

EL DETERIORO DE LOS MATERIALES EN LA ATMÓSFERA

J. M. Costa
Departamento de Química-Física
Universidad de Barcelona

1. Introducción

La estabilidad de los materiales es de una trascendencia indiscutible, no sólo por su contribución al desarrollo de la tecnología sino también por sus efectos sobre la seguridad y bienestar de las personas. Alargar la vida útil de los materiales, evitando en lo posible su deterioro, requiere conocer los mecanismos por los que tiene lugar la deterioración.

La degradación de un material —*corrosión*— se produce mediante procesos físico-químicos, frecuentemente a través de dinámicas complejas. La información acerca de la corrosión atmosférica, acumulada a través de los años, ha dado lugar a diversas publicaciones (Larabee, 1948; Coburn, 1971; Rozemfeld, 1972; Barton, 1973; Feliu y Morcillo, 1982; Costa, Feliu y Morcillo, 1989). A pesar de los muchos esfuerzos y de la variedad de estrategias encaminados a describir cuantitativamente los fenómenos de corrosión, siguen presentándose hoy serios problemas de interpretación, lo cual dificulta la predicción de prestaciones y la previsión de catástrofes potenciales.

Por otra parte, la corrosión ocasiona importantes gastos, tanto directos como indirectos. Entre los primeros cabe citar los debidos a recubrimientos y equipos protectores, inhibidores, reparaciones, sustituciones prematuras de piezas o estructuras, etc. Los segundos incluyen los ocasionados por fugas de fluido en una conducción deteriorada, pérdida de calidad de artículos por contaminación con productos de corrosión, disminución del rendimiento de transferencia de calor o de velocidad de flujo por la formación de costras, disminución de producción al quedar las instalaciones fuera de servicio, el pago de indemnizaciones por incumplimiento de contratos, entre otros. El cálculo de las pérdidas debidas a la corrosión ha sido objeto de diversos estudios llevados a cabo en distintos países (Hoar, 1971; Fink, Haynie y Boyd, 1971; Kulis, 1976; NBS, 1978; ECE, 1981; OECD, 1981). Un reciente estudio elaborado por encargo de la Comunidad Económica Europea, a partir de un detallado análisis técnico y económico, cifra el coste de la corrosión en 370 Ecu por persona y año en los países de la Comunidad (Leach, 1987). Estos trabajos están complementados con nuevos datos publicados últimamente (ver, por ejemplo, Costa y Mercer, 1993). De modo global, se ha estimado que el coste de la corrosión de un país representa aproximadamente el 3 por ciento de su producto interior bruto (Hoar, 1971).

Al diseñar una estructura o un producto su han de tener en cuenta una serie de factores, entre las cuales cabe destacar la selección de los materiales adecuados para su construcción. En la selección, en general, se estudian las prestaciones que debe ejercer y el desgaste que ocasiona el uso de los productos o el

empleo de los dispositivos, pero con frecuencia se olvida que éstos operan en un medio donde los materiales están sujetos a un proceso de corrosión.

La corrosión, si bien es inevitable, puede aminorarse con un diseño correcto del producto, seleccionando un método de protección eficaz del material y controlando las condiciones de trabajo. El análisis detallado de todos estos factores son sumamente importante, habida cuenta que con el empleo correcto de la tecnología actualmente disponible se puede ahorrar casi un 23 por ciento de los gastos de corrosión (Hoar, 1971). Por lo tanto, en la actualidad muchos problemas de corrosión surgen por el desconocimiento de sus riesgos y la ignorancia de la información que permitiría evitarla o al menos reducirla.

2. Corrosión de las estructuras

La construcción de estructuras, objetos y productos, requiere disponer de materiales adecuados, con prestaciones que garanticen su buen servicio durante un cierto tiempo. Los edificios y monumentos, la industria y los transportes, y, en general, cualquier tipo de actividad está sujeta, pues, a la disponibilidad y comportamiento de los materiales.

2.1. Estructuras históricas

La arquitectura monumental está diseñada para cientos de años. Sin embargo, las cambiantes condiciones ambientales han ocasionado daños imprevistos sobre los monumentos. La simple observación de sus estructuras así lo atestigua. Estos daños han aumentado con la progresivamente creciente agresividad atmosférica. Se ha dicho que el obelisco de Cleopatra, situado actualmente en el embarcadero Victoria de Londres, se ha deteriorado más los últimos cien años que durante los casi dos milenios que estuvo expuesto a la atmósfera de Egipto.

Los efectos de los agentes atmosféricos vienen puestos de manifiesto en la Fig. 1, donde se puede observar los daños sufridos por las piedras de una antigua iglesia situada en el ambiente urbano. En general, la simple inspección visual de las viejas estructuras revela los efectos de la corrosión: los cambios de coloración, con aparición de manchas, o las resquebrajaduras, con evidente deterioro, ocasionan la pérdida de detalles en los monumentos. El avance gradual del desgaste de los materiales puede conducir a resultados fatales, con la ruina parcial o total de estructuras. Esto significa la destrucción de monumen-

tos históricos o de obras de arte, con la consiguiente desaparición de patrimonio cultural, sin recuperación posible.



Fig. 1. Corrosión de monumentos

2.2. Estructuras urbanas

El tiempo de vida de las construcciones urbanas varía mucho. Los edificios se diseñan para 50 — 60 años, pero las estructuras comerciales se edifican para 20 — 30 años (Cabrillac et al., 1987), pero con frecuencia, no alcanzan la vida para la que fueron proyectados. La Fig. 2 presenta un caso típico de corrosión en un hormigón.

Afortunadamente, gracias a las nuevas leyes, establecidas por razones de salud, el medio urbano es cada vez más limpio. Con ello se ha conseguido prolongar la vida útil de las estructuras de las ciudades. En los últimos años el deterioro del estado del mobiliario se ha atenuado sensiblemente, tal como se puede observar en las calles de las ciudades.

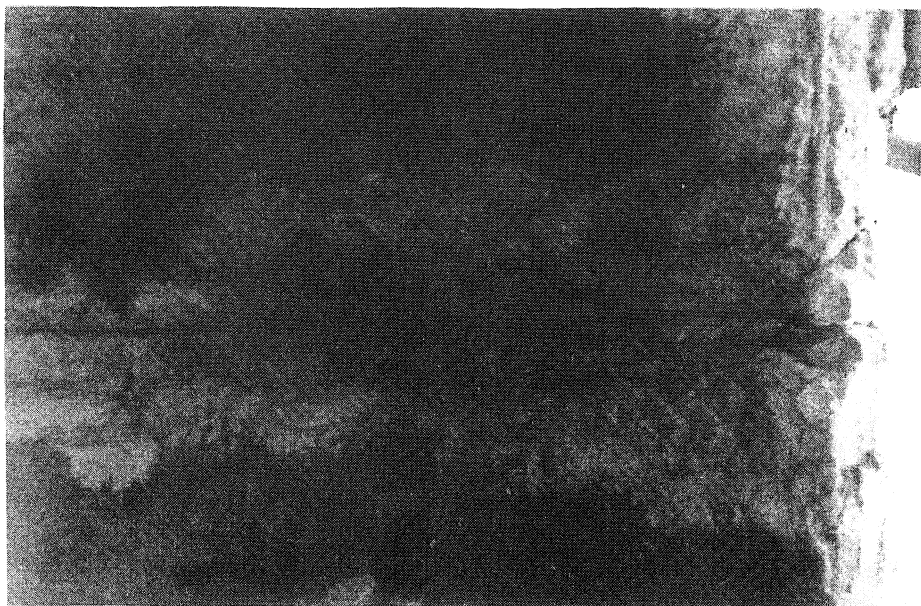


Fig. 2. Corrosión de construcciones

2.3. Estructuras industriales

Muchas estructuras industriales se diseñan para una vida relativamente pequeña. Los reactores de la industria química, por ejemplo, se construyen para 10 — 20 años y las plataformas costeras para unos 20 años; otros productos industriales se proyectan para una vida mucho más corta, como los automóviles, cuya vida se estima para 6 — 10 años (Cabrillac et al., 1987). Durante el tiempo de servicio estas estructuras experimentan los efectos de la corrosión, y nadie discute que existe una relación entre los niveles de agresividad atmosférica y la velocidad de deterioro de los materiales con que están fabricadas. La Fig. 3 muestra los daños sufridos por la carrocería de un automóvil como consecuencia de la corrosión.

3. Materiales específicos

Los materiales utilizados por el hombre son muy diversos. Entre ellos cabe destacar los metales, de amplio uso, y los materiales de construcción, tanto los clásicos como los de nueva implantación.

3.1. Metales

En general, los metales se corroen en la atmósfera mediante un mecanismo de naturaleza electroquímica (para detalles ver, por ejemplo, Costa, 1981). El metal, recubierto por una capa de humedad, que representa un verdadero electrolito, se oxida con liberación de electrones.

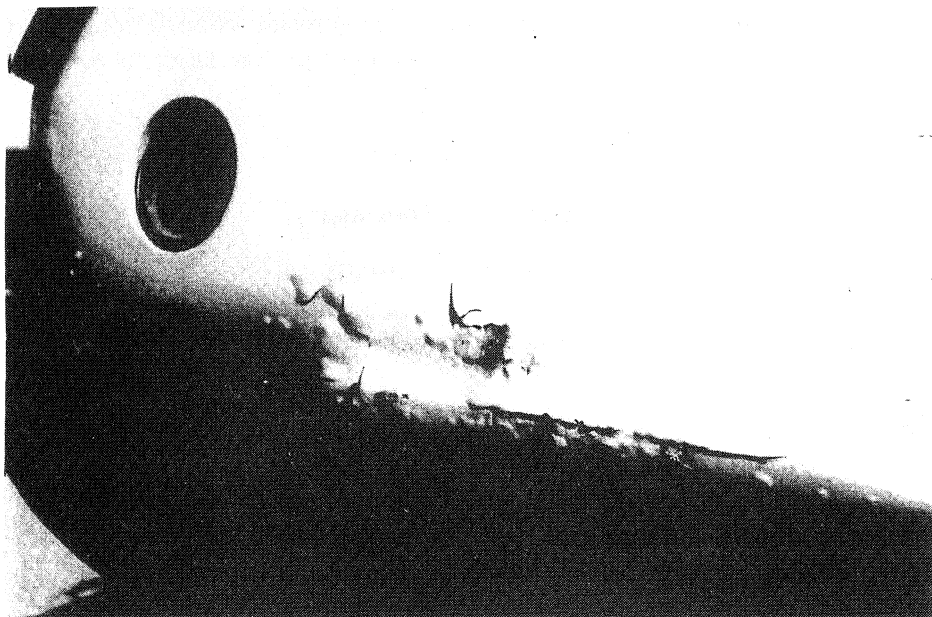


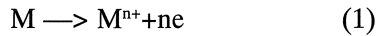
Fig. 3. Corrosión en el automóvil

El proceso de corrosión tiene lugar siempre que, de acuerdo con la Termodinámica, el potencial de la pila formada por el metal con sus iones y la especie oxidante que tiene enfrente tome un valor positivo. Los productos formados pueden dar iones en disolución y participar en equilibrios con otras especies de la misma, incluidos los iones del agua. Como el potencial se puede expresar en función de las concentraciones de los iones en de la disolución, resulta que el potencial se puede dar en términos de pH. Las representaciones gráficas del potencial en función del pH, conocidas como *diagramas de Pourbaix*, muestran los campos de estabilidad y de corrosión de los metales y sus compuestos según los valores del potencial y el pH. Estos diagramas son

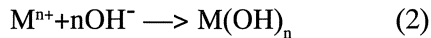
muy útiles para prever el comportamiento de los metales bajo distintas condiciones ambientales.

La corrosión de los metales depende del espesor de la capa de humedad formada sobre ellos. Cuando la película es muy fina prácticamente no hay corrosión, pero a medida que el espesor de la capa aumenta, alcanzando unas pocas micras, la corrosión toma sus valores más altos, permaneciendo estacionarias a espesores superiores.

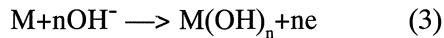
Considerado globalmente, el proceso de corrosión atmosférica incluye reacciones de oxidación y de reducción. Así, la oxidación del metal se puede escribir en la forma



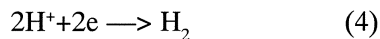
cuyos iones pueden dar productos de corrosión



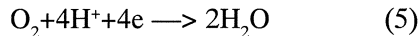
en ciertos casos, tiene lugar la reacción electroquímica con formación directa de los productos



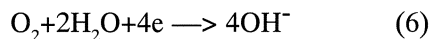
según la naturaleza del metal y las condiciones ambientales. Los electrones suministrados por la reacción de oxidación toman parte en la reacción de reducción. Si la capa de humedad es algo ácida, cabe esperar la reacción



El oxígeno, que es muy soluble en agua, también puede aceptar los electrones. En medio ácido tiene lugar



mientras que en medio neutro o básico, se produce la reacción



Esta última es una reacción muy importante en los procesos de corrosión. El acoplamiento de las reacciones de oxidación y de reducción viene indicado en la Fig. 4.

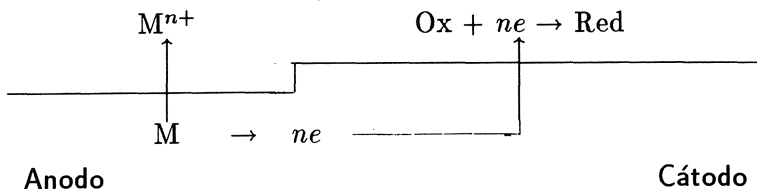


Fig. 4. Reacciones que conducen a la corrosión electroquímica

La magnitud de la corrosión es función del tiempo durante el cual el metal permanece húmedo, junto con otros factores, tales como temperatura, composición química de la atmósfera, naturaleza del material y de los productos de corrosión, etc. La Fig. 5 muestra el efecto del tiempo de exposición sobre la corrosión del acero al carbono y del cinc en una atmósfera urbana (Vilarrasa y Costa, 1984), observándose una marcada diferencia de comportamientos.

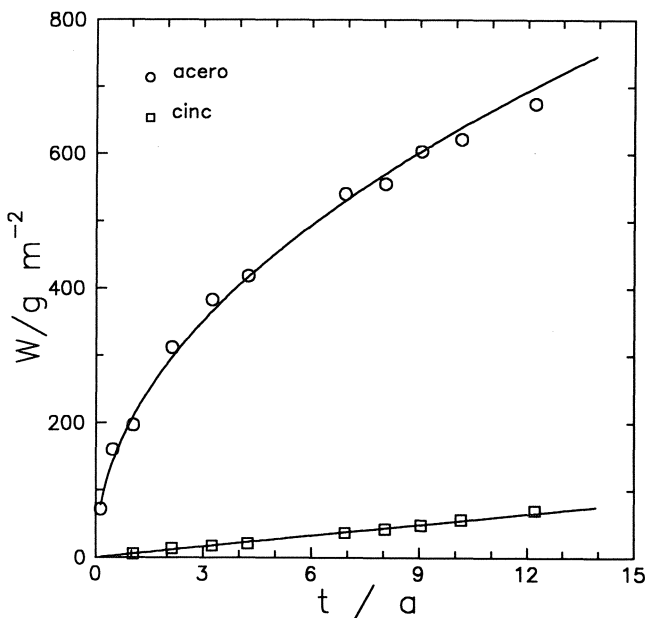
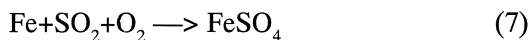


Fig. 5. Evolución de la corrosión de metales con tiempo de exposición

La composición química de la atmósfera viene afectada por la presencia de contaminantes, ya sean naturales o producidos por la actividad humana. Estos contaminantes tienen un efecto acelerante sobre la corrosión, tal como avala la experiencia y que es conocido desde hace muchos años (Costa, Morcillo y Feliu, 1989). Entre los contaminantes del aire activos en los procesos de corrosión de los metales hay que considerar el dióxido de azufre, el ion cloruro y las partículas sólidas. La corrosión de las estructuras de zonas costeras, ricas en sal, o en zonas industriales, donde abundan las emisiones de gases, en particular dióxido de azufre, o de productos sólidos, pone de manifiesto la acción de estas especies.

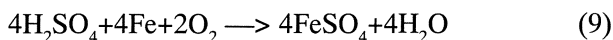
El efecto del dióxido de azufre sobre la corrosión es el resultado de un conjunto de factores que intervienen de modo distinto según el sistema sobre el que actúan. Inicialmente, el gas depositado puede provocar la humectación de la superficie del material al favorecer la condensación del agua, con lo que, además, la película acuosa tiene un pH bajo, y alcanza unas condiciones termodinámicamente propicias para la reacción de reducción. Una manera sencilla, pero útil, de explicar la corrosión del hierro en el aire conteniendo dióxido de azufre, consiste en suponer la formación de sulfato de hierro(II) mediante la reacción



seguida de formación de ácido sulfúrico



el cual puede reaccionar con más hierro, en la forma



Como la formación de ácido sulfúrico necesita consumir agua, la corrosión del hierro depende del tiempo durante el cual la superficie del metal permanece húmeda.

La influencia del ion cloruro sobre la corrosión está bien comprobada. Sin embargo, el mecanismo de su efecto sobre el proceso no es bien conocido. Las sales de anión cloruro, como el NaCl, el CaCl₂ o el MgCl₂, son compuestos higroscópicos, con lo que se favorece la formación de una película de humedad antes comentada, incluso a humedades relativas bajas. Por otro lado, el ion cloruro participa directamente en el mecanismo de corrosión de muchos metales, en particular en el ataque por picadura, una de las formas más agresivas de corrosión, consistente en el ataque profundo de una zona pequeña. La picadura progresa a través de un proceso autocatalítico. El metal disuelto reacciona con

el ion cloruro que ha penetrado en la picadura con formación de ion hidrógeno. De este modo, el medio ácido originado en el interior aumenta el potencial de pasivación del metal que, unido al defecto de oxígeno, por su baja solubilidad en la disolución concentrada interior, produce la continuación del ataque del metal.

3.2. Materiales de construcción

En la construcción se utiliza una gran variedad de materiales, de durabilidades muy distintas. El compromiso entre la practicabilidad y durabilidad restringe los materiales al ladrillo, la piedra y el cemento. La piedra comprende, entre otros, granito, pizarra, arenisca, mármol y caliza. Las tres últimas son calcáreas, con el componente carbonato de calcio.

El ladrillo suele ser impermeable a los agentes atmosféricos, la lluvia ácida inclusive, pero las sales que pueden acumularse y cristalizar en sus poros conducen a su rápido deterioro. En cambio el mortero, con óxido de calcio, se disuelve fácilmente con el agua de lluvia, permitiendo la pérdida de granos de arena. La Fig. 6 muestra el distinto comportamiento y desgaste de estos dos materiales.

El deterioro de caliza y mármol se puede producir por la condensación de agua en las fisuras, que al expandirse durante su congelación resquebraja el material. Este tipo de ataque es fácil de prevenir mediante procedimientos tradicionales.

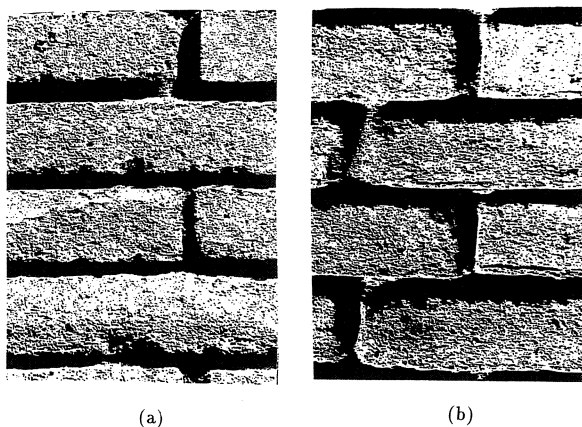
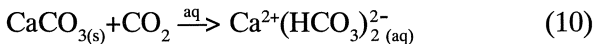


Fig. 6. Deterioro del mortero (a) y del ladrillo (b) en la atmósfera

Los agentes químicos presentes en la atmósfera ejercen una acción inevitable. El carbonato de calcio, CaCO_3 , es poco soluble en agua, pero la lluvia da lugar a un lavado del material, con pérdidas espesor de unos 10 mm en mil años, que produce la indefinición en los monumentos. El ácido aumenta la solubilidad. El dióxido de carbono del aire, frecuentemente húmedo, reacciona lentamente según el proceso



que ocasiona la disolución del material. La presencia de dióxido de azufre o de dióxido de nitrógeno facilita la formación de CaSO_4 y de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ que son más solubles.

La Fig. 7 muestra de modo esquemático la conversión del dióxidos de azufre que contamina la atmósfera en ácido sulfúrico y su reacción con el carbonato de calcio de los materiales. Se supone la existencia de zonas húmedas.

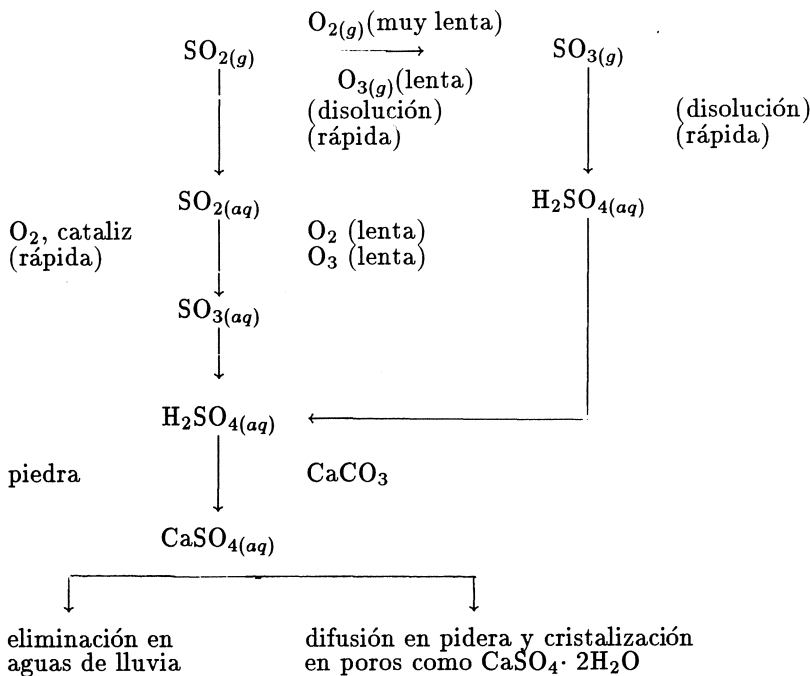


Fig. 7. Esquema de la conversión del dióxidos de azufre en ácido sulfúrico y su reacción con el carbonato de calcio de las piedras

De manera similar los óxidos de nitrógeno del aire pasan a ácido nítrico que posteriormente reacciona con el carbonato de calcio, tal como viene indicado en el esquema de la Fig. 8.

3.3. Pinturas y recubrimientos

El empleo de recubrimientos para los materiales cumple prestaciones *estéticas, protectoras, y de limpieza*. La facilidad de limpieza tiene especial interés en estructuras en interiores, mientras que los dos primeros aspectos incumben a estructuras expuestas a la atmósfera. Gran número de recubrimientos se han formulado para la protección contra la corrosión atmosférica y, además, con el objetivo de embellecer las estructuras expuestas a la vista.

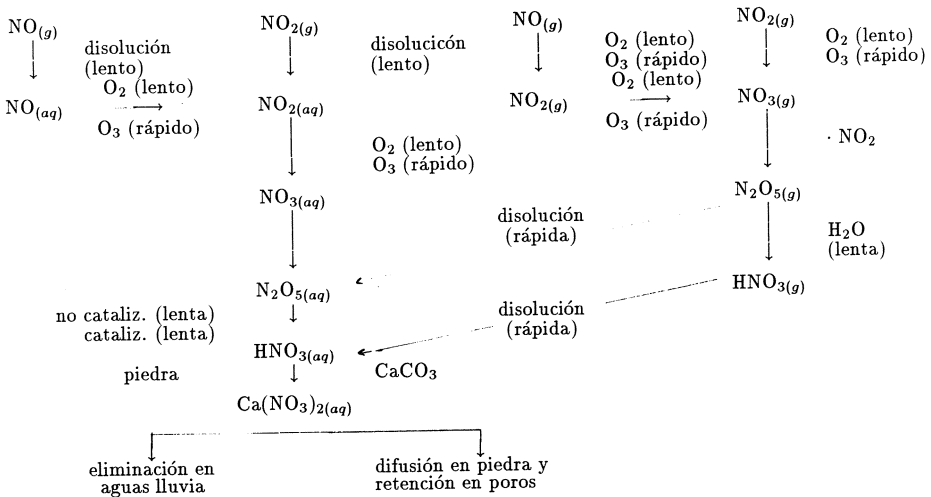


Fig. 8. Esquema de la conversión de los óxidos de nitrógeno en ácido nítrico y su reacción con el carbonato de calcio de las piedras

El efecto de los agentes atmosféricos se suele detectar al cabo uno o dos años de la aplicación de un recubrimiento bien formulado, pero un recubrimiento de mala calidad queda rápidamente deteriorado ocasionando la ruina del material protegido. Los daños dependen del tipo de recubrimiento, tal como pone de manifiesto la Fig. 9. La figura recoge los resultados obtenidos con probetas a la intemperie y probetas resguardadas para dos tipos de pinturas (Spence y Haynie, 1987), mostrando diferencias en su evolución con el tiempo.

Los daños que pueden sufrir estos recubrimientos corresponden a interacciones moleculares, especies extrañas incorporadas durante su aplicación, permeabilidad al oxígeno y a la humedad y lixiviación de sus componentes. La degradación de un recubrimiento implica, pues, la penetración de especies reaccionantes, como agua, oxígeno y otros, que puedan conducir a la formación de un electrolito. Bajo estas circunstancias, se produce un “desenlace catódico” por formación de ion hidróxido debido a la reducción (catódica) del oxígeno; ver ecuación (6). Cuando existe acumulación de productos de corrosión compactos debajo del recubrimiento, puede tener lugar un “alzamiento de óxido”, bajo la acción de humedecimientos y secados alternos de dichos productos.

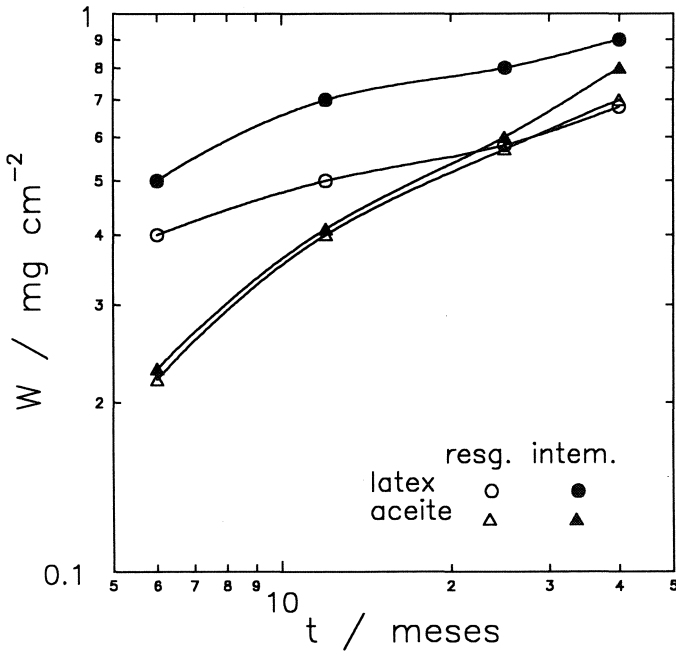


Fig. 9. Efecto del tiempo sobre pinturas bajo condiciones distintas de exposición

Los contaminantes del aire pueden contribuir al deterioro del recubrimiento, dejando expuesta al ataque la superficie no recubierta. Entre las especies causantes de estos daños están el dióxido de azufre, el ozono, ciertos aerosoles y sales. La intensidad del ataque depende del nivel de contaminante en la atmósfera y del tipo de recubrimiento. La Tabla 1 presenta algunos datos del deterioro de pinturas (Campbell *et al.*, 1974), expresados como penetración (velocidad de erosión).

Tipo de pintura	Penetración/ $\mu\text{m a}^{-1}$		
	aire limpio	SO ₂ / 1 ppm	O ₃ / 1 ppm
Doméstica al aceite	45	300	100
de latex	8	24	18
Automóvil	4	7	12
Industrial	40	50	62

Tabla 1. Deterioro de pinturas en varios ambientes.

4. Efectos “naturales” y efectos de los contaminantes

El alcance de los fenómenos de corrosión atmosférica viene determinado por diversos factores ambientales, entre los que hay que destacar las variables meteorológicas. Estas variables influyen sobre la corrosión de modo muy distinto, según el material atacado, y con cierta, y no sencilla, correlación de causas y efectos entre ellas.

La influencia de la temperatura resulta bastante complicada. Además de su efecto sobre la reacción química, hay que tener en cuenta fenómenos como las variaciones diarias de temperatura que llevan consigo evaporaciones y condensaciones de humedad. Si la temperatura es inferior a la del punto de congelación del agua, el hierro, por ejemplo, no forma herrumbre, ya que el proceso de corrosión electroquímica requiere la presencia de agua en forma líquida. De este modo, la humedad relativa resulta ser probablemente el factor que tiene mayor influencia sobre los fenómenos de corrosión de los materiales expuestos al aire, en particular si se trata de materiales metálicos, donde la formación de una película de humedad es imprescindible para su corrosión.

Tal como arriba se ha indicado, la degradación de los materiales en la atmósfera se produce de modo acelerado bajo el efecto de determinados contaminantes del aire. La Tabla 2 muestra un resumen de la acción de los contaminantes atmosféricos sobre diversos materiales (Yocom y Upham, 1982).

Material	Efecto	Contaminante	Otros factores
Metales	pérdida de peso degradación	SO ₂ , Cl ⁻	humedad temperatura
Mat. construc.	permeabilidad dislocaciones	partículas SO ₂	humedad heladas
Tela	manchas reducción tirantez	SO ₂	humedad, hongos insolación
Cuero	fragilidad purlverización	SO ₂	insolación uso
Papel	pérdida resistencia	SO ₂	humedad insolación
Cerámica	cambios de brillo	ácidos grasos	humedad
Pinturas	decoloración	SO ₂ , H ₂ S	humedad hongos
Colorantes	pérdida brillo	SO ₂ , NO ₂	humedad insolación
Goma	pérdida elasticidad hendiduras	O ₂ , oxidantes	insolación humedad

Tabla 2. Acción de los contaminantes sobre algunos materiales

Los contaminantes se difunden desde sus focos de emisión, cubriendo rápidamente extensas zonas. La circulación de contaminantes junto al suelo, donde están situados los objetos y las estructuras de nuestro interés, depende de las propiedades de la capa de aire, conocida como *capa límite atmosférica*, próxima superficie terrestre.

4.1. Capa límite atmosférica

Es bien conocido que los efectos del fluido donde se halla un cuerpo quedan limitados a una fina capa que recubre al mismo. Las características particulares de atmósfera a ras de suelo vienen originadas por las desigualdades del mismo, debidas a los árboles, las colinas, los edificios, etc. o por las distintas

La experiencia muestra la existencia de variaciones de corrosión en zonas relativamente pequeñas, como en el área de una ciudad, tal como se ve en la Fig. 10 (Costa, Gracia y Vilarrasa, 1993) . Ello indica efectos del microclima urbano sobre el comportamiento de los materiales. Además de los factores climáticos, hay que considerar, pues, la distribución de los focos de contaminación por dióxido de azufre y las zonas costeras con alto nivel de ion cloruro, como determinantes de la gradación de la corrosión intraurbana observada.

4.2. Modelado matemático

El análisis del efecto de las variables climáticas, y en particular de los contaminantes, sobre la vida de los materiales conduce a establecer modelos matemáticos del fenómeno de corrosión atmosférica. Se procura que estos modelos sean físicamente realista, suficientemente generales y de uso fácil, y siempre deben apoyarse en datos experimentales.

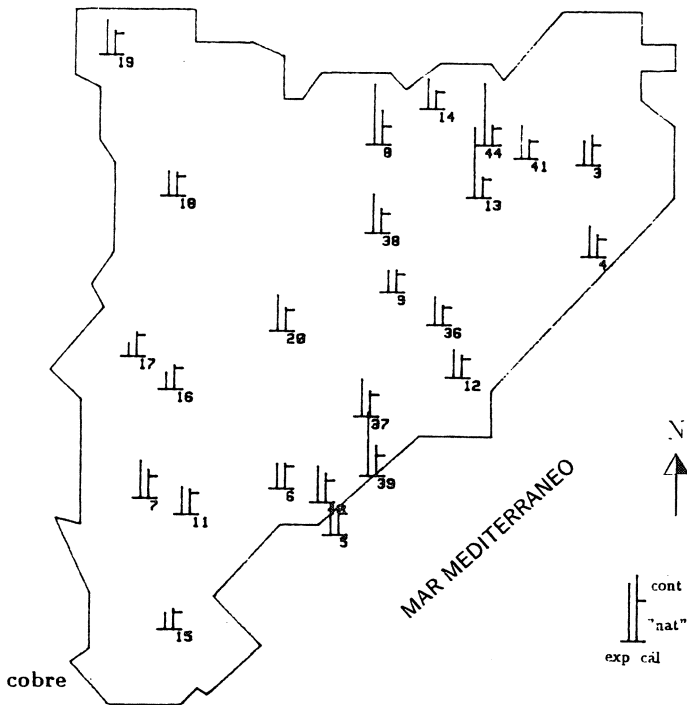


Fig. 11. Corrosión experimental y calculada, junto con las contribuciones “natural” y de los contaminantes (unidades arbitrarias)

Las expresiones matemáticas halladas, pues, relacionan cuantitativamente el ataque del material con los valores de los parámetros ambientales. La recopilación de ecuaciones de este tipo ha sido objeto de diversas publicaciones (ver, por ejemplo, Costa, Morcillo y Feliu, 1989). En general, estas expresiones permitan separar la contribución de los contaminantes al ataque del material y ver si tienen un efecto acelerante sobre el proceso “natural” de corrosión. La Fig. 11 muestra de forma esquemática la contribución “natural” y de contaminantes a la corrosión del cobre, junto con los valores calculados y experimentales para diversos puntos de Cataluña (Costa y Vilarrasa, 1987).

Habida cuenta de la necesidad de controlar los fenómenos de corrosión, el modelo permite hallar la respuesta a muchas preguntas referentes a empleo de los materiales en un lugar de servicio determinado. El interés técnico de las ecuaciones radica en la posibilidad de establecer predicciones técnicas, y clasificar la agresividad de la atmósfera en términos de corrosión atmosférica. Permite, además, evaluar las ventajas económicas de la eliminación de un contaminante, es decir, su repercusión en el coste de la corrosión.

4.3. Clasificación de la agresividad ambiental

Para establecer una clasificación de las atmósferas, con un carácter general, cabe recurrir a la normativa internacional (ISO, 9223). Mediante reglas sencillas y de fácil utilización se puede obtener una clasificación que resulta muy adecuada en el momento de tomar decisiones, tanto para el proyectista de estructuras como para el técnico en protección.

La Norma indicada establece cinco categorías de corrosividad atmosférica. Se basa en el comportamiento de cuatro materiales: acero, cinc, cobre y aluminio, debidamente estandarizados, durante el primer año de exposición. En la Tabla 3 vienen indicados los valores de penetración para cada uno de ellos, expresados en μm , excepto el aluminio que viene dado en g m^{-2} , correspondientes a cada una de las categorías.

Categoría de corrosión	Corrosión anual			
	acero μm	cinc μm	cobre μm	aluminio g m^{-2}
C1	< 1,3	< 0,1	< 0,1	despr.
C2	1,3 - 25	0,1 - 0,7	0,1 - 0,6	< 0,6
C3	25 - 51	0,7 - 2,0	0,6 - 1,3	0,6 - 2
C4	51 - 83	2,0 - 4,2	1,3 - 2,8	2 - 5
C5	> 83	> 4,2	> 2,8	> 5

Tabla 3. Categorías ISO de corrosividad atmosférica en función de la corrosión del primer año de cuatro metales estándar

En la Fig. 12 vienen representadas gráficamente las categorías en que han quedado clasificados los casi cien puntos de ensayo de un estudio de corrosión atmosférica en el término municipal de Barcelona (Vilarrasa y Costa, 1994). Corresponden a la corrosión del cinc. Los puntos quedan distribuidos en dos zonas, una central de baja corrosión, rodeada por una zona de corrosión media, y un punto de mayor corrosión situado junto al mar.

Para el diseño, protección y mantenimiento de las estructuras expuestas a la atmósfera es conveniente disponer de mapas de corrosión, donde quede resumida la información acerca de la corrosividad de distintas zonas geográficas. Estos mapas pueden corresponder a un continente, a un estado o a un país. A veces se refieren a una ciudad o incluso a una zona determinada o una construcción específicas.

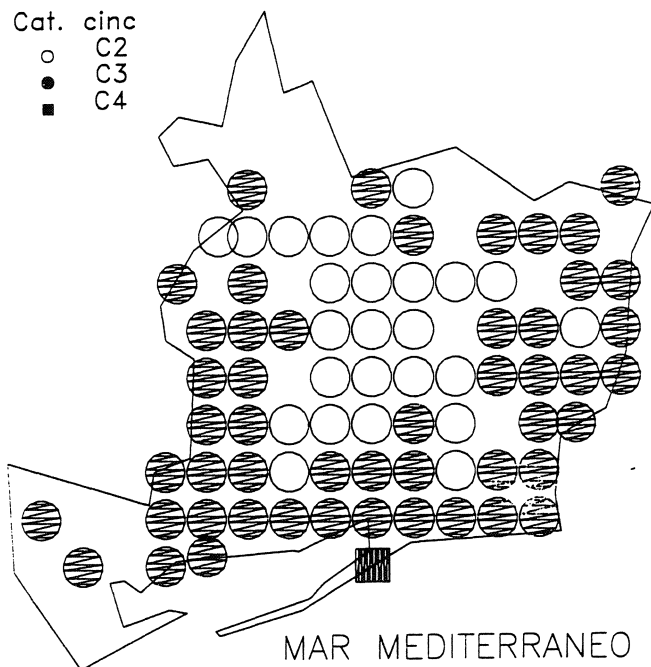


Fig. 12. Corrosividad atmosférica para el cinc en Barcelona, según ISO

Los mapas de corrosión se suelen confeccionar a partir de medidas directas de la corrosión de materiales, debidamente estandarizados, que se exponen en lugares seleccionados por su representatividad. Algunas veces también se recu-

re a los registros de variables ambientales y de su efecto sobre los materiales según mediciones de laboratorio. Recientemente han aparecido los mapas de España de corrosividad atmosférica (Morcillo y Feliu, 1993), que recogen los resultados de la investigaciones desarrolladas durante bastantes años por diversos grupos de trabajo. En la Fig. 13 se presenta un mapa con las líneas de isocorrosión del acero para España (Feliu *et al.*, 1993). Se puede ver que la corrosión es baja en las zonas rurales de la península, tomando los valores más altos en las zonas norte, noroeste y sur próximas a la costa.

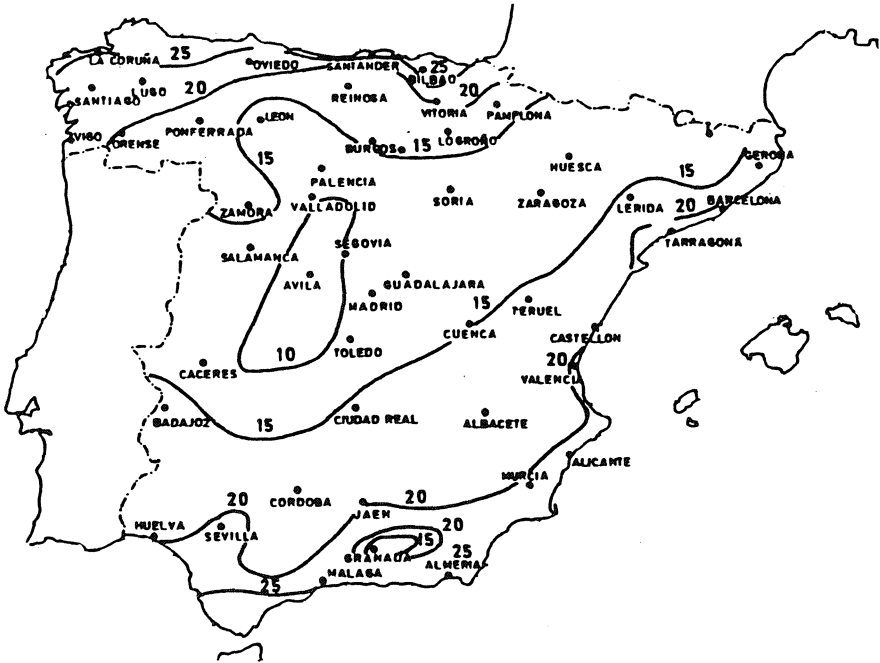


Fig. 13. Mapa con las líneas de isocorrosión del acero para España ($\mu\text{m a}^{-1}$)

5. Materiales para el próximo milenio

La destrucción de materiales por corrosión, y la problemática que comporta, está alcanzando dimensiones insospechadas. Se ha calculado que la mitad de la producción mundial de acero se gasta en la reposición del acero corroído. Estas pérdidas junto al creciente empleo de materiales pronostican una situación

extrema, cuya solución hay que buscar con suficiente antelación. Las gráficas de la Fig. 15, correspondientes a los Estados Unidos, muestran como el uso de los materiales avanza a una velocidad vertiginosa, que contrasta con la de crecimiento de la población, particularmente en los últimos años (Hondros y Bullock, 1989). Este continuo aumento del consumo de materiales representa un peligro para las fuentes suministradoras, con las dificultades que lleva consigo un eventual agotamiento de las mismas.

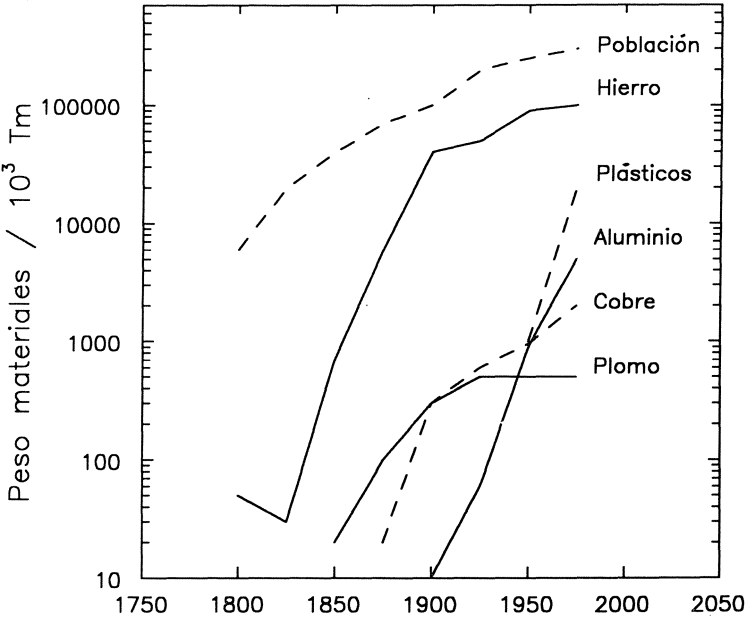


Fig. 14. Variación del empleo de materiales en los Estados Unidos en comparación con el crecimiento de la población

El empobrecimiento de los yacimientos es una amenaza que preocupa tanto a los países industrializados, que precisan asegurar el suministro de materiales, como a los países productores, que pierden una de sus fuentes de riqueza. Hace unos años tuvieron lugar debates públicos muy agitados, donde se presentaba sensacionalistamente una visión pesimista del tema. Ciertamente, la situación es crítica en el Japón y en la Comunidad Económica Europea, tradicionalmente importadores de materiales, que precisan, por ejemplo, los metales considerados estratégicos, actualmente sometidos a severas restricciones. El problema viene

agravado, por otra parte, por el papel que los materiales juegan en la industria actual, en cuanto representan el soporte de las diversas ingenierías en que se apoyan las innovaciones que reclama la sociedad.

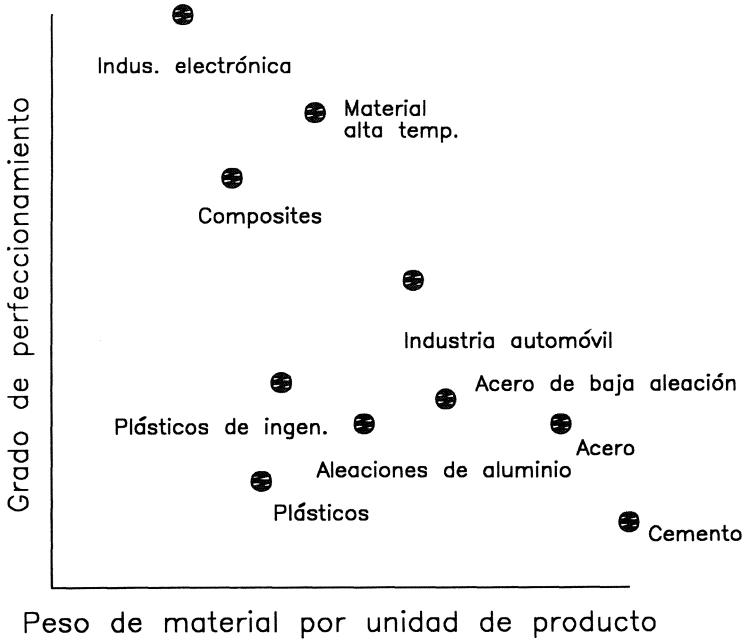


Fig. 15. Correlación entre la cantidad de material de un producto y la perfección del material y su uso.

Las innovaciones que se van desarrollando requieren materiales con funciones específicas. La disponibilidad de materiales adecuados constituye frecuentemente la etapa determinante de una creación industrial. Por esta razón, muchos países industrializados han establecido programas de investigación para estimular el desarrollo de nuevos materiales, con especial atención a la incorporación de los recientes avances científicos, para que dichos materiales alcancen un alto grado de perfeccionamiento. La Fig. 15 muestra gráficamente la relación entre cantidad de material y su contenido técnico (Altenpohl, 1987), y pone de manifiesto como los nuevos materiales incorporan los progresos científico-técnicos para dar prestaciones de alto nivel.

El desarrollo de materiales para las próximas décadas está pues sujeto a ciertos condicionamientos, consistentes en la incorporación a los mismos de los

conocimientos y la experiencia útiles. De esta forma se diseñan materiales con una alta densidad “intelectual” que permiten el progreso de tecnologías punta. Las innovaciones y el desarrollo futuros en una amplia variedad de sectores dependen de estas tecnologías y también del comportamiento de los materiales en ellas utilizados. Evitar su destrucción —*corrosión*— es una tarea prioritaria para el buen fin de los materiales de vanguardia.

Agradecimiento

Algunos de los trabajos aquí mencionados han sido realizados por un equipo de la Universidad de Barcelona. Mi agradecimiento a mis amigos y colegas Dr. A. Estapé, Sr. E. Miró, Dr. P. Molera y Sr. A. Salazar por su colaboración en los trabajos de campo, Sr. E. Pastor y Dra. M. Vilarrasa por sus trabajos de laboratorio, y Sr. J. Gracia y Dr. J. Lorente por el suministro de datos ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- AILOR, W.H., Ed., 1982, Atmospheric Corrosion, Wiley, Nueva York.
- ALTENPOHL, D.G., 1973, Materials and Society, 3, 315.
- BARTON, K., 1973, Schutz gegen atmosphärische Korrosion, Verlag Chemie, Weinheim.
- BRILLAS, E., COSTA, J.M. Y VILARRASA, M., 1990, 11th International Corrosion Congress, 2, 79, AIM, Florencia.
- CABRILLAC, C., LEACH, J.S.L., MARCUS, P. Y POURBAIX, A., 1987, Metals and Materials, 3 533.
- CAMPBELL, G.G., SCHURR, G.G., SLAWIKOWSKI, D.E. Y SPENCE, J.W., 1974, J. Paint Technology, 46, 59.
- COSTA, J.M., 1981, Fundamentos de Electrónica, Alhambra, Madrid.
- COSTA, J.M. Y MOLERA, P., 1981, Corrosió i Medi Ambient 1, UAB, Bellaterra.
- COSTA, J.M. Y CABOT, P.L., 1985, Corrosió i Medi Ambient 2, Edic. U.B., Barcelona.
- COSTA, J.M. Y VILARRASA, M., 1987, 10th International Congress on Metallic Corrosion, 1, 35. CERI, Madrás.
- COSTA, J.M., MORCILLO, M. Y FELIU, S., 1989, en P.N. Cheremisinoff Encyclopedia of Environmental Control Technology, Gulf Publ., Houston.
- COSTA, J.M. Y VILARRASA, M., 1993, Br. Corrosion J., 28(2), 117.
- COSTA, J.M. Y MERCER, A.D., 1993, Progress in the Understanding and Prevention of Corrosion , Vol. 1, Institute of Materials, Londres.
- COSTA, J.M., GRACIA, J. Y VILARRASA, M., 1993, en Progress in the Understanding and Prevention of Corrosion , Vol. 1, p. 89, IofM, Londres.
- ECE TASK FORCE, 1981, Methods to Define Economic Damage Caused by Air Pollution, ENV.
- ESPADA, L., SANCHEZ, A., MERINO, P, Y PEÑA, G., 1989, Rev. Metal. CENIM, 25(5), 305.
- FELIU, S. Y MORCILLO, M., 1982, Corrosión y protección de los metales en la atmósfera, Editorial Bellaterra, Barcelona.

- FELIU, S., COSTA, J.M., ESPADA, L., MORCILLO, M. Y SÁNCHEZ, A., 1993, en *Progress in the Understanding and Prevention of Corrosion* , Vol. 1, p. 1, IofM, Londres.
- FINK, F.W., HAYNIE, F.H. Y BOYD, W.K., 1971, *Technical—Economic Evaluation of Air Pollution Corrosion Cost on Metals in U.S.*, Batelle.
- HOAR, T.P., 1971, *Report of the Committee on Corrosion and Protection*, HMSO, Londres.
- HONDROS, E.D. Y BULLOCK, E., 1989, *Angew. Chem., Int. Ed.*, 28, 1088.
- ISO 9223, 1991, *Corrosion of Metals and Alloys. Classification of Corrosivity of Atmospheres*.
- KULIS, M., 1976, *Werkstoffe u. Korrosion*, 27, 870.
- LARABEE, C.P., 1948, en H.H. Uhlig, *Corrosion Handbook*, 1043, Nueva York.
- LEACH, J.S.L., 1987, *The Cost of Corrosion in the EEC*, Nottingham.
- LIPFERT, F.W., 1989, en Hutzinger, O., ed., *Environmental Chemistry*, Vol. 4, p. 114, SpringerVerlag, Berlin.
- MORCILLO, M. Y FELIU, S., 1993, *Mapas de España de Corrosividad Atmosférica*, CYTED, Madrid.
- NBS, 1978, *Economic Effects of Metallic Corrosion in the U.S.*, Department of Commerce, Washington.
- OECD, 1981, *The Cost and Benefits of Sulphur Oxide Control*, Paris.
- OTERO, T.F., 1984, *La corrosión y su prevención*, U.P.V., Bilbao.
- ROZENFELD, I.L., 1972, *Atmospheric Corrosion*, NACE, Houston.
- SCHLCHTING, H., 1960, *Boundary Layer Theory*, McGraw, Nueva York.
- SPENCE Y J.W., HAYNIE, F.H., 1987, en *Effects of Acid Deposition on Exterior Coatings*, U.S. Envirm. Prot. Agency.
- SPENCE, J.W., HAYNIE, F.H., LIPFERT, F.W., CRAMER, S.D. Y MCDONALD, L.G., 1992, en *Corrosion*, 48, 1009.
- VILARRASA, M Y COSTA J.M., 1994, pendiente publicación.
- YOCOM, J.E. Y UPHAM, J.B., 1982, en A.C. Stern, Ed., *Air Pollution*, Vol. II, Cap. 2, Academic Press, Nueva York.