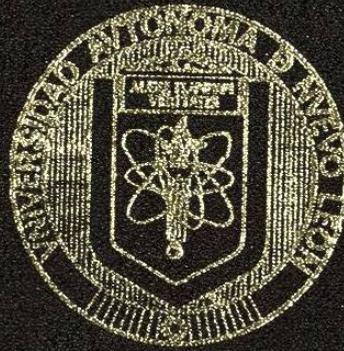


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



EVALUACION DE LA CORROSION ATMOSFERICA DEL ACERO  
EXPUESTO EN DIVERSAS ATMOSFERAS

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON  
ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:  
ROBERTO CARLOS GARCES RODRIGUEZ

CD. UNIVERSITARIA

MAYO 2002

EVALUACION DE LA CORROSION ATMOSFERICA DEL ACERO  
R. C. E. R.  
EXPUES TO EN DIVER SAS ATMOSFERAS

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2002  
.G3724



1020147933

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



EVALUACION DE LA CORROSION ATMOSFERICA DEL ACERO  
EXPUESTO EN DIVERSAS ATMOSFERAS

TESIS

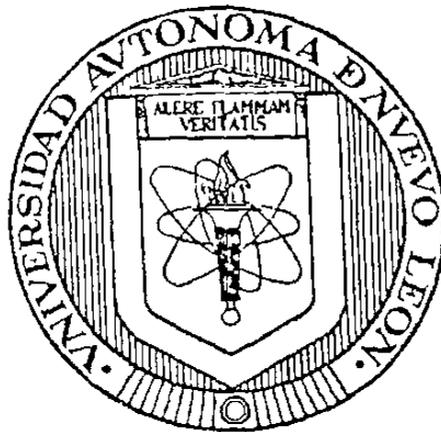
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA CON  
ESPECIALIDAD EN MATERIALES

PRESENTA:  
ROBERTO CARLOS GARCES RODRIGUEZ

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**"EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DEL  
ACERO EXPUESTO EN DIVERSAS ATMOSFERAS".**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES**

**PRESENTA**

**ROBERTO CARLOS GARCÉS RODRÍGUEZ .**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**MAYO 2002**

981882

TM

Z5853

.M2

FJME

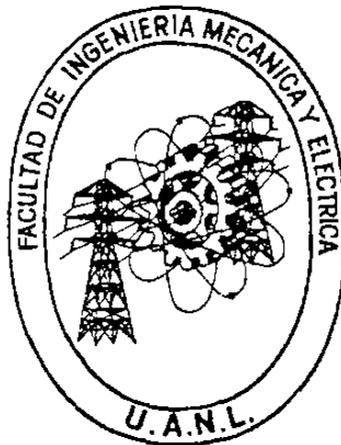
2002

.E3724



FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA Y ELECTRICA**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**"EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DEL  
ACERO EXPUESTO EN DIVERSAS ATMOSFERAS".**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES**

**PRESENTA**

**ROBERTO CARLOS GARCÉS RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Evaluación de la corrosión atmosférica del acero expuesto en diversas atmósferas" realizada por el alumno Roberto Carlos Garcés Rodríguez, con matrícula 1005962 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El comité de tesis



Dra. Patricia Rodríguez López

Presidente



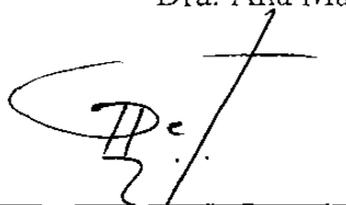
Dr. Alberto Pérez Unzueta

Secretario



Dra. Ana María Guzmán Hernández

Vocal



Vo. Bo.

Dr. Guadalupe Alán Castillo Rodríguez

División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N. L., Mayo de 2002.

## DEDICATORIA

A Dios:

Por darme la oportunidad de vivir una vida plena en compañía de personas maravillosas que durante mi camino has puesto en mi camino. Gracias Dios mío por que ahora estoy convencido que en los momentos difíciles siempre estuviste conmigo. Por la familia que me regalaste que son personas extraordinarias con las que he compartido momentos maravillosos. Pero sobre todo por hacer este sueño realidad.

A mi Mamá.

A ti que siempre me has enseñado a vivir, ser responsable y honesto, que sin ti nunca hubiera encontrado el sentido a la vida, gracias por cuidar siempre de mí y tenerme confianza, de todo corazón siempre estarás en mi mente.

A mis hermanos

Gracias por estar conmigo, y disfrutar de la vida, ustedes son todo mi mundo.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la dicha de vivir y soñar.

A mi Mamá y hermanos, por estar siempre a mi lado con su apoyo incondicional.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica ( Universidad Autónoma de Nuevo León), ya que aquí he pasado mis mejores años de estudio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo para la realización de mis estudios de maestría.

Al Doctorado en Ingeniería de Materiales (DIMAT) por ayudarme a ver lo hermoso de la ciencia.

Al Dr. Alberto Pérez Unzueta, por su apoyo, asesoría, consejos y su gran enseñanza.

Al Dr. Rafael Colás Ortiz, por su gran enseñanza y asesoría

A la Dra. Patricia Rodríguez López por su apoyo y asesoría.

A la Dra. Ana María Guzmán Hernández por su apoyo y sugerencias.

A todos los Doctores del DIMAT por sus conocimientos y experiencias que me han transmitido.

A todas las personas que de algún modo contribuyeron a la realización de este documento.

A mis amigos Maribel, Adriana, Andrés, Edgar por todos los momentos tan bonitos que pasamos.

## RESUMEN

Uno de los problemas más graves causados por los avances de la tecnología, es la corrosión de los materiales como consecuencia de la agresividad atmosférica, incluyendo la destrucción de las estructuras metálicas, construcciones, metales y aleaciones, debido a que 80% están expuestos a este medio.<sup>(1)</sup>

Los aspectos socioeconómicos de la corrosión han sido revisados por Feliú<sup>(8)</sup>, Tomashov<sup>(9)</sup> y desde 1968 con la publicación del informe Hoar<sup>(10)</sup> se tiene un conocimiento más preciso de las pérdidas, directas e indirectas, que la corrosión significa para los países desarrollados. Está aceptado que el 50% de estas pérdidas es debida a la corrosión atmosférica, ya que el 80% de las estructuras metálicas, construcciones, metales y aleaciones están expuestos a este medio. Debido a lo anterior, muchos países están interesados en la construcción de mapas de corrosividad atmosférica que les pueda ayudar a predecir los niveles de corrosividad que presentarán dichos sitios. Estos mapas pueden corresponder a una ciudad<sup>(42-45)</sup> e incluso a una determinada construcción situada en la misma ciudad, por ejemplo un palacio<sup>(46)</sup> o bien una región<sup>(47-48)</sup>, un país<sup>(49-56)</sup> e incluso a todo un continente<sup>(57)</sup>.

En este estudio se plantearon los siguientes objetivos:

1. Elaborar el mapa de Villahermosa, Tabasco de corrosividad atmosférica durante un año de exposición.

2. Comprobar algunos de los mecanismos de corrosión atmosférica propuestos por diversos investigadores.
3. Colaborar con datos de velocidad de corrosión para la construcción del mapa de corrosividad atmosférica en San Nicolás de los Garza y Monterrey, municipios de Nuevo León.
4. Comprobar el cumplimiento de ciertas ecuaciones matemáticas propuestas por diversos investigadores para la velocidad de corrosión a través del tiempo y otra para el cálculo de tiempo de humectación.
5. Identificar los principales productos de corrosión y su morfología.

Nuestra hipótesis de trabajo es que a pesar de que Tabasco presenta mayores promedios anuales de humedad relativa durante el año que Nuevo León, la contaminación de sulfatos y cloruros que se presentan con mayor grado en Nuevo León provocarán altas velocidades de corrosión en las probetas de estudio.

Para el cumplimiento de estos objetivos se requirió acometer gradualmente distintas etapas. Primero, se expusieron durante seis meses las probetas de acero en una atmósfera netamente contaminada, los dos lugares de prueba pertenecen al Estado de Nuevo León, la segunda fase se llevó a cabo durante un año en Huapinol, Parrilla, Tabasco. El acero se expuso al desnudo, se encontró que la estación del Estado de Tabasco es una categoría de corrosividad C3 según los factores climáticos y de C4 según la velocidad de corrosión. Cabe mencionar que este resultado es debido a las altas humedades relativas que presenta Tabasco durante el año. En las estaciones de Nuevo León se dió una categoría tentativa debido a que se llevó el estudio durante seis meses, dicha categoría es C5 según la velocidad de corrosión.

La metodología del proyecto, se basa principalmente en la determinación de las velocidades de corrosión de metales, seguida en el programa ISOCORRAG,

que viene realizando en el seno de la International Standard Organization (ISO), en el Grupo de Trabajo 4 de la Comisión Técnica 156.1.

Dentro de este trabajo de investigación se programó el estudio sistemático de probetas adicionales, para el aspecto del mecanismo de corrosión y del ataque sufrido por el acero expuesto, mediante la aplicación de diferentes técnicas de laboratorio (microscopía electrónica de barrido y metalografías). A través de la técnica de DRX de polvo se identificaron los productos de corrosión goetita y lepidocrocita como los principales productos en la herrumbre. Mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido se identificó con ayuda de la literatura científica consultada las morfologías de diversos productos de corrosión (goetita, lepidocrocita, magnetita, etc.). Existen propuestas que tratan de explicar el mecanismo de corrosión del acero expuesto al ambiente, éstos son los llamados “nidos de sulfatación” que fueron identificados en nuestro estudio, también cabe mencionar que dicha corrosión iniciaba en las inclusiones no metálicas como lo propone otro mecanismo de corrosión.

Con las metalografías se observó que el ataque primero fue preferencial y después de forma intergranular.

Es fundamental la base de datos e información que proporciona esta investigación para que en un futuro sea utilizado para la construcción de mapas de corrosividad en dichos lugares de estudio. En las estaciones de Nuevo León notamos que fue más importante el nivel de  $\text{SO}_2$  y CO que los otros contaminantes, en Tabasco a pesar de tener índices muy bajos de  $\text{SO}_2$  y nada significativa de cloruros, su nivel de corrosividad se debió más a los altos niveles de humedad relativa que presenta durante todo el año.

## INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre la corrosividad atmosférica en México son relativamente recientes. Tenemos conocimiento de que en la década de 1970 se pudieron iniciar éstos en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos Mecánicos de la comisión Federal de Electricidad en el grupo liderado por el Ing. Javier Caballero. Probablemente en PEMEX y en el IMP se hayan hecho estudios semejantes conducentes a evaluar la agresividad de la atmósfera para obtener información relativa a la recomendación de recubrimientos protectores adecuados para PEMEX, pero al no existir material publicado se hace difícil aventurar quiénes fueron pioneros en el área en nuestro país.

En el ámbito Universitario, el Grupo de Corrosión de la Facultad de Química de la UNAM lleva adelante a principios de 1980, los primeros estudios, respaldados por los Dres. Sebastián Feliú y Manuel Morcillo del CENIM, Madrid, España, gracias a un proyecto conjunto CONACYT-CSIC llamado precisamente Corrosión Atmosférica.

A finales de la década de 1980 inician los grandes proyectos en el campo de la corrosión atmosférica. Así, entre los más importantes cabe señalar el proyecto Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica, MICAT, coordinado por el Dr. Manuel Morcillo. Pero sólo se pudieron colocar 4 estaciones en todo el país (San Luis Potosí, Cuernavaca, Distrito Federal y Acapulco). Años después se instaló otra en Mérida con el apoyo del CINVESTAV-Mérida.

Es importante evaluar diversos tipos de atmósferas para tener un mejor conocimiento de las corrosividades del país, es por lo anterior que decidimos iniciar en 1999 el estudio en Nuevo León y en el 2000-2001 en Tabasco. El principal objetivo es la construcción de los mapas de corrosividad atmosférica de Tabasco, Nuevo León y dejar una metodología que sirva de base para la construcción de los mapas de corrosividad en otras ciudades. Lo anterior se logrará mediante la medición de directa de la velocidad de corrosión de las probetas de acero expuestas en dichos lugares, como también la medición de las variables atmosféricas tanto climáticas como de contaminantes para utilizar la clasificación ISO 9223-9225 para caracterizar dicha atmósfera.

También se identificará los principales productos de corrosión, así como su morfología con ayuda de literatura científica actualizada. Se buscará evidencias que apoyen a una propuesta de explicación del mecanismo de corrosión del acero expuesto al medio ambiente.

# ÍNDICE

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iv
Introducción	vii
Capítulo I. Corrosión	
1.0 Definición	1
1.1 Fenómenos de Corrosión	2
1.2 Corrosión electroquímica	2
1.2.1. Componentes de una celda electroquímica	3
1.3 Termodinámica de la corrosión	6
1.4 Serie Galvánica	8
1.5 Diagrama de Pourbaix	10
Capítulo II: Corrosión Atmosférica	
2.0 Definición	13
2.1 Corrosión atmosférica metálica	13
2.2 Tipos de corrosión atmosférica	14
2.3 Importancia Económica	15
2.4 Factores que propician a la corrosión atmosférica	16
2.5 Factores climáticos	16
2.5.1. Tiempo de humectación/Humedad relativa	16
2.5.2. Humedad Relativa	
2.5.3. Naturaleza discontinua del proceso corrosivo y formación global	20
2.5.4. Temperatura	22

2.5.5. Vientos	23
2.6 Factores contaminantes	23
2.6.1. Cloruros	24
Capítulo III: Los Climas de México	
3.0 Introducción	26
3.1. Los climas en México	27
3.2. Tabasco	31
3.2.1. Clima del municipio de Centro, Tabasco (Villahermosa)	32
3.3 Nuevo León	32
Capítulo IV: Estudios de Corrosividad Atmosférica	
4.0 Introducción	34
4.1. Criterios para la elaboración de mapas de corrosión atmosférica	35
4.2. Mapas de Riesgo potencial de corrosión atmosférica	39
4.3 Tiempo de Humectación	42
4.4 Índice de deterioro de Brooks	42
4.5 Mapas de Corrosividad atmosférica según ISO	43
4.6 Mapas de corrosividad atmosférica a partir de las funciones dosis/respuesta (Tratamiento Estadístico)	44
4.7 Estimación de corrosión	45
Capítulo V: Corrosión atmosférica del acero	
5.0 Mecanismo de corrosión para el hierro y acero, expuestos a la atmósfera	50
5.1 Velocidad de formación para las capas de herrumbres	51
5.2 La morfología de las capas de herrumbre natural	52
5.3 Mecanismos químicos de la corrosión del hierro y acero	53
Capítulo VI: Metodología	67
Capítulo VII: Resultados y Discusión	85
Capítulo VIII: Conclusiones	121
Capítulo IX. Recomendaciones	123
Referencias bibliográficas	125

Anexo A	136
Anexo B	145
Anexo C	149
Índice de Figuras	151
Índice de Tablas	156
Resumen Autobiográfico	160