



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Chile

CASTAÑEDA, A.; RIVERO, C.; CORVO, F.

Evaluación de sistemas de protección contra la corrosión en la rehabilitación de estructuras  
construidas en sitios de elevada agresividad corrosiva en Cuba

Revista de la Construcción, vol. 11, núm. 3, diciembre, 2012, pp. 49-61

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127628821005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Evaluation of corrosion  
protection systems for  
rehabilitation of structures  
located under high  
aggressive conditions in  
Cuba*

# **Evaluación de sistemas de protección contra la corrosión en la rehabilitación de estructuras construidas en sitios de elevada agresividad corrosiva en Cuba**



## **Autores**

**CASTAÑEDA, A.** Centro Nacional de Investigaciones Científicas  
abel.castaneda@cnic.edu.cu  
La Habana, Cuba

**RIVERO, C.** Empresa de Materiales para la Industria y la Construcción  
La Habana, Cuba

**CORVO, F.** Universidad Autónoma de Campeche  
San Francisco de Campeche, Mexico

**Fecha de recepción** 09/07/2012

**Fecha de aceptación** 11/12/2012

## Resumen

Se ha desarrollado un proyecto de cooperación científico técnica entre Alemania y Cuba durante un período de dos años. Este proyecto consistió en la evaluación de diferentes sistemas de protección a base de recubrimientos de procedencia europea en dos estructuras representativas en La Habana. El objetivo fundamental es determinar si los sistemas de protección europeos pueden

emplearse en Cuba y si incrementaría la durabilidad de las estructuras expuestas a condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema. Los resultados obtenidos demostraron que los sistemas de protección aplicados se comportaron satisfactoriamente obteniéndose una elevada eficiencia a partir del comportamiento de la dureza y la adherencia durante dos años de estudio.

**Palabras clave:** Deterioro, sistemas de protección, agresividad corrosiva.

## Abstract

*A scientific and technical cooperation project between Germany and Cuba during a period of two years was carried out. This project involved the evaluation of different secondary protection systems of coatings on two representative structures in Havana. The main objective is to determine whether European protection systems can be use in Cuba*

*and it they would increase the durability of structures exposed to corrosive aggressivity conditions between high and extreme. The results showed that secondary protection systems applied were satisfactory obtaining a high efficacy taking account the behavior of the hardness and adhesion determined during two years of study.*

**Key words:** Degradation, protection systems, corrosion aggressivity.

## 1. Introducción

Cuando se procede a la ejecución de trabajos de rehabilitación, es muy necesario establecer una rigurosa selección de los sistemas de protección a aplicar [1].

Para establecer esta adecuada selección, la mejor herramienta encaminada a la obtención de una solución segura y eficaz, es la realización de una serie de trabajos investigativos a pie de obra, basados en la evaluación científica de la calidad de los sistemas de protección, antes de ejecutar los procesos de rehabilitación y restauración de un patrimonio. Esto revierte especial importancia si se demuestra que las estructuras se encuentran bajo condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema.

Los sistemas de protección y su forma de aplicación deben garantizar que las estructuras con un elevado nivel de deterioro recuperen las prestaciones exigidas durante su construcción como son: estética, funcionalidad y, sobre todo, seguridad. De esta manera se logra un incremento en la durabilidad y vida útil de las estructuras [1,2].

Los sistemas de protección secundaria (a base de recubrimientos) constituyen sin dudas el método más empleado en el combate contra el deterioro en las estructuras. La razón de ello es la eficacia, economía y fácil aplicación de estos sistemas [1].

Para que estos sistemas de protección incrementen la durabilidad y vida útil en las estructuras, particularmente bajo condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema, deben poseer entre sus características fundamentales, buena adherencia, dureza, baja porosidad y uniformidad en el espesor. Claro está, debe tenerse en cuenta el tipo de sistema de protección a utilizar en función del material de construcción de la estructura.

Cuba es un archipiélago con un clima caracterizado por tener más de la mitad del año temperaturas medias aproximadamente de 25°C y humedad relativa media alrededor del 75%. Dada su configuración y ubicación geográfica, la influencia del aerosol marino alcanza casi todo el territorio nacional. Estas condiciones favorecen notablemente el deterioro en las estructuras con diferentes materiales de construcción, específicamente en zonas de agresividad corrosiva entre alta y extrema [3].

Numerosas son las estructuras en La Habana situadas cerca del mar, prácticamente en las orillas de la costa norte lo cual constituye actualmente un ejemplo de zona clasificada como agresividad corrosiva entre alta y extrema. Estas estructuras presentan un nivel de deterioro apreciable producto de la influencia directa del

aerosol marino. La corrosión atmosférica es el fenómeno que más influye en el deterioro existente. En dicha zona se han obtenido valores de deposición de iones cloruro muy por encima del límite máximo de acuerdo a los niveles de clasificación establecidos en la norma ISO 9223, sobre todo en el período invernal [4,5].

Se ha ejecutado un proyecto de cooperación científico-técnica entre la República Federal de Alemania y Cuba durante dos años de estudio. El objetivo fundamental consistió en evaluar la eficacia de sistemas de protección secundaria de fácil aplicación. Se seleccionaron dos estructuras de disímiles materiales de construcción para aplicarles sendos sistemas de protección secundaria, teniendo en cuenta la agresividad corrosiva en sus zonas de emplazamiento.

El interés científico fue determinar si los sistemas de protección aplicados (de procedencia europea) podrían o no aplicarse bajo el clima tropical marítimo y costero. El interés práctico fue el demostrar cómo estos sistemas de protección podrían incrementar la durabilidad y vida útil de las estructuras en Cuba, particularmente en el litoral norte de La Habana.

## 2. Procedimiento experimental

Se seleccionaron dos estructuras construidas de disímiles materiales de construcción emplazadas a 20 metros del mar en La Habana, las cuales presentaban un elevado nivel de deterioro producto de la corrosión atmosférica. A cada una se le aplicó la propuesta del sistema de protección secundaria a base de recubrimiento adecuado al tipo de material de construcción. Los parámetros para evaluar la eficacia de estos sistemas de protección fueron la adherencia y la dureza Shore A por un tiempo de dos años.

La terminología empleada en la evaluación de la adherencia y la dureza a pie de obra en función del tiempo de exposición fue: R (tiempo cero, donde se realizó el ensayo después de la aplicación), 1 (seis meses), 2 (un año), 3 (un año y seis meses) y 4 (dos años). Con relación a la dureza se obtuvieron diez valores para cada tiempo de exposición.

Se tuvo en cuenta la estimación de los niveles de agresividad corrosiva en la zona donde se encuentran emplazadas ambas estructuras.

### 2.1. Edificio Residencial

La figura 1 muestra la primera estructura la cual es un edificio residencial de concreto reforzado construido

en el año 1973 mediante la técnica de moldeo deslizante y elementos prefabricados. Para la aplicación de la propuesta de los sistemas de protección se seleccionó uno de los tímpanos (*shear wall*) el cual presentaba severos daños por corrosión en el acero de refuerzo en las zonas bajas de frente y espaldas al mar como bien se observa en la Figura 1.

Figura 1



Previamente se ejecutó el tratamiento superficial en la zona no dañada por corrosión a través de un chorreado de agua a elevada presión. Posteriormente se aplicaron a brocha dos tipos de recubrimientos de procedencia europea (después de un secado superficial del mortero rugoso a la intemperie). Es de notar la aplicación de ambos en la Figura 1. El primero (color gris) consistió en un recubrimiento acrílico de base en agua, monocomponente, impermeable y elástico. Este producto se aplicó a partir de tres capas. Una primera capa diluida el producto a un 40% de volumen en agua hasta lograr

un espesor de película seca de  $50\mu\text{m}$ . Posteriormente se aplicaron la segunda y tercera capa del producto sin diluir a un espesor de película seca de  $120\mu\text{m}$  a un tiempo de secado al tacto de una hora de la segunda capa. Por tanto el espesor final de película seca del sistema de protección fue de  $290\mu\text{m}$ .

El segundo (color blanco) fue un recubrimiento impermeable monocomponente también a base de agua y resinas acrílicas impermeables. La aplicación de este producto fue similar al anterior. Primeramente, se aplicó una primera capa diluida en 20% en agua a un espesor de película seca de  $20\mu\text{m}$ . Seguidamente a un tiempo de secado al tacto de la primera capa, se aplicaron la segunda y la tercera capa del producto sin diluir a un espesor final de película seca de  $50\mu\text{m}$  a un tiempo de secado al tacto de una hora de la segunda capa. De esta manera el espesor final de película seca del sistema fue de  $120\mu\text{m}$ .

Para la evaluación de la adherencia se empleó el ensayo de corte en ángulo de  $30^\circ$  típico para estos tipos de recubrimientos aplicados sobre morteros rugosos de concreto [6]. Con relación a dureza se utilizó un durómetro PCE-HT 150 y el espesor seco de ambos recubrimientos se midió haciendo uso de un equipo medidor de espesores de capas en sustratos no metálicos PT-200; ambos de fabricación española [7].

## 2.2. Centro Recreativo Cultural

La segunda estructura se trató de un centro recreativo cultural construido en el año 2000 formado por cuatro nudos en base a tubos de acero galvanizado dispuestos en celosía espacial.

Para la aplicación de la propuesta del sistema de protección se seleccionó un elemento situado muy próximo al mar como se observa en la figura 2, donde se nota la intensa corrosión en el acero galvanizado sobre todo en las bases de los arcos. Este sistema de protección se basó en la aplicación de cuatro capas de pinturas epóxicas. La primera consistió en un imprimante epóxico de fosfato de cinc, seguido de dos capas de la barrera epóxica. Por último la capa de acabado final de esmalte uretano epóxico. Todas las capas se aplicaron a brocha obedeciendo los tiempos de secado al repinte (16h) para cada producto. El espesor de película seca obtenido en cada capa de pintura fue de  $80\mu\text{m}$  para un espesor total del sistema de  $320\mu\text{m}$ . El espesor seco de las capas se midió haciendo uso de un medidor PC-CTE 60 de fabricación española.

Previo a la aplicación de la capa imprimante se ejecutó el tratamiento superficial (granallado) hasta lograr un

grado de rugosidad A Sa21/2. Antes de la aplicación de cada capa de pintura al repinte se aplicó un chorreado de agua a baja presión para eliminar todo el polvo depositado sobre la superficie pintada. El ensayo de adherencia consistió en el de corte enrejado, característico para recubrimientos a base de pinturas aplicados a materiales metálicos de construcción como el acero al carbono y galvanizado [8]. La dureza se obtuvo a partir del mismo equipo utilizado en la estructura anterior.

Figura 2



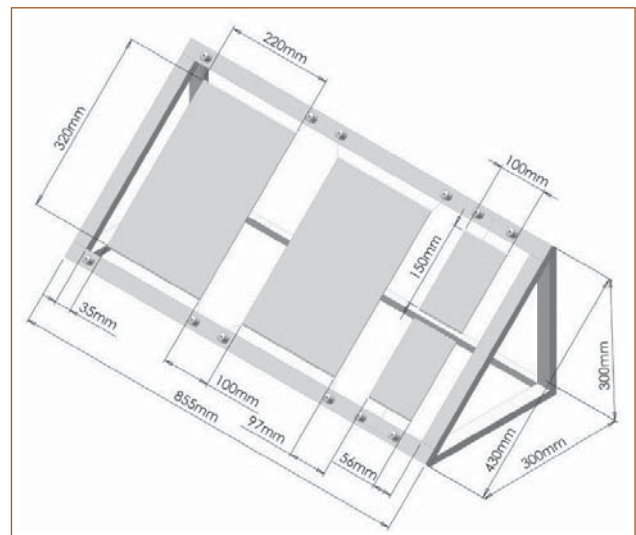
### 2.3. Determinación de la agresividad corrosiva

La determinación de la agresividad corrosiva se realizó dentro del primer año de aplicación de los sistemas de protección. Esto se hizo con el propósito de confirmar el nivel de agresividad corrosiva a que están sometidas no solo las dos estructuras seleccionadas como objeto de estudio, sino también los sistemas de protección a base de recubrimientos que fueron aplicados.

Se seleccionaron siete sitios de exposición (S1, S2, S3, S4, S5, S6 y S7) ubicados cada uno no solo a 20 metros del mar (S1-20 m) donde se encuentran las dos estructuras seleccionadas, sino a 170, 600, 1375, 1772, 2265 y 4911 metros con el propósito de comparar la agresividad corrosiva en La Habana en función de la distancia del mar partiendo desde una zona no apantallada por estructuras, árboles u otros obstáculos característicos de cualquier ciudad.

En cada uno de los sitios se colocó un soporte de madera con dos captadores de iones cloruro y sulfatos bajo techo a una altura no menor de 3 metros. Para la determinación de la deposición de iones cloruro el captador usado fue el paño o vela seca (320mm x 220mm) y en el caso de la deposición de iones sulfato el captador utilizado fue la filtracita el cual consiste en placas filtrantes (150mm x 100mm). La colocación de los soportes (siempre de frente al viento predominante) y las determinaciones se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos en las normas cubanas [9,10]. La figura 3 muestra una representación del soporte de madera donde se colocaron los captadores.

Figura 3



Los cambios de captadores para la determinación de la deposición de ambos agentes agresivos se ejecutaron de forma mensual en cada sitio de exposición durante el año de estudio. Se contó con los valores promedios mensuales de humedades relativas y temperaturas ofrecidos por el Instituto de Meteorología de La Habana donde se encuentra el sitio de exposición 4 (S4-1375m) correspondiente a las determinaciones mensuales de deposición de iones cloruro y sulfatos, así como los promedios anuales de ambos parámetros climáticos para años anteriores y posteriores a los trabajos de aplicación de los sistemas de protección secundaria a base de recubrimientos en ambas estructuras.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Caracterización de la agresividad corrosiva en el sitio donde se encuentran las dos estructuras seleccionadas

La tabla 1 muestra el valor del tiempo de humectación ( $T$ ) en horas/año (h/a) obtenido a través del complejo humedad relativa-temperatura correspondiente al año de determinación mensual de la deposición de iones cloruro y sulfatos en La Habana.

Este parámetro como concepto representa el tiempo por el cual tiende a ocurrir el fenómeno de la corrosión atmosférica siempre y cuando la película de agua líquida permanezca en la superficie del material metálico [11] constituyendo un electrolito. El mismo, muy usado en estudios de corrosión atmosférica caracteriza el entorno climático a que puedan estar sometidas las estructuras.

El valor obtenido corresponde con la existencia de climas cálidos y húmedos característicos de climas tropicales insulares de acuerdo a sus intervalos de clasificación establecidos en la norma ISO 9223 ( $2500 < T \leq 5500$ ). Cuando se relaciona este parámetro con las deposiciones promedios de iones cloruro y sulfato para el primer año de estudio en el marco del proyecto para cada sitio de exposición, se observa en la tabla 1 como se obtiene una agresividad corrosiva alta (C5) para los cuatro materiales metálicos de la construcción más usado, en el sitio ubicado a 20 metros de frente al mar donde se encuentran las dos estructuras.

Al observar detenidamente las figuras 1 y 2 podemos decir que la existencia de un elevado nivel de agresividad corrosiva (C5) para los cuatro materiales metálicos referidos en la norma ISO 9223 influye en el apreciable deterioro por corrosión atmosférica que

**Tabla 1.** Niveles de agresividad corrosiva obtenido en los siete sitios de exposición

Sitio (m)	$T$ (h/a)	DCI- (mg/m2d)	DSOx- (mg/m2d)	Agresividad Corrosiva			
				Acero al carbono	Cobre	Cinc	Aluminio
20	3408	760,05	57,58	C5	C5	C5	C5
		778,81	57,75	C5	C5	C5	C5
170		5,49	21,60	C3	C3	C3	C3
		5,51	21,58	C3	C3	C3	C3
600		4,12	20,46	C3	C3	C3	C3
		4,22	20,56	C3	C3	C3	C3
1365		12,59	27,11	C3	C3	C3	C3
		13,46	27,69	C3	C3	C3	C3
1772		2,85	18,23	C3	C3	C3	C3
		2,94	18,67	C3	C3	C3	C3
2365	2,68	14,87	C3	C3	C3	C3	
	2,68	15,23	C3	C3	C3	C3	
4911	1,90	18,23	C3	C3	C3	C3	
	1,89	18,25	C3	C3	C3	C3	

presentaron las dos estructuras ubicadas a 20 metros del mar en La Habana.

El hecho de que en los demás sitios de exposición ubicados a diferentes distancias del mar hayan presentado una agresividad corrosiva media (C3) como bien se muestra en la tabla 1 debido a una menor deposición de ambos agentes agresivos, no significa una buena garantía para la aplicación de cualquier sistema de protección secundaria en las estructuras de diferentes materiales de construcción. La existencia de una agresividad corrosiva media influye también en el deterioro de las estructuras. En la figura 4 se muestra una estructura en La Habana ubicada alrededor de 2000 metros del mar la cual el mortero de recubrimiento presentó un deterioro considerable.

Figura 4



Al comparar los valores promedios anuales de deposición de ambos agentes agresivos es de notar en la tabla 1 como para los iones sulfato resultó mayor a partir del sitio de exposición ubicado a 170 metros del mar. Esto significa que los iones sulfato procedentes del aerosol marino tienden a depositarse a mayores

concentraciones en comparación con los iones cloruro. Todo lo contrario para el sitio ubicado a 20 metros del mar. Por otro lado, la propia actividad del hombre en el interior de la ciudad como el tráfico constante de automóviles y la presencia de las industrias hace que la deposición de iones sulfato se incremente en comparación con la deposición de iones cloruro, influyendo de forma directa en el deterioro de las estructuras [12,13].

La comparación en cuanto al comportamiento anual de la deposición de ambos agentes agresivos a diferentes distancias del mar confirma que el sitio a 20 metros donde se encuentran situadas las dos estructuras de objeto de estudio, así como los sistemas de protección aplicados, además de estar sometidos a una elevada agresividad corrosiva, la clasificación del tipo de atmósfera basada en estudios de corrosión atmosférica es costera. Este tipo de atmósfera constituye una de las más agresivas influyendo directamente en el deterioro de las estructuras. Su clasificación se debe a que en ese sitio se depositó el 96% de las sales de iones cloruro provenientes del aerosol marino para ambos captadores, tomando como base la sumatoria de los valores promedios anuales de deposición de este peligroso agente agresivo a diferentes distancias del mar.

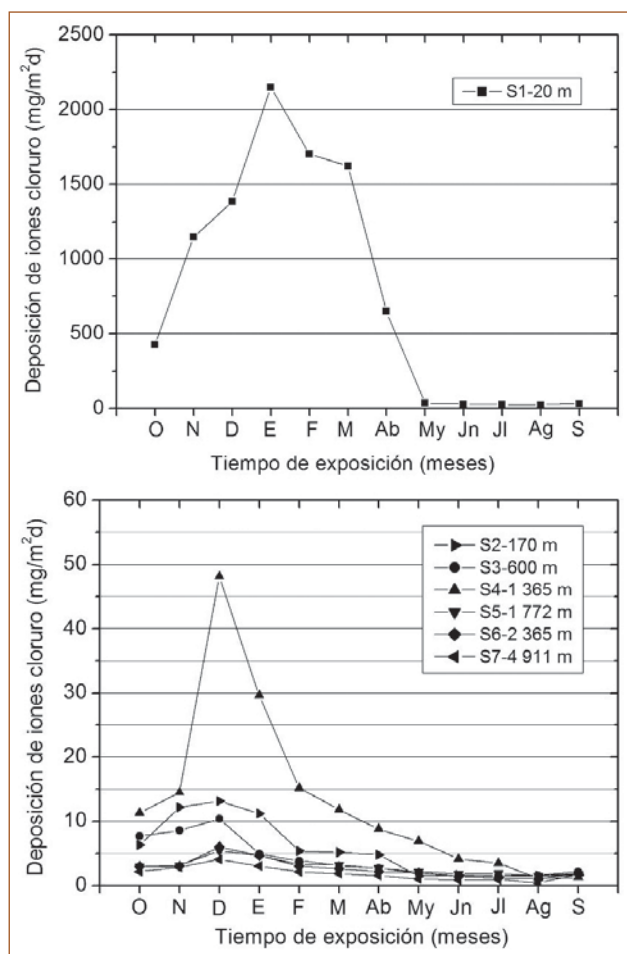
Para el resto de los sitios, la atmósfera se clasifica como urbana, resultando agresiva para muchas estructuras como bien se demuestra en la figura 4, al no existir la presencia de grandes industrias en el interior de La Habana. De ser así, la atmósfera se clasificaría como industrial o urbana. En ocasiones se tiene una combinación entre la atmósfera costera-industrial, resultando entonces en la más perjudicial para las estructura [14].

El comportamiento mensual en ambos agentes agresivos constituye otra fuente para confirmar la existencia de elevados niveles de agresividad corrosiva para el sitio ubicado a 20 metros del mar. En dicha zona se han obtenido promedios anuales de velocidades de corrosión del orden de los 3500 g/m<sup>2</sup>a para el acero al carbono [15]. El valor máximo de velocidad de corrosión establecido en la norma ISO 9223 para obtener una elevada agresividad corrosiva (C5) sobre este apreciado material de la construcción es de 1500 g/m<sup>2</sup>a para un año de exposición de las probetas metálicas [4]. Por tanto en la zona se ha llegado a superar el límite establecido siendo representativo de una agresividad corrosiva extrema (>C5).

Las figuras 5 y 6 muestran el comportamiento mensual de la deposición de ambos agentes agresivos a diferentes distancias del mar. Aquí se tomó el valor medio entre los dos valores de deposición obtenidos para cada captador.



Figura 5



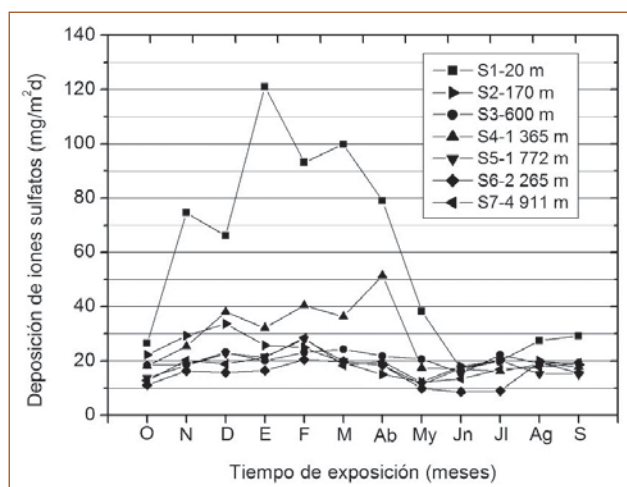
En la figura 5 se observa cómo el sitio ubicado a 20 metros del mar la deposición de iones cloruro llegó a superar los límites establecidos en la norma ISO 9223 en los meses más invernales en Cuba (enero-marzo). Este límite referido en dicha norma es de 1500 mg/m²d [4]. Se aprecia en la figura 5 como la deposición de iones cloruro fue mayor también en la época invernal (octubre-abril) para el resto de los sitios de exposición.

La deposición de iones sulfato presentó un comportamiento similar a la deposición de iones cloruro. Se aprecia en la figura 6 como los mayores valores mensuales se obtuvieron también para el sitio de exposición ubicado a 20 metros del mar, pero sin superar el límite máximo indicado en la norma ISO 9223 (250 mg/m²d). Es válido destacar que la deposición de iones sulfatos fue mayor también durante los meses invernales para el resto de los sitios de exposición como sucedió para la deposición de iones cloruro.

La zona del litoral norte de la Habana es considerada como una de las más agresivas en Iberoamérica cuando se comparan los valores promedios anuales de deposición de iones cloruro con otras ciudades costeras de la región como Buenaventura (Colombia), Valparaíso (Chile), Vigo (España), Puerto Progreso y Puerto Morelos (México), Joao Pessoa (Brasil), Punta del Este (Uruguay) [16, 17, 18].

Solo la agresividad corrosiva de esta zona se iguala a la estimada en la ciudad costera de Cabo Raso en Portugal, donde la deposición promedio anual de iones cloruro ha llegado a ser de 1392 mg/m²d [16]. Por tanto todo sistema de protección aplicado a base de recubrimientos que resista esas condiciones de elevada y extrema agresividad corrosiva en el litoral norte de La Habana, puede ser usado en otras ciudades costeras en todo el continente americano con el fin de incrementar la durabilidad y vida útil de las estructuras.

Figura 6



La entrada de los frentes fríos provenientes del norte acompañado de elevadas velocidades de viento durante la época invernal en Cuba (octubre-abril), influye en una mayor formación y penetración del aerosol marino hacia el interior de la ciudad. Esto trae como resultado una mayor deposición de las sales de iones cloruro y sulfato provocando un intenso deterioro en las estructuras. En la figura 1 se muestra el impacto de las olas en el muro del malecón de la Habana producto de la entrada de un frente frío en la temporada invernal en Cuba.

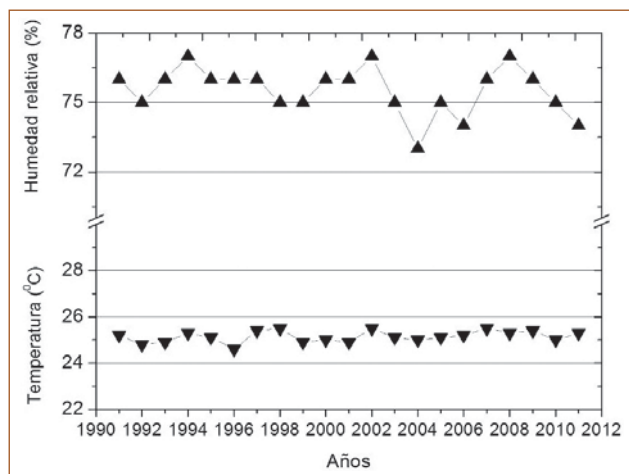
Otro factor que se debe tener muy en cuenta a la hora de demostrar la influencia de la agresividad corrosiva antes de proceder a los trabajos de rehabilitación o construcción de una estructura es referido al tipo de deposición de iones cloruro y sulfatos en dependencia de la humedad relativa y la temperatura. Cuando los

promedios mensuales o anuales de humedad relativa están por encima de 70% significa que la deposición de sales de ambos agentes agresivos sobre la superficie del captador o de las estructuras tiende a ocurrir en forma de solución salina llamándose deposición húmeda [19, 20]. De lo contrario, la deposición de las sales para ambos agentes agresivos ocurre en forma de cristales denominándose deposición seca. En la figura 7 se observa el comportamiento de los promedios anuales de humedad relativa y temperatura en La Habana desde el año 1991 hasta el año 2011.

Se nota cómo los valores promedios anuales de humedad relativa están por encima de 70% para valores promedios anuales de temperatura alrededor de 25°C. Esto significa que la deposición de sales de iones cloruro y sulfatos en la superficie de los captadores colocados a diferentes distancias del mar y en las estructuras es húmeda.

Es conocido que el fenómeno fundamental que causa el deterioro en las estructuras construidas de concreto reforzado o de materiales metálicos de la construcción es la corrosión atmosférica. Por tanto, la deposición húmeda de los iones cloruro y sulfato tiende a incrementar la formación de este fenómeno influyendo en un mayor deterioro [21].

Figura 7



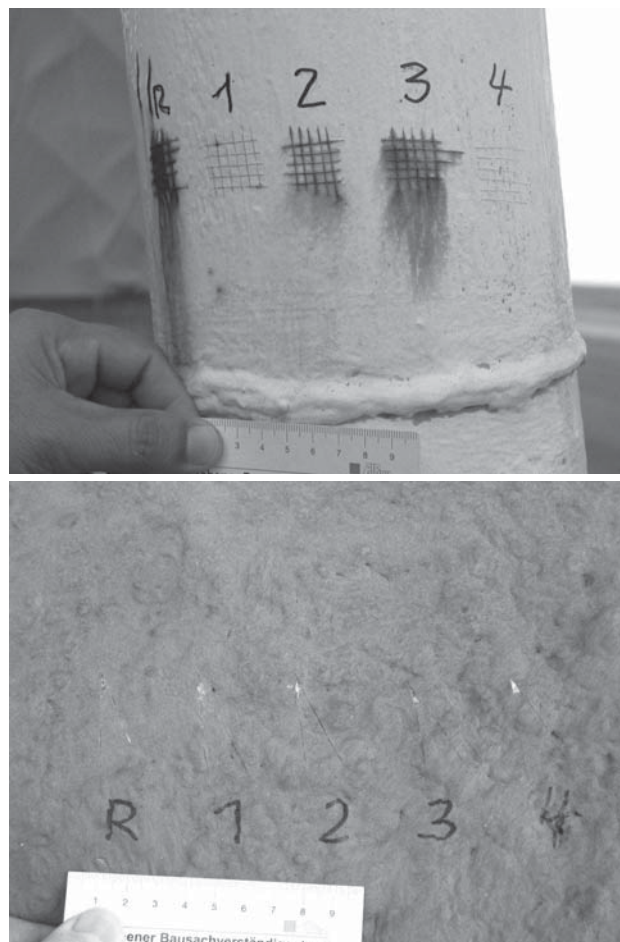
### 3.2. Evaluación de los sistemas de protección secundaria en las dos estructuras.

#### 3.2.1. Evaluación de la adherencia

La figura 8 muestra los ensayos de adherencia en los sistemas de protección secundaria a base de recu-

brimientos aplicados en las dos estructuras a partir del ensayo de corte en ángulo de 30° para el edificio residencial y el de corte enrejado en el caso del centro recreativo para los diferentes tiempos de exposición.

Figura 8



Se observa en la figura 8 como en el ensayo de adherencia de corte en ángulo de 30° correspondiente al edificio residencial, siempre se dejó una zona descubierta en el vértice, es decir sin la aplicación del sistema de protección. Esto se hace con la intención de ver si el sistema de protección sufrió desprendimiento alguno a partir de esa zona debido a la deposición húmeda de los agentes agresivos, lo cual no ocurrió a los diferentes tiempos de exposición [6]. Por lo que se demuestra la elevada adherencia que presentaron ambos sistemas de protección secundaria aplicados en el edificio residencial bajo condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema durante dos años de exposición.

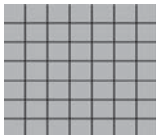
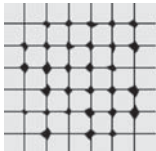
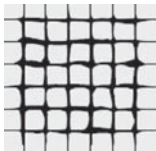
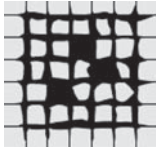
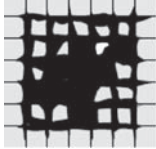
El mismo propósito es perseguido para el ensayo de corte enrejado en el centro recreativo, pero con la intención de originar el fenómeno de la corrosión atmosférica en la zona dañada por la cuchilla a los diferentes tiempos de exposición. Es de apreciar en la figura 8 el derrame de los óxidos de hierro en el substrato metálico donde la corrosión atmosférica siempre tuvo lugar en dicha zona sin desprendimiento alguno del sistema de protección aplicado a base de recubrimientos, lo cual indica que este sistema de protección evita que la corrosión atmosférica avance en el substrato metálico.

En este tipo de ensayo para la evaluación de la adherencia después que se realizan los cortes a un ángulo de 90° se cepilla la superficie durante cinco ocasiones en cada dirección diagonal, o se procede a colocar cinta adhesiva para después retirarla [8]. Posteriormente se realiza la observación donde la adherencia se clasifica de acuerdo a la terminología existente en la norma ASTM 3359 presentada en la tabla.2. En este caso se ejecutó la segunda opción, la de la cinta adhesiva.

Al observar detenidamente los ensayos de corte enrejado en la figura 7 para el centro recreativo, haciendo uso de la clasificación referida en la tabla; la clasificación para los cuatro tiempos de exposición se corresponde con la 5B, es decir no existe área de corte afectada. Por lo que se confirma la buena adherencia que presentó el sistema de protección de recubrimientos bajo condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema.

El hecho de mostrar una buena adherencia en las dos estructuras es indicativo en que los sistemas de protección aplicados a base de recubrimientos presentaron muy baja porosidad. La penetración de los agentes agresivos provenientes del aerosol marino a través del recubrimiento al depositarse de forma húmeda está en función directa con su porosidad. El desprendimiento del sistema de protección a base de recubrimiento ocasiona el deterioro en las estructuras sobre todo si las mismas están sometidas a condiciones de elevada y extrema agresividad corrosiva.

**Tabla 2.** Clasificación de la adherencia para el ensayo de corte enrejado

No.	Clasificación ASTM 3359	Descripción	Ensayo
1	5B	Los bordes del corte están completamente lisos; ninguna de las esquinas de la cuadrícula se ha desprendido. Sin área de corte afectada.	
2	4B	En las intersecciones de los cortes, se han desprendido pequeños fragmentos del recubrimiento. Área de corte afectada menor al 5%.	
3	3B	El recubrimiento se ha desconchado a lo largo de los bordes y/o en las intersecciones de los cortes. Área de corte afectada mayor al 5%, pero menor al 15%.	
4	2B	El recubrimiento se ha desconchado a lo largo de los bordes, en parte por todas las esquinas. Área de corte afectada mayor al 15%, pero menor al 35%.	
5	1B	El recubrimiento se ha desconchado a lo largo de los bordes, en parte o totalmente por todas las esquinas. Área de corte afectada mayor al 35%, pero menor al 65%.	

### 3.2.2. Evaluación de la dureza

Con relación a la dureza Shore A de los sistemas de protección a base de recubrimiento aplicados en las dos estructuras, se aprecia en la tabla 2 cómo este importante parámetro no presentó variación con relación a los diez valores determinados para cada tiempo de exposición en las dos estructuras.

Es de notar en la tabla como los valores del coeficiente de variación (*C.V*) resultaron muy bajos para los cuatro tiempos de medición de la dureza Shore A debido a los bajos valores de desviaciones estándares (*D.S*). Este comportamiento indica que la dureza fue uniforme en toda la superficie lo cual es indicativo de la uniformidad en cuanto al espesor de los sistemas de protección aplicados a base de recubrimiento.

Por otra parte, se observa en la tabla 3 como los valores promedios (*P*) no presentaron una diferencia muy significativa en función del tiempo de exposición siendo este comportamiento indicativo de que la dureza no

sufrió variación alguna para los sistemas de protección aplicados a base de recubrimiento, específicamente una tendencia a disminuir en función del tiempo de exposición al igual que para la adherencia.

Los valores de dureza Shore A obtenidos en la tabla 3 se basan en la reacción elástica del recubrimiento cuando se le deja caer sobre este un material más duro (grafito, diamante) a través del equipo de medición. La prueba sirve como medida de la dureza Shore A indicándose en una escala de 0 Shore correspondiente a 2,5 milímetros de penetración hasta 100 Shore referido a 0 milímetros de penetración.

Al hacer uso de esta escala se observa en la tabla 3 que los sistemas de protección aplicados a base de recubrimiento en ambas estructuras presentaron una elevada reacción elástica siendo índice de una buena dureza.

La razón por la cual la adherencia y la dureza no disminuyeron en función del tiempo de exposición, indica

Tabla 3. Dureza shore A

No.	Edificio residencial										Centro recreativo				
	Color gris Espesor: 290 µm					Color blanco Espesor: 120 µm					Sistema de pinturas Espesor: 320 µm				
	Tiempos de exposición														
	R	1	2	3	4	R	1	2	3	4	R	1	2	3	4
1	90,6	88,6	92,7	93,2	95,0	93,6	93,0	93,6	96,9	96,0	98,3	95,9	98,9	89,2	95,4
2	92,4	90,4	93,5	93,2	98,8	93,7	93,0	96,0	93,2	94,2	99,2	94,3	95,8	88,9	90,4
3	95,3	91,8	98,7	93,1	93,4	92,6	94,8	90,8	95,6	91,6	90,3	88,0	95,0	95,2	97,0
4	94,8	91,2	95,8	91,6	92,5	99,8	88,9	95,9	93,9	94,2	93,5	93,2	95,6	89,9	97,7
5	92,5	92,8	90,3	93,4	90,0	93,2	91,4	95,2	98,9	95,7	96,5	93,3	96,5	87,7	93,6
6	93,4	92,2	94,6	93,7	92,1	92,3	91,1	93,2	96,8	96,4	93,9	92,5	95,9	93,9	96,0
7	94,2	89,7	95,4	95,8	94,3	98,2	90,5	91,6	91,4	95,3	94,3	89,9	96,0	90,9	97,2
8	93,8	93,0	96,7	94,1	93,8	92,3	93,7	92,8	94,0	96,2	95,0	86,8	94,2	86,6	93,2
9	92,1	92,2	92,1	93,6	94,6	99,2	94,4	95,3	97,0	94,2	92,1	93,9	94,0	98,8	92,3
10	91,4	90,7	94,3	94,4	92,3	94,0	94,4	94,6	93,0	93,8	94,7	90,4	93,2	85,2	95,3
P	93,0	91,2	94,4	93,6	93,6	94,8	92,5	93,9	95,0	94,7	94,7	91,8	95,5	90,6	94,8
D.S	1,50	1,41	2,41	1,07	2,32	2,96	1,96	1,80	2,32	1,46	2,68	2,92	1,58	4,19	2,37
C.V (%)	1,6	1,5	2,5	1,1	2,4	3,1	2,1	1,9	2,4	1,5	2,8	3,0	2,0	4,0	3,0

que los sistemas de protección aplicados a base de recubrimientos en las estructuras no presentaron signos de envejecimiento alguno. Esto es representativo de una buena resistencia mecánica, química y térmica de los sistemas de protección aplicados a las dos estructuras bajo condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema.

El envejecimiento en función del tiempo para los sistemas de protección a base de recubrimiento, ya sea en estructuras de concreto o metálicas está muy directamente relacionado con la solubilidad del sistema al agua líquida que se deposita en la superficie producto a la acción directa del aerosol marino acompañado de sus correspondientes sales de iones cloruro y sulfato, sobre todo si las estructuras se encuentran ubicadas bajo condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema, típico de zonas costeras como es el litoral norte de La Habana. Basado en el comportamiento que presentaron los tres sistemas de protección aplicados a las dos estructuras en cuanto a la medición de la adherencia y la dureza indica que los mismos no son solubles al agua, siendo un factor más para que sean aplicados bajo condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema, específicamente en sitios costeros. Como se conoce, las ciudades costeras se caracterizan por una gran infraestructura turística.

#### 4. Conclusiones

La influencia de elevados y medios niveles de agresividad corrosiva, afecta directamente el deterioro de las edificaciones de diferentes materiales de construcción en La Habana específicamente en el litoral norte a cortas distancias del mar donde se encuentran ubicadas las dos estructuras de objeto de estudio en el proyecto.

Los tres sistemas de protección secundaria a base de recubrimientos de procedencia europea aplicados a las dos estructuras presentaron una buena eficacia bajo condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema durante dos años de estudio a partir de la medición de la adherencia y la dureza. Por lo cual los mismos tienden a incrementar la durabilidad y vida útil de las estructuras afectadas por un elevado nivel de deterioro.

El resultado obtenido en el proyecto indica la imperiosa necesidad de evaluar la eficacia de los sistemas de protección a base de recubrimiento antes de aplicarlo en las estructuras sobre todo si las mismas se encuentran sometidas a condiciones de agresividad corrosiva entre alta y extrema con un nivel de deterioro considerable. Esto constituye una solución durable, segura y eficaz a la hora de rehabilitar un patrimonio costero como es el caso del malecón de La Habana.

La obtención de una buena eficacia de los sistemas de protección secundaria a base de recubrimiento de procedencia europea aplicados a las dos estructuras seleccionadas bajo condiciones de elevada y extrema agresividad corrosiva indica que los mismos pudieran ser aplicados en cualquier ciudad donde predomine la atmósfera costera.

#### Agradecimientos

Los autores desean agradecer la gentil colaboración del Dr. Robert Engelfried Investigador y Profesor Titular del Instituto de Investigaciones de la Construcción de la Universidad de Dormut Alemania, debido al asesoramiento técnico brindado durante la ejecución del proyecto.

## Referencias

- Helene P. Manual para reparación, refuerzo y protección de las estructuras de concreto. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. Primera edición. Florida México. DF.1997.
- Troconis de Rincón O., *et al.* 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.
- Corvo F., Pérez T., Dzib L.R., Martín Y., Castañeda A. Outdoor-indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. *Corrosion Science* 50 2008, pp. 220-230.
- ISO 9223. Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres. Classification. First edition. 1992.
- Corvo F., Minotas J., Delgado J., Arroyave C. Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime. *Corrosion Science* 47 2007, pp. 887-892.
- ASTM D 6677-01. Standard Test Method for Evaluating Adhesion by Knife.
- ASTM D 3363-02 Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test.
- ASTM D 3359-97. Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test.
- NC 12-01-08: 88. Método para la determinación del contenido de dióxido de azufre en la atmósfera.
- NC 12-01-09: 88. Método para la determinación del contenido de cloruros en la atmósfera.
- Corvo F., Pérez T., Martín Y., Reyes J., Dzib L.R., González-Sánchez J., Castañeda A. Time of wetness in tropical climate: Considerations on the estimation of TOW according to ISO 9223 standard. *Corrosion Science* 50 2008, pp. 206-219.
- O'Dowd C., Smith M., Consterdine I., Lowe J. Marine aerosol, sea salt and the marine sulphur cycle: A short review. *Atmospheric Environment* 31 1997, pp. 73-80.
- Stefanis N., Theoulakis P., Pilinis C. Dry deposition effect of marine aerosol to the building Stone of the medieval city of Rhode, Grece. *Building and Environment* 44 2009, pp. 260– 270.
- Carvajal A M., Jorquera C. Estudio del efecto del ambiente marino industrial en estructuras de hormigón armado que poseen protección superficial de mortero con acrílico incorporado. *Revista de la Construcción* 9 2010, pp. 109-115.
- Corvo F., Betancourt N., Mendoza A. The influence of airborne salinity on the atmospheric corrosion of steel. *Corrosion Science* 37 1995, pp. 1889-1901.
- Troconis de Rincón O., *et al.* Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. *Corrosion Science* 49 2007, pp. 2832-2843.
- Troconis de Rincón O. Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. *Building and Environment* 41 2006, pp. 952-962.
- Corvo F., Haces C., Betancourt N., Maldonado L., Véleza L., Echeverria M., De Rincón O.T., Rincón A. Atmospheric corrosivity in the Caribbean area. *Corrosion Science* 39 1997, pp. 823-833.
- Meira G.R., Andrade C., Padaratz I.J., Alonso C., Borba J.C. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. *Cement and Concrete Composite* 29 2007, pp. 667-676.
- Meira G.R., Andrade C., Alonso C., Borba J.C., Padilha M. Durability of concrete structures in marine atmosphere zones – The use of chloride deposition rate on the wet candle as an environmental indicator. *Cement and Concrete Composite* 32 2010, pp. 427-435.
- Pradhan B., Bhattacharjee B. Rebar corrosion in chloride environment. *Constructions of Building Materials*. 25 2011, pp. 2565-2575.