

ESTUDIO DE LA AGRESIVIDAD CORROSIVA DE LA ATMÓSFERA PARA EL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN EL HORMIGÓN ARMADO EN LA HABANA

Abel Castañeda^{1*}, Francisco Corvo², Juan. J. Howland³, Rigoberto Marrero⁴

1: Centro Nacional de Investigaciones Científicas. Avenida 25 y 158. Apartado Postal 6414. Playa. La Habana Cuba. 2: Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Investigaciones de Corrosión. San Francisco de Campeche. Campeche. México. 3: Facultad de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. CUJAE. Marianao. La Habana. Cuba. 4: Facultad de Ingeniería Química. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. CUJAE. Marianao. La Habana. Cuba.

*e-mail: abel.castaneda@cnic.edu.cu



RESUMEN

En el presente estudio fueron establecidos los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo en diferentes calidades de hormigón armado y con diferentes espesores de recubrimiento. Se demostró que el nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera de muy elevado (C5), estimado para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, puede ser tenido en cuenta también para el acero de refuerzo en dependencia de la calidad del hormigón armado y el espesor de recubrimiento. Por otra parte, el efecto del apantallamiento artificial y natural en una ciudad costera como La Habana, influye en el comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro, siendo representativo en la disminución de la extensión del nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera de muy elevado, no solo para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, sino también para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción.

Palabras Claves: apantallamiento, agresividad corrosiva, acero de refuerzo, hormigón armado

STUDY OF THE ATMOSPHERIC CORROSION AGGRESSIVITY TO REINFORCING STEEL IN THE REINFORCED CONCRETE IN HAVA CITY

ABSTRACT

The corrosion aggressivity levels of the atmosphere to reinforced steel in different quality of reinforced concrete and recovering thickness were set in this study. It was demonstrated that, the atmospheric corrosion aggressivity level very high (C5) estimated for the main metallic materials commonly used in construction industry can be considered to the reinforcing steel too, depending on the reinforced concrete quality and the recovering thickness. On the other hand, the artificial and natural screening effect in a coastal city as Havana, influence in the chloride deposition performance, being representative in the extension decrease of the atmospheric corrosion aggressivity level very high, not only for the reinforcing steel in the reinforced concrete, but also to mains metallic material more used in the construction industry.

Keywords: screening, corrosion aggressivity, reinforcing steel, reinforced concrete.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, ocurre de forma espontánea y es de naturaleza electroquímica, al igual que en los materiales metálicos de la construcción expuestos directamente a la atmósfera. Son diversos los factores que influyen en el inicio y propagación del fenómeno. Los factores han sido demostrados en muchos estudios en probetas de armado. Sin embargo, los estudios han sido ejecutados bajo ensayos acelerados de exposición a la intemperie y en cámaras salinas, así como en trabajos de diagnóstico a pie de obra una vez que las estructuras presentan un deterioro muy avanzado. Los resultados obtenidos no han conducido a la obtención de una herramienta segura y eficaz que permita prevenir el fenómeno. Esta herramienta se basa en el establecimiento de los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

La normativa que establece los criterios de durabilidad y vida útil para las estructuras de hormigón armado en Cuba, fue elaborada a partir del estudio de que conllevó a la elaboración del Mapa de Agresividad Corrosiva de la Atmósfera [1]. El mapa, tiene establecido los niveles de agresividad para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción pero no, para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Estos materiales son el acero al carbono, cobre, cinc y aluminio. La influencia del apantallamiento artificial originado por las propias estructuras sobre el comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro, no fue considerada durante la ejecución del estudio.

De ahí, a que los resultados obtenidos en el presente estudio contribuyeron a la modificación de dicha normativa, con el propósito de incrementar la durabilidad y vida útil de proyecto en las estructuras de hormigón armado. Esto traerá como resultado la extensión en el tiempo de los trabajos costosos de reparación que se realizan actualmente no solo en La Habana, sino también en otras ciudades costeras del país de elevado potencial constructivo. Estas zonas están ubicadas principalmente en la costa norte. Se tuvo en cuenta también una evaluación más profunda en la calidad del hormigón armado.

A nivel mundial, los escasos estudios de corrosión

atmosférica del acero de refuerzo en función de la calidad del hormigón armado, han sido ejecutados a tiempos de exposición de un año [2, 3]. Estos estudios no valoraron otros factores que influyen directamente en el fenómeno, con el fin de establecer los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en diferentes calidades de hormigón armado. Estos factores son, el comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro, la concentración de este peligroso agente agresivo en el interior del hormigón y la intensidad de corriente corrosión. Este último como un indicador de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo. Los tres factores fueron estudiados en función de la distancia desde el mar en una ciudad costera como La Habana. La ciudad se caracteriza por el apantallamiento artificial producto de las edificaciones construidas muy cerca del mar, y el natural debido a la vegetación existente de gran altura.

Por otra parte, el análisis del comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro en función del incremento de la distancia desde el mar, ha sido valorado en varias zonas costeras del mundo no caracterizadas por el efecto del apantallamiento. Estas investigaciones, no se ejecutaron con el propósito de establecer los niveles de agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en diferentes calidades de hormigón armado y espesores de recubrimiento.

Los estudios relacionados con el establecimiento de los niveles de agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera para los principales materiales metálicos más usados en la construcción, han sido ejecutados en varios países. Los resultados obtenidos han permitido la elaboración de los respectivos mapas [4]. Se destaca la confección del Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (MICAT). En este estudio estuvieron involucrados varios países de la región incluyendo a Cuba [5, 6]. Recientemente fue dado a conocer el Mapa de la Agresividad Corrosiva de la Atmósfera de Chile [7]. Por lo que sería de suma importancia, demostrar si los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera obtenidos en la Habana, pueden ser tenidos en cuenta también para el acero de refuerzo en función de la calidad del hormigón armado y el espesor de recubrimiento [8]. Como bien se conoce, no existe normativa o quizás metodología alguna que permita establecer los niveles de agresividad corrosiva de la

atmósfera para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Selección y colocación de los sitios de exposición

Se seleccionaron siete sitios de exposición a diferentes distancias desde el mar en La Habana (figura 1). Solamente el sitio número uno, ubicado a 20 metros desde el mar, no presentó el efecto del apantallamiento artificial. La distancia desde el mar fue medida haciendo uso del software Google Earth, tomando como referencia la dirección norte desde cada sitio de exposición.

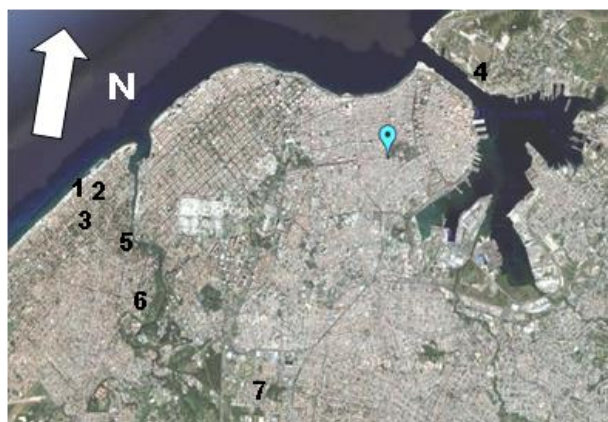


Figura 1. Mapa de la Habana donde se muestran los sitios de exposición seleccionados a diferentes distancias desde el mar.

En cada sitio de exposición se colocaron:

- Un soporte de madera con captadores de contaminantes atmosféricos. Paños secos (320 x 220 mm) para la determinación de la deposición de las sales de iones cloruro. Placas filtrantes de celulosa (150 x 100 mm) para la determinación de la deposición de compuestos de azufre durante el primer año de estudio (figura 2). Los soportes fueron colocados en lugares techados para evitar el efecto de lavados de los contaminantes debido a la lluvia a una altura no menor de tres metros desde el suelo.
- Tres probetas de hormigón armado (200 x 200 x 200 mm) de relaciones agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6; con aceros de refuerzos embebidos a 20 y 40 mm de espesor de recubrimiento. Las probetas permanecieron

por un tiempo de exposición de tres años (figura 3).

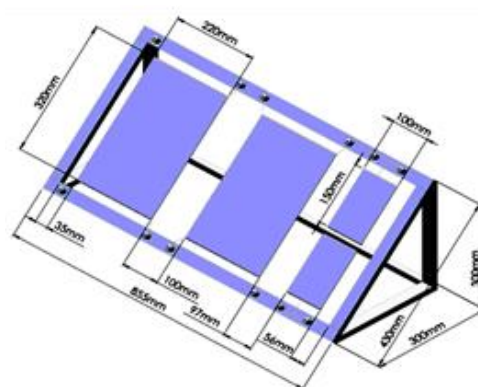


Figura 2. Esquema del soporte de madera donde se colocaron los captadores para la determinación de la deposición de contaminantes.



Figura 3. Tipo de probeta de hormigón armado para las tres relaciones agua/cemento.

Las relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6, así como el espesor de recubrimiento de 20 mm, se corresponden con una de las condiciones de diseño más usadas en la construcción de las estructuras en Cuba. Otras tres probetas de cada relación agua/cemento, permanecieron en el laboratorio. Estas probetas fueron tomadas como referencias para el análisis comparativo de los resultados.

2.2 Determinación y evaluación de la deposición de contaminantes atmosféricos

La determinación de la deposición de iones cloruro (Cl^- en $\text{mg/m}^2\text{d}$, $\text{d} = \text{días}$) se realizó de acuerdo con la metodología establecida en la normativa cubana [9]. Los dos captadores de paño seco se posicionaron en el soporte hacia la dirección norte con un ángulo de inclinación de 45° con respecto a la horizontal. El cambio de captadores se realizó de

manera mensual. Se determinaron dos valores de deposición mensual. Los valores medios mensuales y el valor promedio anual para cada sitio de exposición, fueron graficados en función de la distancia desde el mar.

La determinación de la deposición de compuestos de azufre o sales de iones sulfato (DSO_x en mg/m^2d , d = días) se ejecutó de acuerdo con las especificaciones establecidas en la normativa cubana [10]. Los dos captadores de placa filtrante de celulosa fueron colocados con el mismo ángulo de inclinación. Se determinaron también dos valores de deposición por cada mes de exposición. El valor promedio anual de deposición para ambos contaminantes atmosféricos, sirvió para la estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera en cada uno de los sitios.

2.3 Elaboración de las probetas de hormigón armado

El hormigón utilizado para la elaboración de las probetas fue dosificado teniendo en cuenta en su diseño el logro de un porcentaje mínimo de vacío entre los agregados finos y gruesos. La dosificación base utilizada para la mezcla fue la siguiente: Cemento Pórtland: 365 kg; Arena calcárea de La Habana: 750 kg; gravilla de caliza dura: 1 030 kg. Se utilizó también un aditivo superfluidificante a base de Naftalen Formaldehído Sulfonato (NFS). Esto permitió obtener una mezcla de consistencia fluida y de esta forma garantizar una buena compacidad. (Tabla 1).

Tabla 1. Volumen de agua y por ciento de aditivo usado en la elaboración de las probetas de hormigón armado

Relación agua/cemento	Asentamiento (cm)	Volumen de agua (l)	Aditivo (%)
0,4	15	148	1,7
0,5	17	186	1,2
0,6	18	222	1,0

Las probetas de hormigón armado elaboradas fueron sometidas posteriormente al proceso de curado a inmersión completa en agua por un tiempo de 28 días a temperatura ambiente [11]. Los parámetros que permitieron establecer la calidad de hormigón armado fueron determinados (Tabla 2).

Los aceros de refuerzo al carbono (con diámetro=12 mm y longitud =200 mm), antes de ser embebidos

en el hormigón para las tres relaciones agua/cemento, fueron sometidos a un decapado químico en una solución de ácido clorhídrico al 36%. Este decapado se realizó con el propósito de eliminar el poco producto de corrosión existente [15]. De su longitud total, 160 mm fueron embebidos en la mezcla de hormigón. Otros 40 mm permanecieron en el exterior con el propósito de establecer la conexión con el equipo medidor de la intensidad de corriente de corrosión. Dicha zona fue recubierta con una cinta adhesiva como medio protector contra la corrosión atmosférica.

Tabla 2. Parámetros que establecieron la calidad del hormigón armado.

Parámetros del hormigón	Condiciones de ensayo	Relación agua/cemento		
		0,4	0,5	0,6
Resistencia a la compresión f_{ck} (MPa)	Probetas cilíndricas de hormigón simple ($h=30$ cm y $d=15$ cm) [12].	35	30	26
Porcentaje de porosidad capilar efectiva. (%)	Método de absorción del flujo capilar de agua en muestras cilíndricas de $d=62$ mm y $h=20$ mm [13].	8,0	13,3	19,6
Velocidad de la onda ultrasónica. (m/s)	Probetas cúbicas de hormigón simple en forma de paralelepípedos de las mismas dimensiones [14].	4 241	4 082	3 921

2.4 Evaluación y determinación de la concentración de iones cloruro totales en el interior del hormigón

La determinación de la concentración de iones cloruro totales en porcentaje en masa de hormigón, se realizó anualmente al primero, segundo y tercer año de estudio. De acuerdo con la normativa de la especialidad, se utilizó el método de la extracción de muestras de polvo basado en la valoración

potenciométrica [16]. Se determinaron ocho valores de concentración en la superficie y a profundidades de 10, 20, 30 y 40 mm en las tres probetas de hormigón armado. Estos resultados se utilizaron para la determinación de la concentración promedio de iones cloruro totales (C_{tot}) en toda la masa de hormigón. Esta concentración, fue graficada en función de la distancia desde el mar al igual que la deposición de las sales de iones cloruro.

2.5 Evaluación y determinación de la intensidad de corriente de corrosión

La determinación de la intensidad de corriente de corrosión, como un indicador de la corrosión atmosférica, se efectuó a partir del equipo corrosímetro GECOR-8TM marca GEOCISA de fabricación española (figura 4). Este equipo es muy utilizado en la ejecución de los estudios de diagnóstico a pie de obra.

Primeramente, se humedeció bien la zona de medición de la probeta de hormigón armado, la cual permaneció de frente a la dirección del mar. Se colocó un paño húmedo entre la superficie y el sensor con el propósito de mejorar la electroconductividad del sistema de medición. El sensor se colocó presionándolo con la mano encima de la probeta en la parte donde se encontraban embebidos los aceros de refuerzo a 20 y 40 mm de espesor de recubrimiento (figura 4). El área de polarización del acero de refuerzo embebido fue de 65,25 cm².



Figura 4. Sistema de medición empleado en las mediciones de intensidad de corrosión.

Se determinaron cuatro valores de intensidad de corriente de corrosión por cada uno de los aceros de

refuerzo embebidos a 20 y 40 mm de espesor de recubrimiento en las tres probetas de relación agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6. De esta forma, se obtuvieron ocho valores de intensidad de corriente de corrosión para cada espesor de recubrimiento de hormigón en cada sitio de exposición durante el tercer año de estudio. El valor promedio para este tercer año de exposición, fue graficado en función de la distancia desde el mar.

La clasificación de los valores promedios de intensidad de corriente de corrosión se realizó a partir de los intervalos establecidos en la RED DURAR del CyTED en términos de vida útil de proyecto para las estructuras [17].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis del comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro en La Habana

Para una mejor comprensión en la discusión de los resultados, fue necesario tener en cuenta por separado el análisis del comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro a diferentes distancias desde el mar durante los meses de la etapa invernal y de verano (figura 5). Es de notar como a partir del sitio de exposición ubicado a 170 m, donde ya existen las condiciones del apantallamiento en la ciudad, la deposición durante la etapa invernal permaneció invariable.

Los valores mayores de deposición se obtuvieron como era de esperar, en el sitio ubicado a 20 m al no presentar el efecto del apantallamiento artificial y natural característicos de la ciudad. Se observa que estos valores presentaron una gran variación en dependencia del período estacional. Los valores más elevados fueron obtenidos durante los meses más invernales en Cuba, es decir entre Noviembre y Marzo (figura 5).

De acuerdo con datos de interés obtenidos en el Instituto de Meteorología de La Habana, donde precisamente se encuentra ubicado el sitio de exposición cuatro. Es válido destacar que en la temporada invernal para el primer año de estudio, penetraron en La Habana un total de 17 sistemas frontales (frentes fríos). De estos, siete fueron clasificados como de moderada intensidad. La velocidad máxima del flujo de viento sostenido fue superior a los 9 m/s, precisamente durante los meses más invernales referidos anteriormente.

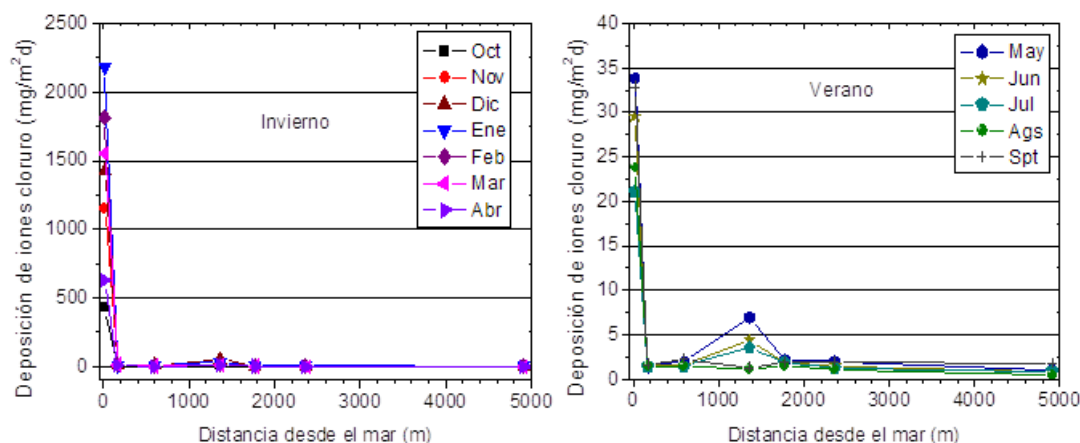


Figura 5. Comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro durante la etapa invernal y de verano.

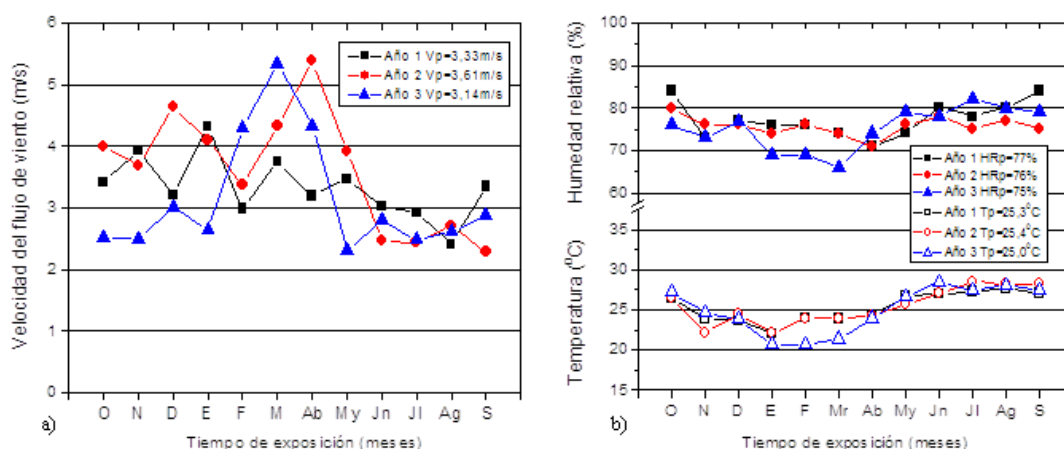


Figura 6. Comportamiento de los valores promedios anuales de velocidad del flujo de viento, humedad relativa y temperatura.

Se nota como los valores promedios anuales de velocidad del flujo de viento (V_p) fueron bastante similares para cada año de estudio. Los valores promedios mensuales fueron mayores en los meses de la etapa invernal en Cuba, en comparación con los meses de verano durante los tres años de estudio (figura 6 a)). Esto confirma la razón por la cual se obtuvieron los valores mayores de deposición de las sales de iones cloruro en el sitio de exposición más cercano al mar durante los meses más invernales.

Por otro lado, al analizar el comportamiento mensual de la humedad relativa (HR) y la temperatura (T) obtenidos del propio instituto. Se

aprecia como para los meses correspondientes a la etapa invernal, fueron registrados los valores menores en ambos parámetros (figura 6 b)). Al observar los valores promedios mensuales y anuales de temperatura (T_p) y humedad relativa (HR_p) durante los tres años de estudios, estos últimos se encuentran por encima del 65%. Este comportamiento representa que la deposición de las sales de iones cloruro ocurre en forma de solución salina (deposición húmeda) y no en forma de cristales de sales (deposición seca). Esto hace que la atmósfera sea más agresiva en la ciudad, no solo para las estructuras de hormigón armado, sino

también para las construidas de cualquier material metálico de la construcción expuesto directamente a la atmósfera.

Al tener en cuenta la relación lineal establecida por Corvo *et al* [18], la cual establece que a partir de la deposición de las sales de iones cloruro obtenida por el captador del paño seco $[DCI^-]_{ps}$ se puede estimar la deposición por el captador de la vela húmeda $[DCI^-]_{vh}$

$$[DCI^-]_{vh} = -54,5 + 1,6[DCI^-]_{ps}$$
$$r = 0,98 \quad p = 0,00 \quad (1)$$

Los valores promedios de deposición estimados por el captador de la vela húmeda serían entonces 1 161,58 mg/m²d y 1 191,59 mg/m²d respectivamente para un valor promedio total de 1 176,58 mg/m²d. Se tuvo en cuenta que, los valores promedios anuales de deposición de las sales de iones cloruro para cada captador del paño seco fueron 760,05 mg/m²d y 778,81 mg/m²d en el sitio ubicado a 20 m desde el mar. Por lo que para ambos captadores, las deposiciones promedio se encuentran en el intervalo entre $300 < S_3 \leq 1\,500$ de acuerdo con la categoría de clasificación exigida en la norma ISO 9223.

El método del captador de la vela húmeda, consiste en una gaza de área conocida enrollada sobre un tapón de goma introducido en un erlenmeyer con agua destilada, donde la gaza hace contacto con el agua. Esta agua al ascender por capilaridad, hace que la gaza humedecida en contacto con el viento propicie una mayor deposición de las sales de iones cloruro. La desventaja de este método se basa en la rápida evaporación del agua en el interior del erlenmeyer debido a las elevadas temperaturas de la atmósfera. Es por eso que en Cuba, tiende a utilizarse mucho el captador del paño seco, siempre y cuando el cambio se realice de forma mensual como bien dice la normativa.

Por otra parte, se demuestra también a partir de la relación lineal, que la deposición húmeda de las sales de iones cloruro durante los meses más invernales de Cuba en ese sitio fue superior a 1 500 mg/m²d teniendo en cuenta ambos captadores (figura 5).

Este resultado permite corroborar la existencia de un nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera de muy elevado en zonas de la ciudad muy próximas al mar, sin la presencia del apantallamiento artificial y

natural. Esto influye en el deterioro anticipado en las estructuras de hormigón armado producto de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, así como de cualquier otro material metálico de la construcción expuesto directamente a la atmósfera.

Los modelos estadísticos, confirman la disminución de la deposición mensual de las sales de iones cloruro con el incremento de la distancia desde el mar (x). Este aspecto ha sido tenido en cuenta en otros estudios investigativos realizados en la costa norte de Suecia [19], en las de Corea del Sur [20], así como en una zona costera al este de Brasil [21], sin valorar la comparación entre los modelos. Se aprecia como los valores mensuales de invierno y verano, se ajustaron mucho mejor para el modelo basado en la función exponencial decreciente, en comparación con el modelo basado en una función lineal bilogarítmica decreciente para una zona caracterizada por el apantallamiento (Tabla 3).

Este resultado se confirma según la comparación entre el ajuste de ambos modelos de acuerdo con el comportamiento de los valores promedios anuales de deposición de las sales de iones cloruro con el incremento de la distancia desde el mar (figura 7).

El resultado de esta comparación demuestra que, hasta una corta distancia desde el mar inferior a 170 m, ocurre la deposición de las sales de iones cloruro de mayores pesos y tamaños procedentes del aerosol marino. Estas sales son formadas principalmente en la zona del rompiente de las olas, siendo más significativo durante la etapa invernal. El mejor ajuste del modelo basado en una función exponencial decreciente demuestra que, tanto para la etapa invernal como la de verano, el efecto del apantallamiento en la ciudad, origina la considerable disminución de la deposición a cortas distancias desde el mar. Esto propicia que las partículas húmedas salinas de menores pesos y tamaños formadas principalmente en el interior del océano, se depositen a mayores distancias desde el mar.

La interpretación del coeficiente estadístico b del modelo basado en una función exponencial decreciente, permite obtener precisamente la distancia desde el mar a la cual cesó la deposición de las sales de iones cloruro de mayor peso y tamaño es decir, la distancia desde el mar hasta la cual se puede clasificar la atmósfera como costera. Este aspecto no fue valorado en las investigaciones ejecutadas en las zonas costeras citadas anteriormente.

Tabla 3. Ajustes de los modelos que indican la disminución de la deposición de las sales de iones cloruro.

Meses	Modelo $DCI^- = ax^{-b}$	p ($< 0,01$)	r	R^2 (%)	Modelo $DCI^- = ae^{(-bx)}$	R^2 (%)
Oct.	$DCI^- = 2\,291x^{-0,85}$	0,007	-0,88	74	$DCI^- = 754e^{(-0,028x)}$	99
Nov.	$DCI^- = 9\,449x^{-1,01}$	0,004	-0,91	80	$DCI^- = 2\,117e^{(-0,030x)}$	99
Dic.	$DCI^- = 7\,799x^{-0,92}$	0,013	-0,85	73	$DCI^- = 2\,660e^{(-0,032x)}$	99
Ene.	$DCI^- = 13\,610x^{-1,04}$	0,014	-0,85	72	$DCI^- = 4\,400e^{(-0,035x)}$	99
Feb.	$DCI^- = 8\,746x^{-1,03}$	0,016	-0,84	71	$DCI^- = 3\,434e^{(-0,031x)}$	99
Mar.	$DCI^- = 10\,410x^{-1,08}$	0,013	-0,85	73	$DCI^- = 2\,880e^{(-0,030x)}$	99
Abr.	$DCI^- = 3\,997x^{-0,98}$	0,009	-0,87	76	$DCI^- = 1\,208e^{(-0,032x)}$	99
May.	$DCI^- = 61x^{-0,45}$	0,069	-0,71	51	$DCI^- = 58e^{(-0,021x)}$	94
Jun.	$DCI^- = 67x^{-0,50}$	0,030	-0,80	64	$DCI^- = 41e^{(-0,018x)}$	96
Jul.	$DCI^- = 43x^{-0,45}$	0,031	-0,79	63	$DCI^- = 51e^{(-0,021x)}$	97
Ags.	$DCI^- = 82x^{-0,59}$	0,004	-0,90	82	$DCI^- = 32e^{(-0,017x)}$	98
Spt.	$DCI^- = 61x^{-0,48}$	0,026	-0,81	66	$DCI^- = 47e^{(-0,020x)}$	97

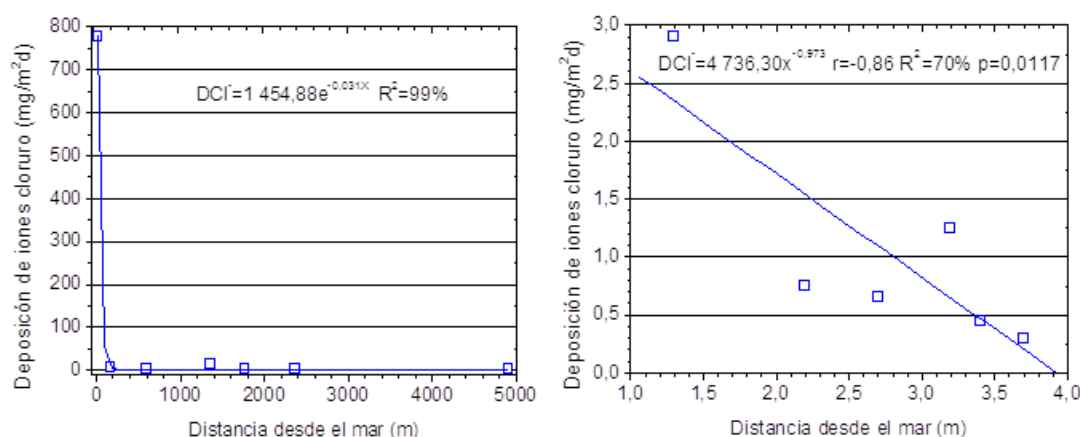


Figura 7. Ajuste del modelo basado en una función exponencial decreciente a partir del comportamiento de los valores promedios anuales de la deposición de las sales de iones cloruro.

De acuerdo con las consideraciones matemáticas del modelo, el inverso del coeficiente estadístico b permite obtener el parámetro t ($t = 1/b$). De esta forma, el modelo estadístico se transforma en $DCI^- = ae^{-x/t}$. Los valores de t pueden ser tomados como la distancia desde el mar hasta la cual finalizó la

deposición de las sales de iones cloruro de mayores pesos y tamaños. Se observa, cómo estos valores de t para ambos captadores fueron menores durante la etapa invernal, en comparación con la de verano durante el primer año de estudio (figura 8).

Este comportamiento demuestra que, durante la

etapa invernal la deposición húmeda de las sales de iones cloruro de mayores pesos y tamaños, finalizó hasta una distancia promedio desde el mar entre 32 y 34 m. Esta distancia se incrementó entre los valores de 51 y 53 m para el período comprendido en los meses de verano. Por tanto, es de considerar que la distancia promedio anual desde el mar hasta la cual ocurrió la deposición de las sales de mayores pesos y tamaños debe estar entre 33 y 52 m. Al tomar el valor medio, dicha distancia puede ser considerada alrededor de los 42 m es decir, muy inferior a 170 m donde ya existen las condiciones de apantallamiento en la ciudad.

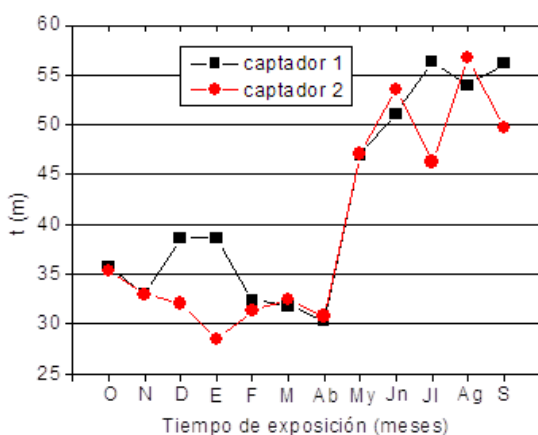


Figura 8. Comportamiento de la distancia desde el mar a la cual finalizó la deposición de las sales de iones cloruro de mayores pesos y tamaños.

La diferencia en la distancia entre ambos períodos confirma que, debido a la entrada de los sistemas frontales durante la etapa invernal, se transportan en el flujo horizontal del aerosol marino las partículas de sales de iones cloruro de mayores pesos y tamaños. Estas partículas que tienden a depositarse a menores distancias desde el mar, su origen en el flujo horizontal en el aerosol marino es causado por el efecto del rompiente de las olas en las orillas de la costa, debido a la fuerte influencia de la velocidad del flujo de viento. No siendo así durante la etapa de verano. La no ocurrencia y entrada de los sistemas frontales, origina que las partículas salinas que se transportan en la masa del aerosol marino de menor peso y tamaño, se depositen a distancias desde el mar ligeramente mayores.

La distancia desde el mar estimada (42 m), puede ser tomada también como un parámetro crítico a

utilizar en el establecimiento de los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Esto se debe a que para mayores distancias, puede ocurrir la deposición de las partículas salinas de iones cloruro provenientes desde el interior del océano, siendo indicativo en la clasificación de otro tipo de atmósfera. Para menores distancias ocurre entonces la deposición de las sales formadas en la zona del rompiente de las olas característica de una atmósfera costera o costera-industrial. Se demuestra además, que la considerable disminución de la deposición de las sales de iones cloruro ocurrió hasta una distancia desde el mar mucho menor a la establecida (entre 150 y 250 m) en los estudios investigativos realizados en Cuba por Corvo *et al* [22] y en España llevados a cabo por Morcillo *et al* [23] en zonas costeras no caracterizadas por el apantallamiento respectivamente. Por tanto, se demuestra cuantitativamente lo planteado por Feliu *et al* [24] y Cole [25] que, en zonas no caracterizadas por el apantallamiento artificial y natural, las sales de iones cloruro tienden a recorrer y depositarse a mayores distancias hacia el interior de la tierra.

3.2 Estimación de los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera

Todo lo referido anteriormente, permitió estimar los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera sobre los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, de acuerdo con la primera variante referida en la norma ISO 9223 durante el primer año de estudio (Tabla 4). Esta estimación se tuvo en cuenta, con el propósito de demostrar su influencia sobre el acero de refuerzo embebido en diferentes calidades de hormigón armado, en una zona costera caracterizada por el apantallamiento artificial y natural.

En el sitio de exposición ubicado a 20 m desde el mar, se estiman los valores de deposición de las sales de iones cloruro (DCI) por el método de la vela húmeda (vh), al hacer uso de la ecuación (1). Es de notar como el nivel de agresividad corrosiva resultó muy elevado (C5). Sin embargo, para los sitios de exposición ubicados a 170 m desde el mar, el nivel fue medio (C3). Para estos sitios, no se tuvo en cuenta la deposición estimada por el método de la vela húmeda a partir de los valores promedios anuales de deposición de este peligroso agente agresivo (Tabla 4).

Para la clasificación de los valores promedios anuales de deposición de las sales de iones cloruro (S) y compuestos de azufre (P) obtenidos entre los dos captadores, se tuvieron en cuenta las categorías establecidas en la norma ISO 9223 para cada agente agresivo (Iones cloruro: S_0 =insignificante, S_1 =moderada, S_2 =elevada, S_3 =muy elevada. Compuestos de azufre: P_0 =insignificante, P_1 =moderada, P_2 =elevada, P_3 =muy elevada)

A pesar de que la norma considera que la deposición de las sales de iones cloruro para su clasificación debe ser obtenida haciendo uso del captador de la

vela húmeda. Corvo [21] demostró, la no existencia de una gran diferencia entre los valores de deposición obtenidos por ambos tipos de captadores, en sitios de exposición alejados del mar en Cuba y no afectados por el apantallamiento artificial y natural en zonas urbanas. De ahí, a que los valores mostrados a partir de una distancia de 170 m desde el mar determinados por el método del captador del paño seco, puedan ser tenidos en cuenta para la clasificación de la agresividad corrosiva de la atmósfera (Tabla 4).

Tabla 4. Niveles de agresividad corrosiva establecidos en la zona de estudio en La Habana.

Sitios (m)	Th (h/a)	DCl ⁻ (mg/m ² d)	DSO _x (mg/m ² d)	Niveles de agresividad corrosiva			
				Acero al carbono	Cobre	Cinc	Aluminio
20		769,43 [1 176,58] _{v,h} (S_3)	57,66(P_2)	C5	C5	C5	C5
170		5,51(S_1)	21,59(P_1)	C3	C3	C3	C3
600		4,17(S_1)	20,51(P_1)	C3	C3	C3	C3
1 365	3 408	13,02(S_1)	27,41(P_1)	C3	C3	C3	C3
1 772		2,89(S_0)	18,45(P_1)	C3	C3	C3	C3
2 365		2,68(S_0)	15,05(P_1)	C3	C3	C3	C3
4 911		1,90(S_0)	18,24(P_1)	C3	C3	C3	C3

Se demuestra de forma cuantitativa que, el nivel C5 tiene un alcance mucho menor en comparación con el establecido en zonas no apantalladas, llegando hasta una distancia desde el mar de 1 km por la costa norte según el Mapa Regional de la Agresividad Corrosiva de la Atmósfera de Cuba. Incluso, se planteó en aquella investigación que el nivel elevado de agresividad corrosiva (C4), el cual no se obtuvo en la zona de estudio seleccionada en La Habana, presentó un alcance hasta de 3 km por la costa norte sin valorar el efecto del apantallamiento.

La no obtención de un nivel elevado de agresividad corrosiva de la atmósfera (C4) para una zona caracterizada por el apantallamiento tanto artificial como natural, difiere también de los estudios de corrosión atmosférica realizados en zonas costeras. Estos estudios permitieron la elaboración de sus correspondientes mapas. Como ejemplos se tienen el Mapa de Agresividad Corrosiva de la Atmósfera de Sudáfrica y el de Chile. En este último caso para el acero al carbono durante un año de exposición. En ambos estudios, no se tuvieron en cuenta la

influencia del apantallamiento artificial y natural sobre la obtención de los niveles de corrosividad de la atmósfera. Todo parece indicar que el efecto del apantallamiento influye de manera positiva en la disminución de los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera. Este efecto no solo influye para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, sino también para cualquier material metálico de la construcción.

Al tener en cuenta la influencia del apantallamiento sobre el comportamiento de la deposición húmeda de las sales de iones cloruro en función del incremento de la distancia desde el mar. El nivel de agresividad corrosiva de muy elevado (C5) puede tener un alcance hasta una distancia desde el mar entre 33 y 52 m. Se demuestra que a distancias mayores donde comienza la influencia del apantallamiento en la ciudad, ocurre un cambio en la clasificación del tipo de atmósfera.

Se nota, como a partir de 170 m desde el mar, la deposición de compuestos de azufre o iones sulfato, fue mayor en comparación con la deposición

húmeda de las sales de iones cloruro (Tabla 4). Esto confirma un predominio de la atmósfera urbana en la zona de estudio seleccionada en La Habana. Sin embargo, para el sitio de exposición ubicado a 20 m desde, a pesar de que la deposición de compuestos de azufre o sales de iones sulfato resultó mucho menor, la atmósfera puede ser clasificada como costera-industrial. El valor promedio determinado se clasifica como elevado (P_2).

Los compuestos de azufre, además de depositarse a mayores distancias desde el mar producto a que sus partículas salinas presentan un menor peso y tamaño. El hecho de que su deposición sea superior a la de las sales de iones cloruro a partir de 170 m, se debe a que su fuente de procedencia no solo es el aerosol marino, sino también la propia actividad humana producto del constante flujo del transporte automotor y de la actividad industrial que se ejecuta y desarrolla en los interiores y exteriores de la propia ciudad. La razón por la cual en el sitio ubicado a 20 m desde el mar haya presentado un valor promedio anual mayor de deposición se debe a que, el aerosol marino es un gran portador de partículas salinas de iones sulfato.

Dadas las condiciones de Cuba es de suponer, aunque no se ha determinado, que en las cercanías del mar los valores de deposición de compuestos de azufre correspondan en su mayoría a sales de iones sulfato del aerosol marino, aunque deben existir también determinadas concentraciones de SO_2 en el aire producto también de la actividad humana como es el transporte marítimo. Mientras nos alejamos del mar, supuestamente deben disminuir los sulfatos del aerosol marino y aumentar el SO_2 en la ciudad. Aunque estos tipos de estudio son llevados a cabo en zonas costeras, cabe pensar que si la única fuente de compuestos de azufre sería la actividad humana y no el agua de mar. La deposición de estos peligrosos agentes agresivos, para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, pudiera presentar un comportamiento diferente en función de la distancia desde el mar.

Para que los compuestos de azufre influyan en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, su deposición debe ser mayor que $250 \text{ mg/m}^2\text{d}$, valor máximo establecido en la norma ISO 9223. Este criterio fue demostrado en estudios realizados por Al-amoudi [26] y Lorente *et al* [27] bajo condiciones aceleradas de exposición.

El valor del tiempo de humectación (Th)

determinado del complejo humedad relativa-temperatura ($HR \geq 80\%$ y $T > 0^\circ\text{C}$) para el primer año de estudio (figura 6 b), indica la existencia de un clima húmedo para condiciones exteriores, de acuerdo con sus rangos de clasificación establecidos en la norma ISO 9223 ($2\,500 < Th \leq 5\,500$). Este valor puede ser debido a que, además de la vegetación existente en la ciudad, las sales de iones cloruro por su carácter higroscópico pueden experimentar un substancial incremento del tiempo de humectación.

3.3 Comportamiento de la concentración promedio de iones cloruro totales

De acuerdo con el comportamiento de la concentración promedio de iones cloruro totales en toda la masa del hormigón, a diferentes distancias desde el mar durante los tres años de exposición de las probetas en los siete sitios. Se aprecia como a partir del sitio de exposición a 170 m desde el mar, la concentración de este peligroso agente agresivo presentó una variación menos significativa en función de la distancia desde el mar y la relación agua/cemento (figura 9). Este comportamiento se confirma de acuerdo con el buen ajuste que presentaron los modelos estadísticos basados en la función exponencial decreciente, como mismo sucedió para los comportamientos mensuales y anuales de la deposición de las sales de iones cloruro.

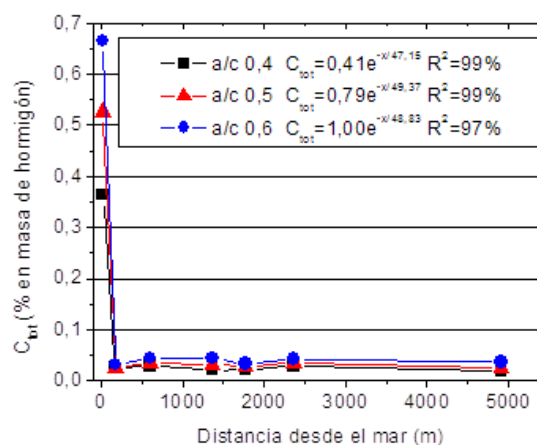


Figura 9. Comportamiento de la concentración promedio de iones cloruro totales con el incremento de la distancia desde el mar.

Lo más interesante del ajuste de los modelos, es ver como los valores del parámetro estadístico t cayeron

en el intervalo obtenido según el comportamiento de la deposición a diferentes distancias desde el mar ($33 < t < 52$). Estos valores son similares a 42 m. Se demuestra que, para menores distancias desde el mar a la obtenida como crítica en la zona de estudio, ocurre en el hormigón armado la penetración y acumulación de este peligroso agente agresivo procedente de la zona del rompiente de las olas es decir las partículas salinas de mayores pesos y tamaño. Esto origina la rápida iniciación y propagación del fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo.

A mayores distancias, donde las sales de este peligroso agente agresivo provienen desde el interior del océano, la penetración y acumulación resultó mucho menor a punto que no se llegó a un umbral concentración de iones cloruro totales capaz de iniciar el fenómeno. Incluso, hasta para las probetas de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 donde el hormigón se caracterizó por presentar un elevado porcentaje de porosidad capilar (Tabla 2). Este resultado continúa confirmando, que el efecto del apantallamiento en la ciudad influye en la disminución de la agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en diferentes calidades de hormigón armado y espesores de recubrimiento.

3.4 Análisis del comportamiento de la corrosión atmosférica a diferentes distancias desde el mar

Los valores promedios de intensidad de corriente de corrosión presentaron un comportamiento muy similar al de la deposición de las sales iones cloruro, así como de la concentración promedio de iones cloruro totales en el interior del hormigón. Se observa, como hubo una considerable disminución de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo. Esta disminución resultó más significativa en las probetas de hormigón armado de relación agua/cemento 0,5 y 0,6 al tercer año de exposición para ambos espesores de recubrimiento de hormigón (figura 10). Este comportamiento permite seguir confirmado que, a partir de una cierta distancia desde el mar, el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado mantiene su estado pasivo.

Para un espesor de recubrimiento de 40 mm en la probeta de relación agua/cemento 0,4; la intensidad de corriente de corrosión a partir de su valor promedio se mantuvo por debajo de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

para todos los sitios de exposición durante el tercer año. Lo mismo sucedió para los valores de referencia obtenidos de las probetas que no fueron expuestas a la atmósfera (figura 10).

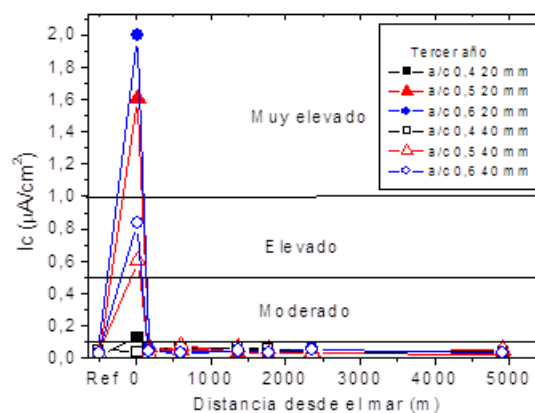


Figura 10. Comportamiento de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo con el incremento de la distancia desde el mar.

Se demuestra que la colocación de los aceros de refuerzo a partir de 40 mm de espesor de recubrimiento de hormigón, elaborado con una relación agua/cemento igual o inferior a 0,4, garantiza una mejor protección primaria contra la corrosión atmosférica bajo condiciones de elevada y muy elevada agresividad corrosiva de la atmósfera. En este caso para sitios costeros no caracterizados por el apantallamiento artificial y natural.

Al presentar la cinética del fenómeno un comportamiento muy similar durante el tercer año de estudio al de la deposición de las sales de iones cloruro y su concentración promedio total en el interior del hormigón con el incremento de la distancia desde el mar. Se confirma que, el agente agresivo que más influye en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo son los iones cloruro en forma de sus correspondientes sales húmedas. Al hacer uso nuevamente del modelo estadístico basado en una función exponencial decreciente. Se aprecia como el modelo solamente no se ajustó para los valores de intensidad de corriente de corrosión obtenidos en la probeta de relación agua/cemento 0,4 a un espesor de recubrimiento de hormigón de 40 mm en el tercer año de estudio. Esto confirma la no disminución de la intensidad de corriente de corrosión en función del incremento de la distancia desde el mar (Tabla 5). Por tanto, a partir del tercer año de exposición, es

posible definir también la distancia crítica hasta la cual cesó la disminución de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, principalmente para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 0,6 para ambos espesores de recubrimiento de hormigón.

Se observa a partir de los valores del parámetro t en los modelos, como la distancia cayó en el intervalo $33 < t < 52$ a la hora de establecer los niveles de

agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Esta distancia resultó ligeramente mayor para un espesor de recubrimiento de 40 mm. Se continúa confirmando que, el efecto del apantallamiento sobre todo el artificial originado por las edificaciones, influye en la disminución de la agresividad corrosiva de la atmósfera en la ciudad.

Tabla 5. Modelos estadísticos ajustados al comportamiento de los valores de intensidad de corriente de corrosión con el incremento de la distancia desde el mar.

Relación agua/cemento	Espesor 20 mm		Espesor 40 mm	
	Modelo	R^2	Modelo	R^2
	$I_c = ae^{-x/t}$	(%)	$I_c = ae^{-x/t}$	(%)
0,4	$I_c = 0,02 + 0,07e^{-x/1312,8}$	72	-	-
0,5	$I_c = 2,41e^{-x/47,2}$	99	$I_c = 0,89e^{-x/51,5}$	96
0,6	$I_c = 3,19e^{-x/42,4}$	99	$I_c = 1,23e^{-x/51,3}$	98

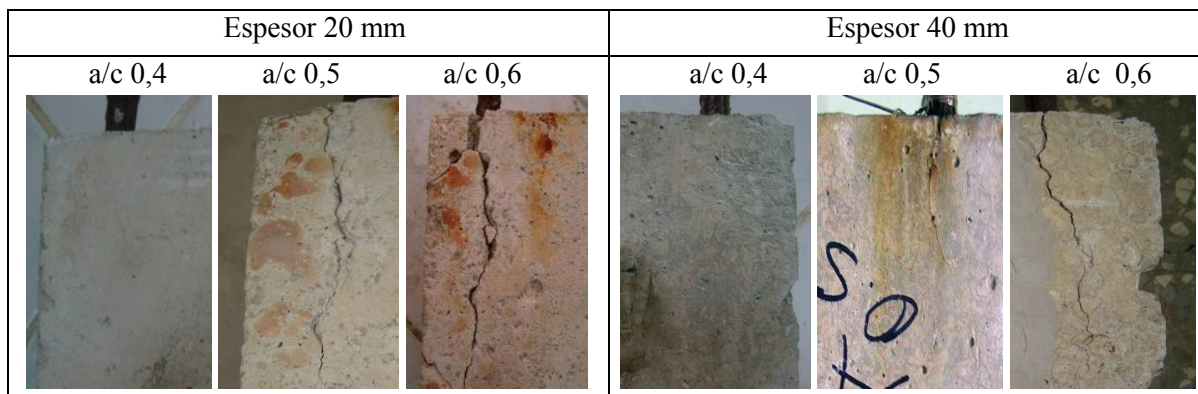


Figura.11. Observación visual de las probetas de hormigón armado. Se observa la presencia de las grietas para las relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 a ambos espesores de recubrimiento de hormigón.

El ajuste del modelo permite seguir demostrando que, las sales de iones cloruro procedentes del interior del océano, al viajar hasta mayores distancias desde el mar debido a su menor peso y tamaño, su penetración en el hormigón armado no propicia el inicio y desarrollo de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo. Esto se debe que no existe un valor de umbral de concentración total de iones cloruro capaz de iniciar el fenómeno. De ahí, a que no deben conducir a un deterioro intenso en las estructuras ubicadas en la ciudad a mayores distancias desde el mar.

Para la probeta de hormigón armado de relación

agua/cemento 0,4 con un espesor de recubrimiento de 20 mm, el modelo ajustado resultó diferente (Tabla 5). Este resultado permite seguir confirmando que el hormigón armado de relación agua/cemento 0,4 resiste mucho más la penetración de las sales húmedas de iones cloruro, principalmente las procedentes de la zona del rompiente de las olas.

3.5 Establecimiento de los niveles de agresividad corrosiva para el acero de refuerzo

Al tener en cuenta el comportamiento de la

deposición de las sales de iones cloruro durante el primer año de estudio. De la corrosión atmosférica del acero de refuerzo y la concentración promedio total en el interior del hormigón durante los tres años de estudio. Es posible demostrar si los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para los principales materiales metálicos pueden ser tenidos en cuenta para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en la Habana.

El nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera de muy elevado (C5) en el sitio ubicado a 20 m desde el mar, estimado a un año para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, puede ser considerado también para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado durante un tiempo de exposición de tres años de las probetas (Tabla 6). En este caso para las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 0,6 a ambos espesores de recubrimiento de hormigón. Lo planteado, es confirmado con la observación visual de las probetas en dicho sitio (Figura 11).

El agrietamiento formado origina una mayor penetración de las sales húmedas de iones cloruro. Esto hace que se intensifique mucho más el fenómeno de la corrosión atmosférica. Es de notar además como el agrietamiento resultó más intenso para 20 mm de espesor de recubrimiento.

Este nivel C5 debe tenerse en cuenta también para la probeta de relación agua/cemento 0,4 donde los aceros de refuerzo fueron colocados a 20 mm de espesor. La corrosión atmosférica se encontró en un nivel moderado (figura 10) a pesar de no notarse la formación de fisuras y grietas al tercer año de exposición. No obstante, se demostró en previos estudios que, para un tiempo de exposición alrededor de 20 años, los modelos de pronósticos indicaron la posible existencia del agrietamiento. La presencia del agrietamiento es un indicador muy confiable del fin de la vida útil de proyecto de las estructuras bajo condiciones de muy elevada agresividad corrosiva de la atmósfera [27]

Con relación a la probeta de hormigón armado de relación agua/cemento 0,4 a un espesor de 40 mm de recubrimiento de hormigón, el nivel de agresividad corrosiva en el sitio puede considerarse bajo (C2). Esto se debe a que los valores de intensidad de corriente de corrosión resultaron inferiores a $0,1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ es decir, despreciable según los términos utilizados en la RED DURAR del CyTED, indicativo del estado pasivo del acero de

refuerzo.

En el resto de los sitios de exposición es decir, a partir de una distancia de 170 m desde el mar, es de esperarse también un nivel bajo de agresividad corrosiva de la atmósfera (C2) para ambos espesores de recubrimiento de hormigón en las tres probetas de relaciones agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6 (Tabla 6). Estos niveles difieren totalmente de los obtenidos para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción. En este caso, el nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera fue medio (C3). Para un nivel medio de agresividad corrosiva de la atmósfera sobre principales materiales metálicos, el hormigón armado garantiza una adecuada protección primaria a los aceros de refuerzo.

Tabla 6. Niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en diferentes calidades de hormigón armado y espesores de recubrimiento.

Sitios (m)	Relación agua/cemento					
	a/c 0,4		a/c 0,5		a/c 0,6	
	Espesor de recubrimiento (mm)					
	20	40	20	40	20	40
20	C5	C2	C5	C5	C5	C5
170	C2	C2	C2	C2	C2	C2
600	C2	C2	C2	C2	C2	C2
1 365	C2	C2	C2	C2	C2	C2
1 772	C2	C2	C2	C2	C2	C2
2 365	C2	C2	C2	C2	C2	C2
4 911	C2	C2	C2	C2	C2	C2

Todo lo referido anteriormente permitió entonces la elaboración del Mapa Regional de la Agresividad Corrosiva de la Atmósfera en La Habana para el acero de refuerzo embebido en diferentes calidades de hormigón y espesores de recubrimiento (figura 10).

Este mapa constituye una herramienta segura y eficaz para la prevención del fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo. Es válido destacar que para su elaboración, solo se tuvo en cuenta el comportamiento de las sales de iones cloruro provenientes desde el mar como principal agente agresivo.

El nivel muy elevado de agresividad corrosiva de la

atmósfera de la atmósfera, se exceptúa para un hormigón armado de relación agua/cemento menor o igual a 0,4 a un espesor de recubrimiento de 40 mm.



Figura 10. Mapa Regional de la Agresividad Corrosiva de la Atmósfera en La Habana obtenido durante los tres años de estudio.

4. CONCLUSIONES

Se establecieron los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en diferentes calidades de hormigón armado y espesores de recubrimiento, como una herramienta segura y eficaz que permita prevenir el deterioro muy avanzado de las estructuras que se pretenden construir a una corta distancia desde el mar, sin la presencia del apantallamiento artificial y natural en litoral norte de La Habana.

El nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera de muy elevado (C5) establecido en la norma ISO 9223 para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, puede ser tenido en cuenta también para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 a espesores de recubrimiento de 20 y 40 mm y para 0,4 a un espesor de 20 mm. Este resultado fue confirmado con la observación visual de las probetas.

El efecto del apantallamiento artificial y natural en una ciudad costera como La Habana, influye en el comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro, siendo representativo en la disminución de la extensión del nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción y para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

El ajuste del modelo estadístico basado en una función exponencial decreciente a partir del comportamiento a diferentes distancias desde el mar de los valores mensuales de deposición de las sales de iones cloruro, la concentración promedio de iones cloruro totales y la intensidad promedio de corriente de corrosión, permitió estimar la distancia crítica a partir de la cual puede existir un cambio en la clasificación del tipo de atmósfera en una ciudad costera apantallada como La Habana.

5. REFERENCIAS

- [1]. Corvo F, Betancourt N, Lariot C, Díaz J C. Segunda variante de Mapa Regional de Agresividad Corrosiva de la atmósfera de Cuba. Proceedings. Primer Taller Internacional de Corrosión, CONACYT-CINVESTAV". Mérida, Yucatán, México, 23-28 marzo, 1992.
- [2]. Trocónis O, Sánchez M, Villano V, Fernández R. Corr. Sci. 2006; 41 (7): 952–962.
- [3]. Trocónis O, Sánchez M, Villano V, Fernández R. Build. Environ. 2007; 49 (13): 2832–2 843.
- [4]. Pierre R. Handbook of Corrosion Engineering. New York. United State. Año 1999.
- [5]. Corvo F, Haces C, Betancourt N, Maldonado L, Veleza L, Echeverría M, De Rincón O T, Rincón A. Corr. Sci. 1997; 39 (5): 823-833, 1997.
- [6]. Morcillo M, Almeida M, Fragata F, Panssian Zehbour. Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica. Parte II- Protección anticorrosiva de metales en las atmósferas de Iberoamérica (Red Temática Patina, XV.D/CYTED). Capítulo: Fundamento sobre la protección anticorrosiva de metales en la atmósfera. Madrid España. Año 2002.
- [7]. Vera R, Delgado D, Araya R, Puentes M. Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2012; 32 (2): 269-276.
- [8]. Norma ISO 9223:1992. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification.
- [9]. Norma Cubana NC 12-01-09: 1988. Determinación del contenido de cloruro en la atmósfera.
- [10]. Norma Cubana NC 12-01-09: 1989. Determinación de compuestos de azufre en la atmósfera.
- [11]. Norma Cubana NC ISO-1920-3 2010. Ensayos de hormigón. Parte 3. Elaboración y curado de probetas para ensayos.
- [12]. Norma Cubana NC-724:2009. Ensayos al hormigón. Resistencia del hormigón endurecido.

- [13]. Norma Cubana NC 345:2005. Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.
- [14]. Norma Cubana NC 231:2002. Determinación, interpretación y aplicación de la velocidad de pulso ultrasónico en el hormigón.
- [15]. Norma ISO 9226: 1992. Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.
- [16]. Norma Cubana NC 272-2003. Hormigón endurecido, cemento y áridos. Determinación del cloruro total por valoración potenciométrica.
- [17]. Trocónis O. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED, Red Temática XV. B. Durabilidad de la armadura, Río de Janeiro, Brasil, 1997.
- [18]. Corvo F, Pérez T, Dzib L R, Martín Y, Castañeda A, González E, Pérez J. Corro. Sci; 2008 50 (4): 220 – 230.
- [19]. Gustafsson E R, Franzén G. Atmos. Environ. 2000; 34 (7): 313-325.
- [20]. Lee J, Moon H, Building and Environment. Build. Environ. 2006; 41 (18): 1447–1453.
- [21]. Meira G R, Andrade C, Alonso C, Padaratz I J, Borba J C. Corr. Sci. 2008; 50 (13): 2724–2731.
- [22]. Corvo F, Betancourt N, Mendoza A. Corr. Sci. 1995; 37 (11): 1889-1901.
- [23]. Morcillo M, Chico B, Mariaca M, Otero E. Corr. Sci. 2000; 42 (3): 91-104.
- [24]. Feliu S, Morcillo M, Chico B. Corr. NACE. 1999; 55 (9): 883–891.
- [25]. Cole I S, Paterson D A, Ganther W D. Corr. Eng. Sci. Tech. 2003; 3 (2): 129–134.
- [26]. Al-amoudi O. Build. Environ. 1998; 33 (1): 53-61.
- [27]. Lorente S, Yssorche M, Auger J. Cem. Conc. Comp. 2011; 33 (5): 735–741.
- [28]. Castañeda A, Corvo F, Howland J J, Marrero R. Rev. Const. Chile. 2014; 13 (1): 32-40.