

13
EJ

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



**ESTIMACION DE LA CORROSION ATMOSFERICA
EN LA CIUDAD DE MEXICO POR LA TECNICA
DE ALAMBRE SOBRE TORNILLO**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
Q U I M I C O
P R E S E N T A
DIEGO ELIZARRARAS CERDA**

MEXICO, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN



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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Prof. HELIO FLORES RAMÍREZ
VOCAL: Profra. MARGARITA EUGENIA GUTIÉRREZ RUIZ
SECRETARIO: Prof. JOAN GENESCA LLONGUERAS
1er SUPLENTE: Prof. JOSÉ LUIS GALVÁN MADRID
2do SUPLENTE: Prof. CARLOS RODRÍGUEZ RIVERA

Lugar donde se desarrollo el tema: Laboratorio de Corrosión, Edificio "D",
Laboratorio 211, Facultad de Química, Ciudad Universitaria.

ASESOR DEL TEMA



DR. JOAN GENESCA LLONGUERAS

SUSTENTANTE



DIEGO ELIZARRARAS CERDA

AGRADECIMIENTOS

De manera muy especial al Doctor Joan Genescá Llongueras, por su confianza, paciencia y apoyo para la elaboración de esta tesis.

Al Ing. Carlos Rodríguez Rivera, por su valiosa ayuda en el desarrollo experimental de este trabajo.

Al Ing. Juan Carlos Hernández Acevedo por su ayuda en los aspectos técnicos proporcionados para la impresión de esta tesis.

A mis padres con mi más profundo agradecimiento, por los casi 27 años de enseñanza y amistad.

A mis hermanos porque desde que recuerdo siempre han estado conmigo.

Voor jij. - "een keer trek je de conclusie vriendschap is geen illusie"

A: Victoria, Kalin, Alfonso, Enrique, Pablo, Virginia, Alfonso, Anne-Marieke, José Antonio, Claudia, Pilar, Mónica, Teresa, Juan Carlos, Armando, Ruy, Viviana, Humberto, Alejandro, Paulina, Luciana. Amigos todos ellos.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
I.1 - CORROSIÓN	3
I.1.1 Clasificación de los procesos de corrosión según el medio	5
I.2.- CORROSIÓN ATMOSFÉRICA	6
I.2.1 Mecanismos de la corrosión atmosférica	6
CAPITULO II	
II.1 - FACTORES METEOROLÓGICOS Y COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA	8
II.1.1 Influencia de los principales factores meteorológicos en la corrosión atmosférica	8
II.1.2 Humectación de la superficie metálica	8
II.1.3 Contaminación atmosférica y su influencia en el fenómeno de corrosión	10
II.1.4 Acción de los principales contaminantes	12
CAPITULO III	
III.1 CONTROL Y SEGUIMIENTO	14
III.1.1 Técnica alambre sobre tornillo	14
III.1.2 Método de los platos de sulfatación con PbO_2	17
III.1.3 Información meteorológica	18
CAPITULO IV	
IV.1 PARTE EXPERIMENTAL	20
IV.1.1 Ubicación específica de las estaciones de monitoreo	21
IV.1.2 Ensayo CLIMAT o técnica Alambre sobre Tornillo	21

IV.1.3 Método de los platos de sulfatación	26
CAPITULO V	
RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION	
V.1 Antecedentes	32
V.2 Resultados	36
CAPITULO VI	
CONCLUSIONES	52
CAPITULO VII	
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA	53

INTRODUCCION

De tiempo atrás es sabido que los metales son susceptibles a experimentar cambios que resultan en la pérdida de las propiedades que los caracterizan. Donde, bajo un proceso natural y espontáneo, las propiedades elementales se pierden para dar paso a aquellas que describen a los compuestos en el estado combinado de origen. A esta tendencia a reaccionar de los materiales metálicos con el medio es lo que se conoce como el fenómeno de corrosión.

El estudio de la corrosión no requiere de amplias justificaciones ya que representa una problemática de muy alto costo en México y en cualquiera de los países industrializados, tanto en lo económico como en lo referente al daño ecológico derivado de la explotación exhaustiva de los recursos minerales.

Entre las causas mas frecuentes de la corrosión se encuentran las provocadas por la acción de la atmósfera, siendo la corrosión atmosférica el área a la cual se destinan el mayor porcentaje de los recursos utilizados en el control de la corrosión. La razón de lo anterior se deriva del uso extensivo de estructuras metálicas expuestas al aire libre, tales como edificios, puentes, cercas, automóviles, barcos, herramientas, clavos, etc.

La elección de un metal o aleación en específico para una área determinada se hace por lo general a partir de sus propiedades físicas o mecánicas, no obstante, solo existen algunos casos muy aislados en los que se ignore la acción de la atmósfera sobre los metales. Incluso frecuentemente es mas importante considerar la interacción del metal con el ambiente que el deterioro sufrido por el metal.

Debido a que la tendencia natural de los procesos de corrosión se rige únicamente por las diferencias energéticas entre los metales y sus productos de corrosión, resulta pues necesario ante esta espontaneidad, contar con medidas que mas allá de aliviar los daños generados por este fenómeno nos permitan desarrollar acciones enfocadas hacia el control del problema. Aquí resulta importante señalar que expresiones tales como: prevención de la corrosión, combatir la corrosión e incluso luchar contra la corrosión pueden ser mal interpretadas, ya que con la mayoría de los metales la corrosión no puede ser evitada y de ahí que el control de la corrosión, mas allá que la prevención, sea la meta deseada. Cualquier medida de control por más parcial que esta parezca significará la prolongación

de utilidad de una pieza o estructura metálica, a su vez que se verá reflejada en el área económica como un importante ahorro de dinero.

Hasta ahora el conocimiento nos resulta insuficiente para predecir con certeza el comportamiento de un metal o una aleación ante un medio ambiente particular, y es por eso que la decisión de utilizar un metal específico así como una protección dada ante un cierto ambiente este sustentada en gran medida en experiencias previas y en pruebas realizadas empíricamente. La tecnología de corrosión se encuentra sin lugar a dudas un paso adelante de la parte científica, de ahí que muchos de los fenómenos involucrados en la corrosión no estén totalmente comprendidos.

La selección de un método particular de control de corrosión es por muchas razones una decisión difícil ocasionada por la gran diversidad de factores que deben ser tomados en cuenta, particularmente, cuando no existe conocimiento previo sobre la agresividad de la atmósfera o del tipo de metal o aleación bajo consideración. De lo anterior se desprende que el seguimiento y control así como la supervisión e inspección son aspectos esenciales en el control de la corrosión.

Los factores que determinan la agresividad de la atmósfera frente a la corrosión metálica son muy diversos, así como característicos a la zona donde nos encontremos, de ahí que es necesario contar con técnicas útiles y sencillas que permitan, en un corto plazo, evaluar a los distintos factores involucrados en este fenómeno. Una vez conocida esta información es posible clasificar las atmósferas de trabajo de acuerdo al grado de agresividad frente a la corrosión, lo que resulta en un país como México, con una diversidad de condiciones climáticas y microclimáticas, una herramienta extremadamente útil para identificar oportunamente las medidas de control, así como los materiales metálicos y recubrimientos adecuados para un control eficaz de la misma.

La técnica de alambre sobre tornillo, retomada recientemente, representa una herramienta que nos permite, a partir de un análisis gravimétrico y en un corto periodo, evaluar directamente la acción de la atmósfera sobre los metales. Esta información conjuntamente con la evaluación de los distintos factores involucrados en este fenómeno proporcionarán las herramientas capaces de distinguir a los diferentes microclimas dentro de una región específica tal como la ciudad de México, en cuya gran extensión no resulta difícil imaginar áreas perfectamente localizables con características muy particulares de acuerdo a su ubicación.

CAPÍTULO I

I.1.- CORROSION

La corrosión se encarga de transformar nuevamente a los metales en compuestos más estables. Por lo que la tendencia del metal a la corrosión estará determinada por la diferencia de energía entre el estado metálico y el de sus productos de corrosión. Ya que los metales se encuentran en la naturaleza en forma de compuestos estables (minerales) como pueden ser óxidos, sulfuros, etc. mediante el aporte de energía es posible obtener metales puros.

Al definir al proceso de corrosión de la manera anterior, es decir, como la reacción de un metal o aleación con el medio, en donde los metales o las aleaciones se transforman en compuestos de naturaleza más estable (óxidos, por ejemplo), resulta necesario contemplar en esta definición lo referente a un carácter propio de transformación como tal, así como a los efectos de esta transformación en caso de ser deliberados y benéficos o inesperados y destructivos.

El acero por ejemplo, al ser expuesto a una atmósfera industrial, reacciona de manera tal para formar como producto óxido, de composición $Fe_2O_3 \cdot H_2O$, el cual por estar muy débilmente adherido a la superficie del metal no puede formar una barrera protectora que aisle al metal de la atmósfera; así la reacción procede de manera aproximadamente lineal hasta que el metal es consumido casi por completo. El cobre, en cambio forma una película de color verde, $CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$, que se adhiere a la superficie del metal aislándolo y protegiéndolo de la atmósfera.

De lo anterior se desprende que cualquier reacción de un metal con su medio ambiente deberá ser considerada como un proceso de corrosión sin importar la extensión de dicha reacción ya sea en sus etapas iniciales o subsecuentes.

Cualquier análisis del fenómeno de corrosión, por más sencillo que sea, deberá al menos considerar a los componentes estructurales del metal, a la naturaleza del medio ambiente y a las reacciones que ocurren en la interfase metal / medio ambiente. Lo anterior se puede sintetizar de la siguiente forma:

Metal: Composición, estructura atómica detallada, heterogeneidad microscópica y macroscópica.

Medio ambiente: Naturaleza química, concentración de especies reactivas e impurezas, presión, temperatura, humedad, etc.

Interfase metal/medio ambiente: Cinética de la oxidación y disolución del metal, cinética de la reducción de las especies en solución, naturaleza y localización de los productos de corrosión, crecimiento de la capa de corrosión, etc.

El fenómeno de corrosión afectará a los distintos metales de muy diversas maneras las cuales dependerán de la naturaleza del metal y de las condiciones ambientales prevalentes. En la figura 1.1 se muestra un esquema práctico de las características del medio ambiente, en el cual se enfatiza la relación entre la estructura detallada del metal con algunos factores externos involucrados en el fenómeno de corrosión.

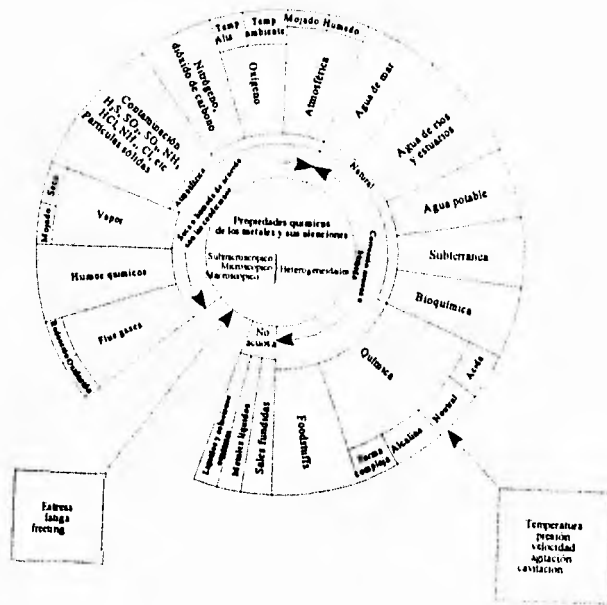


Figura 1.1 Ambientes en corrosión.

1.1.1- Clasificación de los procesos de corrosión según el medio

Existe una clasificación muy general que permite distinguir a los procesos de corrosión en dos grandes grupos: corrosión seca y corrosión húmeda. El término húmedo incluye a todas las reacciones donde una solución acuosa participa en el mecanismo de reacción; de manera implícita el término seco se refiere a la ausencia de agua o de una solución acuosa en el mecanismo (figura 1.2)

Corrosión "seca" Se refiere por lo general a reacciones metal / gas o metal / vapor, que envuelven a elementos no metálicos como el oxígeno, halógenos, sulfuro de hidrógeno, etc. Donde las formas más evidentes se hacen presentes al opacar, oxidar y resquebrajar la superficie del metal. Es importante señalar que la oxidación del elemento no metálico, así como la formación de productos de corrosión deberán de ocurrir por medio de un mecanismo concertado que tendrá lugar en una área específica de la interfase metal / no metal, y dependiendo de los productos de corrosión, de su interacción en la interfase y de las características de la capa que formen sobre el metal, se definirán los pasos subsecuentes en el mecanismo de reacción.

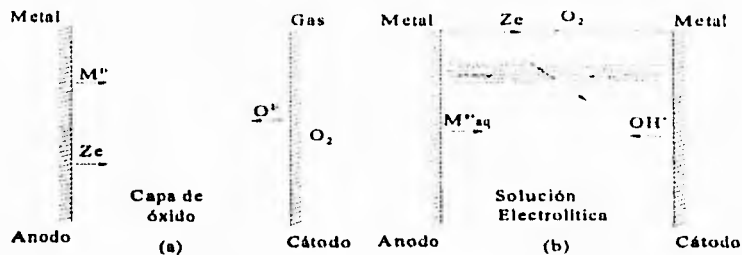


Figura 1.2. Anodos y Cátodos en el proceso de corrosión
a) Corrosión seca b) Corrosión húmeda

Corrosión "húmeda": Es la que se produce en presencia de un electrolito para generar un transporte simultáneo de iones a través del electrolito así como de electrones a través del metal. En la corrosión húmeda, tanto la oxidación del metal como la reducción de las

especies en solución se llevan a cabo en diferentes áreas de la superficie metálica con la consecuente transferencia de electrones desde el metal oxidado (ánodo) hacia la especie reducida capaz de aceptar electrones (cátodo).

Es importante señalar que las fases, termodinámicamente estables, formadas en la interfase metal/solución podrán ser compuestos sólidos o tratarse de iones hidratados (cationes o aniones) que podrán ser transportados fuera de la interfase por medio de procesos tales como la migración, difusión o convección. Bajo estas circunstancias los reactivos no serán separados a través de una barrera y la relación del proceso tenderá a ser lineal. Reacciones subsiguientes con la solución resultarán en la formación de una fase sólida estable, pero en caso de que esta se forme lejos de la interfase no podría ejercer una función protectora. Dentro de la corrosión húmeda encontramos fenómenos tales como la corrosión marina, atmosférica, etc.

I.2.- CORROSION ATMOSFERICA.

Una de las primeras manifestaciones de la corrosión que atrajo la atención de los científicos fue el deterioro de componentes metálicos, al natural, pintados o recubiertos, al estar expuestos a la atmósfera. Actualmente la acción de la atmósfera sobre los metales constituye uno de los mayores problemas planteados por la corrosión debido a su inherente importancia económica. Según autores como Tomashov (refs. 29 y 30), más de un 50% de las pérdidas por corrosión son debidas a la atmosférica.

A pesar de que la corrosión atmosférica representa el más antiguo problema de la humanidad respecto a la corrosión, no obstante hoy por hoy, este fenómeno no se encuentra totalmente comprendido. Lo anterior radica en el número de variables a considerar y a su vez en la complejidad de cuantificar todas estas variables involucradas, lo que hace la labor de predicción una tarea harto complicada.

I.2.1.- Mecanismos de la corrosión atmosférica

Bajo condiciones de temperatura ambiente y en una atmósfera carente de humedad, los efectos del medio sobre los metales avanzan a una velocidad tal que por razones prácticas estos pueden llegar a ser ignorados; sin embargo, en el caso de contar con superficies metálicas humedecidas estos efectos adquieren gran relevancia.

La corrosión atmosférica es un proceso discontinuo que se realiza mediante un mecanismo electroquímico a través de una serie de semireacciones anódicas y catódicas una vez que se ha formado la capa de electrolito. El electrolito puede estar constituido por una película de humedad extremadamente delgada o por una película acuosa de mucho mayor espesor. En este caso la superficie del metal se encuentra perceptiblemente mojada, por ejemplo debido a la lluvia o al rocío.

Por lo general existe un valor de humedad crítica que corresponde a las condiciones de condensación, por arriba del cual la acción de la atmósfera sobre los metales aumenta considerablemente. El grado de humedad junto con la composición de la atmósfera son dos factores importantes para determinar el grado de extensión de la corrosión atmosférica. Cuanto más contaminada se encuentre la atmósfera, más agresiva será la película condensada.

Gran parte de los daños generados a estructuras metálicas producidos por la corrosión atmosférica se deben a la condensación de humedad durante el enfriamiento periódico del aire. A partir de la humedad relativa del aire así como del cambio de temperatura del metal se formará el rocío, de tal manera que cuanto más seco se encuentre el ambiente, mayor será el descenso de temperatura que motive la condensación de humedad; por el contrario, bastará con un ligero descenso de temperatura para llevar la atmósfera al estado de saturación siempre y cuando se tenga un valor muy alto de humedad relativa.

Aún en atmósferas que no presenten saturación, en las cuales teóricamente la posibilidad de formación de rocío es inexistente, la condensación de vapor de agua se produce gracias a fenómenos de condensación capilar y química.

Las superficies rugosas, las superficies cubiertas por productos de corrosión de naturaleza porosa y las superficies donde se ha depositado polvo favorecen la condensación capilar. La llamada condensación química se debe a las propiedades higroscópicas, tanto de los productos de corrosión como de sustancias contaminantes depositadas sobre la superficie del metal.

La velocidad de las reacciones de corrosión aumenta con la concentración de sustancias ionizables en la capa del electrolito. Por debajo de esta película, el metal se corroe por medio del proceso catódico de reducción de oxígeno del aire. Solo bajo condiciones de un alto grado de contaminantes ácidos sucede la reducción de protones.

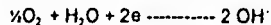
Las reacciones más comunes son:

proceso anódico:



proceso catódico:

reducción de oxígeno disuelto en medio neutro o alcalino



reducción de protones en medio ácido



CAPÍTULO II

II.1.- FACTORES METEOROLOGICOS Y COMPOSICION DE LA ATMOSFERA.

La importancia decisiva del papel de los contaminantes y de la humedad en el fenómeno de corrosión atmosférica se mencionó con anterioridad. Es sabido que por debajo de un nivel de humedad relativa, situado generalmente entre un 60 y 80 % (h_r) (ref 14), no comienza o de ser el caso se detiene el proceso de corrosión, de acuerdo al tipo de material, estado superficial y la concentración de contaminantes en la atmósfera, entre otras variables experimentales.

II.1.1- Influencia de los principales factores meteorológicos en la corrosión atmosférica

Resultaría casi imposible referirse a la acción de la atmósfera sobre los metales sin mencionar la contribución de los periodos de lluvia, niebla, condensación por rocío, temperatura, etc. a este fenómeno. Factores que contribuyen de manera directa al tiempo total de humectación de las superficies metálicas

Humedad relativa (h_r): El vapor de agua representa una parte esencial en la formación de la capa de electrolito, la cual como es sabido se encargará de soportar las reacciones electroquímicas de corrosión, y es a partir de los términos de humedad relativa como podemos expresar su concentración en la atmósfera.

Propiamente se define como la relación porcentual de la presión del vapor de agua en la atmósfera con respecto a aquella que saturaría a la atmósfera a la misma temperatura

La humedad relativa tiene injerencia directa tanto en la frecuencia como en la duración de los periodos de lluvia, niebla y rocío. Durante los cuales las capas de electrolito se forman, desarrollándose las micropilas de corrosión con una actividad plena. Sin embargo, la relación de estos distintos fenómenos con respecto a su aportación a la humedad relativa media anual, no es del todo clara, lo que si resulta lógico es que a mayor humedad relativa mayor probabilidad de que alguno de estos fenómenos se presente.

Al ser un dato de fácil obtención, la humedad relativa del aire es extensamente manejada en los distintos estudios de corrosión atmosférica.

II.1.2.- Humectación de la superficie metálica

No resulta difícil afirmar que durante los periodos de humectación aparentemente visibles la corrosión avanza de manera notable, incluso es posible inferir una relación directa entre el grado de corrosión que sufre una pieza metálica, y el intervalo de tiempo en que dicha superficie se encuentra humectada. Por tanto, el cuantificar este intervalo de tiempo posee una enorme trascendencia práctica (ref. 23)

Este intervalo de tiempo en el cual una superficie metálica se encuentra cubierta por una película de agua se conoce como tiempo de humectación y determina la duración de los procesos electroquímicos de corrosión.

El tiempo de humectación varía de acuerdo a las condiciones climáticas del entorno. Depende de la humedad relativa de la atmósfera, la frecuencia y duración de los periodos de lluvia, niebla y rocío, la temperatura del aire y de la superficie metálica, las propiedades de los productos de corrosión, deposición de sales higroscópicas, así también como de la velocidad del viento y de las horas de sol.

A pesar de la importancia que representa el conocer el tiempo de humectación solo es posible determinar, a partir de datos meteorológicos proporcionados por las distintas instituciones especializadas en esta área, la frecuencia, más no la duración de los fenómenos de lluvia, niebla, rocío, etc. Para contar con un enfoque cuantitativo sería necesario trabajar con equipo especialmente diseñado para esta labor. Sin embargo es posible aprovechar la información meteorológica para estimar sobre los riesgos de humectación y, por ende, corrosión, de cualquier lugar en particular.

De los fenómenos involucrados en la humectación de la superficie metálica, es difícil precisar cual de ellos resulta más perjudicial respecto a la corrosión.

Rocío: La formación de rocío ocurre cuando la temperatura de la superficie del metal se encuentra por debajo del punto de rocío de la atmósfera. Esto ocurre generalmente por la noche cuando la temperatura del ambiente decrece por la transferencia de calor entre el aire y la estructura metálica. Otra razón para que esto suceda tiene lugar al amanecer cuando la temperatura del ambiente aumenta más rápido que la temperatura del metal.

La cantidad de agua depositada en la superficie del metal proveniente del rocío es aproximadamente de 10 g/m^2 , además que sus efectos en el lavado de la superficie del metal son prácticamente nulos.

Lluvia: La capa de electrolito formada en la superficie del metal durante los periodos de lluvia resulta de un mayor espesor que en el caso de la película formada por rocío, se estima que es aproximada a los 100 g/m^2 .

La precipitación en forma de lluvia afecta en la corrosión e partir de incrementar el espesor de la película de electrolito en la superficie metálica, así como también incorporando estimuladores de la corrosión, por ejemplo, en la forma de H^+ y SO_4^{2-} .

Por otra parte, la lluvia actúa lavando la superficie del metal, desprendiendo a los contaminantes depositados durante los periodos secos.

Lluvia ácida: Los contaminantes atmosféricos pueden retornar a la superficie de la tierra en forma gaseosa o de aerosol (depósito seco) y por acción de la lluvia (depósito húmedo).

La gran parte de los óxidos de azufre y de nitrógeno en la atmósfera pasan a formar ácidos sulfúrico y nítrico respectivamente, a partir de un proceso de oxidación. El retorno de estos ácidos a la superficie de la tierra, principalmente por acción de la lluvia, da lugar a lo que se conoce como lluvia ácida.

Por lo tanto además de la acción de la atmósfera sobre los metales vinculada a la absorción de gases corrosivos por la película de humedad, existe la corrosión producida por la acción directa del agua de lluvia que ha incorporado sustancias corrosivas antes de ponerse en contacto con el metal.

Temperatura: La influencia de la temperatura en el fenómeno de corrosión atmosférica es algo complejo, aunque se ha determinado como un factor no decisivo en el caso de largos periodos de exposición de las estructuras metálicas. Bajo condiciones específicas, influye de manera importante en el grado de corrosión.

Por una parte, un incremento de la temperatura estimula el ataque de la corrosión a partir de favorecer las reacciones electroquímica y químicas, así como los procesos de difusión en la superficie del metal. Por la otra parte, un incremento de temperatura conduce a una evaporación más rápida de la capa del electrolito. En consecuencia el tiempo de humectación se acorta y con esto el grado de corrosión disminuye.

Como se mencionó anteriormente es posible tener un enfoque cuantitativo del tiempo de humectación si se cuenta con el equipo adecuado, generalmente se trata de celdas electroquímicas que cuando la superficie del metal se encuentra mojada registran un flujo de corriente. De cualquier forma para fines prácticos el tiempo de humectación se determina en base a datos meteorológicos de temperatura y humedad relativa. El periodo cuando la humedad relativa es mayor o igual al 80% y la temperatura se encuentra por arriba de los 0°C (ref. 18), se considera para la estimación del tiempo actual de humectación.

En el caso de existir contaminantes en la atmósfera, los fenómenos de corrosión tendrán lugar en condiciones de humedad relativa por debajo de las señaladas.

II.1.3.- Contaminación atmosférica y su influencia en el fenómeno de corrosión

Un hecho de todos evidente es el continuo deterioro de la calidad del aire. Día a día el problema se agudiza al punto de requerir medidas extremas de control, principalmente en zonas industriales y urbanas. El deterioro de la calidad del aire se comienza a hacer patente desde el momento en que el hombre comienza a sustituir las fuentes naturales de energía por aquellas dependientes en su mayoría de combustibles fósiles para generar la transformación de calor en fuerza motriz, aunado a una explotación exhaustiva e irracional de sus recursos naturales.

i) Contaminantes de la atmósfera

En un sentido estricto esta clasificación de la composición de la atmósfera resultaría totalmente arbitraria, esto se debe a que los llamados contaminantes se derivan parcial o totalmente de fuentes naturales. Sin embargo la concentración de dichos contaminantes variará apreciablemente de un entorno a otro, con radios de acción muy pequeños.

Oxidos de azufre: Estos óxidos realizan una labor determinante como poderosos estimuladores de la corrosión atmosférica, siendo el dióxido de azufre (SO_2) el más frecuente en la atmósfera.

El SO_2 en la atmósfera es derivado de dos fuentes principales. De la oxidación en el aire del H_2S natural, proveniente de la actividad volcánica, y emisiones artificiales derivadas del quemado de combustibles fósiles donde se encuentra presente el azufre. Evidentemente, estas últimas son las que se han incrementado en gran manera en las últimas décadas.

Sulfuro de hidrógeno: Producido por la descomposición de compuestos orgánicos sulfurados o por la acción de bacterias sulfato-reductoras bajo condiciones anaeróbicas.

Como se mencionó anteriormente se oxida rápidamente a SO_2 , y a pesar que sus concentraciones no son muy altas, son directamente responsables de opacar a la plata y al cobre.

Óxidos de nitrógeno: Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son emitidos tanto por fuentes naturales como artificiales, los primeros provienen de actividad volcánica, procesos microbianos en los suelos y de incendios forestales, estando repartidos en toda la superficie terrestre, a diferencia de los emitidos por fuentes artificiales, que se encuentran concentrados en zonas urbanas e industriales.

De los distintos óxidos de nitrógeno, se considera que solo el dióxido de nitrógeno NO_2 y el óxido nítrico NO presentan daños directos sobre la salud y el medio ambiente.

Partículas salinas: Formadas principalmente por cloruros provenientes de la evaporación del agua de mar, y en menor grado por la descomposición de disolventes clorados en la atmósfera y como consecuencia de procesos industriales específicos. De manera estricta, su acción se encuentra totalmente determinada por su proximidad al mar, de tal forma que sus efectos se van aminorando a manera que nos alejamos de las costas. La acción de los cloruros sobre los metales es altamente agresiva, esto se debe en gran medida a su naturaleza higroscópica.

Otras partículas volátiles: Aquí se pueden enumerar dos grupos principales, el primero formado por partículas inertes no-absorbentes, que afectan la corrosión facilitando distintos procesos de aereación en los puntos de contacto. El segundo grupo lo forman partículas absorbentes, intrínsecamente inertes, pero forman superficies capaces de absorber SO_2 ,

o agua y así generar las condiciones necesarias para llevar a cabo los procesos de corrosión atmosférica

II.1.4.- Acción de los principales contaminantes

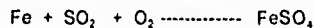
De los contaminantes de la atmósfera, el NaCl y el SO₂ son los agentes corrosivos más comunes de la atmósfera. Estas dos sustancias se encargan de estimular de manera importante la corrosión de las superficies metálicas humedecidas, a partir de incrementar la actividad de la película del electrolito. De ahí que no sea de extrañar que en zonas costeras la corrosión atmosférica exceda considerablemente a lo previsible en atmósferas carentes de contaminantes, y lógicamente, apartadas de la costa. Lo mismo sucede con los focos de emisión de SO₂, en cuyo entorno los procesos corrosivos se aceleran linealmente a medida que nos acercamos a la fuente de emisión. (ref. 3) la dispersión del contaminante desde la zona de emisión da lugar a la aparición de microclimas. Sin embargo es necesario considerar otros efectos secundarios tales como la actividad del viento y el posible apantallamiento de edificios y construcciones aledañas.

Como se mencionó, el papel del dióxido de azufre toma singular importancia en el fenómeno de corrosión cerca de las grandes urbes y zonas industriales, al provenir antropogénicamente, a partir de quemar combustibles con contenidos de azufre.

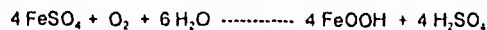
La acción del SO₂ en la atmósfera ha sido ampliamente estudiada principalmente al interaccionar sobre el acero. Según Schikorr (ref. 24), la capa de herrumbre que se forma sobre el acero absorbe SO₂ de manera excesivamente rápida y bajo un proceso exhaustivo y continuo casi independiente de factores climatológicos como la temperatura y la humedad relativa. Sin embargo, solo bajo condiciones de h_a entre 70 - 80%, interviene acelerando la acción de la atmósfera sobre los metales a través de un proceso cíclico que tiende a perpetuar su efecto.

A continuación se describe someramente este ciclo autocatalítico:

- i) El SO₂ con el acero forma sulfato ferroso.



- ii) Posteriormente este sulfato ferroso da lugar a más herrumbre liberando ácido sulfúrico

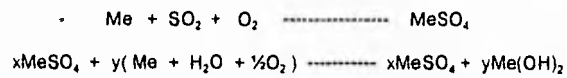


- iii) El ácido sulfúrico reacciona con el acero para formar nuevamente el sulfato de hierro



En el caso de metales no ferrosos como cobre y zinc sucede lo siguiente.

En estos metales los contaminantes entran a formar parte de los mismos productos de corrosión desempeñando además una labor de protección sobre las superficies metálicas. Lo anterior es debido a una cinética de ataque lenta que resulta de la carencia de efectos catalíticos de los contaminantes



CAPÍTULO III

III.1. - CONTROL Y SEGUIMIENTO

Por la gran diversidad de factores involucrados en el fenómeno de corrosión metálica resulta apremiante contar con técnicas adecuadas que nos permitan evaluar de manera práctica y sencilla a los distintos factores involucrados en la acción de la atmósfera sobre los metales. La idea es contar con técnicas de inspección y monitoreo en las cuales se trabaje con condiciones extremas para obtener en un periodo corto de tiempo resultados confiables que nos permitan considerar comportamientos a futuro.

No resulta difícil encontrar en la bibliografía trabajos sobre el comportamiento de metales y aleaciones en la atmósfera, donde a la atmósfera involucrada se le califica muy a la ligera. No obstante, como lo mencionan distintos autores, la clasificación simplista de las atmósferas en *rural, urbana, industrial y marina*, únicamente por su cercanía al mar o a núcleos urbanos o industriales, la mayoría de las veces ni siquiera da una idea aproximada, del verdadero comportamiento de la atmósfera frente al fenómeno de corrosión. De ahí la importancia de contar con técnicas adecuadas que nos permitan tener clasificadas a las distintas atmósferas de acuerdo a su orden de corrosividad, justificándose esta labor con solo pensar que dichos resultados ayudarían en la difícil tarea de seleccionar materiales metálicos así como sus recubrimientos óptimos para un control eficaz de la corrosión.

Por lo general, la corrosividad atmosférica se deduce del grado de corrosión que experimentan un grupo de probetas metálicas una vez que estas hayan sido expuestas a una atmósfera determinada (ref. 21). Sin embargo lejos de ser un problema difícil de solucionar, no deja de ser una labor compleja, pues no hay que olvidar al gran número de variables involucradas en este fenómeno. Por nombrar las más importantes, tipo de metal, tiempo de humectación y composición de la atmósfera.

III. 1.1 - Técnica alambre sobre tornillo

El ensayo del "alambre sobre el tornillo" constituye una importante herramienta de trabajo en los estudios de corrosión atmosférica. Consiste fundamentalmente, en evaluar la pérdida de peso que experimenta un alambre una vez que este ha sido expuesto durante cierto tiempo a la atmósfera, enrollado firmemente a la rosca de un tornillo metálico de distinta naturaleza, por lo general de comportamiento catódico con respecto al alambre, el cual lógicamente desempeña las veces del ánodo y, en algunas ocasiones, enrollado a un tornillo plástico.

Esta técnica se inició en los Estados Unidos por *Bell Telephone Laboratories* y posteriormente fue desarrollada por *Alcan International Limited* bajo la conducción del equipo de Doyle y Godard (refs. 6, 7, 8, 9 y 10). En principio el ensayo "alambre sobre tornillo" fue diseñado específicamente para estudios de corrosión galvánica en la atmósfera, entendiéndose por corrosión galvánica a una de las áreas de la corrosión atmosférica.

descrita por la influencia adversa que un metal podrá desarrollar en otro distinto al estar en contacto bajo un ambiente determinado. La extensión de este proceso dependerá de la naturaleza del medio ambiente y de los metales involucrados. La diferencia de potencial entre ambos iniciará el ataque sobre el metal menos noble de los dos.

En la actualidad esta técnica no solo se utiliza para estudios de corrosión galvánica atmosférica. Diversos investigadores la utilizan para predecir el comportamiento del aluminio frente a distintos metales durante un espacio corto de tiempo (3 meses) y, quizás donde actualmente esta técnica goza de mayor popularidad, es para planificación en las áreas de diseño, material y recubrimientos de estructuras metálicas donde no se cuenta con información previa acerca de la corrosividad atmosférica. Igualmente es utilizada en la localización de fuentes de emisión de contaminantes que colaboran a determinar la agresividad de la atmósfera frente a la corrosión metálica (ref. 10).

Ultimamente esta técnica se ha denominado bajo el nombre de "ensayo CLIMAT", siglas en inglés de Classification of Industrial and Marine Atmospheres.

Los ensayos naturales para determinar la corrosividad atmosférica más difundidos se llevan a cabo con probetas metálicas planas, teniendo el gran inconveniente que para producir resultados confiables y reproducibles se requieren de largos periodos de tiempo (1 año) (ref. 21). Por otra parte los ensayos que reproducen en laboratorio las condiciones atmosféricas no han podido demostrar su eficacia como una importante herramienta de trabajo.

De lo anterior se hace evidente la necesidad de contar con un ensayo que, sin perder información real del proceso corrosivo inherente a los ensayos naturales, sea a la vez rápido, confiable y reproducible. A este respecto, la técnica de "alambre sobre tornillo" constituye una valiosa herramienta de trabajo. La elevada sensibilidad de esta técnica, que hace posible un rápido y eficiente estudio de la corrosión atmosférica, se debe a la combinación de distintos fenómenos que contribuyen al proceso de corrosión, la corrosión generada (propriadamente dicha) de la superficie del alambre expuesta a la atmósfera, la corrosión en los resquicios que existen entre el alambre y el tornillo y la corrosión galvánica que tiene lugar al estar en contacto los dos metales. El resultado es un proceso de corrosión acelerado, favorecido por la acumulación de líquidos corrosivos en los resquicios aunado a la alta relación superficie/masa que presenta el alambre. El cual después de tres meses de exposición a la atmósfera se desenrolla del tornillo y, después de eliminar los productos de corrosión por medio de reactivos particulares para esta labor, se determina la pérdida de peso que experimentó el alambre, expresada como porcentaje del peso original y denominada Índice de Corrosividad Atmosférica (I.C.A.).

Los primeros estudios realizados por Doyle y Godard (ref. 8 y 9), dejaron ver la confiabilidad de esta prueba, al evaluar la corrosividad en distintas atmósferas determinando un rango de acción para cada una de ellas, según lo muestra la tabla 3.1. Donde el parámetro I.C.A. alcanza sus valores más altos en atmósferas marinas y sus valores más bajos en las atmósferas rurales.

TIPO DE ATMOSFERA	I.C.A.
Marina	0.4 - 9.0
Industrial	0.15 - 1.8
Rural	0.0 - 0.3

Tabla 3.1.- Valores del I.C.A. de acuerdo a la atmósfera involucrada

Gran parte de la sensibilidad de esta técnica radica en el par galvánico (alambre/metal) con que se esté trabajando. Hoy día son numerosos los trabajos en los que se ha comprobado la sensibilidad de determinados pares galvánicos frente a la acción de una atmósfera específica, es decir, el funcionamiento del par galvánico dependerá, entre otros factores, de la atmósfera bajo la cual se esté trabajando.

Concretamente Doyle y Godard (ref. 6 y 10) señalan en sus estudios al par alambre de aluminio sobre tornillo de acero (Al-Fe) con un alto grado de respuesta bajo la acción de atmósferas marinas, mientras que el par alambre de aluminio sobre tornillo de cobre (Al-Cu) resulta sensible tanto a atmósferas de tipo industrial como marinas. Donde de acuerdo a la utilización de estos pares galvánicos será posible determinar los índices de Corrosividad Marina (I.C.M.), es decir el porcentaje en pérdida de peso sufrida por el aluminio al exponerse el par "Al-Fe" por un periodo de tres meses en una atmósfera marina. De igual forma el uso del par "Al-Cu" bajo una atmósfera de tipo industrial será necesario para determinar el Índice de Corrosividad Industrial (I.C.I.).

Existe una clasificación arbitraria señalada por Doyle y Godard (ref. 7) donde se dividen en cinco categorías de corrosividad de acuerdo a los índices I.C.I. e I.C.M., respectivamente (tablas 3.2 y 3.3.).

I.C.I.	CLASIFICACION	SIGNIFICADO
0 - 1	Despreciable	Areas rurales y suburbanas
> 1 - 2	Moderada	Areas urbanas
> 2 - 4	Moderadamente severa	Areas urbano-industriales
> 4 - 7	Severa	Areas industriales
> 7	Muy severa	Areas muy industriales

Tabla 3.2. Clasificación de los niveles de corrosividad industrial basada en datos CLIMAT (I.C.I.)

I.C.M.	CLASIFICACION	SIGNIFICADO
0 - 2	Despreciable	Area habitable
> 2 - 5	Moderada	Zona costera
> 5 - 10	Moderadamente severa	Zona costera y expuesta
> 10 - 20	Severa	Zona muy expuesta
> 20	Muy severa	Muy expuesta, azolada por viento y la arena

Tabla 3.3. Clasificación de los niveles de corrosividad marina basada en datos CLIMAT (I.C.M.)

Para cuantificar la corrosión galvánica experimentada por el alambre es necesario colocar, además de las probetas formadas por alambre y tornillo metálicos, probetas donde el alambre se enrolla a tornillos plásticos en los cuales la acción de la corrosión galvánica es inexistente. De tal forma que la corrosión galvánica que experimenta el alambre se calcula por la diferencia entre las pérdidas de peso de los alambres enrollados a tornillos plásticos y a tornillos metálicos.

La técnica del "alambre sobre tornillo" o ensayo "CLIMAT" es una herramienta que refleja directamente la acción de la atmósfera sobre los metales, sin embargo con el fin de obtener una idea precisa acerca de la agresividad ambiental sobre las estaciones de ensayo, es necesario determinar la concentración de los contaminantes, principalmente, Dióxido de azufre en atmósferas industriales y cloruros en atmósferas marinas (con dióxido de azufre presente en zonas costeras/industriales.)

Los cloruros en zonas bajo influencia de atmósferas marinas se cuantifican por el método de la "probeta captadora" de Hache. En cuanto a la determinación de la concentración de dióxido de azufre en atmósferas de tipo industrial o marino industrial, la técnica conocida bajo el nombre de "Platos de Sulfatación" es actualmente una de las más utilizadas en esta tarea.

III. 1.2 - Método de los platos de sulfatación con PbO₂

Uno de los principales factores que determinan la intensidad del fenómeno corrosivo en núcleos de población e industria, es sin lugar a dudas la composición de SO₂ en la atmósfera, generado principalmente como contaminante a partir del quemado de combustibles con contenidos de azufre.

La exposición de probetas metálicas a la atmósfera como parte de la técnica de alambre sobre tornillo para evaluar la acción de la atmósfera sobre los metales, debe de ir acompañada de la estimación de la cantidad de SO₂ que incide sobre sus superficies. Dicha estimación se realiza por medio del método de platos de sulfatación con PbO₂.

Dicho método consiste en una evaluación indirecta de la concentración de SO_2 presente en las inmediaciones donde se realiza el estudio. Dicha concentración se calcula indirectamente a partir de la cantidad de PbSO_4 que se forma de la reacción entre el PbO_2 contenido en los platos de sulfatación, y el SO_2 presente en la atmósfera.

El análisis consiste en transformar a los iones sulfato en sulfato de bario mediante cloruro bórico con el fin de realizar una turbidimetría, para así determinar con precisión la concentración del contaminante. Este análisis se llevara a cabo una vez que los platos de sulfatación hallan sido expuestos durante treinta días.

En la tabla 3.4 se muestra la clasificación de la composición de la atmósfera debida al SO_2 según ISO.

Velocidad de deposición SO_2 (mg./m ² día)	Concentración SO_2 (mg./m ³ o ppm)	Categoría
< 10	< 0.012	P ₀
> 10 - 35	0.012 - 0.04	P ₁
> 35 - 80	0.04 - 0.09	P ₂
> 80 - 200	0.09 - 0.25	P ₃

Tabla 3.4. Clasificación de la contaminación por sustancias sulfurosas representadas por el nivel de SO_2

III.1.3. - Información meteorológica

El tiempo de humectación de la superficie metálica es considerado como un factor clave en la corrosión debida a la atmósfera. Si recordamos la condición necesaria para que en una superficie metálica tenga lugar un proceso corrosivo es la formación de la capa de electrolito, pues el proceso de corrosión atmosférico es la suma de los procesos parciales de corrosión que tienen lugar cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal.

La necesidad de contar con técnicas de evaluación del tiempo de humectación se antoja evidente, ya que este representa la suma de los tiempos parciales de humectación, durante los cuales se hace posible la corrosión atmosférica.

Existen diferentes métodos para cuantificar el tiempo de humectación, donde la precisión de los resultados obtenidos por dichos sistemas de medida dependerán del tipo de instrumento o sensor utilizado. Sin embargo si consideramos al tiempo de humectación, como dependiente de la zona macroclimática así como del tipo de localización, es posible valerse de datos meteorológicos al considerar como una estimación del tiempo de humectación a aquellos periodos en que la humedad relativa (HR) es mayor de 80 % y la temperatura superior a los 0 °C, (refs. 20 y 21). En donde zonas con influencia directa de contaminantes

se considerarán niveles por debajo establecidos por la norma
 De cualquier forma es importante señalar que esta estimación no corresponde necesariamente al tiempo de humectación real, no obstante el criterio propuesto es, por lo general, lo suficientemente preciso para caracterizar a una atmósfera

En la tabla 3.5 se presenta una clasificación de la atmósfera de acuerdo al tiempo de humectación, propuesta por la norma ISO.

CATEGORÍA	HORAS/AÑO	% AÑO	EJEMPLO
t ₁	< 10	< 0.1	Atmósfera interior climatizada
t ₂	10 - 250	0.1 - 3	Atmósfera interior, excepto espacios interiores no aireados
t ₃	250 - 2500	3 - 30	Atmósfera exterior, en regiones secas o muy frías
t ₄	2500 - 5500	30 - 60	Atmósferas exteriores excepto tropical seca y las frías
t ₅	> 5500	> 60	Lugares no ventilados en regiones muy húmedas

Tabla 3.5. Clasificación del tiempo de humectación de superficies metálicas que se corroen.

CAPÍTULO IV

IV. 1. - PARTE EXPERIMENTAL.

Las actividades realizadas para este estudio sistemático fueron las siguientes:

- i) Preparación de probetas "Alambre sobre Tornillo" para su exposición a la atmósfera.
- ii) Puesta a punto de la metodología de platos de sulfatación para determinar SO₂ en la atmósfera.
- iii) Comparación entre los resultados obtenidos por ensayo "Alambre sobre Tornillo" con los obtenidos a partir del método de platos de sulfatación y datos climatológicos.
- iv) Calibración de las diferentes atmósferas involucradas.

Toda la técnica experimental fue desarrollada en el laboratorio de corrosión, Lab. 211 edificio D Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

A partir de un breve estudio cualitativo se escogieron tres puntos específicos dentro del área metropolitana, para ubicar nuestras estaciones de trabajo con la idea de clasificarlas de acuerdo al grado de corrosividad. Las estaciones de monitoreo se ubicaron en las zonas de Tlalhepantla, Colonia Nápoles y Ciudad Universitaria, zonas que en principio se pensarían con características muy diferentes de acuerdo a su entorno.

La idea de identificar zonas específicas, descritas por la composición de contaminantes así como por las características climáticas frente al fenómeno de corrosión atmosférica, dentro del área metropolitana reforzaría la idea de microclimas específicos dentro de una zona que es considerada de manera un tanto burda como una zona urbana - industrial. Para este fin nos valimos de las técnicas anteriormente descritas modificando su aplicación en puntos específicos de acuerdo a los fines de este trabajo. Asimismo la información meteorológica requerida fue proporcionada por los servicios meteorológicos de Ciudad Universitaria y del puerto aéreo.

Este trabajo fue desarrollado durante un periodo de tres meses que abarcó del 18 de diciembre de 1993 al 27 de marzo de 1994, de acuerdo a las condiciones establecidas por las siguientes normas internacionales:

- ASTM. (1991). Standard practice for monitoring atmospheric SO₂ using the sulfation plate technique. Philadelphia, Vol. 03.02, pp. 362-366. G 91 -86.
- ISO. 9293. Corrosion of metals and alloys. Classification of corrosivity categories of atmospheres. Ginebra, Suiza (1992).
- ISO. 9226. Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Methods of determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Ginebra, Suiza. (1992).

En cuanto a la técnica "Alambre sobre tornillo" al ser un técnica de aplicación relativamente reciente en México, la práctica estuvo basada en experiencias previas generadas por el departamento de corrosión y protección del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (C.E.N.I.M.) en España, modificándose su aplicación en algunos detalles. Asimismo se contó con resultados obtenidos de experiencias previas realizadas en 1991, en estaciones ubicadas en Ciudad Universitaria y la zona de Tlalnepantla (Refs 17 y 19)

IV.1.1.- Ubicación específica de las estaciones de monitoreo

Estación Ciudad Universitaria.- Esta estación se ubicó al suroeste del área metropolitana en la azotea del edificio "D" de la facultad de Química de la UNAM, en una zona rodeada en gran medida por la reserva ecológica de la Universidad, así como también de avenidas importantes y de zonas habitacionales.

Estación Colonia Nápoles.- Localizada al centro-suroeste del área metropolitana en una zona conformada en gran parte por oficinas, comercios y casa habitación. La estación de monitoreo se instaló en el último piso de un edificio ubicado en la calle de Atlanta esquina con Porfirio Díaz, a dos cuadras de la avenida de los Insurgentes

Estación Tlalnepantla.- Esta estación se ubicó al noreste del área metropolitana en el fraccionamiento industrial Tlalnepantla en la azotea de una compañía maquiladora en el número 2 de la calle de San Nicolás. Rodeado por un gran número de industrias de diversos giros así como por la zona habitacional de valle dorado.

IV.1.2. - Ensayo CLIMAT o Técnica "Alambre sobre Tornillo"

Materiales:

Es importante señalar que las dimensiones y los materiales utilizados en las muestras estuvieron estandarizados con la finalidad de establecer comparaciones entre datos o resultados obtenidos anteriormente por esta técnica.

a) Alambre de aluminio comercial

El diámetro del alambre fue de 1 mm, utilizándose aproximadamente una longitud entre 80 y 90 cm. de acuerdo a la longitud de los tornillos utilizados, lo que suponía una vez enrollados, cubrían aproximadamente la mitad de la longitud de los tornillos.

b) Tornillo de cobre

Estos tornillos fueron maquinados de varillas de cobre comercial con una longitud de 10 cm. y estaban roscados con un paso de rosca de 13 hilos por pulgada, es decir aproximadamente

5 vueltas por centímetro. Además de contar con perforaciones en sus extremos para insertar las aletas que sujetaron al alambre.

c) Tornillo de acero

Maquilados a partir de varillas de acero 1010, con las mismas consideraciones técnicas de los tornillos de cobre.

d) Tornillos de latón

Estos tornillos con sus respectivas tuercas fueron utilizados para sujetar las terminales del alambre de aluminio. Sus dimensiones aproximadas fueron de 3 mm. de diámetro y de 30 cm. de longitud.

e) Bases de madera

Estas bases fueron utilizadas para construir los pupitres que exhibirían a las probetas en las estaciones de monitoreo. Las dimensiones de dichas bases fueron las siguientes; Longitud de 60 cm., Ancho de 25 cm. y altura de 5 cm.

Se colocaron escuadras de madera a las bases de tal forma que estas quedaron con una inclinación de 45° con respecto a la horizontal. Por último se hicieron las perforaciones necesarias a las bases de madera para la colocación de las probetas, con una separación de 7 cm. entre cada perforación.

Metodología:

Antes del montaje de las estaciones fue necesario desengrasar los componentes de las probetas, así como lo fue el utilizar guantes quirúrgicos durante la preparación de las muestras para evitar cualquier posibilidad de contaminación durante su manejo.

Una vez limpios cada tornillo junto con sus conexiones (tornillos y tuercas de latón) fueron pesados con una precisión de 0.1 mg al igual que el resto de las determinaciones, obteniendo así el valor descrito por P_1 ; posteriormente los alambres de aluminio se enrollaron firmemente a la rosca de los tornillos, estando el alambre en contacto con aproximadamente 50 mm. de la longitud del tornillo. Las terminales de los alambres se fijaron al tornillo catódico por medio de las terminales de latón , volviéndose a pesar, obteniendo el valor para P_2 .

A partir de la diferencia entre los dos valores anteriores se obtuvo el valor P_3 , el cual nos describe el peso del alambre que se enrolló al tornillo. Posteriormente las terminales de los alambres que fueron fijados a los tornillos de latón fueron pintados con laca con la finalidad de eliminar una posible acción galvánica no deseada.(figura 4.1)

Las muestras en los pupitres fueron colocadas por triplicado es decir por cada pupitre se

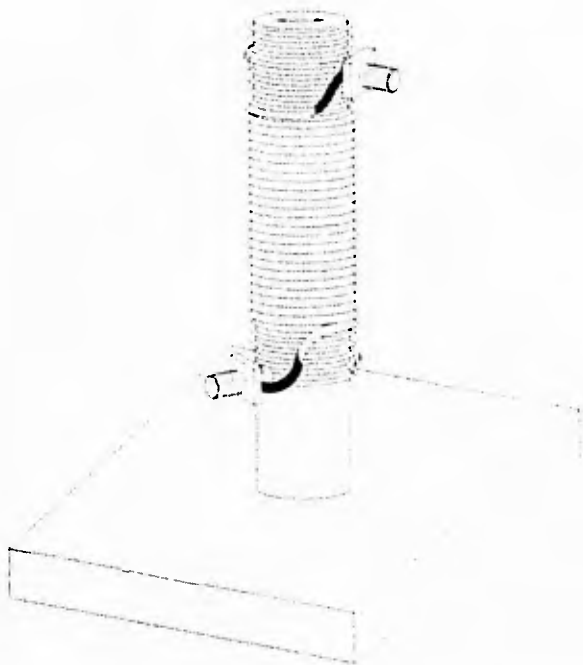


Figura 4.1 Probeta "Alambre sobre Tornillo"

Las muestras en los pupitres fueron colocadas por triplicado es decir por cada pupitre se contaba con 6 probetas, de las cuales tres eran Al/Fe y las otras tres eran Al/Cu.

Los tornillos se dispusieron de manera vertical en las perforaciones de las bases de madera, las cuales se colocaron sobre escuadras para garantizar que estuviesen a 45° con respecto a la horizontal, además de eliminar en su colocación cualquier efecto de apantallamiento creado por los mismos tornillos. (figura 4.2)

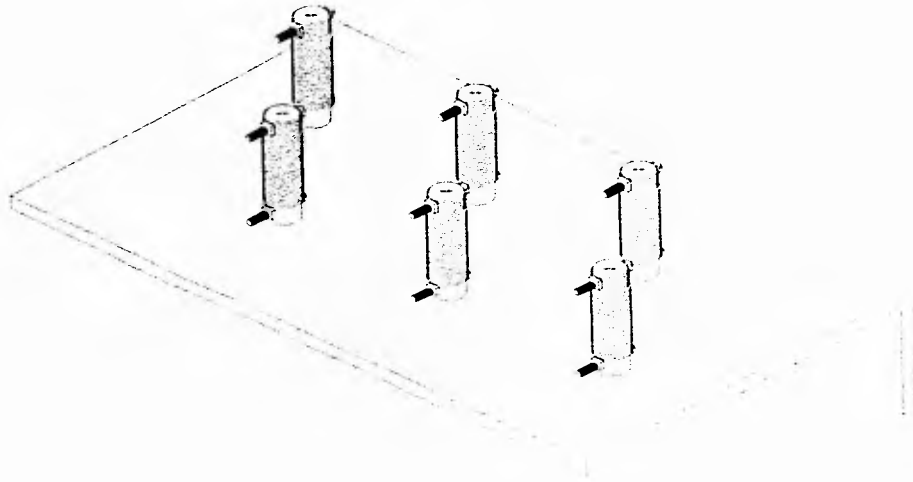


Figura 4.2 Pupitre de probetas "Alambre sobre Tronillo"

Una vez montadas e identificadas las estaciones, los pupitres fueron guardados en bolsas de cierre hermético para evitar su contaminación antes de la exposición.

El 18 de diciembre de 1993 fueron colocados los pupitres en sus respectivas estaciones de monitoreo cuidando que las muestras quedaran expuestas al aire libre en lugares que no estuviesen resguardados de los agentes atmosféricos determinantes en el fenómeno de corrosión.

Después de un periodo de tres meses de exposición, el 27 de marzo de 1994 los pupitres fueron retirados de las estaciones de monitoreo para su posterior manejo.

Los alambres se desenrollaron de los tornillos cortando la terminales sujetas a las conexiones de latón, a dichas terminales se les elimino la cubierta de laca con un tratamiento de acetona para ser posteriormente pesados, obteniendo así el valor de P_4 .

De tal forma que el peso inicial del alambre expuesto a la atmósfera, es decir sin las terminales que fueron cubiertas de laca, se calculó a partir de la diferencia:

$$P_3 = P_3 - P_4$$

Siendo este valor el que se consideró como peso inicial al momento de determinar el índice de corrosividad atmosférica (I.C.A.)

Una vez desmontados los alambres se sometieron a una limpieza con soluciones decapantes específicas con la finalidad de eliminar los productos de corrosión sin afectar directamente al aluminio. Los alambres se pesaron varias veces para asegurar que los productos de corrosión se habían eliminado totalmente, llegando al punto en que las variaciones de peso resultaban despreciables. Obteniendo así el valor del peso final P_6 .

Los valores de los índices de corrosividad atmosférica (I.C.A.) se obtuvieron en por ciento de pérdida de peso con respecto al peso original del alambre.

$$I.C.A. = \frac{P_3 - P_6}{P_3} \times 100$$

Técnicas de limpieza.

Antes de la exposición

Los alambres de aluminio fueron ligados para remover la capa de óxido adherida, procurando una misma apariencia a lo largo de cada alambre. Los residuos se removieron con un algodón impregnado de acetona.

Los tornillos una vez que fueron maquinados fue necesario remover los residuos adheridos de grasa sumergiéndolos en acetona. Para mejores resultados esta operación se realizó en una cuba equipada con ultrasonido.

Después de la exposición:

Las terminales de los alambres, las cuales fueron pintadas con laca al inicio de la exposición, fueron cuidadosamente cortadas y despintadas con acetona.

El resto del alambre fue desenrollado y de acuerdo a las normas ISO/DP-8407, sumergido en una solución decapante con el fin de eliminar los productos de corrosión adheridos al alambre.

La solución decapante se preparó con ácido nítrico (HNO_3) sp gr 1.42 saturado con óxido crómico (Cr_2O_3) a una temperatura entre 20 y 25 °C.

Los alambres una vez desmontados se sumergieron en la solución por alrededor de 5 minutos en una cuba provista con ultrasonido, se enjuagaban y se secaban con acetona y aire a presión para ser posteriormente pesados. Nuevamente se volvían a sumergir y se repetía la misma operación hasta que las variaciones en peso eran despreciables, por lo general después de 3 o 4 veces.

IV.1.3.- Método de los platos de sulfatación

Equipo, material y reactivos:

Equipo: Estufa, agitador magnético, balanza analítica, espectrofotómetro Perkin-Elmer

Material: Vasos de precipitados y matraces volumétricos de distintas medidas, tubos de ensayo, pipetas volumétricas, agitadores de vidrio, vidrios de reloj, embudos para filtración, papel filtro (Whatman No. 42), cajas Petri de poliestireno 90 mm. y soportes de aluminio para los platos de sulfatación.

Reactivos: Dióxido de plomo, goma de tragacanto, acetona, agua destilada, solución de carbonato de sodio 5%, solución de ácido clorhídrico 0.7 M, soluciones de sulfato de sodio de concentración 10-100 ppm, solución reforzadora de pH, Cloruro de bario y solución de sulfato de sodio 0.7 M.

Metodología:

Preparación: En la caja Petri se colocó el papel filtro cortado de manera circular de manera tal que este cubría totalmente la base de la caja. El papel filtro se humedeció completamente

con acetona presionando firmemente con un vidrio de reloj hasta que la acetona se evaporó por completo.

Con esto el papel filtro quedó completamente adherido a la base de la caja Petri.

Posteriormente los platos así formados se enjuagaron con agua destilada y se dejaron llenos, por espacio de una hora.

El siguiente paso consistió en la preparación de la pasta de bióxido de plomo con la cual se cubrirían los platos de sulfatación. Para esto se preparó una emulsión formada por 3.5 mg de goma de tragacanto y 900 ml de agua destilada bajo una agitación de mayor a menor velocidad durante dos horas.

Por otra parte 0.8 g de papel filtro finamente cortado se humedecieron en con una cantidad mínima de agua y bajo una agitación constante se formó una pulpa homogénea después de 12 horas. Esta pulpa se agregó a 80 ml de la emulsión formada con goma de tragacanto y se agitó vigorosamente hasta formar una mezcla suave y uniforme a la cual posteriormente, sin suspender la agitación, se le añadieron 25.6 g de bióxido de plomo.

Una vez preparada la pasta de bióxido de plomo se vertieron en los platos, preparados anteriormente, 16 ml de pasta repartiéndose de manera homogénea en toda la superficie.

Por último estos platos (destapados) fueron colocados en la estufa a una temperatura de 46 °C por espacio de 24 horas bajo inspección frecuente. Luego de esto fueron retirados, tapados perfectamente y colocados en un desecador hasta el momento de su exposición.

Exposición a la atmósfera.

Para la exposición de los platos de sulfatación en las estaciones de monitoreo, fue necesario construir un tipo de soporte, el cual fue maquinado de aluminio comercial en los talleres del instituto de física.

Dichos soportes se colocaron de forma horizontal, fijándose a una pared sin que fueran obstruidos del viento normal y de la circulación de corrientes de aire, desempeñando la función de sujetar y orientar a los platos, una vez destapados, en una posición tal que la pasta de bióxido de plomo quedará expuesta hacia abajo quedando, así protegidos de la lluvia (figura 4.3)

Los platos se expusieron de esta forma en las estaciones de Tlalnepantla, Colonia Nápoles y Ciudad Universitaria, con un periodo de exposición de alrededor de 30 días por plato. Por lo que se expusieron tres platos de sulfatación por cada estación de acuerdo a la técnica de "Alambre sobre Tornillo" cuya duración fue de tres meses.

Al concluir el periodo de exposición, los platos fueron cerrados y cubiertos para su posterior análisis, el cual se realizó puntualmente al día siguiente de que fueron retirados, no obstante que podría haberse realizado dentro de los siguientes 60 días.

Análisis y cuantificación.

El sulfato que se depositó en los platos fue removido y solubilizado con una solución de carbonato de sodio. Posteriormente el sulfato fue tratado con cloruro de bario para ser precipitado y así cuantificado turbidimétricamente. El procedimiento seguido para este análisis se describe a continuación:

Tratamiento.

Se desprendió el contenido de los platos de sulfatación y se colocó en un vaso de precipitados al cual se le agregaron bajo agitación 200 ml. de la solución de Na_2CO_3 5%. Posteriormente se dejó en reposo durante tres horas agitando ocasionalmente.

Transcurridas las tres horas se colocó por espacio de 30 minutos en baño María. Una vez fría la solución del vaso de precipitados se ajustó a un volumen de 50 ml.

Se filtró, y a 10 ml del filtrado se acidularon a un pH entre 3 y 4 agregando de 5 a 7 ml de HCl 0.7 M.

Una alícuota de 5 ml fue tomada de la solución anterior, se colocó en un tubo de ensayo y adicionando agua destilada se completó a un volumen de 20 ml. A este tubo se agregaron aproximadamente 0.3 g. de BaCl_2 agitando vigorosamente. Posteriormente se dejó reposar unos 3 minutos y se dispuso a conocer su concentración.

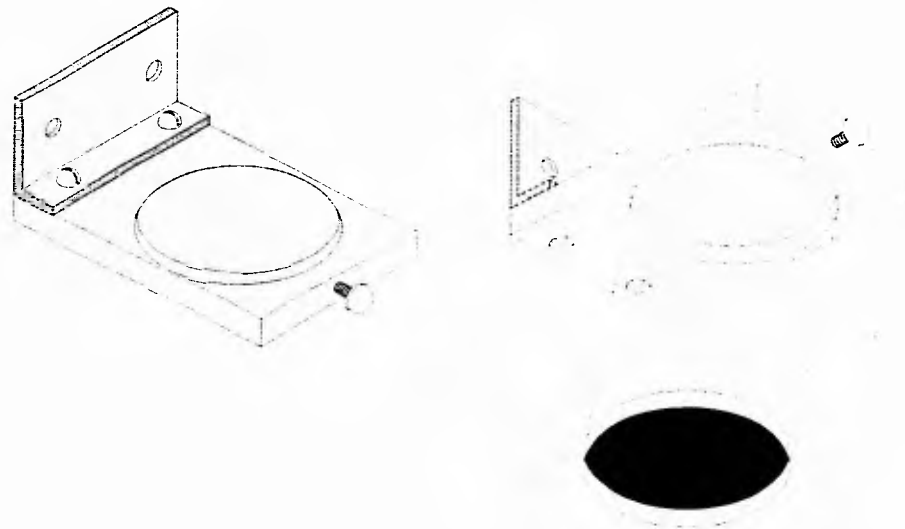


Figura 4.3 Soporte y plato de sulfatación

Cuantificación.-

La determinación de la concentración de SO_2 depositado en los platos se realizó por un método turbidimétrico. En el cual a partir de los valores de turbidez y con la ayuda de una curva de calibración elaborada previamente fue posible obtener la cantidad en gramos depositados del contaminante.

Para la curva de calibración se prepararon 20 ml. de soluciones de concentración 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 ppm de Na_2SO_4 , las cuales se acidularon a un pH entre 3 y 4 con una solución reforzadora con la siguiente composición

Etanol (100 ml.), glicerina (50 ml.), ácido clorhídrico conc. (30 ml.), cloruro de sodio (75 g.) y agua destilada (300 ml.).

Posteriormente se agregaron 0.3 g. de BaCl_2 a cada solución agitando vigorosamente. Una vez en reposo se realizaron las medidas turbidimétricas en un espectrofotómetro Perkin-Elmer a una longitud de onda de 500 nm. Con los valores obtenidos se construyó una gráfica de densidad óptica en función de la concentración de sulfato contenida en cada una de las soluciones utilizadas para esta curva de calibración.

Una vez que las muestras de cada estación fueron tratadas para su cuantificación se efectuaron las mediciones en el espectrofotómetro, procurando que la lectura se encontrara a media escala de la curva de calibración. Si la lectura se encontraba a los extremos se realizaban las correcciones pertinentes, es decir si presentaba la muestra poca absorbancia debida a la escasa presencia de sulfatos, se preparaba otra muestra con el mismo tratamiento pero agregando 5 ml de solución de BaSO_4 10 ppm y se vuelve a tomar la lectura. Si por el contrario la lectura correspondía a un valor muy alto de absorbancia debido a la presencia en exceso de sulfatos, se preparaba otra muestra con el mismo tratamiento pero con una cantidad extra de 0.03 g. de BaCl_2 , tomándose nuevamente la lectura.

Se realizó la cuantificación mensual de cada muestra de las estaciones, además de realizar la medición correspondiente bajo el mismo tratamiento a un plato de sulfatación no expuesto.

Con los valores de turbidez de las muestras se obtuvieron las cantidades de sulfatos en ppm depositados, a partir de la curva de calibración.

Finalmente aplicando la siguiente ecuación se obtuvo el valor de velocidad de deposición del contaminante para las muestras de cada estación de monitoreo:

$$R = \frac{(S - S_0) \left(\frac{PM_1}{PM_2} \right)}{A t}$$

Donde:

- R = Velocidad de deposición de bióxido de azufre (SO₂) en mg / m² día.
- S = Cantidad en mg. del ion sulfato en el plato expuesto.
- S₀ = Cantidad en mg. del ion sulfato en el plato no expuesto.
- PM₁ = Peso molecular del bióxido de azufre.
- PM₂ = Peso molecular del ion sulfato.
- A = Area de exposición en m².
- t = Tiempo de exposición en días.

CAPÍTULO V
RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

V.1 Antecedentes

En un estudio anterior a este trabajo (ref. 17) se ha determinado la velocidad de depósito de SO_2 por el método de los platos de sulfatación durante doce meses (Noviembre 1989 a Noviembre 1990) con una periodicidad mensual, en la estación de ensayo de corrosión atmosférica de Ciudad Universitaria, situada en la Facultad de Química, Edificio D, encontrándose un valor promedio para el periodo estudiado de:

$$20.08 \text{ mg/m}^2 \times \text{día}$$

Dentro de la clasificación establecida por la ISO (1992a), relativa a la agresividad de las atmósferas, el valor anterior está dentro de la categoría P_3 (Tabla 3.4), lo cual junto al tiempo de humectación característico de la zona, $t_3 - t_4$ (Genescá et al. 1988 Tabla 3.5), configuran una atmósfera con características de corrosividad baja media (Tablas 5.1 y 5.3) estableciéndose para los cuatro metales estudiados la siguiente categoría, de acuerdo con la tabla 5.2:

Metal	Categoría
Fe	2
Zn	3
Cu	3
Al	3

Durante el mismo periodo de tiempo, se han expuesto probetas metálicas de Fe, Zn, Al y Cu en la estación de Ciudad Universitaria, de acuerdo con la metodología señalada por la ISO (1992b).

Categoría	Corrosividad
1	Muy baja
2	Baja
3	Media
4	Alta
5	Muy alta

Tabla 5.1. Categorías de la corrosividad de la atmósfera

Los resultados encontrados después de la exposición de las probetas durante un año se presentan en la tabla 5.4 y de acuerdo con la tabla 5.2, les corresponde la categoría señalada. Como se nota existe una muy buena concordancia y si acaso puede decirse que la predicción de la agresividad de la atmósfera a partir de los parámetros tiempo de humectación y contaminación por SO_2 es ligeramente por exceso para el caso del Cu y del Al.

Categoría	Pérdida de peso (Fe)	Pérdida de peso (Cu)	Pérdida de peso (Zinc)	Pérdida de peso (Al)	Profundidad PIC. mm
1 g/m ² mm	1 - 10 0.15 - 1.25	< 0.9 < 0.1	< 0.7 < 0.1	despreciable despreciable	- -
2 g/m ² mm	10 - 200 1.25 - 25	0.9 - 5 0.1 - 0.6	0.7 - 5 0.1 - 0.7	< 0.6 < 0.25	20
3 g/m ² mm	200 - 400 25 - 50	5 - 12 0.6 - 1.3	5 - 15 0.7 - 1.2	0.6 - 2 0.25 - 0.8	50
4 g/m ² mm	400 - 650 50 - 80	12 - 25 1.3 - 2.8	15 - 30 1.2 - 4.2	2 - 5 0.8 - 2	50 - 100
5 g/m ² mm	> 650 > 80	> 25 > 4.2	> 30 > 4.2	> 5 > 2.8	> 150

Tabla 5.2. Pérdidas por corrosión para el primer año de exposición para las diferentes categorías de corrosividad

			P ₀ -P ₁	P ₁	P ₂
Acero al carbón	r ₁	S ₂ -S ₁	1	1	1-3
		S ₂	1	1	1-2
		S ₁	1-2	1-2	2
	r ₂	S ₀ -S ₁	1	1-2	2
		S ₂	2	3-4	3
		S ₁	3-4	3-4	4
	r ₃	S ₀ -S ₁	2-3	3-4	4
		S ₂	3-4	3-4	4-5
		S ₁	4	4-5	5
	r ₄	S ₀ -S ₁	3	4	5
		S ₂	4	4	5
		S ₁	5	5	5
	r ₅	S ₀ -S ₁	4	5	5
		S ₂	5	5	5
		S ₁	5	5	5
Zinc y cobre	r ₁	S ₀ -S ₁	1	1	1

		P ₀ -P ₁	P ₁	P ₂
	S ₁	1	1	1-2
	S ₁	1	1-2	2
T ₂	S ₀ -S ₁	1	1-2	2
	S ₂	1-2	2	2
	S ₃	3	3	3-4
T ₃	S ₀ -S ₁	3	3	3
	S ₂	3	3-4	3-4
	S ₃	3-4	4	4
T ₄	S ₀ -S ₁	3	3-4	4-5
	S ₂	4	4	5
	S ₃	5	5	5
T ₅	S ₀ -S ₁	4	5	5
	S ₂	5	5	5
	S ₃	5	5	5
Aluminio	T ₁	S ₀	1	1
		S ₁	1	1
		S ₂	2	2
	T ₂	S ₃	2	2-3
		S ₀	1	1-2
		S ₁	1	1-2
	T ₃	S ₂	2-3	3-4
		S ₃	4	4
		S ₀	3	3
	T ₄	S ₁	3	3
		S ₂	3-4	4
		S ₃	4	4-5
	T ₅	S ₀	3	3-4
		S ₁	3-4	4
		S ₂	3-4	4
T ₆	S ₃	5	5	
	S ₀	4	4	
	S ₁	5	5	
	S ₂	5	5	
	S ₃	5	5	

Tabla 5.3 Estimación de la corrosividad de la atmósfera por categorías

Metal	Velocidad corrosión micrómetros	Categoría
Fe	15.404	2
Zn	0.8105	3
Cu	0.4882	2
Al	0.1563	2

Tabla 5.4. Velocidad de corrosión de probetas metálicas planas, periodo Nov 1989 - Nov 1990

Las conclusiones de dicho estudio fueron las siguientes.

La clasificación de la agresividad de la atmósfera propia de Ciudad Universitaria, en la Ciudad de México, efectuada durante el periodo comprendido entre noviembre de 1989 y noviembre de 1990, realizado por diferentes métodos, ensayo "alambre sobre tornillo", relación entre la corrosión del acero y la del zinc, predicción basada en parámetros climatológicos y de contaminación y estimación fundamentada en la velocidad de corrosión experimentada por probetas metálicas expuestas directamente a la atmósfera durante un año, ha dado lugar a que la misma deba considerarse como rural y de corrosividad baja a media, encontrándose una buena concordancia entre todos los métodos.

V.2 Resultados

En este estudio realizado durante el periodo comprendido entre el 18 de Diciembre de 1993 y el 27 de Marzo de 1994, los resultados obtenidos son:

TECNICA "ALAMBRE SOBRE TORNILLO"

Estación Tlainepanlla.

Par Al / Cu *Tabla 5.5.1*

PESO INICIAL DEL ALAMBRE	PESO FINAL DEL ALAMBRE	DIFERENCIA (P _i - P _f)	I.C.A. (% en pérdida de peso)
9.2317 g.	9.2100 g.	0.0217 g.	0.235
8.6759 g.	8.6560 g.	0.0199 g.	0.229
8.0562 g.	8.0284 g.	0.0278 g.	0.345

valor promedio = 0.269 I.C.A.

Par Al / Fe. *Tabla 5.5.2*

PESO INICIAL DEL ALAMBRE	PESO FINAL DEL ALAMBRE	DIFERENCIA (P _i - P _f)	I.C.A. (% en pérdida de peso)
8.4671 g.	8.4017 g.	0.0654 g.	0.772
8.2913 g.	8.2311 g.	0.0603 g.	0.727
8.3369 g.	8.3003 g.	0.0666 g.	0.795

valor promedio = 0.7645 I.C.A.

Estación Colonia Nápoles.

Par Al / Cu *Tabla 5.6.1*

PESO INICIAL DEL ALAMBRE	PESO FINAL DEL ALAMBRE	DIFERENCIA ($P_f - P_i$)	I.C.A. (% en pérdida de peso)
8.2723 g	8.2570 g	0.0153 g	0.184
8.7623 g	8.7394 g	0.0229 g	0.253
8.4918 g	8.4781 g	0.0137 g	0.161

valor promedio = 0.199 I.C.A.

Par Al/Fe *Tabla 5.6.2*

PESO INICIAL DEL ALAMBRE	PESO FINAL DEL ALAMBRE	DIFERENCIA ($P_f - P_i$)	I.C.A. (% en pérdida de peso)
8.7009 g	8.6423 g	0.0586 g	0.673
9.3517 g	9.4120 g	0.0603 g	0.644
8.6761 g	8.6275 g	0.0486 g	0.560

valor promedio = 0.625 I.C.A.

Estación Ciudad Universitaria.

Par Al / Cu **Tabla 5.7.1**

PESO INICIAL DEL ALAMBRE	PESO FINAL DEL ALAMBRE	DIFERENCIA (P _f - P _i)	I.C.A. (% en pérdida de peso)
8.4200 g	8.4109 g	0.0091 g	0.108
9.2426 g	9.2246 g	0.0180 g	0.194
9.1875 g	9.1618 g	0.0257 g.	0.279

valor promedio = 0.193 I.C.A.

Par Al / Fe. **Tabla 5.7.2**

PESO INICIAL DEL ALAMBRE	PESO FINAL DEL ALAMBRE	DIFERENCIA (P _f - P _i)	I.C.A. (% en pérdida de peso)
8.0387 g	7.9917 g.	0.0470 g	0.584
8.6804 g	8.6326 g	0.0479 g	0.551
9.1718 g.	9.1321 g.	0.0397 g	0.432

valor promedio = 0.522 I.C.A.

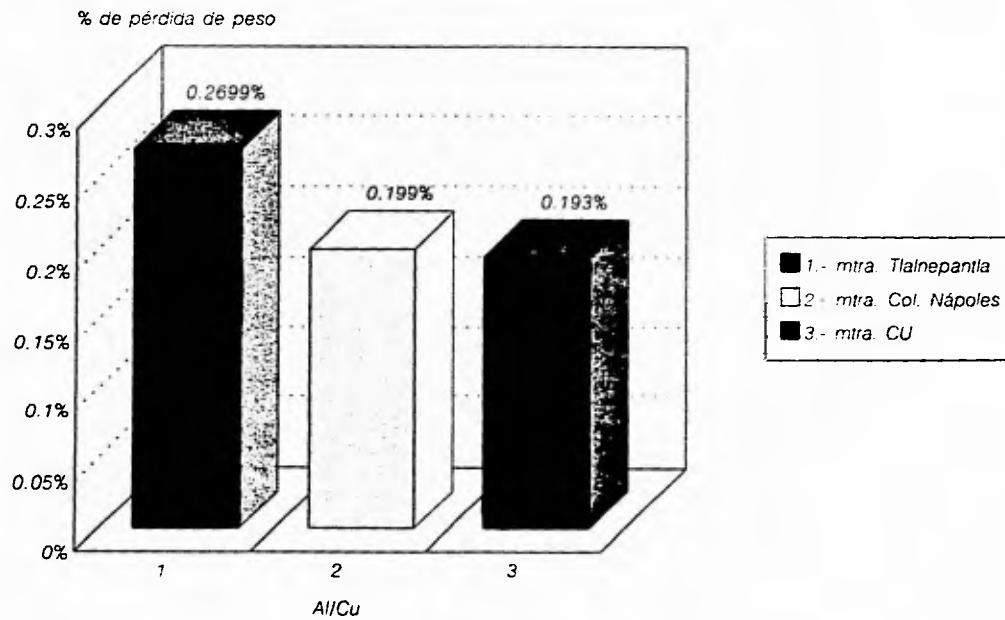


Figura 5.1 Porcentaje de pérdida de peso del par Al/Cu
Ensayes "Alambre sobre Tornillo"

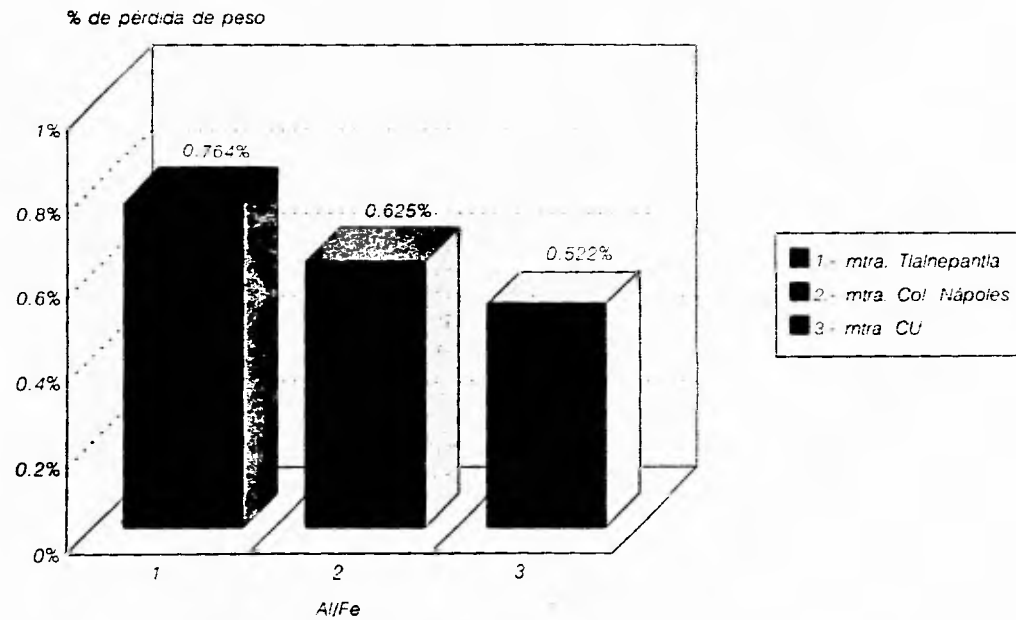


Figura 5.2 Porcentaje de pérdida de peso de! par Al/Fe
"Ensayes Alambre sobre Tornillo"

METODOLOGIA DE LOS PLATOS DE SULFATACION.

Estación Tlalnepantla.

Tabla 5.8.1

PERIODO DE EXPOSICION	VELOCIDAD DE DEPOSICION SO ₂ (mg./m ² día)	CONCENTRACION SO ₂ (mg./m ³ o ppm)
18/Dic/93 - 19/Ene/94	24.35	0.0292
20/Ene/94 - 23/Feb/94	22.20	0.0266
25/Feb/94 - 27/Mar/94	23.99	0.0287

Estación Colonia Nápoles.

Tabla 5.8.2

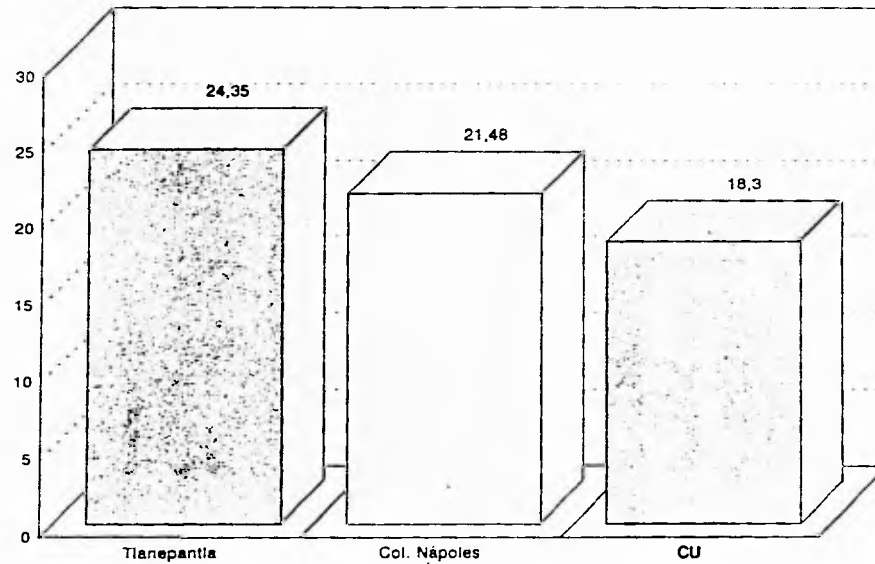
PERIODO DE EXPOSICION	VELOCIDAD DE DEPOSICION SO ₂ (mg./m ² día)	CONCENTRACION SO ₂ (mg./m ³ o ppm)
18/Dic/93 - 19/Ene/94	21.48	0.0257
20/Ene/94 - 23/Feb/94	18.98	0.0277
25/Feb/94 - 27/Mar/94	21.12	0.0253

Estación Ciudad Universitaria.

Tabla 5.8.3

PERIODO DE EXPOSICION	VELOCIDAD DE DEPOSICION SO ₂ (mg./m ² día)	CONCENTRACION SO ₂ (mg./m ³ o ppm)
18/Dic/93 - 19/Ene/94	18.30	0.0219
20/Ene/94 - 23/Feb/94	16.90	0.0202
25/Feb/94 - 27/Mar/94	18.65	0.0223

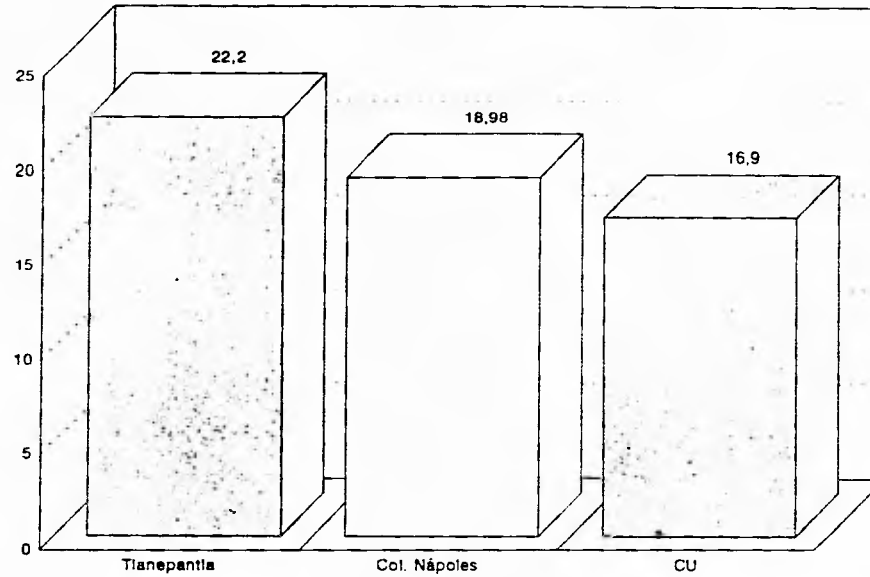
Velocidad de deposición de dióxido de azufre
(mg/m² -día)



Estación
(periodo del 18/Dic/94 al 19/Ene/94)

Figura 5.3.1 Velocidad de deposición de contaminantes sulfurados en forma de SO₂

Velocidad de deposición de dióxido de azufre
(mg/m² -día)



Estación
(periodo del 20/Ene/94 al 23/Feb/94)

Figura 5.3.2 Velocidad de deposición de contaminantes sulfurados en forma de SO₂

Velocidad de deposición de dióxido de azufre
(mg/m² - día)

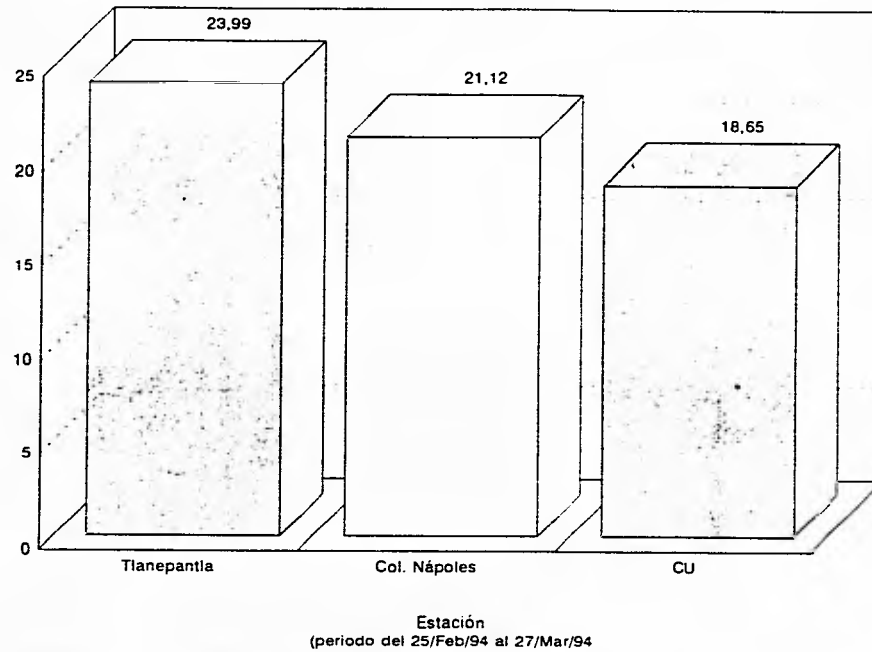


Figura 5.3.3 Velocidad de deposición de contaminantes sulfurados en forma de SO₂

DATOS CLIMATOLOGICOS.

Tabla 5.9.1

ESTACION CIUDAD UNIVERSITARIA

PERIODO DE MONITOREO	TEMPERATURA PROMEDIO	HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO
18/Dic/93 - 19/Ene/94	11.04 °C	58.37 %
20/Ene/94 - 23/Feb/94	14.37 °C	65.55 %
25/Feb/94 - 27/Mar/94	20.38 °C	55.15 %

Tabla 5.9.2

ESTACION PUERTO AEREO

PERIODO DE MONITOREO	TEMPERATURA PROMEDIO	HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO
18/Dic/93 - 19/Ene/94	12.5 °C	56.40 %
20/Ene/94 - 23/Feb/94	15.21 °C	69.17 %
25/Feb/94 - 27/Mar/94	19.10 °C	53.6 %

Con los resultados obtenidos (ver figuras 5.1 y 5.2) se puede comprobar que dentro de la misma ciudad de México, los valores obtenidos son diferentes. Esta diferencia queda de manifiesto asimismo al estudiar la contaminación en estas mismas estaciones (tablas 5.8 y figura 5.3)

Los parámetros climatológicos de las mismas zonas y periodos de tiempo se presentan en las tablas 5.9.

Dentro del proyecto MICAT, se disponen de resultados obtenidos anteriormente para la estación de Ciudad Universitaria, estos resultados son.

Metal	Velocidad corrosión micrómetros
Fe	5.0562
Zn	0.4668
Cu	0.8397
Al	0.0291

Tabla 5.10 Velocidad de corrosión de probetas metálicas planas, proyecto MICAT periodo

Junio 1991- Junio1992

Mes	Húmeda relativa promedio
Diciembre	60%
Enero	70%
Febrero	65%
Marzo	60%
Abril	70%

Tabla 5.11 Valores mensuales de humedad relativa, proyecto MICAT periodo Diciembre 1993 - Abril 1994.

Con lo determinado por el ensayo CLIMAT se observa lo siguiente:

Comparando, en dos periodos de tiempo diferentes, los valores de la velocidad de corrosión y del contenido de SO_2 para las dos estaciones de que se dispone de datos, Tlalnepantla y Ciudad Universitaria, se puede comprobar que no ha habido cambios sustanciales (ver figuras 5.4 y 5.5).

En el caso de Ciudad Universitaria resulta interesante señalar que se presenta una ligera disminución con respecto al primer trabajo en los índices de corrosividad atmosférica (I. C. A.) para ambos pares galvánicos.

Al analizar los contenidos de SO_2 en la atmósfera en los dos periodos, se refuerzan los resultados anteriores.

Los datos obtenidos para la estación de la Colonia Nápoles, intermedios entre los de Tlalnepantla y Ciudad Universitaria, permiten afirmar que no es posible considerar como representativo de la agresividad atmosférica de la Ciudad de México, a una sola estación de monitoreo.

Respecto a la metodología utilizada, el par galvánico Al/Fe está reportado como mas sensible a atmósferas marinas que el par Al/Cu, siendo éste último mas adecuado para atmósferas industriales. Sin embargo, en este estudio y por lo que se refiere a la ciudad de México, en todos los casos el par Al/Fe resultó ser el que presentaba mayor velocidad de corrosión, siendo esta una de las aportaciones importantes de este trabajo

Comparando los valores obtenidos, con los de otros autores, se puede observar que en el caso de España, un estudio realizado por el C.E.N.I.M (Tabla 5.11 y ref. 13), los valores para el par Al/Cu, salvo casos excepcionales, son mayores que para el par galvánico Al/Fe.

Respecto a México en un estudio reciente, aún no publicado, realizado en el estado de Tabasco (Tabla 5.12) sucede lo contrario siendo los valores del par Al/Cu, en la mayoría de los casos, mayores que los del par Al/Fe.

De lo anterior se desprende en principio que no se puede asignar a priori una determinada sensibilidad a un par galvánico en función atmósfera y que los datos reportados en la literatura para un país determinado, no pueden generalizarse.

Las condiciones microclimáticas y de contaminación propias de la zona de estudio parecen ser tan características, que obligan a realizar el estudio al menos con los dos pares galvánicos, Al/Cu y Al/Fe.

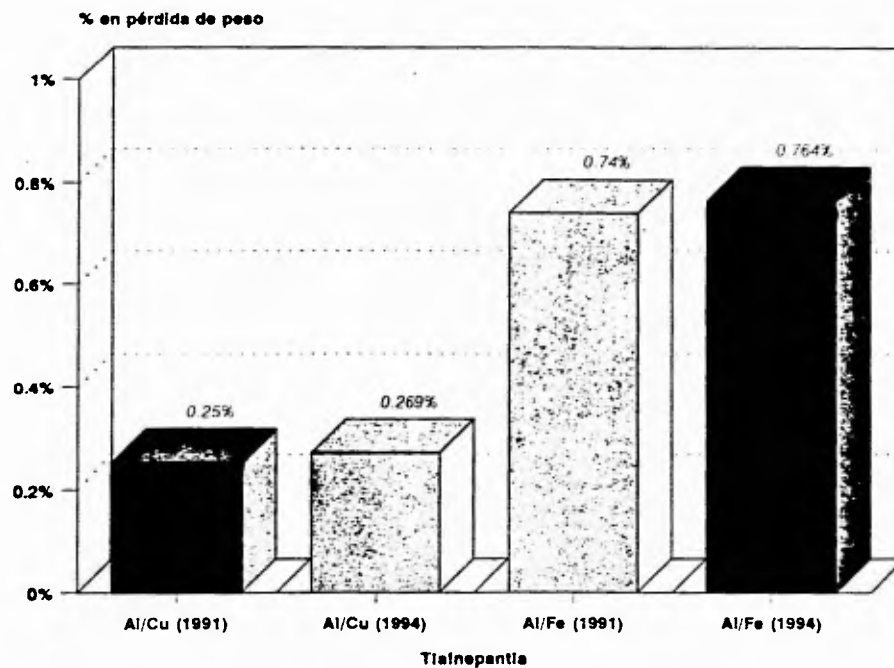


Figura 5.4 Gráfica comparativa, ensayo "Alambre sobre Tornillo" de Tlalnepantla en dos periodos diferentes de tiempo

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

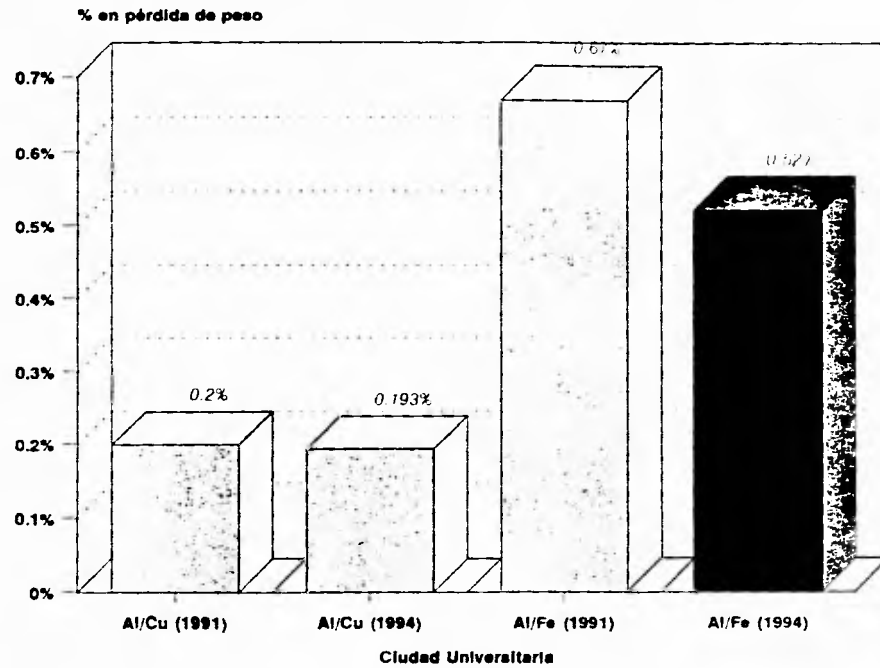


Figura 5.5 Gráfica comparativa, ensayo "Alambre sobre Tornillo" de Ciudad Universitaria en dos periodos diferentes de tiempo

ESTACION	Al/Fe	Al/Cu
Madrid	0.06	0.27
El Escorial	0.05	0.22
Zaragoza	0.06	0.83
Barcelona	2.6	3.6
Sestao	4.3	5.9
Avilés	2.1	2.3
Cabo Negro	13.2	12.7
Cádiz	0.46	0.75
Alicante	1.3	2.2

Tabla 5.12 Pérdidas de peso (%) en probetas "alambre sobre tornillo" al cabo de tres meses.

Nombre estación	Número	Al/Fe (%)	ICM	Al/Cu (%)	ICI
Cd. Pemex oficinas.	1	0.25	I	0.025	I
Batería J Colomo	2	0.23	I	0.19	I
A. Cerdán	3	3.79	II	0.08	I
Vernet	4	0.16	I	1.21	II
Belem	5	0.48	I	1.20	II
Batería El Golpe	6	1.54	I	0.83	I
C. Green	7	0.71	I	1.70	II
Tecoluitilla	8	0.35	I	0.35	I
P. Ceiba	9	0.75	I	0.54	I
PIJJE	10	0.36	I	0.25	I
Guerrero	11	--		--	
S. Sarlat	12	0.15	I	0.19	I
Tabasquillo	13	0.17	I	0.38	I
UPQ La Venta	14	0.59	I	0.43	I
Batería La Venta	15	0.43	I	0.39	I
Río Tonalá	16	0.45	I	1.77	II
Zona Arq. La Venta	17	1.55	I	0.39	I
Aguadulce	18	0.95	I	0.63	I
Bat. Agave	19	0.18	I	0.25	I
U. J. A. T.	20	0.19	I	0.24	I
Pedrero	21	0.22	I	0.15	I
R. H. Puerco	22	0.24	I	0.29	I
Bat. Samaria	23	0.29	I	1.57	II
P. Iny. Samaria	24	0.23	I	0.30	I
Arch. Muerto	25	0.18	I	0.37	I
Comp. Ductos	26	0.27	I	0.43	I
Cunduacán	27	0.40	I	0.57	I
Cárdenas	28	0.41	I	0.30	I
Frontera	29	0.27	I	2.15	III
Zapata	30	0.25	I	0.33	I
Codazpet	31	0.23	I	0.29	I

Tabla 5.13 Clasificación corrosividad atmósferas

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES

VI.- CONCLUSIONES

Con los resultados experimentales obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- i) La técnica de "Alambre sobre Tornillo" ha demostrado ser un método rápido y eficaz para determinar el grado de corrosividad atmosférica.
- ii) Su tiempo usual de exposición (tres meses) permite conocer la variabilidad en el grado de corrosividad en diferentes periodos de tiempo, incluso dentro de un mismo año.
- iii) Con los resultados obtenidos, determinar el grado de corrosividad atmosférica en la Ciudad de México a partir de una sola estación de monitoreo, no sería representativo, ya que como lo determinó este estudio esto depende directamente del entorno en que se encuentra, reforzando la idea de microclimas.
- iv) El par galvánico Al/Fe resultó ser el que representaba mayor velocidad de corrosión en las tres estaciones de monitoreo.

CAPÍTULO VII
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

VII.- REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- 1 - W.H. Ailor, "Handbook on corrosion testing and evaluation", Ed. Wiley.(1977).
- 2 - J. Avila, J. Genescá, S. Feliu y M. Morcillo "Corrosión Atmosférica I. Agresividad potencial de la Atmósfera en ausencia de contaminantes", LatinAmerican Journal of Metallurgy and Materials Vol 8 (1988) 52 - 62
- 3 - J. Avila, J. Genescá, S. Feliu y M. Morcillo "Corrosión Atmosférica, I.- Agresividad potencial de la Atmósfera en ausencia de contaminantes", LatinAmerican Journal of Metallurgy and Materials. Vol 8 (1988) 52 - 62.
- 4 - J. Avila y J. Genescá, "Termodinámica y cinética de corrosión", Fac. de Química (1985).
- 5 - H. Bravo y R. Torres, "Niveles de los contaminantes en la atmósfera de la ciudad de México, alternativas de Control". Ciclo Ecología y Desarrollo Industrial. PEMEX (1984).
- 6 - D.P. Doyle y T.E. Wright, Alcan News, Marzo (1969).
- 7 - D.P. Doyle y T.E. Wright, "Atmospheric corrosion", W.H. Ailor, Ed. Wiley, Nueva York (1982) 227 - 243.
- 8 - D.P. Doyle y H.P. Godard, "Nature", 200 (1963) 38.
- 9 - D.P. Doyle y H.P. Godard, "Proc. 3rd. International Congress on Metallic Corrosion", MIR Publishers, Vol IV, Moscú 1969, 429 - 437.
- 10 - D.P. Doyle y T.E. Wright "Quantitative assesment of atmospheric galvanic corrosion", ASTM STP 978, H.P. Hack, Ed. American Society for Testing and Materials, Filadelfia (1988) 161 - 173.
- 11 - U.R. Evans, "The corrosion and oxidation of metals: scientific principles and practical applications". Ed. Edward Arnold (1977).
- 12 - Feliu S. "Agresividad atmosférica y predicciones de corrosión", Rev. Corrosión y Protección, Vol. 8 Num 1 (1977) 3 - 9.
- 13 - Feliu S. y Morcillo M., "Análisis de la corrosividad atmosférica en España mediante probetas alambre sobre tornillo", Rev. Metal. CENIM, 13 (4) (1977) 212
- 14 - Feliu S. y Morcillo M., "Corrosión y protección de los metales en la atmósfera".

Bellaterra, S.A. Barcelona (1982).

- 15.- Feliu S. y Morcillo M. "Datos de corrosión atmosférica en España y su interpretación". Rev. Metal CENIM VOL. 14 198 - 203 (1978)
- 16.- Feliu S. y Morcillo M. (1975). "Estudio de la corrosión del acero dulce, Zinc y cobre en la atmósfera de Madrid". Rev. Metal. Madrid 11, 159 - 170.
- 17.- J. Genescá y C. Rodríguez "Calibración de la agresividad de la atmósfera del suroeste de la ciudad de México". Rev. Int. Contam, Ambient. 8 (2), 82 - 90 (1992).
- 18.- H. Gutmman y P.J. Sereda, "Metal Corrosion in the atmosphere" ASTM STP 435, 1968, p. 522.
- 19.- Hernández Peña Patricia, Martínez Barragan Lina. Tesis de Licenciatura, (001-00522-h1-1992). "Corrosión Atmosférica en Materiales Ingenieriles", Aplicación de la técnica de alambre sobre tornillo. Dr. Joan Genescá Llongueras (1992).
- 20.- ISO. 9293 "Corrosion of metals and alloys". Classification of corrosivity categories of atmospheres. Ginebra, Suiza. (1992).
- 21.- ISO. 9226. "Corrosion of metals and alloys". Corrosivity of atmospheres. Methods of determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Ginebra, Suiza (1992).
- 22.- Morcillo M. (1992). "Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica (MICAT)". Primeros resultados. Rev. Iber. Corros. Prot. 23, 79 - 84.
- 23.- Ortíz Herbert Saúl, Tesis de Licenciatura, (001-00522-02-1988). "Corrosion Atmosférica. Obtención del tiempo de humectación", Dr. Joan Genescá Llongueras. 1988.
- 24.- G Schickorr, "Korrosionverhalten von Zink", Metall-Verlag GMBH, Berlin (1962).
- 25.- G Schickorr, "Werkst. Korros", 14 (1963) 69; 15 (1964) 457; 18 (1967) 514.
- 26.- L.L. Schneir. "Corrosion", Ed. News - Butter worths, Vol. 1y2 (1980).
- 27.- J.C. Scully. "Fundamentals of Corrosion", Ed. Pergamman press. (1990).
- 28.- ASTM. (1991). "Standard practice for monitoring atmospheric SO₂ using the sulfation plate technique". Filadelfia, Vol. 03.02, pp 362-366 G 91 -86
- 29.- Tomashov N.D., "Corros Sci", 1, 77(1961).

- 30.- N.D. Tomashov , "Theory of corrosion and protection of metals". Mac Millan Co .
Nueva York (1966) 367.