

Corrosión atmosférica. Conceptos básicos y experiencias obtenidas en el clima tropical costero de Cuba

Atmospheric corrosion. Basic concepts and experiences obtained in the coastal tropical climate of Cuba

Jenrry Viña Rodríguez^{a*}, Abel Castañeda Valdés^a, Cecilia Valdés Clemente^a.

^{a*}, **Autor principal y creador de la idea científica** (0000-0001-8667-9066). Centro Nacional de Investigaciones Científicas CNIC Desarrollo e Innovación Dirección de Investigación. Laboratorio de Protección de Materiales. Avenida 25 y Calle 158 CUBANACAN, Playa, La Habana. jenrry.vina@cnic.cu

^a, **Revisión de artículo, asesoría técnica-ingenieril y gramatical** (0000-0002-2531-9224). Centro Nacional de Investigaciones Científicas CNIC. Desarrollo e Innovación Dirección de Investigación. Laboratorio de Protección de Materiales. Avenida 25 y Calle 158 CUBANACAN, Playa, La Habana. abel.castaneda@cnic.edu.cu

^a, **Revisión de artículo, asesoría gramatical** (0000-0001-6119-6076). Centro Nacional de Investigaciones Científicas CNIC. Desarrollo e Innovación Dirección de Investigación Laboratorio de Protección de Materiales Avenida 25 y Calle 158 CUBANACAN, Playa, La Habana. cecilia.valdes@cnic.edu.cu

Recibido: 19 de enero de 2021;

Aceptado: 30 de marzo de 2021;

RESUMEN

En este trabajo, se resume una serie de conceptos básicos establecidos en la normativa de la especialidad de corrosión atmosférica (Normas ISO 9223:2012, ISO 9225:2012 e ISO 9266:2012). Los conceptos, son tenidos en cuenta a la hora de realizar un estudio de corrosión atmosférica o de agresividad corrosiva de la atmósfera para los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción (acero al carbono, cinc, cobre y aluminio). Se describen algunas experiencias obtenidas que no son recogidas en la normativa de la especialidad, derivadas de los últimos estudios realizados en el clima tropical costero de Cuba. De esta forma se indica la necesidad de ejecutar siempre que sea posible, la primera variante para estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera basada en la descripción típica del ambiente atmosférico de conjunto con la tercera variante, fundamentada en la determinación de la medida directa de la velocidad de corrosión anual en probetas de dimensiones estandarizadas. Para ciertas condiciones descritas, ha existido una gran diferencia entre la estimación, haciendo uso de los valores indirectos anuales de velocidad de corrosión determinados por las funciones dosis/respuestas como segunda variante y la tercera variante de determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero al carbono y el acero galvanizado.

Palabras claves: corrosión atmosférica, agresividad corrosiva, determinación, estimación, velocidad de corrosión.

ABSTRACT

A series of basic concepts established in the atmospheric corrosion specialty regulations (ISO 9223: 2012, ISO 9225: 2012 and ISO 9266: 2012 Standards) are summarized in this work. In this work, a series of basic concepts established in the atmospheric corrosion specialty regulations (ISO 9223: 2012, ISO 9225: 2012 and ISO 9266: 2012 Standards) are summarized. The concepts are taken into account when carrying out a study of atmospheric corrosion or corrosive aggressiveness of the atmosphere for the metallic materials most used in the construction industry (carbon steel, zinc, copper and aluminum). Some experiences obtained that are not included in the regulations of the specialty are described, derived from the latest studies carried out in the tropical coastal climate of Cuba. This indicates the need to execute whenever possible, the first variant for estimating the corrosive aggressiveness of the atmosphere based on the typical description of the atmospheric environment together with the third variant, based on the determination of the direct measurement of the annual corrosion rate in specimens of standardized dimensions. For certain conditions described, there has been a large difference between the estimation, making use of the indirect annual values of corrosion rate determined by the dose / response functions as the second variant and the third variant for determining the corrosive aggressiveness of the atmosphere for the carbon steel and galvanized steel.

Keywords: atmospheric corrosion, aggressivity corrosion, determination, estimation, corrosion rate.

INTRODUCCION

El fenómeno de la corrosión atmosférica, es el ataque electroquímico que sufren los materiales metálicos expuestos a la atmósfera de forma directa o indirecta, provocando su deterioro de manera considerable (Shewetzer, 2010). El deterioro acelerado influye en las pérdidas colosales de las propiedades mecánicas, físicas, químicas, tecnológicas y ecológicas de los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción. Otros materiales de construcción expuestos a la atmósfera experimentan otros tipos de fenómenos de deterioro. La atmósfera por su gran extensión, es el medio natural y más agresivo al cual están expuestos la mayoría de los materiales metálicos en comparación con otros medios naturales como son las aguas de mar, aguas naturales y el suelo, por lo que tiende a ocasionar las afectaciones mayores por corrosión atmosférica en las estructuras construidas con cualquier material metálico (Domínguez, Castro, Matos, Hing, 1987; Chenet *et al*, 2018).

El fenómeno, es capaz de causar también pérdidas económicas directas e indirectas (Domínguez, Castro, Matos, Hing, 1987). Las pérdidas directas, son aquellas que están relacionadas directamente con el material metálico, elemento estructural o equipo que sufren del ataque por corrosión atmosférica. Como ejemplo se tienen, el costo del recambio o la reparación del material metálico totalmente atacado por el fenómeno. El costo de la mano de obra en los trabajos intensos de reparación, donde se tiene en cuenta la inversión en los insumos y recursos directamente relacionados con los medios y sistemas de protección a base de recubrimientos y/o aleaciones especiales.

Las pérdidas indirectas se producen como consecuencia del sistema de corrosión o proceso corrosivo. Estas pérdidas no están directamente relacionadas con el costo del material metálico muy afectado por el fenómeno de la corrosión atmosférica. Se trata de las paradas de plantas, las pérdidas y contaminación de productos, así como las pérdidas de eficiencia. Desde el punto de vista social, se producen pérdidas debido al no funcionamiento de instalaciones hoteleras, de servicios de salud, culturales, recreativas y deportivas, muy deterioradas por el fenómeno, afectando el bienestar social de la población (Castañeda *et al*, 2020). Tiene un impacto social negativo elevado, el deterioro de las viviendas. Se tienen en cuenta, además, las pérdidas ecológicas y algo muy importante: las pérdidas valiosas de vidas humanas.

Por otra parte, la intensidad del fenómeno de la corrosión atmosférica en combinación con otros tipos de corrosión de acuerdo a su naturaleza (química o electroquímica), originan derrames, fugas y esparcimiento de compuestos químicos muy peligrosos. Esto conduce a la aparición de riesgos de accidentes mayores que pueden ocurrir en la industria química como la explosión e incendios, provocando cualquier tipo de pérdidas directas e indirectas (Viña, Camejo, Castañeda, 2020).

El sistema de corrosión atmosférica comprende cuatro componentes. El conductor electrolítico, relacionado totalmente con la formación de las capas de agua debido a los procesos de condensación de la atmósfera, rocío, niebla densa, neblina, periodo antes y después de la caída de la lluvia, que va acompañado de la deposición de agentes agresivos de procedencia natural o antropogénica sobre la superficie del material metálico. Precisamente este último, como otro componente del sistema y tiene la función de conductor eléctrico sobre el cual se desarrollan las reacciones anódicas y catódicas como componentes también, para dar lugar a la reacción total del fenómeno que originan los productos de corrosión debido a la presencia del

conductor electrolítico (Shewetzer, 2010). Si cualquiera de los cuatro componentes está ausente, es evidente que el fenómeno de la corrosión atmosférica no se originaría. La agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera como concepto, es la capacidad que presenta la atmósfera para causar el origen y desarrollo de la corrosión atmosférica en un sistema (ISO-9223:2012). Es controlada por los siguientes factores: el complejo humedad relativa-temperatura, la deposición de agentes agresivos y un factor importante, la velocidad anual de corrosión en dependencia del material metálico durante un año de estudio. Se tienen en cuenta además, otros factores no reflejados en la normativa de la especialidad como son, las condiciones de exposición y la distancia desde la línea costera, a la hora de interpretar los resultados obtenidos en estudios de corrosión atmosférica, sobre todo en países con climas tropicales costeros como Cuba.

Cuando se habla de condición de exposición o categorías de localización, se refiere a la condición típica, definida convencionalmente a la cual está sometido el material metálico en estudio o elemento estructural. Por ejemplo: condición de exposición al exterior; interior bajo el efecto de abrigo ventilado, interior a espacio cerrado, interior bajo condiciones soterrada (ISO-9223:2012). Como experiencia se tiene en Cuba, el interior bajo el efecto estufa (Martín *et al*, 2006).

Como condición necesaria y suficiente en estudios de corrosión atmosférica, se tiene la determinación de las “categorías de agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera”. Se entiende como concepto, a un rango estandarizado de corrosividad en relación al efecto de la corrosión atmosférica durante un tiempo de un año (ISO-9223:2012). Se determina a partir de tres variantes de evaluación establecidas en la normativa de la especialidad sobre materiales metálicos referidos como son: acero al carbono, cinc, cobre y aluminio. La categoría de agresividad corrosiva es un parámetro técnico que proporciona la selección adecuada no solo de los materiales metálicos y sus sistemas de protección a base de recubrimientos. Concibe, además, una extensión en la normativa actual a la selección adecuada de los materiales de construcción clasificados como inorgánicos, orgánicos y compuestos, que pueden ser expuestos también a la atmósfera. Como experiencia se tiene, el material compuesto más utilizado en la industria de la construcción debido a su moderado costo, carácter formaceo y facilidad de fabricación, el hormigón armado.

En estudios realizados en el clima tropical costero de Cuba, se ha demostrado que las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera entre muy elevada (C5) y extrema (CX) determinadas para el acero al carbono, cinc, cobre y aluminio a un año de estudio, se corresponden con un deterioro intenso (fisuras y grietas) en probetas de hormigón armado. Las probetas fueron colocadas durante tres años exposición ante dichas condiciones de agresividad y elaboradas con relaciones agua/cemento (w/c) 0,5 y 0,6 en un sitio de exposición situado alrededor de 20 metros de la línea costera en zonas no apantalladas (Castañeda *et al*, 2019). Los aceros de refuerzo fueron colocados con un espesor de recubrimiento de hormigón de 20 y 40 mm (Figura 1). Se trató de las condiciones de diseño que se usaban en la elaboración del hormigón armado para la construcción de las estructuras en zonas de elevado potencial constructivo del clima tropical costero de Cuba (Castañeda *et al*, 2019).

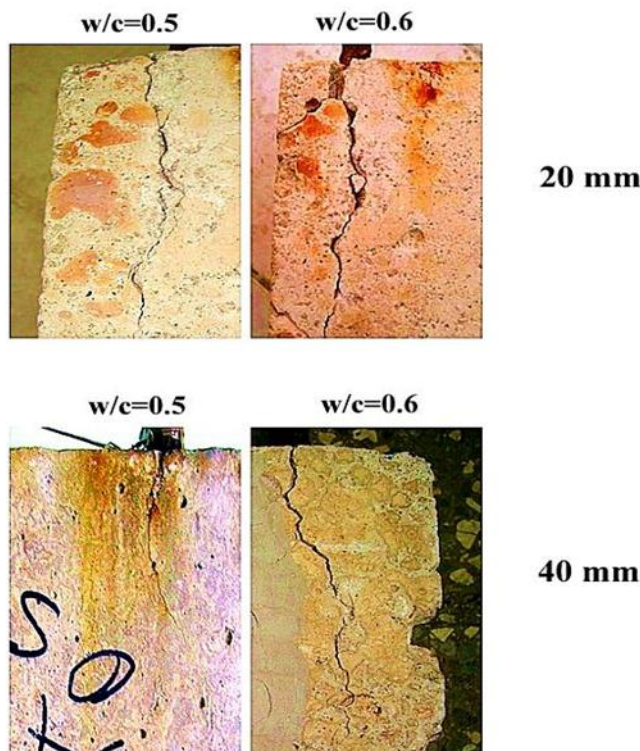


Fig. 1. Deterioro en las probetas de hormigón armado debido al fenómeno de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo. Se observan las manchas de los óxidos de hierro sobre el hormigón.

El deterioro intenso se debe al fenómeno acelerado de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo el cual provoca la formación de fisuras y grietas en el hormigón armado.

Por otra parte, una categoría media de agresividad corrosiva (C3) para el acero al carbono fue determinada en zonas próximas a la bahía de La Habana. De ahí, la durabilidad elevada que vienen presentando la infraestructura antigua y de patrimonio que rodea esa zona estratégica para el país (Valdés, 2014).

Al hablar de sitios de exposición, se refiere a los sitios de ensayos que deben ser instalados una vez seleccionada la zona de estudio. Se tiene como experiencia adquirida que, el número de sitios debe estar entre tres y siete. Los mismos pueden ser colocados a una misma o a diferentes distancias desde mar o línea costera. Todo depende del interés que presente la entidad que financie el servicio científico

técnico o proyecto de investigación. El sitio debe componerse de los soportes para la colocación de captadores para la determinación de la deposición de agentes agresivos y las probetas metálicas para la determinación de la velocidad de corrosión ya sea para la condición de exposición al exterior (Figuras 2 a), b) y c) y al interior (Figuras 3 a), b) y c).



Fig. 2 a), b) y c). Ejemplo de tres tipos de sitios para la condición de exposición al exterior colocados en diferentes zonas de estudios del clima tropical costero de Cuba.

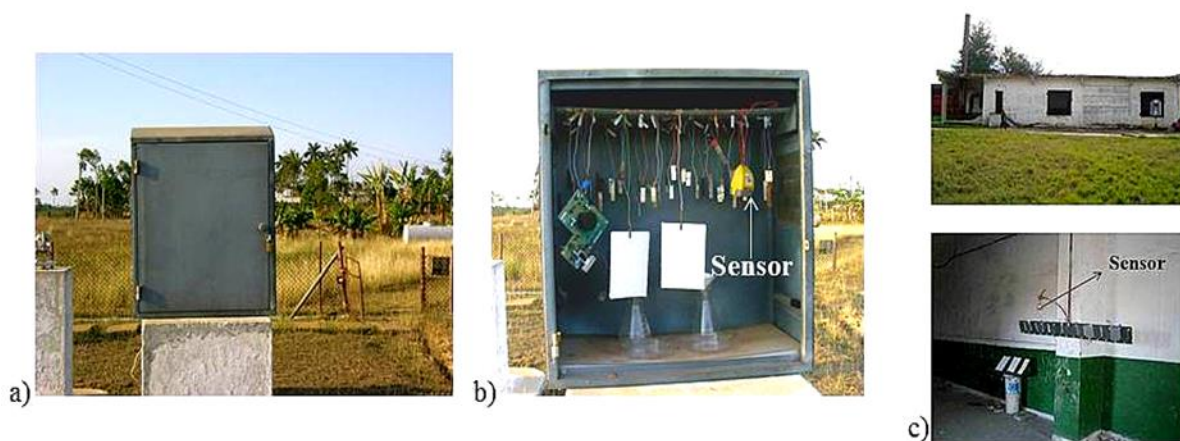


Fig. 3 a), b) y c). Ejemplo de dos tipos de sitios para la condición de exposición al interior colocados en diferentes zonas de estudios del clima tropical costero de Cuba. Interior bajo efecto estufa a) y b). Interior bajo el efecto de abrigo ventilado donde se observan las ventanas c).

El sitio de exposición adquiere su identificación en dependencia de su condición. En caso de interior a espacio cerrado, es cuando no existe ninguna ventilación desde el exterior en el local y soterrada cuando se trata de un refugio o silos debajo la tierra. Se nota, además, los sensores para la medición del complejo humedad relativa-temperatura (Figuras 3 b) y c).

Importancia de los estudios de corrosión atmosférica

Antes del momento de iniciación de los trabajos de construcción de las obras, deben ejecutarse estudios de corrosión atmosférica que conduzcan a la evaluación de la agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera. Las zonas costeras se identifican como de elevado potencial constructivo. Los resultados obtenidos permitirán, además de establecer la selección adecuada de los materiales de construcción y sus sistemas de protección, realizar los procesos de inversión, diseño, construcción y trabajos futuros de mantenimiento con criterios de durabilidad. Por otra parte, garantizan prolongar en el tiempo de manera considerable los trabajos costosos de reparación. De esta forma, se mantienen en el tiempo las condiciones iniciales de vida útil de proyecto de las estructuras como son estética, funcionalidad y seguridad. Además, se evita que las estructuras construidas con los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, hormigón armado y otros, alcancen su vida útil residual sin funcionamiento social alguno, dejando atrás la vida útil de servicio y la vida útil última.

Este trabajo tiene como objetivos, describir una serie de conceptos básicos que son recogidos en la normativa de la especialidad de corrosión atmosférica. Como bien se conoce, en ocasiones se torna difícil la adquisición de cualquier normativa al realizar un estudio ingenieril y no solo de corrosión atmosférica. Se pretende demostrar, además, ciertas experiencias obtenidas en estudios de corrosión atmosférica ejecutados en el clima tropical costero de Cuba, que no aparecen descritas en la normativa.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE EXPERIENCIAS

Estimación y determinación de las categorías de corrosividad de la atmósfera

De acuerdo con las especificaciones establecidas en la normativa de la especialidad, tres variantes son bien esclarecidas para la obtención y evaluación de las categorías de agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera en una zona de estudio previamente seleccionada. Dos variantes permiten la estimación y la otra la determinación en el momento de ejecutar un estudio de corrosión atmosférica (ISO-9223:2012).

Estimación de las categorías de agresividad corrosiva a partir de la descripción típica del ambiente atmosférico. Primera variante

Complejo humedad relativa-temperatura

El primer aspecto a tener en cuenta en esta variante de estimación, es el comportamiento mensual y anual del complejo humedad relativa (HR)-temperatura (T). Este complejo es definido como el efecto combinado de la temperatura y la humedad relativa sobre la corrosividad de la atmósfera. Para la determinación de ambos parámetros climáticos puede ser usado el servicio meteorológico, siempre y cuando las zonas de estudios seleccionadas estén en el radio de acción de las estaciones o centros meteorológicos. En caso de que los estudios se ejecuten en zonas intrincadas lejos del servicio en condiciones exteriores de exposición y teniendo en cuenta las condiciones interiores, pueden usarse para la medición de ambos parámetros diferentes equipos, dispositivos y sensores calibrados (Figuras 3 b) y c).

Valores promedios elevados mensuales y anuales de ambos parámetros climáticos (HR > 70% y T entre 25 y 28°C), característicos de climas tropicales costeros como el de Cuba, es indicativo como una condición necesaria para la existencia de categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera. De esta forma, se garantiza la presencia de la película de agua en la superficie de los materiales metálicos y que la deposición de los principales agentes agresivos sobre la superficie de los materiales, ocurra en forma de disolución salina y no como una deposición seca en forma de cristales de sales (Meira *et al*, 2008). Este factor no señalado en la normativa de la especialidad, es significativo en la obtención de categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera.

Con relación a la temperatura, la definición del complejo dada anteriormente, es tomada hasta ciertos valores promedios mensuales y anuales. Lo que sucede realmente es que, a valores muy elevados de temperatura, donde se origina un calentamiento excesivo en la superficie del material metálico expuesto directamente a la atmósfera, la corrosión atmosférica tiende a disminuir considerablemente, a tal punto que no ocurre. Esto se debe a la eliminación total de la película de agua depositada en la superficie del material metálico, originada por el proceso de condensación en la atmósfera o el contacto con superficies frías en la nocturnidad, en

horas de la mañana, así como antes y después de la caída de la lluvia. De ahí, a que la dependencia de la corrosión atmosférica con la temperatura en climas tropicales costeros como el de Cuba sea caracterizada por una función de pico (Figura 4). Vale recordar que, la corrosión atmosférica ocurre mediante un mecanismo de naturaleza electroquímica debido a la película de agua que se deposita sobre la superficie de los materiales metálicos expuestos a la atmósfera de forma directa (condición al exterior) y de forma indirecta (condiciones interiores).

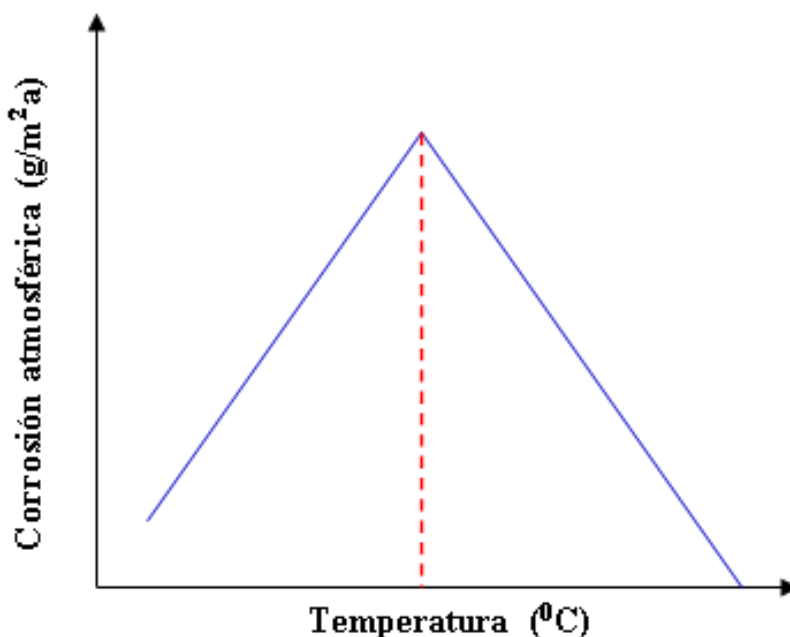


Fig. 4. Representación esquemática de la dependencia de la corrosión atmosférica con la temperatura en climas tropicales costeros.

La experiencia basada en el incremento de la temperatura de la atmósfera hasta un cierto valor sobre la película de agua líquida es demostrada (Figura 5). Se destaca además de los cuatro componentes, cómo la película de agua posee un espesor (δ) que puede ser medido en micrómetros o milímetros. El incremento de la temperatura en la superficie del material metálico origina un cambio en el estado físico-técnico de la sustancia de líquido a vapor saturado. De esta forma, el espesor de la película de agua (δ) tiende a disminuir ($\delta_1 > \delta_2 > \delta_3 > \delta_4$) incrementándose la intensidad del fenómeno (I_c) debido a un mayor predominio de la fase de vapor. Esto trae como resultado una difusión (D) mayor del oxígeno hacia la superficie del material metálico y su posterior adsorción (Figura 5). De ahí, a que el paso controlador del proceso electroquímico del fenómeno de la corrosión atmosférica sea la difusión del oxígeno, es decir, se establece una diferencia de concentración entre el seno del electrolito (C_o) y en la superficie metálica (C_s). En esto influye también el pH alrededor de la neutralidad que posee el agua condensada depositada en la superficie de los materiales. Los iones metálicos salen en forma de cationes mediante la reacción anódica, dejando un número de electrones en el metal que son tomados por el oxígeno disuelto en el agua existente, lo cual representa la reducción catódica del agente oxidante. La concentración en la superficie de este tiende a ser cero ($C_s = 0$) (Figura 5). Producto del carácter electroquímico del proceso, se tiene en cuenta la constante de Faraday (F) y el número de electrones que se intercambian (n).

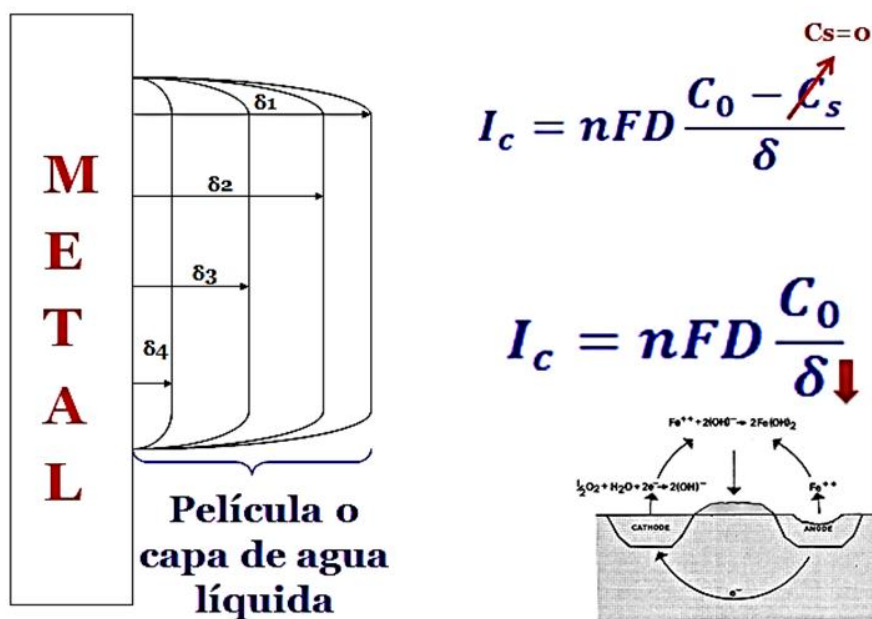


Fig. 5. Influencia del incremento de la temperatura en la corrosión atmosférica.

Todo el proceso explicado anteriormente, se representa a partir de un factor influyente en el fenómeno y tenido en cuenta en la descripción típica del ambiente atmosférico, denominado tiempo de humectación. Se entiende por tiempo de humectación, al período en el que una superficie metálica está cubierta por películas adsorbentes y/o líquidas de electrolito para poder causar la corrosión atmosférica (ISO-9223:2012). En otras palabras, es el tiempo en horas/año (h/a) en que ocurre el fenómeno de la corrosión atmosférica sobre los materiales metálicos.

Este parámetro con sus intervalos de clasificación exigidos en la normativa de la especialidad (ISO-9223:2012) tiende a ser determinado a valores promedios diarios de humedad relativa y temperatura por encima de 80% y 0°C respectivamente. Sin embargo, se ha demostrado en el clima tropical costero de Cuba, como una experiencia no recogida en la normativa de la especialidad, que su determinación es una condición necesaria pero no suficiente para la ocurrencia del fenómeno (Corvo *et al*, 2008a). Esto se debe a que se han determinado valores muy elevados de tiempo de humectación a intervalos de humedad relativa inferiores a 80%, es decir, la película de agua puede estar presente a partir de valores de humedad relativa alrededor de 50%.

Por otra parte, se ha demostrado que no tiene sentido el cálculo del tiempo de humectación en climas tropicales costeros como el de Cuba. Esto se debe a que para valores similares determinados de tiempos de humectación en todo el país que convergen a un mismo intervalo de clasificación, diferentes categorías de agresividad corrosiva desde C2 baja hasta CX extrema, han sido obtenidas para los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, como son el acero al carbono, cinc, cobre y aluminio. El factor fundamental ha sido el comportamiento de la deposición de agentes agresivos de procedencia natural o antropogénica, principalmente la deposición de las sales de iones cloruro en forma de disolución salina procedentes del mar y transportadas en el aerosol marino (Corvo *et al*, 2008b).

El tiempo de humectación tampoco tiene en cuenta el tiempo de caída de la lluvia. En ese tiempo, existe un efecto de lavado de los agentes agresivos (sales de iones cloruro y sulfato) en la superficie de los materiales metálicos, donde la corrosión atmosférica

resulta mínima a valores elevados de tiempos de humectación. Para las condiciones interiores, el tiempo de humectación ha resultado mayor que en condiciones exteriores. Para esta última condición de exposición, la corrosión atmosférica a partir de su cinética, ha resultado inferior, debido a las menores deposiciones de agentes agresivos (Corvo *et al*, 2008b).

Deposición de agentes agresivos

Otro aspecto importante a definir en la caracterización típica del ambiente atmosférico como primera variante de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera, es el comportamiento de la deposición mensual y anual de agentes agresivos como las sales de iones cloruro y sulfato (definida también como compuestos de azufre). Se entiende por deposición a la cantidad de agentes agresivos en forma de cristales de sales o en forma de disolución salina, que se depositan en la superficie de un captador o material metálico, mientras el aerosol marino continúa penetrando desde el mar hacia el interior de la tierra, a partir de su flujo horizontal (Meira *et al*, 2008). Diferentes tipos de captadores y dispositivos, se vienen usando a nivel mundial para la determinación de la deposición de los agentes agresivos en estudios de corrosión atmosférica (Howland y Castañeda, 2017). En los últimos años se ha venido usando en Cuba, el paño seco para la determinación de la deposición de las sales de iones cloruro (320 x 220 mm) y el captador de placa filtrante de celulosa (filtrasita: 150 x 100 mm) para la determinación de los iones sulfatos o compuestos de azufre. Los soportes donde son colocados los captadores deben ir ubicados en una caseta con techos a dos aguas o en zonas donde no le impacte la lluvia caída a una altura no inferior de 3 m (Figuras 2 a), b) y c). De esta manera se evita el lavado de los agentes agresivos en la superficie de cada captador.

La deposición, no es más que un indicador del flujo de deposición vertical, resultante del flujo horizontal del aerosol marino. Para su interpretación, los dos valores mensuales de deposición de las sales de iones cloruro y sulfato determinados, pueden ser graficados mensualmente a diferentes distancias desde la línea costera (ISO 9225:2012). En caso de ser graficados mensualmente, se tiene como resultado la estación más agresiva en el año, que generalmente es la invernal en el clima tropical costero de Cuba, debido a la entrada de los frentes fríos (Castañeda, Rivero, Corvo, 2012). Valores muy elevados de deposición mensual y promedio anual de sales de iones cloruro, llegando a ser muy superiores a los límites máximos establecidos en la normativa de la especialidad, han sido obtenidos durante la época invernal.

El límite máximo de deposición promedio anual de sales de iones cloruro determinadas por el captador de la vela húmeda establecido en la normativa es 1500 mg/m²d. Se ha llegado a obtener de manera mensual alrededor de 3000 mg/m²d en los meses más invernales en Cuba (enero y febrero), así como un valor promedio anual alrededor de 1800 mg/m²d, exactamente en zonas no apantalladas en el litoral costero de La Habana a 20 metros de la línea costera para ambos casos (Castañeda, Corvo, Howland, Marrero, 2018).

De acuerdo con la base de datos actualizada existente en el Laboratorio de Protección de Materiales de la Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación del CNIC, muy pocos valores promedios anuales de deposición de sales de iones cloruro, han sido determinados similares o superiores a 1800 mg/m²d en zonas costeras nivel mundial (Tabla 1). Evidentemente, se tratan de zonas con categorías estimadas y determinadas de agresividad corrosiva de la atmósfera de C4 (elevada), C5 (muy elevada) y CX (extrema) para los materiales metálicos más usados en la industria de

la construcción y el hormigón armado. En el caso de la India, el valor promedio anual determinado se basó en una deposición seca, debido a los valores promedios anuales elevados de temperatura y muy bajos de humedad relativa (Tabla 1).

Tabla 1. Valores más elevados de deposición de sales de iones cloruro a nivel mundial

País	Zona costera	Deposición (mg/m ² d)	Referencias
México	Veracruz	1 483,0	Liboria et al, 2014
	Coatzacoalcos	1 040,38	
Portugal	Cabo Razo	1 392,0	Trocónis et al, 2007
India	Sriharikota	5 000	Natesan et al, 2005
España	Cabo Vilano	1 905,0	Alcántara et al, 2015

El efecto de la disminución de la deposición mensual y promedio anual, en función del incremento de la distancia desde la línea costera hacia el interior de la tierra, en dependencia del número de sitios de exposición instalados, permite a partir del ajuste de modelos estadísticos, conocer la distancia crítica a partir de la cual comienza a disminuir de manera considerable principalmente la deposición de las sales de iones cloruro. Permite conocer, además, el porcentaje de deposición de este peligroso agente agresivo por cada sitio de exposición, siendo mayor en los sitios colocados muy próximos a la línea costera. Se ha demostrado en estudios realizados en el clima tropical costero de Cuba que, entre un 90 y un 95% de las sales de iones cloruro en siete sitios de exposición al exterior, es depositada a una distancia desde la línea costera entre 20 y 30 m en la época invernal en zonas costeras caracterizadas por el efecto de apantallamiento de las estructuras como es la zona del Malecón Habanero (Castañeda, Corvo, Howland, Marrero, 2018).

La determinación de valores elevados de deposición de agentes agresivos es una condición necesaria y suficiente para la obtención de categorías elevadas (C4), muy elevadas (C5) y extrema (CX) de agresividad corrosiva de la atmósfera.

Otra experiencia ha sido la influencia de la velocidad del viento en la deposición de las sales de iones cloruro, principalmente en zonas muy próximas a la línea costera. Se ha demostrado que, a partir de una velocidad del viento de 3 m/s, existe un incremento considerable de la deposición de este peligroso agente agresivo, siendo uno de los umbrales más bajos determinados a nivel mundial (Castañeda, Corvo, Howland, Marrero, 2018). De ahí, la obtención de categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera.

Las experiencias explicadas anteriormente, así como las comprendidas en el complejo humedad relativa-temperatura, no son ilustradas en la normativa de la especialidad en cuanto a la descripción típica del ambiente atmosférico. Las mismas han servido para la interpretación de los resultados obtenidos en los estudios de corrosión atmosférica realizados en el clima tropical costero de Cuba a partir del año 2005.

Los valores promedios anuales de deposición de iones cloruro y compuestos de azufre, permiten la clasificación de la atmósfera en la zona de estudio teniendo en cuenta sus intervalos de clasificación exigidos en la normativa de la especialidad. Se

entiende por la clasificación de la atmósfera o tipo de ambiente, a la caracterización de la atmósfera sobre la base de criterios apropiados distintos de la corrosividad o de factores de operación complementarios: rural, urbano, industrial, marino, costero (ISO 9223:2012).

En los estudios ejecutados en el clima tropical costero de Cuba, se ha obtenido la combinación de varias clasificaciones de la atmósfera en las zonas estudiadas. Como ejemplo se tiene, en zonas industriales próximas a la costa donde se favorece la obtención de una atmósfera industrial-costera (Corvo *et al*, 2008c). Otro caso sería la clasificación de una atmósfera costera-industrial muy próximo a la zona del rompiente de las olas (línea costera), con o sin la presencia de industria (Valdés *et al*, 2019). Esto se debe a que el agua de mar, es portadora también de sales de iones sulfato, las cuales son transportadas en el aerosol marino. De acuerdo con la base de datos, la mayoría de los estudios de corrosión atmosférica a nivel mundial han sido ejecutados en atmósferas industriales-costeras, costeras-industriales y costeras, en comparación con las atmósferas clasificadas como urbana y rural. Sin embargo, los problemas de deterioro en la infraestructura metálica debido a la corrosión atmosférica persisten a nivel mundial.

Por otra parte, se ha demostrado también, cómo la clasificación de la atmósfera varía en función del incremento de la distancia desde la línea costera, zona donde ocurre la acción del rompiente de las olas del mar. Este aspecto tampoco es recogido en la normativa de la especialidad. Por ejemplo, en función del incremento de la distancia, se han obtenido la combinación de las atmósferas costera-industrial e industrial-costera, llegando a ser totalmente industrial y rural a mayores distancias desde la línea costera (Castañeda, Corvo, Valdés, 2018), manteniéndose los mismos valores de tiempos de humectación. Todo recae en que, a partir de una cierta distancia desde la línea costera, la deposición de las sales de iones sulfato debido a las diferentes fuentes de este peligroso agente agresivo (agua de mar, industrias, tráfico automotor, etc.) comienza a ser mayor que la deposición de las sales de iones cloruro. Por otra parte, al presentar las partículas de sales de iones sulfato un menor peso y tamaño en comparación con la de las sales de iones cloruro, las mismas tienden a depositarse a mayores distancias desde la línea costera. Es evidente que, la combinación de los tipos de atmósfera donde exista la costera, recae en una mayor categoría de corrosividad de la atmósfera para los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción.

A pesar de que en la normativa de la especialidad se ilustra el concepto de nivel de contaminación ambiental (ISO 9223:2012), es válido aclarar que un estudio de corrosión atmosférica o de agresividad corrosiva de la atmósfera no se relaciona con un estudio de contaminación ambiental, de calidad del aire, o cualquier otro relacionado con el cambio climático.

La descripción típica del ambiente atmosférico, solo tiene en cuenta el comportamiento del complejo humedad relativa-temperatura, la deposición de las sales de iones cloruro e iones sulfato o compuestos de azufre, además de la determinación de la concentración de NO₂. En ocasiones, se hace uso también de la determinación de la deposición del material particulado total a partir de la suma del inorgánico y el orgánico, principalmente bajo condiciones interiores. Se entiende por nivel de contaminación ambiental, al rango numerado basado en mediciones cuantitativas de sustancias químicamente activas específicas, gases corrosivos o partículas suspendidas en el aire, tanto naturales como por el resultado de la actividad humana y que son diferentes de los componentes normales del aire.

Estimación de las categorías de agresividad corrosiva a partir de las funciones dosis/respuestas. Segunda variante

La segunda variante de estimación, se basa en el cálculo indirecto de la velocidad de corrosión anual a partir de la pérdida de espesor (r_{corr} en $\mu\text{m}/\text{años}$) para cada material metálico, haciendo uso de las funciones dosis/respuestas establecidas en la normativa de la especialidad de corrosión atmosférica (Tabla 2). Se trata de una variante más cualitativa en comparación con la primera variante basada en la descripción típica del ambiente atmosférico. Se entiende por funciones dosis/respuestas en estudios de corrosión atmosférica, a la relación derivada de los resultados de las pruebas de campo, es decir, en la condición de exposición al exterior para el cálculo indirecto de la velocidad de corrosión anual a partir de la pérdida de espesor, haciendo uso de los valores promedios anuales de los parámetros ambientales (ISO 9223:2012).

Tabla 2. Funciones dosis/respuestas para el cálculo indirecto de la velocidad de corrosión.

No.	Metales	Funciones dosis/repuestas	n	R ²
1	Acero al carbono	$r_{corr} = 1,77P_d^{0,52} e^{(0,020HR)} + 0,102S_d^{0,62} e^{(0,033HR+0,040T)}$	128	0,85
2	Cinc	$r_{corr} = 0,0129P_d^{0,44} e^{(0,046HR)} + 0,0175S_d^{0,57} e^{(0,008HR+0,085T)}$	114	0,78
3	Cobre	$r_{corr} = 0,0053P_d^{0,26} e^{(0,059HR)} + 0,01025S_d^{0,27} e^{(0,036HR+0,049T)}$	121	0,88
4	Aluminio	$r_{corr} = 0,0042P_d^{0,73} e^{(0,025HR)} + 0,0018S_d^{0,60} e^{(0,020HR+0,094T)}$	113	0,65

Leyenda: P_d , S_d , HR, T: promedio anual de deposición de sales iones sulfato, sales de iones cloruro, humedad relativa y temperatura respectivamente.

Para el cálculo indirecto de la velocidad de corrosión, se hace uso de los valores promedios anuales de deposición de sales iones sulfato, sales de iones cloruro, humedad relativa y temperatura. De ahí, la necesidad de ejecutar la primera variante de estimación basada en la descripción típica del ambiente atmosférico en estudios de corrosión atmosférica o evaluación de la agresividad corrosiva de la atmósfera en una zona previamente seleccionada. Los valores anuales de velocidad de corrosión (r_{corr} en $\mu\text{m}/\text{años}$) obtenidos, sirven para la estimación de la categoría de agresividad corrosiva de la atmósfera en la zona de estudio para cada material metálico, según los rangos de clasificación exigidos en la normativa de la especialidad (Tabla. 3).

Los valores anuales de velocidad de corrosión obtenidos por las funciones dosis/respuestas, no están referidos para el aluminio (Tabla. 3). Como bien se conoce, este apreciado material metálico expuesto a la atmósfera de forma directa, pudiera experimentar corrosión generalizada y localizada. Los valores referidos en la tabla son calculados asumiendo el mecanismo electroquímico generalizado de la corrosión atmosférica (ISO 9223:2012). El aluminio, debido a su condición de pasivarse espontáneamente frente al oxígeno de la atmósfera presente en la fase de vapor saturado de la película de agua, tiende a sufrir corrosión localizada tipo picadura. Este tipo de corrosión atmosférica es muy intensa en zonas costeras de elevadas

deposiciones de sales de iones cloruro, donde las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera oscilan entre elevada (C4), muy elevada (C5) y extrema (CX).

Tabla 3. *Categorías de corrosividad o agresividad corrosiva de la atmósfera para los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción*

Categoría de corrosividad	Velocidad de corrosión de metales				
	Unidad	r_{corr}			
		Acero al carbono	Cinc	Cobre	Aluminio
C1	g/(m ² año)	$r_{corr} \leq 10$	$r_{corr} \leq 0.7$	$r_{corr} \leq 0.9$	Despreciable
	μm/año	$r_{corr} \leq 1.3$	$r_{corr} \leq 0.1$	$r_{corr} \leq 0.1$	-
C2	g/(m ² año)	$10 \leq r_{corr} \leq 200$	$0.7 \leq r_{corr} \leq 5$	$0.9 \leq r_{corr} \leq 5$	$r_{corr} \leq 0.6$
	μm/año	$1.3 \leq r_{corr} \leq 25$	$0.1 \leq r_{corr} \leq 0.7$	$0.1 \leq r_{corr} \leq 0.6$	-
C3	g/(m ² año)	$200 \leq r_{corr} \leq 400$	$5 \leq r_{corr} \leq 15$	$5 \leq r_{corr} \leq 12$	$0.6 \leq r_{corr} \leq 2$
	μm/año	$25 \leq r_{corr} \leq 50$	$0.7 \leq r_{corr} \leq 2.1$	$0.6 \leq r_{corr} \leq 1.3$	-
C4	g/(m ² año)	$400 \leq r_{corr} \leq 650$	$15 \leq r_{corr} \leq 30$	$12 \leq r_{corr} \leq 25$	$2 \leq r_{corr} \leq 5$
	μm/año	$50 \leq r_{corr} \leq 80$	$2.1 \leq r_{corr} \leq 4.2$	$1.3 \leq r_{corr} \leq 2.8$	-
C5	g/(m ² año)	$650 \leq r_{corr} \leq 1500$	$30 \leq r_{corr} \leq 60$	$25 \leq r_{corr} \leq 50$	$5 \leq r_{corr} \leq 10$
	μm/año	$80 \leq r_{corr} \leq 200$	$4.2 \leq r_{corr} \leq 8.4$	$2.8 \leq r_{corr} \leq 5.6$	-
CX	g/(m ² año)	$1500 \leq r_{corr} \leq 5500$	$60 \leq r_{corr} \leq 180$	$50 \leq r_{corr} \leq 90$	$r_{corr} \geq 10$
	μm/año	$200 \leq r_{corr} \leq 700$	$8.4 \leq r_{corr} \leq 25$	$5.6 \leq r_{corr} \leq 10$	-

Se ha demostrado en los estudios realizados en el clima tropical costero de Cuba, una correspondencia entre la primera y segunda variante de estimación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera. Es evidente que, valores promedios mensuales y anuales elevados de temperatura y principalmente de humedad relativa, independiente de los valores promedios anuales de deposición de las sales de iones cloruro y sulfato, responden a valores elevados de velocidad de corrosión (r_{corr} en μm/años), indicando la estimación de categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera en una zona de estudio para el acero al carbono, cinc y el cobre.

Determinación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera

La determinación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera, como tercera variante de evaluación, es determinada a partir de la medida directa de la velocidad de corrosión anual en probetas de dimensiones estandarizadas en mm (150 x 100, 100 x 50, 100 x 75, pueden ser menor Figuras 2 a), b), c) y Figuras 3 a), b), c) para los materiales metálicos referidos en la normativa (ISO 9223:2012). Se trata de un método totalmente directo a la hora de determinar la velocidad de corrosión anual, ya sea por el método de pérdida de masa en función del área de la probeta y el tiempo de exposición (g/m²año, año = 1), así como por el método de la pérdida de espesor en función del tiempo (mm/año o μm/año). Al dividir el valor anual determinado por la pérdida de masa (g/m²año) entre la densidad de cada material metálico referido (Fe =

7,86 g/m³, Zn = 7,14 g/m³, Cu = 8,96 g/m³, Al = 2,70 g/m³), se tiene entonces el valor anual por la pérdida de espesor (μm/año).

Se entiende por velocidad de corrosión a la pérdida de masa y/o espesor del material metálico expuesto a la atmósfera de forma directa o indirecta, en función del área y el tiempo de exposición hasta un año de estudio. El valor anual de velocidad de corrosión, determinado en un estudio de corrosión atmosférica, es el valor guía que expresa la acción corrosiva esperada del ambiente atmosférico para una categoría de agresividad corrosiva de la atmósfera dada en los materiales metálicos, referenciados en la normativa de la especialidad (ISO 9223:2012).

Es evidente que, previo a la colocación de las probetas metálicas en los sitios de exposición seleccionados en el estudio, se ejecuten los procesos de desengrasado y decapado químico. Posterior a su retiro al año de estudio, se efectúan los procesos de eliminación de los productos de corrosión (óxidos metálicos) de acuerdo con lo referido en la normativa de la especialidad (ISO 8407:2012).

Como experiencia tomada en estudios de corrosión atmosférica ejecutados en el clima tropical costero de Cuba, al determinar la velocidad de corrosión mensual y a tiempos acumulativos de tres, seis, nueve y doce meses (tres valores en cada período de exposición), se obtienen al graficar los valores mensuales durante el año de estudio, las denominadas curvas de corrosión. Es por eso la colocación de 15 probetas metálicas en los soportes, tres para la medición mensual y las otras doce para la determinación de la velocidad de corrosión durante los tiempos acumulativos (Figuras 2 a) y c). Generalmente, estas curvas presentan un comportamiento muy similar en forma de parábola al de la deposición mensual de las sales de iones cloruro. De ahí a que se demuestre que las sales de iones cloruro ha sido un factor determinante en el desarrollo de la corrosión atmosférica, principalmente en el acero al carbono. Esto se debe a que, los estudios de corrosión atmosférica son iniciados y culminados en los meses invernales, es decir, en la época más agresiva, como bien establece la normativa de la especialidad (ISO 9223:2012). Por otra parte, en ocasiones ha resultado conveniente solo la determinación anual de la velocidad de corrosión en los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción: acero al carbono, cinc, cobre y aluminio (Figura 2 b), debido a lo intrincada que se encontró la zona de estudio (Castañeda, Corvo, Fernández, Valdés, 2016).

Se ha demostrado que, en zonas muy próximas a la línea costera donde la atmósfera ha sido clasificada como costera-industrial, al existir un incremento considerable de la velocidad de corrosión en función de los tiempos acumulativos, se puede considerar el valor del tiempo igual a la unidad, es decir, 1 en cada tiempo acumulativo. De ahí, que la verdadera velocidad de corrosión (g/m²año), usada para la determinación de la clasificación de la agresividad corrosiva de la atmósfera es la determinada a un año de estudio (Tabla. 3).

Es evidente que, las categorías de corrosividad de la atmósfera, determinadas por la medida directa de la velocidad de corrosión, ofrecen un menor nivel de incertidumbre en comparación con la estimada por las funciones dosis/respuestas (Tabla 4) (ISO 9223:2012).

El elevado nivel de incertidumbre a partir de los valores de velocidad de corrosión anual determinados, haciendo uso de las funciones dosis/respuesta, se divide en dos partes: la incertidumbre de las propias funciones y en las mediciones de los parámetros ambientales. La primera es la dominante en estudios de corrosión atmosférica (ISO 9223:2012). Sería novedoso obtener las propias funciones

dosis/respuestas para cada material metálico, ajustadas a las condiciones del clima tropical costero de Cuba.

Tabla 4. Niveles de incertidumbre para la evaluación de la agresividad corrosiva basado en la determinación y estimación.

Metales	Nivel de incertidumbre	
	Determinación	Estimación
Acero al carbono	$\pm 2 \%$	-33 % hasta 50%
Cinc	$\pm 5 \%$	-33 % hasta 50%
Cobre	$\pm 2 \%$	-33 % hasta 50%
Aluminio	$\pm 5 \%$	-33 % hasta 100%

El nivel bajo en cuanto a la determinación, se debe a que la categoría de agresividad corrosiva es obtenida a partir del valor promedio de tres valores anuales de velocidad de corrosión por ambos métodos directos: pérdida de masa y espesor. De ahí, la necesidad imperiosa de obtener las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera a partir de su determinación al año de estudio, siempre y cuando sea posible en estudios de corrosión atmosférica. Claro está, es válida la estimación a partir de la descripción típica del ambiente atmosférico, debido a los aportes y experiencias que se obtienen.

Por otra parte, la norma ISO 9223:2012 tiene establecido que, el nivel de incertidumbre teniendo en cuenta el valor de velocidad de corrosión anual determinado por las funciones dosis/respuestas, puede ser menor en un rango medio, correspondiente a una categoría media (C3) estimada de agresividad corrosiva de la atmósfera. Una mayor incertidumbre puede ser obtenida en rangos inferiores y superiores, correspondientes a categorías muy baja (C1) y muy elevada (C5) de agresividad corrosiva de la atmósfera.

Este aspecto referido anteriormente, ha demostrado sus experiencias para el acero al carbono y el acero galvanizado en los últimos estudios de corrosión atmosférica realizados en el clima tropical costero de Cuba. De esta forma, las capas de óxidos actúan como efecto barrero a la difusión del oxígeno y de otros agentes agresivos como las sales de iones sulfato y cloruro. Sin embargo, a partir de cierta distancia desde el mar, donde la atmósfera fue clasificada como industrial, debido a que la deposición mensual y promedio anual de las sales de iones sulfato han resultado superior a la de iones cloruro, las categorías determinadas a partir de la medida directa de la velocidad de corrosión anual resultaron entre media (C3) y hasta de baja (C2) (Castañeda, Corvo, Fernández, Valdés, 2016; Castañeda, Corvo, Valdés, 2018). Se trata de una gran diferencia entre la estimación y la determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera.

La explicación científica del resultado se debe a que, cuando la deposición de iones sulfato ha sido muy superior a la de iones cloruro, en ambos materiales se tienden a formar capas de óxidos muy compactas y de adherencia elevada. De esta forma, las capas de óxidos actúan como efecto barrero a la difusión del oxígeno y de otros agentes agresivos como las sales de iones sulfato y cloruro. En otras palabras, los iones sulfatos, incluso a elevadas deposiciones, no son considerados como un agente agresivo peligroso para los aceros al carbono. Sin embargo, ha sucedido todo lo contrario en caso de existir una atmósfera costera-industrial, es decir, la deposición de las sales de iones cloruro muy superior a la de iones sulfato. Para este caso, se ha demostrado una correspondencia entre la estimación y la determinación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera, principalmente, la muy elevada (C5). Los productos de corrosión formados, no constituyen capas compactas de adherencia elevada, más bien, existen en forma de capas de óxidos totalmente exfoliadas debido a la influencia de la deposición elevada de las sales de iones cloruro (Castañeda, Corvo, Fernández, Valdés, 2016; Castañeda, Corvo, Valdés, 2018).

De forma general, la distancia desde la línea costera y la clasificación de la atmósfera, han influido en cuanto a la diferencia entre la estimación y la determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera para ambos materiales. Ambos aspectos, que no son recogidos en la normativa de la especialidad de estudios de corrosión atmosférica, influyen en la incertidumbre a la hora de estimar una agresividad corrosiva elevada (C4), muy elevada (C5) y extrema (CX).

Para el caso del cobre, existe una correspondencia entre la estimación y la determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera independientemente de la distancia desde la línea costera y la clasificación de la atmósfera. Como bien se conoce, el cobre es muy afectado por la deposición de las sales de iones sulfato y concentración de NO_2 , ya sea en una atmósfera costera-industrial, industrial-costera e industrial (Castañeda, Corvo, Fernández, Valdés, 2016; Castañeda, Corvo, Valdés, 2018).

CONCLUSIONES

En este trabajo, se recapitulan una serie de conceptos básicos establecidos en la normativa de la especialidad de corrosión atmosférica y que son tenidos en cuenta a la hora de realizar un estudio de agresividad corrosiva de la atmósfera o de corrosión atmosférica para los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción (acero al carbono, cinc, cobre y aluminio).

Sin embargo, se describen una serie de experiencias en los conceptos, que no son recogidos en la normativa de la especialidad, derivadas de los últimos estudios realizados en el clima tropical costero de Cuba. De esta forma se indica, la necesidad de ejecutar siempre que sea posible, la primera variante de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera, basada en la descripción típica del ambiente atmosférico de conjunto con la tercera variante de determinación fundamentada, en la medida directa de la velocidad de corrosión anual en probetas de dimensiones estandarizadas.

Para ciertas condiciones descritas, ha existido una gran diferencia entre la estimación, haciendo uso de los valores indirectos anuales de velocidad de corrosión, determinados por las funciones dosis/respuestas como segunda variante, y la tercera variante de determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero al carbono y el acero galvanizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Alcántara, J. Chico, B. Díaz, I. De la Fuente, D. Morcillo, M. (2015). Airborne chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosion of mild steel. *Corrosion Science*, vol. (97), pp. 74–88.
- Castañeda, A. Rivero, C. Corvo, F. (2012). Evaluación de sistemas de protección contra la corrosión en la rehabilitación de estructuras construidas en sitios de elevada agresividad corrosiva en Cuba. *Revista de la Construcción de Chile*, vol. (11), pp. 49-61.
- Castañeda, A. Corvo, F. Fernández, D. Valdés, C. (2016). Outdoor-indoor atmospheric corrosion in a coastal wind farm located in a tropical island. *Engineering Journals, Tailandia*, vol (21), pp. 44-62.
- Castañeda, A. Corvo, F. Howland, J, J. Marrero, R. (2018). Penetration of marine aerosol in a tropical coastal City: Havana. *Revista ATMÓSFERA-UNAM*, vol. (31), pp. 87-104.
- Castañeda, Abel. Corvo, F. Valdés, C. (2018). Atmospheric corrosion study in a Harbor located in a tropical island. *Material and Corrosion*, vol. (69), pp. 1472-1744.
- Castañeda, A. Corvo, F. Howland, J, J. Marrero, R, Fernández, A. (2019). Atmospheric corrosion behaviors of reinforcement steel in reinforced concrete in a coastal city as Havana, Cuba. Springer Nature Switzerland AG 2020 F. Martirena et al. (eds.), *Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete, RILEM Book series 22*, pp. 283-291.
- Castañeda, A. Marrero, R. Valdés C. Howland, J. J. (2020). Aporte económico en estudios de corrosión atmosférica y deterioro de materiales en zonas estratégicas del clima tropical costero de Cuba. *Tecnología Química*, vol. (40), pp.52-67
- Chen, Y. Huang, H. Zhang, Y. Wang, Ch. Fan, W. (2018). A method of atmospheric corrosion prediction for aircraftstructure. *Material and Corrosion*, vol (1), pp. 1-12.
- Corvo, F. Pérez, T. Martin, Y. Reyes, J. Dzib, L, R. González-Sánchez, J. Castañeda, A. (2008a) Time of wetness in tropical climate: Considerations on the estimation of TOW according to ISO 9223 standard. *Revista Corrosion Science*, vol (50), pp. 206–219.
- Corvo, F. Pérez, T. Martin, Y. Reyes, J. Dzib, L, R. González, A, J. Castañeda, A. (2008b). *Corrosion Research Frontiers. Atmospheric corrosion in tropical climate. On the concept of Time of Wetness and its interaction with contaminants deposition. Electroanalytical Chemistry: New Research. Nova Science Publishers. Chapter 2. New York. EE.UU.*
- Corvo, F. Pérez, T. Dzib, L. Martín, Y. Castañeda, A. González, E. Pérez, J. (2008c). Outdoor-Indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. *Corrosion Science*, vol. (50), pp. 220 – 230.
- Domínguez, J. A. Castro, D. M. Matos, R. Hing. R. (1987). *Introducción a la Corrosión y Protección de Metales. Facultad de Procesos Químicos y Alimentarios. Empresa Nacional de Producción y Servicio de la Educación Superior.*
- ISO 9223:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification determination and estimation.

- ISO 9225:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres.
- ISO 9226:2012. Corrosion of metals and alloys – Determination of corrosion rate of standard specimen for the evaluation of corrosivity.
- ISO 8407. Corrosion of metals and alloys — Removal of corrosion products from corrosion tests specimens.
- Liboria, M. Carmina. M. Estela, Sarmiento. O. Sarmiento, J. Ramirez. L. Uruchurtu, Jorge. (2014). Atmospheric Corrosion Dose/Response Functions from Statistical Data Analysis for Different Sites of Mexico. *Innovations in Corrosion and Materials Science*, vol. (4), pp. 11-20.
- Martín, Y. Corvo, F. Castañeda, A. Valdés, C. González, E. Pérez, J. Portilla, C. (2006). Influencia de diferentes factores ambientales en la corrosión de metales que se emplean en la construcción de equipos electro electrónicos. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, vol (37), pp. 219-225.
- Meira, G. R. Andrade, C. Alonso, C. Padaratz, I. J. Borba, J. C. (2008). Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone - A tool for corrosion studies. *Revista Corrosion Science*, vol. (50), pp. 2724–2731.
- Natesan, M. Venkatachari, G. Palaniswamy, N. (2005) *Corrosivity and durability maps of India*. *Corrosion Prevention and Control*, vol (1), pp. 43-54.
- Trocónis, O. Duracon Collaboration. (2007). Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. *Corrosion Science*, vol (49), pp. 2832–2843.
- Shewetzer, Philips, A. (2010). *Fundamentals of corrosion. Mechanisms, Causes and Preventative Methods*. Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300. ISBN: 978-1-4200-6770-5.
- Valdés, C. Estudio del deterioro del material pétreo del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís. *Reseña tesis de doctorado*. (2014). *Revista CENIC, EBSCO, Ciencias Químicas*, vol.(45), pp. 1-8.
- Valdés, C. Castañeda, A. Corvo, F. Marrero, R. Montero, R. (2018). Atmospheric corrosion study of carbon steel in Havana waterfront zone. Springer Nature Switzerland AG 2020, F. Martirena et al. (eds.), *Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete, RILEM Book*, vol. (22), pp. 329-337.
- Viña, J. Camejo, J. J. Castañeda, A. (2020). Análisis preliminar de riesgos de accidentes mayores en la central termoeléctrica “Otto Parellada”. *Revista CENIC, Ciencias Químicas*, vol. (51), pp.147-173.