 - 99(2004) Standard Practice for Conducting Wire-on-Bolt Test for Atmospheric Galvanic Corrosion.

- ASTM B117 - 07a Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.