

ESTUDIO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DEL ACERO AL CARBONO EN LA REFINERÍA DE PETRÓLEO DE LA HABANA, CUBA

Atmospheric corrosion study of carbon steel in the oil refinery of Havana, Cuba

Abel Castañeda Valdés^a, Cecilia Valdés Clemente^a, Francisco Corvo Pérez^b, Rigoberto Marrero Águila^c.

^a Laboratorio de Protección de Materiales. Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación. Centro Nacional de Investigaciones Científicas CNIC. Avenida 25 y Calle 158 CUBANACAN, Playa, La Habana, abel.castaneda@cnic.edu.cu.

^b Centro de Investigación en Corrosión. Universidad Autónoma de Campeche. Av. Héroe de Nacozari, No. 480 Campus VI de Investigación. San Francisco de Campeche, México, fcorvo@uacam.mx.

^c Grupo de Investigación en Corrosión e Ingeniería de Materiales. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana. Calle 114 No. 11901 entre Ciclo vía y Rotonda, Marianao, La Habana, rigo@quimica.cujae.edu.cu

Recibido: 8 de abril de 2020.

Aceptado: 26 de agosto de 2020.

RESUMEN

La corrosión atmosférica del acero al carbono fue estudiada en la refinería de petróleo de La Habana, Cuba. Cuatro sitios de exposición, tres bajo la condición exterior de exposición y uno a interior fueron colocados en la refinería durante un año de estudio. Categorías más elevadas de agresividad corrosiva para la condición exterior, C5 muy elevadas y CX extrema, fueron esperadas para atmósferas clasificadas como industrial-costera, industrial e industrial altamente contaminada debido a la deposición elevada de sales de iones sulfato. Se demostró, una equivalencia entre las dos variantes de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera para las atmósferas clasificadas en la condición exterior de exposición. La elevada deposición de iones sulfato muy superior a la de iones cloruro trajo como resultado, diferencias entre la categoría de estimación y de determinación de la agresividad corrosiva para atmósferas clasificadas como industrial e industrial altamente contaminada. La categoría estimada fue elevada (C4) y la determinada media (C3). Sin embargo, para una atmósfera clasificada como industrial-costera, donde la deposición de iones cloruro resulta más elevada sin llegar a ser superior a la de iones sulfato, existió una equivalencia entre las dos variantes de estimación y la determinación elevada (C4) de la agresividad corrosiva para la condición exterior de exposición. La deposición de las sales de iones cloruro continúa siendo el factor más influyente en la corrosión atmosférica del acero al carbono, demostrándose en este estudio, para una atmósfera clasificada como industrial altamente contaminada. Para la condición interior de exposición, existe una equivalencia entre la estimación y la determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera elevada (IC4) en la refinería. El incremento de la HR fue el factor más influyente en la corrosión atmosférica del acero al carbono.

Palabras clave: corrosión atmosférica, acero al carbono, agresividad corrosiva, cloruro, sulfato

ABSTRACT

Atmospheric corrosion of carbon steel was studied in the oil refinery of Havana, Cuba. Four exposure sites, three in outdoor exposure condition and one in indoor exposure condition were placed in the refinery during one year of study. Corrosivity categories of the atmosphere higher, C5 very high and CX extreme, were expected for atmosphere classified as industrial-coastal, industrial and industrial highly polluted, due to high deposition of sulfate ions. Equivalence between two ways of estimation of corrosivity categories of the atmosphere was demonstrated for the atmospheres classified in the outdoor exposure condition. The high deposition of sulfate ions higher than chlorides, bring as results difference between the category of estimation and determination for atmosphere classified as industrial and industrial highly polluted. The category high (C4) was estimated and medium (C3) was determined. However, for an atmosphere classified as industrial-coastal, where the deposition of chloride ions is higher without being higher than sulphate ions, there was equivalence between the two ways of estimation and determination high (C4) of aggressivity corrosion for outdoor exposure condition. The chloride deposition salts remain as the most influential factor in the atmospheric corrosion of carbon steel, demonstrated in this study, for an atmosphere classified as industrial highly polluted. For the indoor exposure condition, there was equivalence between the estimation and determination of aggressivity corrosion of the atmosphere high (IC4) in the refinery. The increase in RH is the most influential factor in the atmospheric corrosion of carbon steel.

Keywords: atmospheric corrosion, carbon steel, aggressivity corrosion, sulfate, chloride.

INTRODUCCIÓN

La corrosión atmosférica del acero al carbono ha sido estudiada en el clima tropical costero de Cuba, así como en varias regiones costeras e industriales de Latinoamérica desde la década de los años 80 hasta los últimos años (Corvo *et al*, 2008; Chico *et al*, 2017). Escasos estudios han reportado la resistencia a la corrosión atmosférica de este apreciado material metálico de la construcción en el interior de una refinería de petróleo, localizada en una zona costera de bahía en una isla con un clima tropical (Ghanbarzadeh, Neshati, Reza, 2013).

Las refinerías de petróleo a nivel mundial se encuentran emplazadas muy próximas a las bahías para las operaciones de carga y descarga de los buques, así como para el aprovechamiento del agua de mar en todos los sistemas de enfriamiento. El deterioro por corrosión de los sistemas influye de manera general en un incremento de las pérdidas directas o indirectas (Domínguez, Castro, Matos, Hing, 1987; Chen *et al*, 2018). De ahí, la selección adecuada de los materiales metálicos y sus medios de protección para resistir los fluidos muy agresivos presentes en los procesos unitarios. La prevención y combate de la corrosión atmosférica ya sea bajo condiciones exterior e interior de exposición a la atmósfera en una refinería de petróleo, ocupa también un lugar importante en la ingeniería. El acero al carbono está presente mayoritariamente en casi todo el equipamiento que componen los sistemas encargados de los procesos de refinación del petróleo.

Corvo *et al*, 1992; demostraron a partir de la segunda variante del Mapa de Agresividad Corrosiva de la Atmósfera de la República de Cuba que, el factor fundamental que más influye en la corrosión atmosférica del acero al carbono bajo la condición exterior es la deposición de las sales de iones cloruros (DCI^- en mg/m^2d) ya sea a cortas y grandes distancias desde el mar. De forma general, 27 sitios de exposición bajo condiciones exteriores y 12 a interiores abarcaron diferentes zonas a lo largo y ancho del país, sin tener en cuenta las cuatro refinerías de petróleo ubicadas entre las zonas costeras norte y sur. La deposición del material particulado (DMP en mg/m^2d) y la posición de las probetas en cuanto a su colocación, demostraron una mayor influencia en la corrosión atmosférica del acero al carbono bajo condiciones interiores en espacios cerrados y con el efecto de abrigo ventilado (Corvo, *et al* 2006).

Los estudios enfocados en la resistencia del acero al carbono a la corrosión atmosférica continuaron su desarrollo a partir del año 2006 hasta la actualidad, sin tener en cuenta las cuatro refinerías de petróleo (Howland, Castañeda, 2018). Otros 31 sitios de exposición, 28 bajo condiciones exteriores y 3 a interiores en armarios metálicos bajo el efecto estufa, fueron colocados en varias zonas estratégicas de elevado potencial constructivo en el clima tropical costero de Cuba. Todos con el fin de evaluar la influencia de la agresividad corrosiva de la atmósfera no solo para el acero al carbono, sino también relativo a otros materiales metálicos muy usados en la industria de la construcción como son el acero galvanizado, cinc, cobre y aluminio. Se destacan: la zona de Cojímar en La Habana (Martín *et al*, 2006 y Corvo *et al*, 2008). El chatarrero ubicado en zonas aledañas a la Bahía de La Habana (Castañeda *et al*, 2006). La zona de mayor desarrollo eólico situada en Gibara al norte de Holguín (Castañeda, Fernández, Valdés, Corvo, 2015 y Castañeda, Corvo, Valdés, 2016) y la Zona Especial de Desarrollo Mariel (Fernández & Castañeda, 2015 y Castañeda, Valdés, Corvo, 2018). Se tiene en cuenta también un estudio de corrosión atmosférica realizado recientemente en la

zona tradicional del malecón habanero (Valdés, 2019). La DCI^- continúa siendo el factor fundamental en la corrosión atmosférica del acero al carbono bajo condiciones exteriores. El factor que más influye bajo condiciones interiores en armarios metálicos bajo el efecto estufa es la DMP (Martín *et al*, 2006; Corvo *et al*, 2008).

La agresividad corrosiva de la atmósfera para la condición exterior de exposición en la refinería de petróleo, es evaluada por las tres variantes establecidas (ISO-9223:2012), como sucedió en las zonas de Gibara, Especial de Desarrollo Mariel (ZEDM) y el malecón habanero. Las tres variantes son, la estimación, teniendo en cuenta una descripción del ambiente típico atmosférico en cada uno de los sitios seleccionados. La estimación de la agresividad corrosiva, calculando los valores indirectos de velocidad de corrosión obtenidos de las funciones dosis/respuesta. En este caso no solo para el acero al carbono, sino también para el cinc y el cobre. La tercera variante se basa en la medida directa de la velocidad de corrosión a partir de la pérdida de masa en función del área y el tiempo de exposición en las probetas metálicas estandarizadas durante un año de estudio.

La agresividad corrosiva para la condición interior bajo el efecto de abrigo ventilado, fue estimada también a partir de la descripción del ambiente típico atmosférico interior y determinada haciendo uso de la medida directa de la velocidad de corrosión en las probetas metálicas al año de estudio (ISO-11844-1: 2006).

El objetivo general es, demostrar la corrosión atmosférica del acero al carbono en una refinería de petróleo localizada en una isla con un clima tropical durante un año de estudio, bajo condiciones exterior e interior de exposición. Otros objetivos del estudio son, demostrar si existe una equivalencia entre las tres variantes de evaluación de la agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero al carbono, así como conocer los factores que más influyen en la corrosión atmosférica del acero al carbono para ambas condiciones de exposición respectivamente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección y ubicación de la zona de estudio. Montaje de los sitios de exposición

El estudio fue ejecutado en una refinería de petróleo en Cuba ubicada al sureste de la Bahía de la Habana en el municipio Regla, la cual ocupa una extensión territorial de 2.8 km². En el interior de la refinería fueron seleccionados cuatro sitios de exposición, tres bajo la condición exterior de exposición (sitios #1, #2 y #4) y el otro bajo la condición interior de exposición (sitio #3) (Fig.1). Sitio # 1. Situado en el litoral norte de la refinería en la costa en la Bahía de La Habana (Fig. 2 a). Sitio # 2. Planta uno (Fig. 2 b). Sitio # 3. Interior colocado en un almacén en la parte sur de la refinería con ventanas que dan acceso a la circulación del viento. Se trata de la condición interior de exposición bajo el efecto de abrigo ventilado (Fig. 2 c). Sitio # 4. Planta dos (Fig. 2 d).

En cada uno de los sitios de exposición se instalaron soportes de madera para la colocación de cuatro captadores de deposición de agentes agresivos y las 15 probetas metálicas de acero al carbono AISI-1018 (Fig. 2 a), b), c) y d). Los soportes de madera al exterior fueron colocados a una altura inferior a los 3 m en áreas techadas con acceso al viento, con el fin de

protegerlos contra la lluvia. Esto evita el lavado de los agentes agresivos depositados en la superficie de los captadores.

Parámetros meteorológicos

En los sitios de exposición #2 exterior y #3 interior, fueron colocados sensores electrónicos calibrados DATA LOGGER Tinytag/Ultra de fabricación alemana (Fig. 2 c). De esta forma, los valores promedios mensuales y anuales de humedad relativa (HR) y temperatura (T) fueron determinados para ambas condiciones de exposición durante el año de estudio (marzo/2014-febrero/2015).

Determinación de la deposición de agentes agresivos

Dos valores de deposición de sales de iones cloruro (DCl^- en mg/m^2d) e iones sulfato o compuestos de azufre (DSO_x^- en mg/m^2d) fueron determinados mensualmente para cada sitio de exposición durante el año de estudio (marzo/2014-febrero/2015). Dos captadores de paños secos (320 mm x 220 mm) compuestos por una tela antiséptica adsorbente fueron usados para la determinación de la DCl^- . Dos captadores de placa filtrante de celulosa (150 mm x 100 mm) fueron usados para la determinación de la DSO_x^- (Fig. 2 a), b), c) y d).

La preparación de los captadores y las determinaciones de los dos valores mensuales de DCl^- y DSO_x^- se realizaron a partir de la metodología de análisis establecida (ISO-9225:2012). Todos los captadores permanecieron siempre en bolsas de nylon protegidos antes del momento de su colocación y después de su retiro.

Determinación de la velocidad de corrosión

Las 60 probetas de acero al carbono AISI-1018 (Carbono (C): 0.13 – 0.2%, Manganeso (Mn): 0.39%, Aluminio (Al): 0.02%, Azufre (S) < 0.05% y fósforo (P) < 0.07%) fueron sometidas a los procesos de desengrasado y decapado químicos (ISO-9226:2012). Posteriormente, las 60 probetas fueron pesadas para la obtención de sus pesos iniciales (P_i en g) antes de su colocación en cada uno de los sitios de exposición (15 en cada sitio). Además, tres probetas fueron retiradas y colocadas mensualmente para la determinación mensual de la velocidad de corrosión en cada sitio de exposición durante el año de estudio (marzo/2014-febrero/15), para un total de 72 probetas de acero al carbono usadas. Las otras tres probetas fueron retiradas solamente a tiempos de acumulativos de exposición de tres, seis, nueve y 12 meses.

Todas las probetas después de retiradas a sus tiempos de exposición fueron sometidas al proceso químico de eliminación del producto de corrosión (ISO-9226:2012). Consecutivamente se le realizaron las pesadas finales (P_f en g).

Los valores de velocidad de corrosión (V_c en g/m^2) en las probetas colocadas en los tres sitios de exposición al exterior (sitios #1, #2 y #4) fueron calculados usando la expresión que establece la pérdida de masa entre el área (Área (A) = 0,015 m^2), donde el tiempo de exposición t es igual a la unidad (1). El espesor de 3 mm fue considerado despreciable:

$$V_c = \frac{P_i - P_f}{A \cdot t} \quad (1)$$

Para la condición interior de exposición en el sitio # 3, los valores de velocidad de corrosión (V_c en g/m²) fueron obtenidos también por la pérdida de masa pero, haciendo uso de la expresión (ISO-11844-1: 2006):

$$V_c = \frac{(P_i - P_f) - (P_{ib} - P_{fb})}{A \cdot t} \quad (2)$$

Esta expresión relaciona la pérdida de masa de las probetas antes y después de su colocación en atmósferas interiores $[(P_i - P_f)]$ con la pérdida de masa de una probeta en blanco $[(P_{ib} - P_{fb})]$ sin someterla a exposición bajo condiciones interiores es decir, permaneció en el laboratorio en una desecadora con sílica-gel (desecante) totalmente hermetizada durante el año de estudio.

Todas las probetas permanecieron en desecadoras antes del momento de su colocación y después de su retiro en cada uno de los sitios de exposición. El decapado químico y las pesadas iniciales a las tres probetas que se colocaron mensualmente, se realizaron un día antes del cambio en cada sitio de exposición en la refinería. Los tres valores mensuales de velocidad de corrosión fueron graficados para cada sitio en el año de estudio. Las determinaciones a tiempos acumulativos de tres, seis y nueve meses para ambas condiciones de exposición, no fueron tenidas en cuenta.

Evaluación de la agresividad corrosiva de la atmósfera

Estimación de la agresividad corrosiva en condiciones exteriores

El comportamiento mensual de los dos valores de DCl^- y DSO_x^- , y el de los valores promedios mensuales de HR y T fueron usados para la descripción del ambiente típico atmosférico, en comparación con la condición interior, como primera variante de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera. Los dos valores promedios anuales de DCl^- y DSO_x^- sirvieron para la clasificación de la atmósfera.

Los valores promedios anuales calculados de DCl^- , DSO_x^- , HR y T , fueron sustituidos en las funciones dosis/respuestas para el cálculo indirecto de la velocidad de corrosión (Tabla 1). El uso de las funciones dosis/respuestas exige que, los valores promedios anuales DCl^- determinados por el paño seco (S_{dp}) tienen que ser calculados por el método de captación de la vela húmeda (S_{wc}). Para la conversión de los valores fue usada la expresión (ISO-9225:2012):

$$S_{wc} = 2.4 S_{dp} \quad (3)$$

Los valores indirectos de velocidad de corrosión calculados (V_c en $\mu\text{m/año}$) a partir de sus intervalos de clasificación, sirvieron para la estimación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera en cada uno de los sitios de exposición como segunda variante, no

solo para el acero al carbono, sino también para el cinc y el cobre con la excepción del aluminio en cada uno de los sitios de exposición bajo condiciones exteriores (ISO-9223:2012).

Estimación de la agresividad corrosiva en condiciones interiores

Para la estimación de la categoría de agresividad corrosiva de la atmósfera en el sitio #3 a partir de la descripción del ambiente típico bajo condiciones interiores, intervalos de clasificación son establecidos para el valor promedio anual de HR , así como para los dos valores promedios anuales de concentración de iones sulfato (ISO-11844-1:2006). Los dos valores promedios anuales de concentración de iones sulfato (CSO_x^- en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) son obtenidos de los dos valores promedios anuales de DSO_x^- usando la expresión (ISO-9225:2012):

$$DSO_x^- = 0,8 CSO_x^- \quad (4)$$

Determinación de la agresividad corrosiva en las condiciones exterior e interior

Los tres valores anuales directos obtenidos de velocidad de corrosión (V_c en g/m^2) y sus valores promedios (V_{cp} en g/m^2), sirvieron para la determinación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera en cada uno de los sitios de exposición para el acero al carbono en la refinería de petróleo (ISO-9223:2012). Para la condición interior, los tres valores anuales de velocidad de corrosión tienen que ser convertidos a $\text{mg}/\text{m}^2\text{d}$ (ISO-11844-1: 2006). La observación visual de cada una de las probetas retiradas al año de estudio antes de someterlas al proceso de eliminación del producto de corrosión, permite confirmar los resultados obtenidos.

Análisis estadístico

El ajuste de regresiones estadísticas basadas en funciones exponenciales crecientes y múltiples, sirvieron para demostrar los factores que más influyen en la corrosión atmosférica del acero al carbono para ambas condiciones de exposición en la refinería. En cada sitio de exposición, 12 valores tomados como el número de determinaciones (n), fueron obtenidos de los promedios mensuales de velocidad de corrosión como variable dependiente, así como los valores medios mensuales de DCl^- , DSO_x^- y promedios mensuales de HR y T como variables independientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción del ambiente típico atmosférico en las dos condiciones de exposición

Análisis de los parámetros meteorológicos

Los valores promedios mensuales de T presentaron un comportamiento muy similar en ambas condiciones de exposición (Fig.3). Los valores mayores fueron obtenidos en la condición exterior de exposición, así como en la estación de verano para ambas condiciones (Mayo/2014-Septiembre/2014). El comportamiento para la condición exterior, es similar a los obtenidos en los estudios realizados en las zonas de Gibara, ZEDM y el malecón

habanero. Para la condición interior de exposición resulta también similar, pero, en armarios metálicos bajo efecto estufa (Martín *et al*, 2006 y Corvo *et al*, 2008).

Los valores promedios anuales de T entre ambas condiciones de exposición (27°C al exterior y $25,2^{\circ}\text{C}$ al interior) no mostraron una gran diferencia. No obstante, una mayor difusividad del oxígeno hacia la superficie del material metálico tiende a ocurrir con el incremento de la T en la condición exterior de exposición, siendo indicativo de valores mensuales y anuales más elevados de velocidad de corrosión correspondiente con categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera tanto para el acero al carbono, como para el cinc, el cobre y el aluminio.

Sin embargo, la obtención de valores promedios mensuales y anuales menores de T en la condición interior de exposición en el sitio #3, posibilita una mayor permanencia de la película de agua líquida en la superficie del material metálico (Corvo *et al*, 2008). Por tanto, es proclive también la obtención de categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera bajo condiciones interiores en la refinería.

El comportamiento de los valores promedios mensuales de HR fue diferente. En los meses de julio/14 y septiembre/14, así como a partir de noviembre/14 hasta febrero/15 (estación de invierno) los valores para la condición interior resultaron mayores (Fig. 3). En algunos meses de verano y en la estación de invierno, la HR procedente del exterior tiene una mayor permanencia en la atmósfera interior del almacén, debido a la ausencia de la radiación solar y el viento. El valor promedio anual de HR en el interior del almacén fue de 87% siendo ligeramente superior al valor promedio anual para la condición exterior de exposición el cual fue de 85%. Al igual que sucedió con la T , tampoco los valores promedios anuales de HR mostraron una gran diferencia. Los dos valores son considerados elevados en estudios de corrosión atmosférica.

El valor promedio anual de 87%, supera al valor que establece el nivel máximo (nivel-IV $HR = 70\%$) establecido para condiciones interiores (ISO-11844-1: 2006). Se trata de una condición necesaria para la obtención de valores elevados de velocidad de corrosión correspondiente con categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera en la condición interior de exposición.

Al obtenerse valores promedios elevados de HR , la DCI^{-} y DSO_x^{-} ocurren en forma de disolución salina para ambas condiciones de exposición (Meira, *et al* 2008 y Castañeda *et al*, 2018). Este último aspecto influye en la obtención de categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero al carbono en ambas condiciones de exposición en la refinería de petróleo.

Deposición de agentes agresivos

La DSO_x^{-} mensual fue muy superior a la DCI^{-} (Fig. 4 a), b), c) y d) durante el año de estudio. Este comportamiento fue demostrado en los estudios ejecutados en la zona de Gibara y la ZEDM, en los sitios exteriores colocados a una distancia desde el mar a partir de 1 y 4 km respectivamente. No siendo así, en los sitios ubicados a menores distancias en ambas zonas,

así como para la zona del malecón habanero. Los sitios de exposición en esta última fueron instalados de frente totalmente al mar a una distancia ~ 20 m.

Las partículas de sales de iones sulfato transportadas en el aerosol marino, al tener un menor peso y tamaño que las de iones cloruro, tienen a depositarse mayormente en forma de disolución salina a mayores distancias desde el mar hacia el interior de la tierra en ambas condiciones de exposición. Esta deposición es favorecida por la presencia de industrias y medios de transporte. La DSO_x^- mensual en la refinería es favorecida por las emisiones de SO_2 , SO_3 y H_2S , así como por los sistemas de transportación que ocurren a diario en la bahía y en la propia refinería. En las bahías de tipo bolsa como es el caso, no existen zonas de rompiente de las olas, es decir, el agua de mar es serena. En las zonas de rompiente, se originan las partículas de sales de iones cloruro que, por su gran peso y tamaño, son depositadas a cortas distancias desde el mar en forma de disolución salina debido a los valores elevados de HR (Meira *et al*, 2008 y Castañeda *et al*, 2018). De ahí la determinación de valores muy elevados de DCl^- mensual lo cual conduce a categorías muy elevada (C5) y extrema (CX) de agresividad corrosiva de la atmósfera principalmente para el acero al carbono. Por otro lado, la refinería está ubicada alrededor de 3,5 km de la zona norte del rompiente de las olas en el malecón habanero.

Al existir una DSO_x^- mensual elevada en la refinería durante el año de estudio, es proclive la existencia de categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera en ambas condiciones de exposición, no solo para el acero al carbono, sino también para otros materiales metálicos muy usados en la industria de la construcción, química y metalúrgica.

La DCl^- mensual fue superior en los meses invernales (Octubre/2014-Marzo/2015) como ha sucedido de manera general en los estudios realizados en el clima tropical costero de Cuba pero, sin llegar a ser mayor que DSO_x^- mensual, con algunos valores elevados para la DSO_x^- en los cuatro sitios de exposición (Fig. 4 a), b), c) y d). Por tanto, el acero al carbono en la refinería es afectado, además por la DSO_x^- , por la DCl^- .

De forma general, es válido confirmar como la deposición de ambos agentes agresivos a partir de sus valores mensuales y promedios anuales, fue superior bajo la condición exterior (E) en comparación con la condición interior (I) como casi siempre sucede en estudios de corrosión atmosférica (Fig.5). De esta forma, es de esperar valores más elevado de V_c para los tres sitios de exposición al exterior de la refinería. No obstante, para la condición interior de exposición en el sitio #3, los dos valores promedios anuales de CSO_x^- fueron $23,85 \mu g/m^3$ y $26,67 \mu g/m^3$. Ambos valores resultaron muy superiores al valor que establece el nivel máximo (nivel-IV $CSO_x^- = 10 \mu g/m^3$) establecido para condiciones interiores (ISO-11844-1: 2006). Se trata, de otra condición necesaria desde el punto de vista de la descripción del ambiente típico atmosférico, que propicia la obtención de valores elevados de V_c correspondiente con categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera en la condición interior de exposición bajo el efecto de abrigo ventilado.

Clasificación de la atmósfera para la condición exterior

Como aspecto interesante resulta la clasificación de la atmósfera en los tres sitios de exposición bajo la condición exterior (Tabla 2).

Los valores promedios anuales de DSO_x^- resultaron muy superiores a 24 mg/m²d, por lo que se está en presencia de una atmósfera clasificada como industrial, obtenida en las zonas de Gibara y la ZEDM a las distancias desde el mar referidas anteriormente (Tabla 2). En el sitio #4, la atmósfera es clasificada como industrial altamente contaminada, debido a que los valores promedios anuales resultaron mayores que 80 mg/m²d (ISO-9226:2012). Se trata de los valores más elevados de deposición de este agente agresivo en estudios de corrosión atmosférica realizados en el clima tropical costero de Cuba (Tabla 2).

Otro aspecto interesante resultó en la clasificación de una atmósfera industrial-costera en el sitio #1. Clasificación no muy obtenida en otros estudios de corrosión atmosférica realizados en Cuba. (Tabla 2). Sin embargo, este tipo de atmósfera fue demostrada en la estación de Casa Blanca localizada muy próximo al sitio # 1 de exposición en la refinería (Corvo *et al*, 2008), así como en la ZEDM en las zonas cercanas a la bahía.

En el sitio #1, al ser los valores promedios anuales de DCl^- determinados por el paño año seco (S_{dp}) superiores a 10 mg/m²d, se hace uso de la expresión (3) para convertirlos a vela húmeda (S_{wc}) y la atmósfera es clasificada como costera (Tabla 2). Al ser los valores promedios anuales de DSO_x^- mayores que 24 mg/m²d y superiores además a los de DCl^- (< 10 mg/m²d paño seco), entonces la atmósfera puede ser clasificada como industrial-costera (Tabla 2). En el caso contrario es decir, si los valores promedios anuales de DCl^- son superiores a los de DSO_x^- , manteniéndose estos últimos por encima de 24 mg/m²d, los materiales metálicos están expuesto a una atmósfera costera-industrial (ISO: 9225-2012). Se trata de la atmósfera que más viene predominando en los estudios de corrosión atmosférica realizados en zonas estratégicas de elevado potencial constructivo en el clima tropical costero de Cuba en los últimos años. Los sitios de exposición han sido colocados a cortas distancias desde el mar.

Estimación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera

Los valores indirectos de V_c calculados por las funciones dosis/respuesta, demuestran la existencia de una categoría elevada de agresividad corrosiva de la atmósfera (C4) para el acero al carbono, el cobre y el cinc, llegando a muy elevada (C5) para este último en el sitio #4 donde la atmósfera fue clasificada como industrial altamente contaminada (Tabla 3). Se notan los rangos de clasificación de agresividad para cada material metálico (ISO: 9223-2012).

La agresividad corrosiva de la atmósfera no es estimada para el aluminio, debido a que este material metálico experimenta los mecanismos de electroquímicos de corrosión atmosférica generalizado y localizado. Los valores presentados de V_c son calculados como corrosión generalizada (ISO: 9223-2012).

Los valores promedios anuales elevados de DSO_x^- , así como de HR y la combinación de los tipos de atmósfera como bien se demostró en la descripción del ambiente típico atmosférico, permiten estimar categorías elevadas y hasta de muy elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera para la condición exterior en la refinería de petróleo. De esta forma, se demuestra una correspondencia entre las dos variantes de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera en la refinería de petróleo es decir, entre la descripción del ambiente típico atmosférico y los valores indirectos de V_c calculados por las funciones dosis/respuesta.

Los valores promedios anuales elevados de DSO_x^- , así como de HR y la combinación de los tipos de atmósfera como bien se demostró en la descripción del ambiente típico atmosférico, permiten estimar categorías elevadas y hasta de muy elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera para la condición exterior en la refinería de petróleo. De esta forma, se demuestra una correspondencia entre las dos variantes de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera en la refinería de petróleo es decir, entre la descripción del ambiente típico atmosférico y los valores indirectos de V_c calculados por las funciones dosis/respuesta.

Comportamiento mensual de la velocidad de corrosión en ambas condiciones de exposición

Antes de pasar a la determinación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero al carbono a ambas condiciones de exposición, es válido demostrar el comportamiento mensual de la V_c en los cuatro sitios de exposición en la refinería. Los valores mayores mensuales fueron obtenidos en la estación de invierno (Fig. 6 a), b), c) y d).

Este comportamiento es similar al de la DCI^- . Se demuestra que, tanto los captadores de determinación de deposición de agentes agresivos y las probetas metálicas, no estuvieron expuestos de forma directa a las condiciones de servicio debido a los procesos unitarios que son ejecutados en la refinería.

Para la condición exterior de exposición, los valores mensuales de V_c resultaron muy superiores en comparación con los determinados para la condición interior bajo el efecto del abrigo ventilado en el almacén (Fig. 6 a), b), c) y d). Esto se debe a una mayor deposición de ambos agentes agresivos a valores elevados de HR . Por tanto, es de esperar una mayor agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero al carbono a exteriores en toda la refinería de petróleo. Sin embargo, los valores mensuales de V_c no fueron superiores a 200 g/m^2 para la condición exterior de exposición en la refinería de petróleo. Valores mensuales superiores fueron demostrados en los últimos estudios de corrosión atmosférica realizados en zonas de elevado potencial constructivo en el clima tropical costero de Cuba. Los sitios de exposición fueron seleccionados a cortas distancias desde el mar. La atmósfera es clasificada como costera-industrial.

Determinación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera

Condición exterior de exposición

De acuerdo con la medida directa de la V_c anual para las tres probetas y sus valores promedios (V_{cp}). Solamente el sitio #1, situado lo más próximo al litoral de la costa en la Bahía de La Habana, se determinó una categoría elevada (C4) de agresividad corrosiva de la atmósfera clasificada como industrial-costera (Tabla 4). Valores mensuales mayores de DCl^- fueron determinados en este sitio. Se notan, los rangos de clasificación de agresividad (ISO: 9223-2012).

Los otros dos sitios de exposición presentaron una categoría media (C3) de agresividad corrosiva de la atmósfera. La atmósfera fue clasificada como industrial e industrial altamente contaminada respectivamente.

De acuerdo con la descripción del ambiente típico atmosférico y los valores indirectos de V_c determinados por las funciones dosis/respuesta, mayores categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera (C5 Muy elevada y CX Extrema) fueron esperadas a partir de la medida directa de la V_c anual. Por tanto, existe diferencia entre la estimación por las dos vías y la determinación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero al carbono bajo la condición exterior de exposición en la refinería en los sitios #2 y #4. Los estudios de corrosión atmosférica desarrollados en la zona de Gibara y la ZEDM para el acero al carbono, han demostrado esta diferencia. Los sitios de exposición fueron seleccionados a las distancias desde el mar referidas. La atmósfera es clasificada como industrial.

Se confirma que, al existir una mayor DSO_x^- en comparación con la DCl^- y la atmósfera es clasificada como industrial o industrial altamente contaminada ($DCl^- < 10 \text{ mg/m}^2\text{d}$) sobre el acero al carbono se originan productos de corrosión mucho más compacto. Esto trae como resultado valores inferiores de velocidad de corrosión que conllevan a la determinación de la categoría media (C3) de agresividad corrosiva de la atmósfera. Los productos de corrosión no forman capas exfoliadas, como sucedió en los estudios de corrosión atmosférica en zonas de elevado potencial constructivo. La DSO_x^- resultó inferior a la DCl^- , por lo que la atmósfera es clasificada como costera-industrial. Los sitios de exposición fueron colocados a cortas distancias desde el mar.

Se nota a partir de la observación visual, como los productos de corrosión no originaron capas exfoliadas, principalmente en las tres probetas colocadas en los sitios de exposición #2 y #4 al año de estudio (Tabla 4). De esta forma se confirma, además de los valores de mensuales y anuales de V_c determinados, la determinación de un nivel medio (C3) de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero al carbono en la refinería.

Condición interior de exposición

Para la condición interior de exposición bajo el efecto de abrigo ventilado en la refinería, no existe diferencia entre la estimación por la descripción típica del ambiente agresivo y la

determinación de la agresividad corrosiva. Los tres valores anuales de V_c de conjunto con el valor promedio indicaron una categoría de agresividad corrosiva de la atmósfera elevada (IC4). Se notan los rangos de clasificación de agresividad (ISO-11844-1:2006) (Tabla 5). El sitio #3 bajo condiciones interiores, es ubicado muy cerca del sitio #4 donde la atmósfera es clasificada como industrial altamente contaminada (Fig. 1). La coloración gris que identifica al metal base es notada (Tabla 5). Por tanto, la observación visual para la condición interior de exposición bajo el efecto de abrigo ventilado en la refinería de petróleo, no constituye una herramienta convincente.

Al ser convertidos a $\text{mg}/\text{m}^2\text{a}$ los valores anuales de V_c bajo condiciones exteriores (Tabla 4), que propician una agresividad corrosiva de la atmósfera elevada (C4) en el sitio #1 y media (C3) en los sitios #2 y #4; en condiciones interiores bajo el efecto de abrigo ventilado, propician una categoría elevada (IC4) de agresividad corrosiva ($10\,000 < V_c \leq 70\,000$).

La categoría elevada (IC4) de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero al carbono AISI-1018, ha sido muy obtenida en el clima tropical costero de Cuba para condiciones interiores bajo el efecto de abrigo ventilado, así como en espacios totalmente cerrado. La atmósfera exterior ha sido clasificada como, industrial y urbana, pero no en atmósfera industrial-costera y en una atmósfera industrial altamente contaminada. En todos los casos, la DSO_x^- es superior a la DCl^- con valores promedios mensuales y anuales elevados de HR (Corvo *et al*, 2008). Sin embargo, para una atmósfera costera y costera-industrial, donde la DSO_x^- es inferior a la DCl^- un nivel de agresividad muy elevado (IC5) fue determinado. De ahí, la necesidad imperiosa de garantizar buenas condiciones de hermetización en los almacenes en todo el país, así como el uso de medios de protección temporal contra la corrosión atmosférica (grasas) y no solo para el acero al carbono.

Factores que influyen en la corrosión atmosférica.

Las regresiones lineales y múltiple ajustadas son las que han permitido demostrar los factores que más influyen en la corrosión atmosférica del acero al carbono en los estudios de corrosión atmosférica realizado en el clima tropical costero de Cuba (Tabla 6). En este estudio, regresiones basadas en funciones exponenciales crecientes ajustadas permitieron demostrar que, la DCl^- es el factor que más influye en la aceleración de la corrosión atmosférica del acero al carbono en los sitios #1 y #2 bajo condiciones exteriores (Tabla 6).

Por otra parte, en el sitio #4 también a condiciones exteriores, la regresión múltiple ajustada permitió demostrar que, el incremento de la DCl^- y la HR de la atmósfera influyen también de manera significativa en el incremento de la corrosión atmosférica del acero al carbono (Tabla 6).

Se confirma que, la DCl^- es el factor más influyente en la corrosión atmosférica del acero al carbono, no solo en presencia de una atmósfera clasificada como costera, costera-industrial, industrial-costera, urbana, rural e industrial como sucede en el clima tropical costero de Cuba, también en una atmósfera clasificada como industrial altamente contaminada en el interior de una refinería de petróleo localizada en una isla tropical. Se confirma además que, las sales de iones cloruro al depositarse son muy higroscópicas y mucho más activas, en comparación con las de iones sulfato por muy superiores que sean en el aerosol marino. De

ahí a que tengan una mayor influencia en el comportamiento creciente de la corrosión atmosférica del acero al carbono en estos tipos de atmósferas.

Con relación al sitio #3 para la condición interior de exposición bajo el efecto del abrigo ventilado, la regresión lineal demuestra como el incremento de la HR resultó el factor más influyente en la corrosión atmosférica del acero al carbono (Tabla 6). La muy baja DCI^- , hace que este peligroso agente agresivo no aparezca en la regresión como un factor muy influyente. No obstante, otros estudios a condiciones interiores bajo el efecto del abrigo ventilado ejecutados en el clima tropical costero de Cuba, permitieron demostrar la influencia de la DCI^- en la corrosión atmosférica del acero al carbono a niveles elevados de HR . Las regresiones múltiples fueron ajustadas de forma general para las tres atmósferas exteriores en las zonas de estudio (costera, industrial y urbana) con un mayor número de determinaciones (Corvo, *et al*, 2008).

Debido a un mayor nivel de HR , mayores posibilidades de condensación influyen en la corrosión atmosférica del acero al carbono, además de una mayor permanencia de la película de agua líquida producto a la no influencia del viento y la intensidad de la radiación solar. Además, un decrecimiento del pH en la película de agua debido a la rápida dilución de las sales de iones sulfato y gases como H_2S , SO_2 , SO_3 ejerce también una gran influencia en la corrosión atmosférica del acero al carbono.

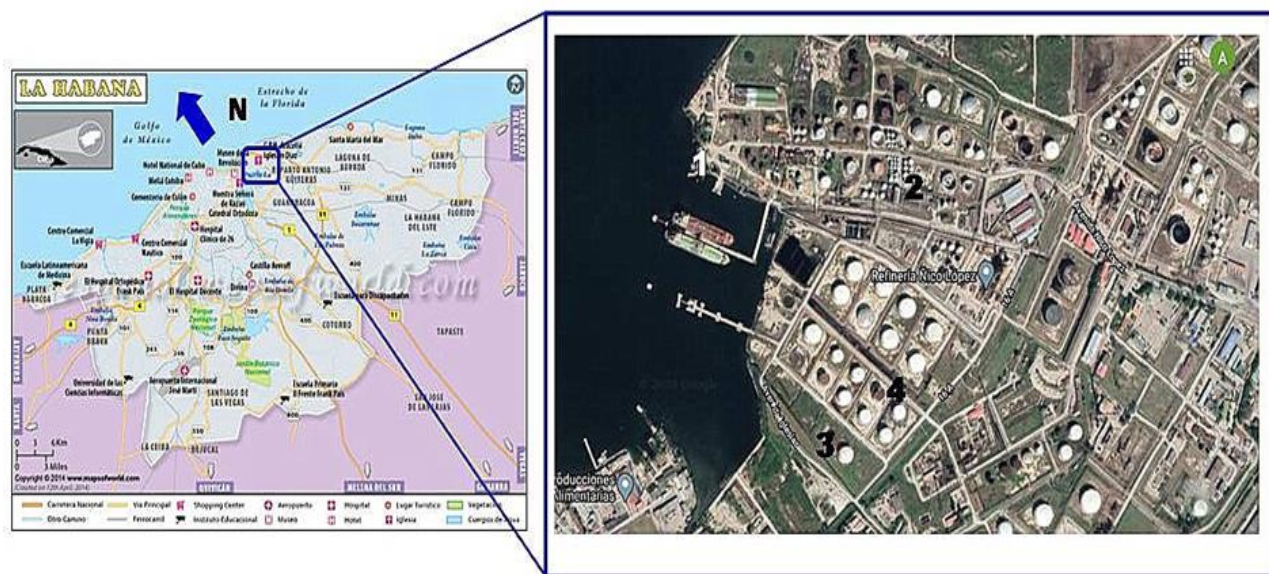


Fig.1. Refinería de petróleo ubicada al sureste de la Bahía de La Habana. Ubicación de los sitios de exposición.



Fig.2. Sitios 1 a), 2 b), 3 c) interior de un almacén con el efecto de abrigo ventilado y 4 d). Soportes de madera colocados en cada uno de los sitios de exposición con los cuatro captadores de contaminantes atmosféricos y las 15 probetas metálicas del acero al carbono AISI-1018.

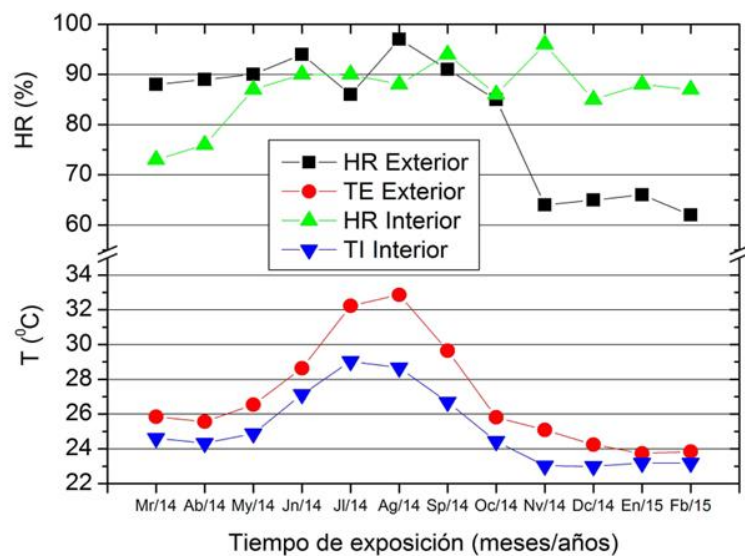


Fig.3. Comportamiento de los parámetros meteorológicos en ambas condiciones de exposición.

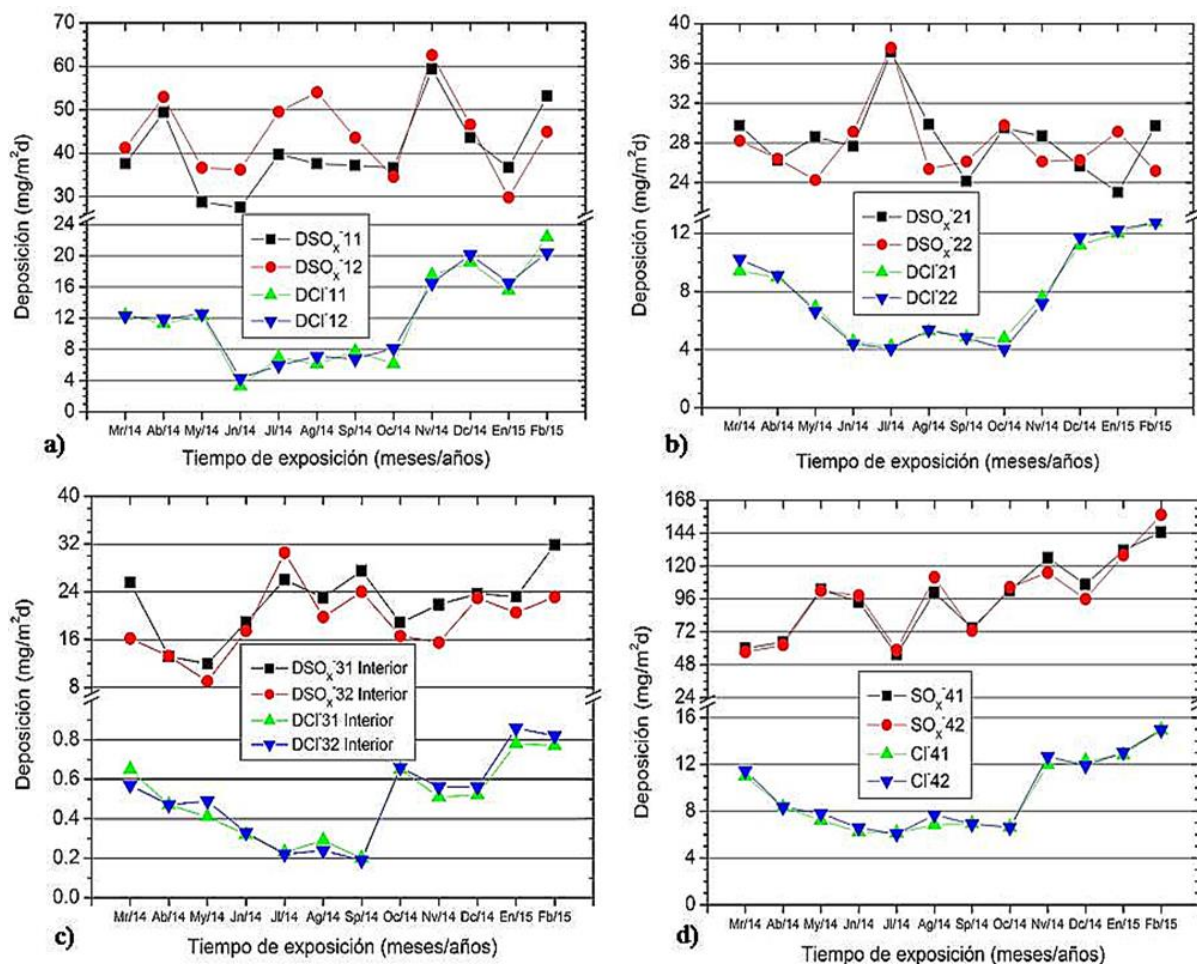


Fig.4. Comportamiento de la deposición de ambos agentes agresivos. Sitios de exposición 1 a), 2 b), 3 c) interior y 4 d)

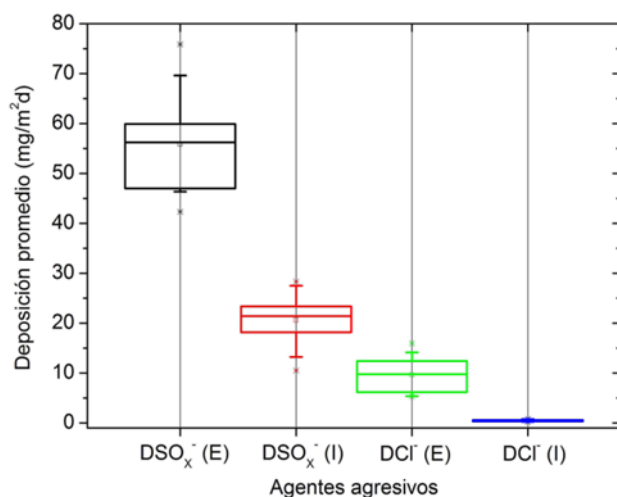


Fig.5. Valores promedios de deposiciones para ambas condiciones de exposición.

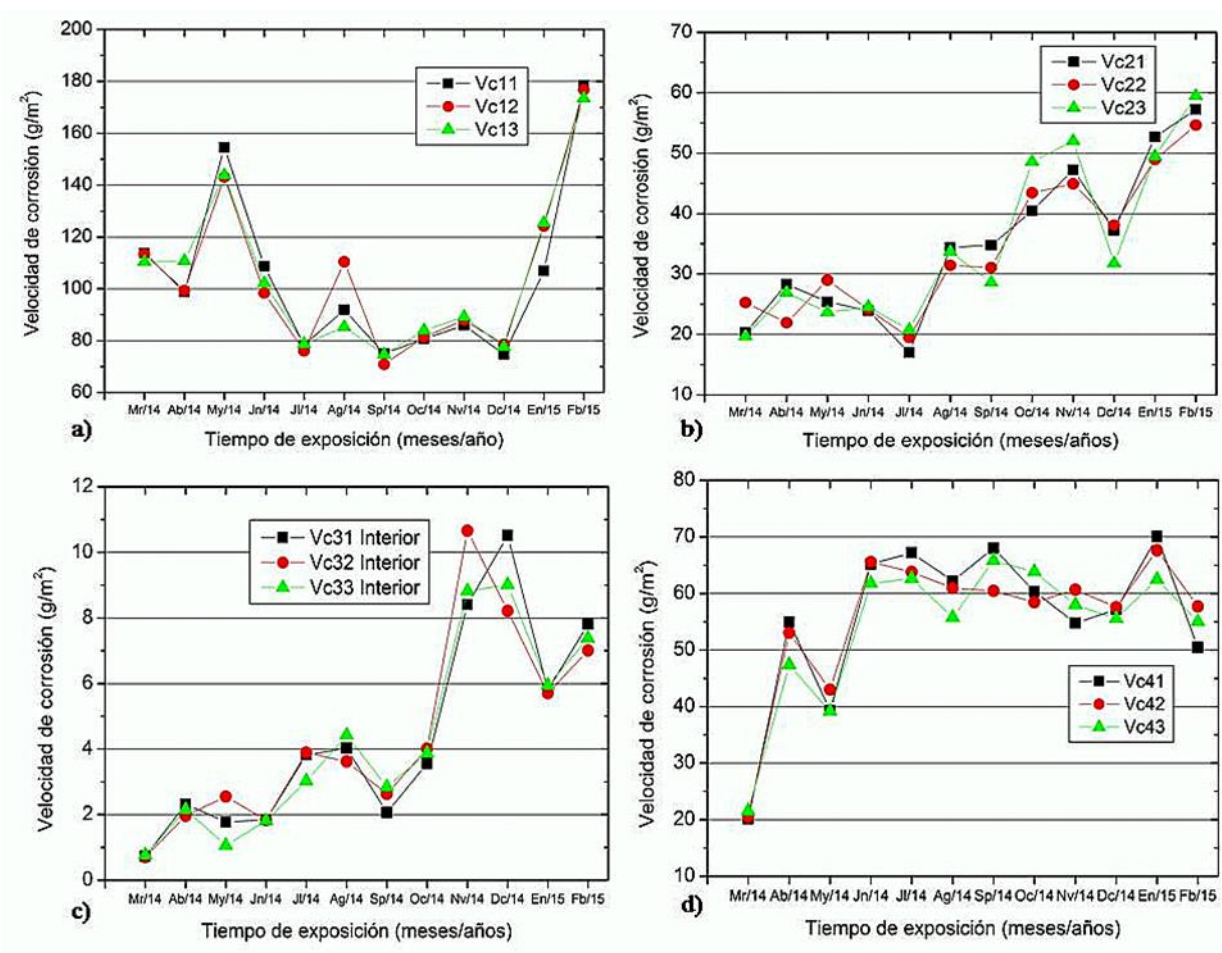


Fig.6. Comportamiento mensual de la velocidad de corrosión. Sitios de exposición 1 a), 2 b), 3 c).

Tabla 1. Funciones dosis/respuestas para el cálculo indirecto de la velocidad de corrosión

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

Leyenda. n: número de determinaciones, R2: coeficiente de determinación, Pd y Sd: deposición de iones sulfato y cloruro respectivamente.

Tabla 2. Clasificación de la atmósfera en los cuatro sitios de exposición al exterior.

| Sitios de exposición | Promedios anuales de deposición (mg/m ² d) | | Clasificación de la atmósfera |
|----------------------|---|---------------|----------------------------------|
| | Iones cloruro | Iones sulfato | |
| 1 | 11,73(S_{dp})=(28,15 S_{wc}) | 40,78 | Industrial-Costera |
| | 11,80(S_{dp})=(28,32 S_{wc}) | 44,37 | |
| 2 | 7,71 | 28,39 | Industrial |
| | 7,71 | 27,79 | |
| 4 | 9,27 | 96,94 | Industrial altamente contaminada |
| | 9,49 | 97,04 | |

Tabla 3. Estimación de los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera en la refinería.

| Sitios de exposición | Acero al carbono | | Cinc | | Cobre | |
|----------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|---|
| | V _c (μm/año) | Categorías (C) | V _c (μm/año) | Categorías (C) | V _c (μm/año) | Categorías (C) |
| 1 | 61,28 | Elevada (C4) $50 < V_c \leq 80$ | 3,88 | Elevada (C4) $2,1 < V_c \leq 4,2$ | 2,39 | Elevada (C4) $1,3 < V_c \leq 2,8$ |
| 2 | 51,12 | Elevada (C4) $50 < V_c \leq 80$ | 2,94 | Elevada (C4) $2,1 < V_c \leq 4,2$ | 1,85 | Elevada (C4) $1,3 < V_c \leq 2,8$ |
| 4 | 70,92 | Elevada (C4) $50 < V_c \leq 80$ | 4,90 | Muy Elevada (C5) $4,2 < V_c \leq 8,4$ | 2,54 | Elevada (C4) $1,3 < V_c \leq 2,8$ |

Tabla 4. Categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera. Observación visual de las probetas.

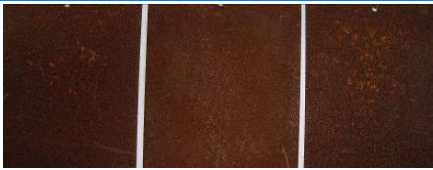

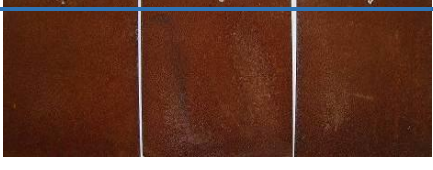
| Sitios de exposición | Acero al carbono | | | |
|----------------------|---|--|--|--|
| | V _c (g/m ² a) | Observación visual | | V _{cp} (g/m ² a) |
| 1 | 460,76 |  | | 448,69 |
| | 406,77 | | | |
| | 478,54 | | | |
| 2 | 210,06 |  | | 210,06 |
| | 210,34 | | | |
| | 209,79 | | | |
| 4 | 298,71 |  | | 282,17 |
| | 274,64 | | | |
| | 273,17 | | | |
| | | | | Categorías (C) |
| | | | | Elevada (C4) $400 < V_c \leq 650$ |
| | | | | Media (C3) $200 < V_c \leq 400$ |
| | | | | Media (C3) $200 < V_c \leq 400$ |

Tabla 5. Categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera determinadas para la condición interior de exposición. Observación visual de las probetas.


| Velocidad de corrosión | | Categoría (IC) | Observación visual | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|--|--|--|--|
| V_c (mg/m ² a) | V_{cp} (mg/m ² a) | | | | |
| 19 990 | 24 683 | Elevada (IC4) 10 000 < V_c ≤ 70 000 |  | | |
| 25 520 | | | | | |
| 28 540 | | | | | |

Tabla 6. Regresiones que demuestran los factores que influyeron en la corrosión atmosférica del acero al carbono.

| Sitios de exposición | Regresión n=12 | R ² (%) | p |
|----------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------|
| 1 | $V_c = 97,19e^{3,79DCl^-}$ | 66 | 0,007 |
| 2 | $V_c = 30,28e^{8,07E-05DCl^-}$ | 59 | 0,0104 |
| 3 (Interior) | $V_c = 20,33 + 0,19HR$ | 77 | 0,0002 |
| 4 | $V_c = 216,54 + 5,00DCl^- + 1,39HR$ | 61 | 0,014 |

Leyenda. R²: Coeficiente de determinación, p: Nivel de significación, n: Número de determinaciones (meses).

CONCLUSIONES

La corrosión atmosférica del acero al carbono bajo condiciones de exposición exterior e interior, es estudiada en el interior de una refinera de petróleo localizada en una isla con un clima tropical costero durante un año de estudio. Categorías más elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera (C5 Muy elevada y CX Extrema) para la condición exterior de exposición fueron esperadas para atmósferas clasificadas como industrial-costera, industrial e industrial altamente contaminada debido a la elevada DSO_x^- muy superior a la DCl^- .

Se demostró, una equivalencia entre las dos variantes de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera para las atmósferas clasificadas en la condición exterior de exposición. La elevada DSO_x^- muy superior a la DCl^- trae como resultado, diferencias entre la estimación y la determinación de la agresividad corrosiva para atmósferas clasificadas como industrial e industrial altamente contaminada. La categoría estimada es elevada (C4) y la determinada media (C3). Sin embargo, para una atmósfera clasificada como industrial-costera, donde la DCl^- resulta más elevada si llegar a ser superior a la DSO_x^- , existe una equivalencia entre las dos variantes de estimación y la determinación elevada (C4) de la agresividad corrosiva para la condición exterior de exposición.

La DCI^- continúa siendo el factor más influyente en la corrosión atmosférica del acero al carbono para la condición exterior de exposición en el clima tropical costero de Cuba, demostrándose en este estudio, para una atmósfera clasificada como industrial altamente contaminada en una refinería de petróleo.

Existe una equivalencia entre la estimación y la determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera elevada (IC4) para la condición interior de exposición en la refinería. El incremento de la HR resulta el factor más influyente en la corrosión atmosférica del acero al carbono.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Albear, Howland, J, J. Castañeda, A. (2017), El ambiente agresivo costero de La Habana y su impacto sobre las estructuras de hormigón armado, Editorial Nuevo Milenium.
- Castañeda, Abel. Corvo, Francisco. González, E. Pérez, Julia. Portilla, C. Valdés, C. Martín. (2006). Influencia de la agresividad corrosiva en las pérdidas de chatarra de cobre, aluminio. Revista CENIC Ciencias Químicas, volumen (37), pp. 182-187.
- Castañeda, Abel. Fernández, D. Valdés, C. Corvo, F. (2015). Estudio de la corrosión atmosférica en una zona estratégica de Cuba. Revista CENIC Ciencias Químicas, volumen (46), pp. 1-12.
- Castañeda, A. Corvo, F. Howland, J, J. Marrero, R. (2018). Penetration of marine aerosol in a tropical coastal City: Havana. Revista ATMÓSFERA-UNAM, volume (31), pp. 87-104.
- Castañeda, A. Corvo, F. Fernández, D. Valdés, C. (2016). Outdoor-indoor atmospheric corrosion in a coastal wind farm located in a tropical island. Revista Engineering Journals, Tailandia, volume (21), pp. 44-62.
- Castañeda, Abel. Corvo, F. Valdés, C. (2018). Atmospheric corrosion study in a Harbor located in a tropical island. Revista Material and Corrosion, volume (69), pp. 1472-1744.
- Chen, Y. Huang, H. Zhang, Y. Wang, Ch. Fan, W. (2018). A method of atmospheric corrosion prediction for aircraft structure. Revista Material and Corrosion, volume (1), pp. 1-12.
- Chico, B. De la Fuente, D. Díaz, I. Simancas, J. Morcillo, M. (2017). Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases. Revista Materials, volume (10), pp. 601-618.
- Corvo, F. Betancourt, N. Díaz, J. C. Lariot, C. León, Y. Pérez, J. Rodríguez, O. Bricuyet, E. Catalá, F. (Marzo, 1992). Segunda variante de Mapa Regional de Agresividad

Corrosiva de la atmósfera de Cuba. Proceedings. Primer Taller Internacional de Corrosión, CONACYT-CINVESTAV, Mérida, Yucatán, México.

- Corvo, F. Pérez, T. Dzib, L. Martín, Y. Castañeda, A. González, E. Pérez, J. (2008). Outdoor-Indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. *Revista Corrosion Science*, volume (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.
- Fernández, D. Castañeda, A. (2015). Estudio de la corrosión atmosférica en el Puerto del Mariel. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, volumen (46), pp. 47-58.
- Ghanbarzadeh, Al. Neshati, J. Reza, M. (2013). Atmospheric corrosion map of an oil refinery. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, volume (60), pp. 106–114.
- 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.
- ISO 11844-1: 2006. Corrosion of Metals and Alloys—Classification of Low Corrosivity of Indoor Atmospheres. Part 1: Determination and Estimation of Indoor Corrosivity.
- 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*, volumen (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*, volumen (50), pp. 2724–2731.
- 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, volume 22, pp. 329-337.