Rev. Int. Contam. Ambient. *18* (1) 27-32, 2002

CARACTERIZACIÓN DE LA AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA SOBRE LOS MATERIALES METÁLICOS ESTRUCTURALES EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Ramón MUÑOZ LEDO y Jorge URUCHURTU CHAVARÍN

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Palmira, 62490, Temixco, Morelos, México. Correo electrónico: juch@iie.org.mx

(Recibido junio 2001, aceptado noviembre 2001)

Palabras clave: corrosividad, acero, cinc, cobre, aluminio, normas ISO

RESUMEN

En este trabajo se presenta la caracterización de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales en diferentes sitios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Bajo normas de la Organización Internacional de Estándares (ISO) y a partir de datos ambientales se obtuvo la corrosividad del acero, cinc, cobre y aluminio. Éstas van de muy baja a alta dependiendo de las condiciones ambientales de la zona y del material que se considere.

Key words: corrosivity, steel, zinc, copper, aluminium, ISO

ABSTRACT

This work presents the characterization of atmospheric aggressiveness of structural metals in different sites in the Metropolitan Zone of Mexico City. Under the norms set by the International Standards Organization, and using environmental data, the corrosivity levels of steel, zinc, copper and aluminium were obtained. The range goes from very low to high, depending on the environmental conditions of the site and the material.

INTRODUCCIÓN

Corrosión atmosférica

En el más amplio sentido, la corrosión es la degradación de los materiales para adoptar estados más estables en la naturaleza, siendo la corrosión metálica un fenómeno electroquímico provocado por el ambiente. Se puede considerar a la corrosión atmosférica como una forma o un tipo de corrosión que resulta de la interacción de una atmósfera natural y un material metálico expuesto en la misma. Por atmósfera natural debe entenderse tanto la exterior como la interior de lugares de abrigo. Las características físicas más importantes de una atmósfera natural son la temperatura y la humedad relativa. Por lo tanto, los factores que afectan principalmente a los materiales desde el punto de vista de su exposición a la atmósfera son climáticos y químicos (Barton 1976).

Frecuentemente las estructuras metálicas están sometidas a la acción de ambientes agresivos naturales, siendo las expuestas a la atmósfera las más abundantes y la principal causa de pérdidas por corrosión. Éstas están calculadas en 50 % de las pérdidas totales por corrosión de un país y se aproximan a un total entre 4 y 6 % del producto interno bruto (PIB) (Tomashov 1966). La corrosión atmosférica es ocasionada por las altas temperaturas ambientales, la humedad y los agentes contaminantes agresivos de origen natural o antrópico del medio en el que están expuestos los materiales (Kucera y Matsson 1974).

Factores climáticos

La excesiva duración de los ensayos y el hecho de que dentro de cada tipo de atmósfera existan numerosos factores que afectan la corrosión, que dependen de la evolución de la zona bajo estudio (geografía, crecimiento indus-

TABLA I. CATEGORÍAS DE AGRESIVIDAD DE LA ATMÓSFERA (ISO 1987)

Categoría de agresividad	Pérdida de masa				
	Acero µm/año	Cinc µm/año	Cobre µm/año	Aluminio g/m²año	Corrosividad
C1	≤ 1.3	≤ 0.1	≤ 0.1	Desp.	Muy baja
C2	> 1.3 ≤ 25	> 0.1 ≤ 0.7	> 0.1 ≤ 0.6	≤ 0.6	Baja
C3	> 25 ≤ 50	> 0.7 ≤ 2.1	> 0.6 ≤ 1.3	> 0.6 ≤ 2	Media
C4	> 50 ≤ 80	> 2.1 ≤ 4.2	> 1.3 ≤ 2.8	> 2 ≤ 5	Alta
C5	> 80 ≤200	> 4.2 ≤ 8.4	> 2.8 ≤ 5.6	> 5 ≤ 10	Muy alta

trial, demografía, etc.), así como de la climatología (estacional y diaria) del lugar, dificultan una evaluación de validez permanente. Los ensayos naturales *in situ* valoran la agresividad de una atmósfera y se admite que se mantendrá aproximadamente constante (González 1989). La cuantificación del deterioro de un metal en una atmósfera dada está determinada por la siguiente ecuación:

$$C = \sum_{i=1}^{n} T_i V_i$$

donde: C es la corrosión total o pérdida de masa sufrida por el material metálico a lo largo del tiempo, T_i es el tiempo de humectación de la superficie metálica. Este parámetro, el más importante en la corrosión atmosférica, es el tiempo de humectación de la superficie metálica (τ_i) e igual a la suma del número de horas al año cuya humedad relativa es igual o mayor a 80 % y a una temperatura igual o mayor a 0 °C que es a la que ocurre la corrosión de manera significativa; esto de acuerdo con:

$$T_i = \sum_{i=1}^{n} \tau_i$$

y V_i es la velocidad de corrosión correspondiente a cada período de humectación τ_i.

De lo anterior se observa que los factores climáticos juegan un papel fundamental en la corrosión atmosférica. El tiempo de humectación incluye factores como: temperatura ambiente, precipitación pluvial, viento, humedad relativa, etc., que lo establecen y lo modifican afectando el tiempo que la superficie metálica permanece mojada o húmeda. Además la intensidad de la corrosión se incrementa con la presencia de contaminantes atmosféricos (Kucera y Gullman 1981).

Factores químicos

Uno de los factores que incrementa la intensidad del fenómeno corrosivo en la atmósfera es la composición química de la misma. El bióxido de azufre (SO_2) y el cloruro de sodio (NaCl), son los agentes corrosivos más comunes y significativos de la atmósfera, aunque las partículas y el ácido sulfhídrico (H_2S) en casos particulares también son importantes (González y Otero 1984). El NaCl se incorpora a la atmósfera desde el mar y lejos de éste la contaminación atmosférica se intensifica por la presencia de industrias y núcleos de población, siendo el SO_2 el contaminante principal por su incidencia sobre el proceso corrosivo proveniente de la combustión de sólidos y líquidos que contienen azufre y que se encuentra comúnmente en atmósferas urbanas e industriales (Kucera *et al.* 1990). Esto implica por consiguiente, la necesidad de medir la cantidad de estos contaminantes dispersos dentro de la capa de aire.

Clasificación de la agresividad atmosférica

Desde hace tiempo, el Grupo de Trabajo 4 del Comité Técnico 156 de la *International Standards Organization* (ISO) viene trabajando en la elaboración de normas que permitan clasificar las atmósferas desde el punto de vista de la corrosividad. El fin ha sido establecer guías simplificadas y de fácil utilización, que aparecieron como normas ISO 9223 y 9224 (ISO 1987, 1989).

Con relación a la clasificación de la corrosividad atmosférica, ISO 9223 establece cinco categorías (**Tabla I**), para cada uno de los cuatro metales estructurales típicos (acero al carbón, cinc, cobre y aluminio). Esta misma norma establece para las atmósferas diferentes categorías en cuanto a tiempo de humectación y a concentración de dióxido de azufre y cloruros (**Tablas II a IV**). La estimación de la

TABLA II. CLASIFICACIÓN POR EL TIEMPO DE HUMECTACIÓN (ISO1989)

Categoría	Tiempo de humectación	
	Horas/Año	% Año
T1	$\tau < 10$	$\tau < 0.1$
T2	$10 \le \tau \le 250$	$0.1 \le \tau \le 3$
T3	$250 \le \tau \le 2500$	$3 \le \tau \le 30$
T4	$2500 \le \tau \le 5500$	$30 \le \tau \le 60$
T5	$\tau > 5500$	$\tau > 60$

TABLA III. CLASIFICACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR NIVEL DE SO_2 (ISO 1989)

Categoría	Depositación SO_2 $mg/m^2día$	Concentración SO_2 mg/m^3
P0	$P \leq 10$	$P \leq 0.012$
P1	$10 < P \leq 35$	$0.012 < P \leq 0.04$
P2	$35 < P \leq 80$	$0.04 < P \leq 0.09$
P3	$80 < P \leq 200$	$0.09 < P \leq 0.250$

categoría de corrosividad de una atmósfera puede realizarse a partir de los datos de corrosión en el primer año de exposición o bien a partir de los datos ambientales de la propia atmósfera, como se presenta en las **tablas V a VII**.

TABLA IV. CLASIFICACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR NIVEL DE Cl^- (ISO 1989)

Categoría	Depositación de Cl^- $mg/m^2día$
S0	$S \leq 3$
S1	$3 < S \leq 60$
S2	$60 < P \leq 300$
S3	$300 < P \leq 1500$

La literatura en español trata ampliamente el tema de la corrosión atmosférica desde diferentes puntos de vista (Feliu y Morcillo 1982, Genescá 1994 y Mariaca *et al.* 1999).

En este trabajo, se presenta una primera aproximación para la clasificación de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales típicos de distintos puntos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), a partir de datos ambientales del año 2000 y utilizando la normativa de ISO.

METODOLOGÍA

Los datos fueron obtenidos de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA), la cual se compone de 32 estaciones en donde se miden los contaminantes de manera continua, se promedian los datos y se graban en forma horaria. En este caso, para estudiar la corrosión atmosférica se consideran las estaciones siguientes: Tacuba, ENEP Acatlán, San Agustín, Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal, Cerro de la Estrella, Hangares, Plateros y Coacalco. En ellas se determinan las concentraciones de bióxido de azufre (SO_2) así como la humedad relativa y temperatura. La concentración de NaCl se supone despreciable por no estar las estaciones cerca de fuentes contaminantes de este tipo. La estación UNAM se incluye con propósitos de comparación, ya que existen datos de un estudio de corrosividad atmosférica realizado por (Morcillo *et al.* 1999), durante cuatro años (1989-1992); en donde se hace la clasificación de la agresividad atmosférica mediante la obtención de datos ambientales y medidas de corrosión por pérdida de masa.

Debido a la gran cantidad de datos que se manejan, así como de la incertidumbre que se tiene en la determinación y manejo de la medición de contaminantes atmosféricos, fue necesario revisar y depurar la información primaria obtenida para lograr los resultados en la forma adecuada. Estos se almacenaron en bases de datos (DBF ó XLS) y se hizo una presentación en forma horaria, para cada terminal de medición; de dichos resultados, mediante el uso de EXCEL se extraen los datos a archivos ASCII, en donde con un programa en FORTRAN se leen dichos datos y se calculan los valores promedio diarios, mensuales y anuales. Hay que hacer notar que dentro de la validación de los datos hay horas, días o meses que no tienen resultados (se eliminan, del promedio estadístico), hay puntos donde el aparato no alcanzó el intervalo mínimo o el máximo y se registra con un valor negativo (-99.99). Para este caso se determinó un valor de cero que no se contabilizó para los promedios finales (buscando que los resultados sean lo más representativos posibles). Existen otras indicaciones que son puestas por los responsables de las redes de monitoreo; en ellas se indican falla del monitor, de energía eléctrica, de los analizadores, falta de calibración y de mantenimiento preventivo que también se descartaron durante el análisis.

Los resultados (concentración) de los elementos contaminantes en el aire se expresan inicialmente en ppm (partes por millón de concentración), así como también en microgramos por litro, para poder hacer las comparaciones con otras entidades que realizan dichas mediciones o análisis de la información. Posteriormente

TABLA V. CLASIFICACIÓN DE LA AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA PARA EL ACERO (ISO 1989)

	T1			T2			T3			T4			T5		
	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3
P0-P1	1	1	1-2	1	2	3-4	2-3	3-4	4	3	4	5	4	5	5
P2	1	1	1-2	1-2	1-2	3-4	3-4	3-4	4-5	4	4	5	5	5	5
P3	1-2	1-2	2	2	3	4	4	4-5	5	5	5	5	5	5	5

TABLA VI. CLASIFICACIÓN DE LA AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA PARA EL CINC Y EL COBRE (ISO 1989)

	T1			T2			T3			T4			T5		
	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3	S0-S1	S2	S3
P0-P1	1	1	1	1	1-2	3	3	3	3-4	3	4	5	4	5	5
P2	1	1	1-2	1-2	2	3	3	3-4	4	3-4	4	5	5	5	5
P3	1-2	2	2	3	3-4	3	3-4	4	4-5	5	5	5	5	5	5

TABLA VII. CLASIFICACIÓN DE LA AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA PARA EL ALUMINIO (ISO 1989)

	T1				T2				T3				T4				T5			
	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
P0-P1	1	1	2	2	1	1	2-3	4	3	3	3-4	4	3	3-4	3-4	5	4	5	5	5
P2	1	1	2	2-3	1-2	1-2	3-4	4	3	3	4	4-5	3-4	4	4	5	4	5	5	5
P3	1	1	2-3	3	2	3-4	4	4	3	4	4-5	5	4-5	5	5	5	5	5	5	5

los datos se transformaron a unidades de depositación de SO_2 (mg/m^{2}día) para su comparación de acuerdo con la norma ISO. Además se extrajo de los datos de humedad relativa el número de horas que permaneció por encima del 80 % con la temperatura superior a 0 °C, que es el tiempo de humectación.

La información para determinar el bióxido de azufre y su comportamiento se obtuvo con apego a las Norma Oficial Mexicana NOM–022–SSA1–1993, que está relacionada con la calidad del aire para la protección de la salud.

A la fecha esta metodología de tratamiento de los datos ambientales aunque contemplada dentro de las normas ISO, no se ha hecho extensiva y se aplica por primera vez a la ZMCM.

RESULTADOS

La **tabla VIII** presenta los datos de los promedios anuales y el tiempo en horas totales de humectación de los parámetros ambientales obtenidos para las estaciones de monitoreo consideradas en el estudio. Se obtuvieron humedades relativas mayores a 40 % con excepción de San Agustín, Hangares, Acatlán y Plateros que presenta el valor mínimo. Sin embargo, ésta tiene el mayor número de horas de tiempo de humectación; así como el valor mínimo promedio de temperatura, lo que puede explicar el tiempo de humectación observado, ya que la disminución de la temperatura entre el día y la noche estimula la condensación y por ende el tiempo de humectación, como se demuestra en un estudio de

TABLA VIII. PARÁMETROS AMBIENTALES (PROMEDIO ANUAL) DE LAS ESTACIONES DE LA ZMCM

Estación	Humedad Relativa %	Tiempo de Humectación h/año	Temperatura °C	Depositación SO_2 mg/m^{2}día	Depositación Cl^- mg/m^{2}día
Acatlán	38.6	100	14.7	40.3	Desp.
C. Estrella	40.2	144	16.7	41.1	Desp.
Coacalco	47.2	376	15.2	35.0	Desp.
Hangares	29.7	168	17.0	49.0	Desp.
Merced	42.1	272	16.7	54.3	Desp.
Pedregal	40.6	146	16.0	21.8	Desp.
Plateros	25.5	781	9.2	19.3	Desp.
San Agustín	37.6	100	16.2	31.5	Desp.
Tacuba	40.8	384	15.2	55.1	Desp.
Tlalnepantla	42.9	64	15.5	67.4	Desp.
Xalostoc	46.0	312	16.7	65.6	Desp.
UNAM	62.0	255	15.4	12.8	Desp.

El número de determinaciones fue sobre 8578 muestras para SO_2, 8297 muestras para el % humedad relativa y de 8328 muestras para la temperatura. Máximo de muestras por año: 8760

monitoreo instantáneo de la corrosión realizado por Tres *et al.* (2001). Los tiempos menores de humectación (menos de 200 horas) se presentan en San Agustín, C. Estrella, Hangares, Pedregal y Acatlán; mientras que las temperaturas promedio oscilan entre 14.7 y 17 °C con excepción de Plateros con 9.2 °C

La depositación de SO_2 varía entre un mínimo de 19.25 mg/m²día y un máximo de 67.37 mg/m²día. Valores mayores a 10 mg/m²día y menores o iguales a 35 mg/m²día se presentan sólo en Plateros, San Agustín, Coacalco y Pedregal, mientras que por arriba de este umbral se encuentran las demás. Todos los valores están por encima de la estación UNAM, utilizada con propósitos comparativos (Mariaca *et al.* 1999). La depositación de cloruros se consideró despreciable en todos los casos, ya que no existen fuentes emisoras de este contaminante en las cercanías de las estaciones.

Los mayores valores de depositación se observan en Xalostoc y Tlalnepantla que son zonas industriales, seguidos de Tacuba, Merced, Hangares y C. Estrella que son áreas urbanas densamente pobladas. Le siguen Acatlán que es un área suburbana, pero viento abajo de la zona industrial de Tlalnepantla. El último grupo incluye zonas urbanas y suburbanas como Coacalco, San Agustín, Pedregal y Plateros, viento arriba de las zonas industriales o bien alejados de éstas. De acuerdo con estos resultados, se obtiene la clasificación de la agresividad atmosférica para los cuatro metales estructurales que se presenta en la **tabla IX**.

TABLA IX. CLASIFICACIÓN DE LA AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA PARA LOS MATERIALES EN LA ZMCM

Estación	Fe	Zn	Cu	Al
Acatlán	C1	C1	C1	C1
C. Estrella	C1-C2	C1-C2	C1-C2	C1-C2
Coacalco	C3-C4	C3	C3	C3
Hangares	C1-C2	C1-C2	C1-C2	C1-C2
Merced	C3-C4	C3	C3	C3
Pedregal	C1	C1	C1	C1
Plateros	C2-C3	C3	C3	C3
San Agustín	C1	C1	C1	C1
Tacuba	C3-C4	C3	C3	C3
Tlalnepantla	C1	C1	C1	C1
Xalostoc	C3-C4	C3	C3	C3
UNAM	C2-C3	C3	C3	C3

Se hace notar que la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales, no siempre corresponde con las zonas mas contaminadas, como es el caso de Tlalnepantla (**tabla IX**). Esto se debe a que es indispensable el concurso de la humedad relativa, y mas específicamente del tiempo de humectación, para que se dé la corrosión. La presencia de los contaminantes, básicamente acelera el proceso corrosivo (Morcillo *et al.* 1999).

La **figura 1** presenta el mapa de la ZMCM con la localización de las estaciones y la corrosividad del acero y en la **figura 2** se muestran las estaciones y la corrosividad del cinc, cobre y aluminio (ver **Tabla I**). Para el acero, la corrosividad en San Agustín, Pedregal, Tlalnepantla y Acatlán es muy baja; C. Estrella, y Hangares es muy baja a baja; Plateros es baja a media; Coacalco, Merced y Tacuba es media a alta.



Fig 1. Mapa de corrosividad para el acero en la ZMCM



Fig 2. Mapa de corrosividad para el cinc, cobre y aluminio en la ZMCM

Para el caso del cinc, cobre y aluminio la corrosividad en San Agustín, Pedregal, Tlalnepantla y Acatlán es muy baja, C. Estrella y Hangares es de muy baja a baja, mientras que Xalostoc, Coacalco, Merced y Tacuba presentan corrosividad media.

CONCLUSIONES

Se obtuvo la caracterización de la agresividad atmosférica en diferentes sitios de la ZMCM, a partir de datos ambientales.

La corrosividad que se presenta en las estaciones es: muy baja en San Agustín, Pedregal, Tlalnepantla y Acatlán, de muy baja a baja en C. Estrella y Hangares, de baja a media en Plateros y de media a alta en Coacalco, Merced y Tacuba. Se recomienda corroborar la categorización de la agresividad corrosiva obtenida a través de parámetros ambientales, mediante ensayos de exposición atmosférica de los materiales metálicos en los sitios considerados en este estudio.

AGRADECIMIENTO

Al M. en C. Rafael Ramos Villegas por proporcionar el acceso a los datos base de este estudio.

REFERENCIAS

Barton K. (1976). *Protection against atmospheric corrosion*. Wiley, Londres, 27 p.

Feliu S. y Morcillo M. (1982). *Corrosión y protección de los metales en la atmósfera*. CENIM, Madrid, 246 p.

Genescá J. (1994). *Más allá de la herrumbre III. Corrosión y medio ambiente*. FCE, México, 117 p.

González J.A.(1989). *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. CENIM, Madrid, 78 p.

González J. A. y Otero E. (1984). The effects of sulphur dioxide in the corrosion of iron. Br. Corros. J. *19*, 89-93.

ISO 9223 (1987). Classification of corrosivity categories of atmospheres. ISO, Ginebra.

ISO 9224 (1989). Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres. ISO, Ginebra.

Kucera V. y Gullman J. (1981). *Atmospheric corrosion. ASTM-STP 727*. ASTM, Filadelfia, 215 p.

Kucera V. y Matsson E. (1974). *Corrosion in natural environments. ASTM-STP 558*. ASTM, Filadelfia, 241 p.

Kucera V., Coote A., Henriksen J., Knotkova D., Leygraf C. y Reinhardt U. (1990). Effects of acidifying pollutants on materials including historic and cultural monuments. *Proc. 11th Int. Corrosion Congress,* AIM, Florencia, Vol. 3, pp. 2.433-2.440.

Mariaca L., Genescá J., Uruchurtu J. y Hernández L. S. (1999). *Corrosividad atmosférica*. Plaza y Valdez, México, 209 p.

Morcillo M., Almeida E. Rosales, B., Uruchurtu J. y Marrocos M. (1999). *Corrosión y protección de metales en las atmósferas de iberoamérica. Parte I: Mapa de iberoamérica de corrosividad atmosférica*. CYTED, Madrid, 816 p.

Tomashov N. D. (1966). *Theory of corrosion and protection of metals*. Collier Mc Millan, Londres, 255 p.

Tres G., Arriaga R., Malo J. y Uruchurtu J. (2001), Monitoreo por ruido electroquímico de la corrosión del acero en una atmósfera contaminada. Rev. Int. Contam. Ambient. *17*, 171-178.