

# Predicción a corto y largo plazo de la corrosión atmosférica de metales

M. Morcillo<sup>(\*)</sup>

**Resumen** Es conocido que la corrosión atmosférica de metales es un proceso electroquímico, de tipo discontinuo, que tiene lugar únicamente cuando la superficie metálica se encuentra mojada o humedecida por distintos fenómenos meteorológicos (lluvia, condensación de humedad, niebla, etc.). La magnitud de la corrosión atmosférica sería relativamente baja, a no ser por la presencia de ciertos contaminantes en la atmósfera, el anhídrido sulfuroso (contaminante antropogénico) y los cloruros procedentes del mar (contaminante natural) principalmente. Existen en la bibliografía distintos modelos para predecir la corrosión atmosférica de metales a tiempos breves (por lo general, 1 año) y largos (15, 20 ó más años) de exposición a la atmósfera. En todos ellos, aparecen como variables independientes, además de las correspondientes a los distintos factores meteorológicos (volumen de precipitación, días de lluvia, humedad relativa (HR), T, etc.), el contenido en SO<sub>2</sub> de la atmósfera y la salinidad atmosférica (Cl<sup>-</sup>).

Palabras clave: **Corrosión atmosférica. Velocidad de corrosión. Predicción.**

## Annual and long-term prediction of the atmospheric corrosion of metals

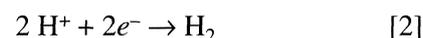
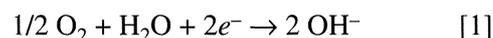
**Abstract** The atmospheric corrosion of metals is known to be a discontinuous electrochemical process which takes place only when the metallic surface is wet or moistened by different meteorological phenomena (rain, humidity condensation, fog, etc.). The magnitude of atmospheric corrosion would be relatively low if it were not for the presence of certain pollutants in the atmosphere, mainly sulphur dioxide (anthropogenic pollutant) and marine chlorides (natural pollutant). The literature contains different models for predicting the atmospheric corrosion of metals over short periods (generally one year) and long periods (15, 20 or more years) of atmospheric exposure. In addition to the different meteorological factors (volume of precipitation, days of rain, relative humidity (RH), T, etc.), atmospheric SO<sub>2</sub> deposition rate and atmospheric salinity (Cl<sup>-</sup>) appear as independent variables in all of these models.

Keywords: **Atmospheric corrosion. Corrosion rate. Prediction.**

### 1. CORROSIÓN ATMOSFÉRICA. GENERALIDADES

A temperatura ambiente, y en una atmósfera perfectamente seca, la corrosión metálica progresa a velocidad infinitesimal, de modo que puede ser ignorada a efectos prácticos; en cambio, adquiere especial importancia sobre superficies humedecidas. El mecanismo es electroquímico. El electrolito está constituido por una película de humedad extremadamente delgada, o una película acuosa cuando el metal aparece perceptiblemente mojado.

Bajo la película de electrolito, la mayoría de los metales expuestos en la atmósfera se corroen por medio del proceso catódico de reducción de oxígeno (1). Únicamente en el caso de un alto grado de contaminación por productos ácidos, adquiere importancia la reacción de descarga de iones hidrógeno (2).



La suma de los tiempos parciales de humectación constituye el llamado tiempo de humectación (TDH), durante el cual es posible la corrosión metálica. Se ha encontrado una buena correlación entre

<sup>(\*)</sup> Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM (CSIC), Avda. de Gregorio del Amo, 8. 28040-Madrid (España).

el TDH y el tiempo en que la humedad relativa (HR) supera un determinado nivel por lo general, superior al 70 % (3 y 4).

De los contaminantes atmosféricos, el NaCl y el SO<sub>2</sub> son los más comunes agentes agresivos de la atmósfera. El NaCl se incorpora a ésta desde el mar, siendo sus efectos muy acusados cerca de la orilla, donde el aire transporta grandes cantidades de sal y se produce una continua pulverización de agua. El SO<sub>2</sub> de origen antropogénico puede llegar a alcanzar concentraciones importantes en las atmósferas próximas a centrales térmicas, atmósferas impurificadas por humos industriales y de hogares domésticos, transporte, etc. Se origina al quemar combustibles que contienen azufre.

## 2. ALCANCE DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

Es un hecho bien comprobado, a través de la experiencia práctica que se tiene sobre el comportamiento de estructuras reales y por los resultados de numerosos ensayos, que la velocidad de corrosión de los metales en la atmósfera puede ser decenas e incluso centenares de veces mayor en unos lugares que en otros, lo que justifica el interés en conocer las variables fundamentales que actúan en la corrosión atmosférica y que originan esta gran dispersión de resultados (5).

En la tabla I se exponen los rangos de velocidades de corrosión encontrados para el acero al carbono, cinc, cobre y aluminio en la Red Iberoamericana-

na de Ensayo de Materiales en la Atmósfera (Proyecto MICAT (6)).

## 3. PREDICCIÓN DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

Expresiones matemáticas que predicen la cuantía de la corrosión, conocidas como relaciones dosis/respuesta, se encuentran en la bibliografía para un gran número de materiales, en particular para el acero y el cinc. Incorporan frecuentemente como variables independientes, la concentración de SO<sub>2</sub>, la concentración de cloruros en zonas cercanas al mar y algún parámetro representativo de la humectación de la superficie metálica (el número de días de lluvia al año, número de horas de HR superior al 80 %, etc.).

Los modelos para predecir el daño por corrosión de los metales en la atmósfera tienen su utilidad para conocer la durabilidad de las estructuras metálicas, para determinar los costes económicos de los daños asociados con la degradación de los materiales, para el conocimiento científico del efecto de las variables ambientales en la cinética del proceso de corrosión atmosférica, etc. Sin embargo, las predicciones de corrosión constituyen un problema complejo por mediar en ellas múltiples factores.

## 4. CORROSIÓN ANUAL

La literatura especializada ofrece un gran número de funciones de daño o relaciones dosis-

TABLA I.- Corrosión anual del acero al carbono, zinc, cobre y aluminio en atmósferas de la Región Iberoamericana (6)

TABLE I.- Annual corrosion rate of low carbon steel, zinc, copper and aluminium in atmospheres of the Ibero-American Region (6)

Tipo de atmósfera	Lugar	País	Acero al carbono (µm)	Zinc (µm)	Cobre (µm)	Aluminio (g · m <sup>-2</sup> )
Rural	Cuzco	Perú	1,4 (mín.)	0,40	0,09 (mín.)	0,02 (mín.)
	S. Juan	Argentina	4,9	0,21	0,17	0,08
	Granada	España	8,5	0,11 (mín.)	0,22	0,04
	Cotové	Colombia	19,6	0,33	0,73	0,14
Urbana	México	México	9,7	0,82	0,64	0,12
	Sao Paulo	Brasil	20,6	1,21	1,69	0,56
Marina	A. do Cabo	Brasil	165,4	4,87	4,12	1,68
	Ubatuba	Brasil	302,0	7,07	3,29	1,17
	Antártida	Chile	24,1	8,00	8,22 (máx.)	3,65
Industrial	Petrox	Chile	167,2	8,58 (máx.)	5,35	5,43 (máx.)
Urbana-Marina	Sines	Portugal	365,0 (máx.)	4,03	3,61	3,79
Industrial-Marina	Leixoes	Portugal	72,4	2,51	4,32	4,09
		R = máx./mín.	261	78	91	272

respuesta que relacionan la corrosión anual con datos ambientales. En la tabla II se presentan algunas de ellas. Hay que apuntar que su aplicabilidad puede ser limitada si, en su obtención, mediante el tratamiento estadístico, la variación de los parámetros ambientales fue reducida, si no se consideraron factores ambientales importantes a nivel global, etc.

Como puede observarse al analizar la tabla II, en las funciones de daño interviene un número reducido de variables significativas: algún parámetro meteorológico, HR, temperatura, o una combinación de ambas (tiempo de humectación), número de días de lluvia, etc., y, por lo general, siempre la contaminación de la atmósfera por SO<sub>2</sub> y/o cloruros.

A la hora de realizar predicciones de la corrosión anual, el conocimiento de los parámetros meteorológicos en una determinada región no suele presentar grandes inconvenientes, habida cuenta de la existencia en los diferentes países de bancos de datos meteorológicos. No así cuando se trata de estimar la contaminación atmosférica por SO<sub>2</sub> y cloruros.

Para el primero de esos contaminantes, la información a nivel mundial es cada vez más amplia. En Europa está constituida desde hace tiempo la Red Internacional EMEP (*Cooperative Programme for*

*Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmissions of Air Pollutants in Europe*), con 97 puntos de muestreo, 6 de los cuales se encuentran en territorio español. En España, además, existe la Red Nacional de Vigilancia y Prevención de la Contaminación Atmosférica (RNVPCA), con 1.547 sensores (1990-1991) (12).

La información disponible en cuanto a salinidad atmosférica es muy escasa (únicamente en estaciones EMEP), lo que dificulta enormemente las predicciones de corrosión anual si no es posible realizar determinaciones *in situ* del contenido de Cl<sup>-</sup> en el aire atmosférico. La dificultad es todavía mayor al intentar realizar predicciones de la salinidad atmosférica en zonas próximas a la costa.

## 5. PREDICCIONES DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA A LARGO PLAZO

El conocimiento del dato de corrosión atmosférica a largo plazo (10, 20 ó más años) constituye una información de enorme interés para los ingenieros de diseño y expertos en corrosión a la hora de realizar distintos cálculos de ingeniería de la estructura metálica y dictaminar las medidas más adecuadas de protección anticorrosiva.

TABLA II.- Funciones de daño para la corrosión atmosférica anual (2 y 7-11)

TABLE II.- Damage functions for annual atmospheric corrosion rates (2 and 7-11)

Material	Ref.	Función de daño	Observaciones
Acero al carbono	7	$C = 0,728 (HR) - 31,19$ (Únicamente atmósferas rurales)	C = corrosión anual en $\mu\text{m}$ (acero, zinc y cobre) y en $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (aluminio)  HR = Humedad relativa media (%)
	8	$C = 0,606 (S) + 22,36$	
	9	$C = 0,346 (S^*) + 36,53$	
	2	$C = 0,259 (S) + 0,431 (Cl) + 20,71$	
	10	$C = 1,59 (S) + 0,96 (Cl) + 2,49$	
	11	$C = 26,6 (S) + 57,4 (Cl) + 33,0$	
Zinc	7	$C = 0,012 (D) - 0,35$ Únicamente atmósferas rurales	T = Temperatura media anual (°C)  D = Número de días de lluvia al año  P = Precipitación total anual (mm)  TDH = Número de horas/año en que HR > 80% y T > 0 °C
	10	$C = 0,0009 (P) + 0,0462$	
	8	$C = 12,26 (TDH) + 0,030 (S) - 3,05$	
	9	$C = 0,0741 (S^*) + 0,671$	
	2	$C = 0,0511 (Cl) + 0,713$	
	10	$C = 2,52 (TDH) + 0,02 (Cl) - 0,05$	
Cobre	10	$C = 0,0216 (HR) - 0,7656$ Únicamente atmósferas rurales	Cl = Salinidad atmosférica media anual ( $\text{mg Cl m}^{-2}\text{d}^{-1}$ )  S = Media anual de velocidad de depósito de SO <sub>2</sub> ( $\text{mg SO}_2 \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ )  S* = Concentración media anual de SO <sub>2</sub> + Cl <sup>-</sup> ( $\text{mg SO}_2 \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ )
	8	$C = 6,75 (TDH) + 0,0010 (S) - 1,86$	
	9	$C = 0,042 (S^*)$	
	10	$C = 2,07 (TDH) + 0,02 (S) + 0,01 (Cl)$	
	11	$C = 2,00 (S) + 1,45 (Cl) + 1,03$	
Aluminio	2	$C = 0,020 (HR) - 1,13$ Únicamente atmósferas rurales	
	10	$C = 0,0001 (P) - 0,2306 (TDH) + 0,0738$	
	7	$C = 0,203 (T) + 0,042 (Cl) - 2,41$	
	11	$C = 0,56 (S) + 0,72 (S) + 0,18$	
	10	$C = 0,832 (TDH) + 0,024 (S) + 0,007 (Cl) - 0,182$	

TABLA III.– Rangos de  $n$  en la ec. [3] obtenidos en exposiciones de larga duración (10-20 años)TABLE III.– Ranges for  $n$  in Eq. [3] for long-term exposures (10-20 years).

Material	Atmósferas rural-urbana lejos del mar	Atmósferas industriales lejos del mar	Atmósferas marinas
Acero al carbono	0,3 – 0,7	0,3 – 0,7	0,6 – 0,9
Zinc	0,8 – 1,0	0,9 – 1,0	0,7 – 0,9
Cobre	0,5 – 0,9	0,6 – 0,8	0,4 – 0,6

En este apartado se presentan dos formas de realizar las estimaciones de corrosión atmosférica para largos períodos de tiempo, una basada en la norma ISO 9224 (17), y otra en la aplicación de una función potencial (ley bilogarítmica), comúnmente empleada por los investigadores en corrosión atmosférica (11).

ISO, en su norma 9224 (17), ha establecido unos valores guía de corrosión basados en la experiencia que se tiene de estudios de corrosión atmosférica de larga duración realizados en distintos países.

Por otro lado, se admite generalmente (11), que la variación de la corrosión atmosférica con el tiempo sigue una ecuación del tipo

$$C = At^n \quad [3]$$

en la que  $C$  es la magnitud de la corrosión al cabo de  $t$  años,  $A$  es la corrosión después del primer año de exposición (corrosión anual) y  $n$  un exponente, generalmente inferior a la unidad, función a su vez del tipo de atmósfera y composición del metal. Parece general la utilidad de esta ley potencial para predecir el progreso de la corrosión, aun después de largo tiempo, con diferentes materiales metálicos.

De acuerdo con la ecuación [3], los datos referentes a la corrosión anual,  $A$ , sirven también para hacer extrapolaciones del comportamiento para períodos de tiempo mucho más largos.

A partir de una recopilación bibliográfica a nivel mundial de datos de exposición de hasta 3 años de exposición, se ha confeccionado la tabla III, donde se presentan los rangos de  $n$  obtenidos para las distintas atmósferas (18).

La bibliografía recoge asimismo, otros modelos, compuestos (potencial-lineal), en los que después de un cierto período de tiempo en el que se observa un decrecimiento gradual de la velocidad de corrosión con el tiempo, ésta sigue un comportamiento lineal (19).

## REFERENCIAS

- (1) FELIU, S. y MORCILLO, M. Corrosión y protección de los metales en la atmósfera, Edic. Bellaterra, Barcelona 1982.
- (2) MORCILLO, M. y FELIU, S. Mapas de España de Corrosividad Atmosférica. CYTED, Madrid 1993.
- (3) ROZENFELD, I.L. Atmospheric corrosion of metals. NACE, Houston (Texas, EE.UU.) 1972.
- (4) BARTON, K. Protection against atmospheric corrosion. Wiley and Sons, Londres (R.U.) 1976.
- (5) BERUKSHITIS, G.K. y KLARK, G.B. Corrosion of metals and alloys. Tomashov y Mirulyubev, Jerusalem (Israel) 1966.
- (6) MORCILLO, M. Atmospheric Corrosion. W.W. Kirk y H.H. Lawson (Eds.) ASTM STP 1.239, Filadelfia (Penn., EE.UU.) 1995: 257.
- (7) FELIU, S., COSTA, J.M., ESPADA, L., MORCILLO, M. y SÁNCHEZ, A. Progress in the understanding and prevention of corrosion. J.M. Costa y A.D. Mercer (Eds.). The Institute of Materials. Londres (R.U.) (1993): 1.
- (8) HAAGENRUD, S., HENRIKSEN, J.F. y GRAM, F. Dose-response functions and corrosion mapping for a small geographical area. Informe. Norwegian Institute for Air Research, Lillestrom. 1986.
- (9) BENARIE, M. y LIPFERT, F.L. *Atmos. Environ.* 20 1986: 1947.
- (10) MORCILLO, M. y MARIACA, L. en Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica. M. Morcillo. E. Almeida, B. Rosales, J. Uruchurtu y M. Marrocos (Eds.). Madrid (España) 1998. (Pendiente de publicación).
- (11) FELIU, S., MORCILLO, M. y FELIU, JR., S. *Corr. Sci.* 34 (3), 1993: 407-422.
- (12) FERNÁNDEZ PATIER, R. en Mapas de España de Corrosividad Atmosférica, CYTED, Madrid (España) 1993.
- (13) STREKALOV, P.V. y PANCHENKO, YU. M. *Prot. Metals.* 30 (3), 1994: 254-263.
- (14) STREKALOV, P.V. *Prot. Metals.* 24 (5), 1998: 630-641.
- (15) MORCILLO, M. *et al.* Atmospheric Environment. Enviado para publicación.
- (16) CHICO, B. La salinidad atmosférica: factor controlante del proceso de corrosión en ambientes marinos. Su dependencia de la topografía y meteorología del lugar de exposición. Tesina de Licenciatura. Univ. Complutense, Madrid 1995.
- (17) ISO 9224. Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Guiding values for the corrosivity categories. Geneve (Suiza), 1992.
- (18) MORCILLO, M., SIMANCAS, J. y FELIU, S. Atmospheric corrosion. W.W. Kirk y H.H. Lawson, ASTM STP 1.239, Filadelfia (Penn., EE.UU.) 1995: 195.
- (19) MCCUEN, R.H. y ALBRECHT, P., en Application of accelerated corrosion tests to service life prediction of material. Cragolino, G. y Sridhar, N. ASTM STP 1.194. Filadelfia (Penn., EE.UU.) 1994.