

Aporte económico en estudios de corrosión atmosférica y deterioro de materiales en zonas estratégicas del clima tropical costero de Cuba

Economical contribution of atmospheric corrosion and material's decay studies in strategical zones of the tropical coastal climate of Cuba

Dr.C. Abel Castañeda-Valdés^I, Dr. C. Rigoberto Marrero-Águila^{II}, Dr.C. Orestes Mayo-Abad^{III}, Dra.C. Cecilia Valdés-Clemente^I, Dr. C. Juan. J. Howland-Albear^{IV}

^IGrupo de Protección de Materiales. Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación. Centro Nacional de Investigaciones Científicas CNIC, Cuba; ^{II}Grupo de Investigación en Corrosión e Ingeniería de Materiales. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba; ^{III}Centro de estudios de Ingeniería de procesos CIPRO, Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba; ^{IV}Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical CECAT. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

Resumen

Diversos estudios de corrosión atmosférica y deterioro de materiales han sido ejecutados en Cuba en los últimos años en zonas costeras estratégicas del país y de elevado potencial constructivo. Los resultados obtenidos con vistas a solucionar la problemática del deterioro anticipado de la infraestructura, están siendo aplicados actualmente por diversos organismos de la administración central del estado directamente vinculados con la construcción. El aporte económico resulta un eslabón fundamental en la aplicación de los resultados. Se demuestra que un aporte económico significativo puede estar directamente relacionado con las mejoras en los procesos tecnológicos en la industria de la construcción basados en la obtención de materiales de construcción. Se logran obtener plazos elevados de durabilidad y vida útil en zonas costeras del país de elevado potencial constructivo, con lo cual se alargan en el tiempo de los trabajos costosos de reparación en toda la infraestructura, representando también un aporte económico significativo en cuanto a los ahorros en la industria de la construcción en Cuba.

Palabras clave: ahorro, aporte económico, materiales de construcción, corrosión.

Abstract

Several atmospheric corrosion and material's decay studies has been carried out in Cuba recently in strategical coastal zones of the country with of elevated constructive potential. The results obtained in view to solve the problematic of anticipated decay of the infrastructure are being applied recently by diverse organizations of the central administration of the estate directly related with construction works. The economical contribution of these studies is a fundamental key for the inapplicability. It is shown that a significant economical contribution could be directly related with the improvement of the technological processes in the construction industry, based in the attainment of the construction materials. Elevated durability period sand useful life were obtained in coastal zones of the country with elevated constructive potential, manifested as a reduction in the time of expensive repairing works in all the

infrastructure, also represent in significant economical contribution as savings in the construction industry in Cuba.

Keywords: savings; economical contribution; construction materials; corrosion.

Introducción

Los estudios de corrosión atmosférica y prevención de deterioro de materiales de construcción, son ejecutados con el fin de obtener una serie de resultados decisivos directamente relacionados con el incremento de la durabilidad y vida útil, antes de proceder con las labores de construcción de toda la infraestructura. Estos estudios se ejecutan generalmente en las zonas costeras de elevado potencial constructivo. Entre los resultados más importantes a obtener se destacan las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera [1].

Las categorías de agresividad corrosiva o niveles de corrosividad de la atmósfera son características técnicas que proporcionan las bases para la selección adecuada de los materiales de construcción y sus correspondientes sistemas de protección [1].

Diversos estudios de corrosión atmosférica y deterioro de materiales han sido ejecutados en Cuba en los últimos años en zonas costeras estratégicas del país y de elevado potencial constructivo. Los resultados obtenidos por las instituciones ejecutoras, con vistas a prevenir el deterioro anticipado en la infraestructura, están siendo aplicados actualmente por diversos organismos de la administración central del estado directamente vinculados con la construcción [2,3]. El logro de los resultados está permitiendo también en la actualidad, la implantación de medidas encaminadas a la disminución de la importación de aditivos, tecnologías y productos especializados de un elevado precio en el mercado, los cuales son muy utilizados en los trabajos costosos de reparación de las estructuras intensamente dañadas por los procesos de deterioro.

El Grupo de Protección de Materiales, perteneciente a la Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC) y la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), donde se involucran las Facultades de Ingeniería Química e Ingeniería Civil, son las

instituciones que han venido acumulando una gama de resultados importantes para el país en la temática de este trabajo. La fusión de los resultados obtenidos presenta plena concordancia con los Lineamientos del 287 al 291 de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, referidos a la construcción. Estos resultados, que responden a la solución de la problemática relacionada con el deterioro intenso y anticipado en los materiales más usados en la industria de la construcción, presentan un aporte económico muy significativo para el país.

El aporte social del estudio está encaminado a construir la infraestructura del sector residencial y estatal con mayores criterios de durabilidad y vida útil, sobre todo en aquellas zonas donde existe la influencia directa del aerosol marino sin el efecto del apantallamiento en los litorales costeros de Cuba. Esto evitará la ocurrencia de desastres en las estructuras. Los desastres ocurridos hasta el momento, no solo han constituido pérdidas cuantiosas de estructuras y materiales, sino algo más importante: las pérdidas valiosas de vidas humanas. La orientación socialista de la revolución, hace que la vivienda en Cuba no se vea como un producto a fabricar con fines de lucro. Ella constituye una necesidad básica de la población a resolver con una participación importante del estado.

Demostrar cifras del impacto económico negativo sobre el deterioro de la infraestructura en Cuba debido al fenómeno de la corrosión atmosférica y deterioro de materiales, ha resultado difícil. Sin embargo, quedaron establecidas una serie de metodologías que están permitiendo demostrar el aporte económico de los estudios de corrosión atmosférica y deterioro de materiales en Cuba. Por tanto, el objetivo fundamental de este trabajo consiste en demostrar el aporte económico de una serie de estudios de corrosión atmosférica y deterioro de materiales en zonas estratégicas de elevado potencial constructivo en el clima tropical costero de Cuba.

Materiales y métodos

Se abordó el estudio de los requerimientos tecnológicos para lograr la protección de tres de los principales materiales más ampliamente utilizados en la industria de la construcción: aluminio, piedra caliza y hormigón armado.

También se caracterizó la agresividad corrosiva de la atmósfera en dos zonas de desarrollo estratégico para el país, para así determinar el comportamiento de los principales materiales metálicos más utilizados en las construcciones (acero al carbono, acero galvanizado, aluminio, cinc y cobre).

Los perfiles de aluminio lacado se producen por normas de calidad regidas por directrices europeas. Se utilizaba un tratamiento químico superficial con disoluciones de iones crómicos, muy agresivos para el medioambiente. Se decidió cambiar la tecnología por una no crómica, respetuosa con el medioambiente y la instalación de una planta de tratamiento para los residuales. Se dieron a conocer las especificaciones para el nuevo tratamiento, las medidas de control de la calidad y las mejoras medioambientales que se alcanzan. Los perfiles lacados obtenidos, fueron sometidos a diversos ensayos de corrosión atmosférica para evaluar su desempeño en las condiciones del clima tropical costero de Cuba [4,5].

La Habana Vieja y otras zonas cubanas, cuentan con edificaciones de piedra caliza y es evidente su afectación durante el paso del tiempo. Se estudiaron los problemas de deterioro en el Convento de San Francisco de Asís, teniendo en cuenta la influencia del ambiente sobre la piedra y la evaluación de productos protectores. Se tuvieron en cuenta los componentes principales en estos tipos de estudios. Se realizó la caracterización de la piedra y la costra tanto en la edificación bajo estudio como en otros edificios patrimoniales, así como la interacción entre la piedra con la agresividad ambiental. Se definieron cuáles contaminantes intervienen más en el deterioro del material pétreo, determinado por la localización [6,7].

El impacto del ambiente agresivo costero en el litoral de La Habana, ha provocado un deterioro intenso y anticipado sobre las estructuras de hormigón armado, debido al fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, muy connotado en zonas muy próximas al mar[8,9]. A tal punto que fue necesario establecer los requisitos tecnológicos para construir las estructuras de hormigón armado con criterios de durabilidad. Estos requisitos estuvieron relacionados con la elaboración de un hormigón durable. Se tuvo en cuenta el espesor de recubrimiento sobre el acero de refuerzo bajo condiciones de muy elevada y extrema agresividad corrosiva de la atmósfera, típica del litoral costero de La Habana.

El desarrollo de la Revolución Energética en Cuba, ha posibilitado la ejecución de proyectos destinados a la generación de la energía eléctrica a partir de la energía eólica. Para garantizar una eficiencia elevada en la generación de la energía, los parques eólicos se construyen en zonas costeras. Existe necesidad de diseñar, construir y realizar procesos inversionistas en las zonas donde se emplazan parques eólicos con criterios de durabilidad y vida útil. Se llevó a cabo la evaluación de la agresividad corrosiva en la zona de desarrollo eólico de Gibara, Holguín, con el objetivo de realizar un estudio de la influencia de la agresividad corrosiva de la atmósfera en el acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio [10,11].

Es bien conocido que, las zonas portuarias como la Zona Especial de Desarrollo Mariel (ZEDM) generan un índice elevado de contaminación atmosférica. Esto se debe a la cercanía de las industrias existentes en la periferia de los puertos, ubicadas con el propósito de aprovechar la carga y descarga de los productos. Por otra parte, la presencia del mar hace que se forme el aerosol marino debido a la influencia del viento, siendo el mar otra fuente de agentes agresivos, que influye en el comportamiento de los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción. De ahí la necesidad de establecer una adecuada selección, así como los métodos de protección sobre los principales materiales metálicos más usados en la construcción mencionados anteriormente, para montaje de la infraestructura en función de la agresividad corrosiva de la atmósfera en la ZEDM [12,13].

Análisis económico de los estudios realizados

Mejoras en el proceso de obtención de perfiles de aluminio lacado

Los beneficios económicos del trabajo asociados al proceso de producción de perfiles de aluminio lacado y en especial los del tratamiento químico superficial previo, quedan evidenciados mediante el análisis de los costos de este proceso, considerando básicamente los costos de los reactivos empleados en cada tecnología. Con la tecnología crómica, el costo por consumo de reactivos es de 114,57 USD por tonelada de perfil lacado, mientras que al emplear la tecnología no crómica este valor se reduce a 55,26 USD. Con esta diferencia del cambio de tecnología, el costo para una producción anual de la planta de 2 100 t perfiles lacados se reduce de 258 230, 33 USD a 124 551,00 USD. El

ahorro a partir de la diferencia es de 133679 USD, lo cual representa un 52% del costo total. Se reitera que este ahorro es referido para una producción anual. En caso de diez producciones que realiza la planta como mínimo, el ahorro se incrementa en un millón de USD anual. La instalación de una planta de tratamiento de residuales también arrojó efecto económico positivo. Los costos por tonelada de perfil, correspondientes al consumo de reactivos para el tratamiento de los residuales, son de 22,47 y 5,88 USD para tecnología crómica y no crómica respectivamente. De esta forma, para una producción anual promedio de 2 100 t de perfiles lacados, el costo para una producción anual se reduce de 133 134,75 USD a 34 839,00 USD. Por tanto, el ahorro es de 98 295,75 USD representando un 74%. En resumen, el cambio de tecnología de crómica a no crómica permite un ahorro de 231 975,08 USD solo para una producción anual.

La modificación de la normativa respecto al espesor del lacado permite duplicar como mínimo la vida útil de los perfiles, generando ahorros de aproximadamente 1,4 y 4,6 millones de € respecto a la producción nacional y al producto importado respectivamente, para un ahorro total al año de más de 6 millones de €. Se demostró que el costo de la tropicalización de los perfiles lacados, consistente en un aumento del espesor del lacado, resulta insignificante (solo 35 € por tonelada de perfil) comparado con la pérdida de los mismos, cuyo valor medio es de 1400 € por tonelada. Esto indica que, el incumplimiento de las especificaciones estipuladas en el Reglamento Técnico del Ministerio de la Construcción (MICONS), provoca un deterioro del perfil lacado en un tiempo muy inferior al previsto, obligando a su sustitución, con cuantiosas pérdidas para el país.

Estudio del deterioro del Convento de San Francisco de Asís en La Habana Vieja

El análisis económico preliminar del estudio, se encaminó a evaluar el periodo de seis años en que se aplicó un hidrofugante a diferentes zonas de la edificación, tiempo que corresponde con el de la investigación que se presenta. Se constató que se mantienen las propiedades del material pétreo y por tanto no fue necesario realizar la limpieza de las superficies. Según la ficha técnica del producto, el mismo tiene un tiempo de vida útil de 10 años. Se tomó como base de cálculo un área de 3 500 m², correspondiente a la fachada norte de la edificación. Se obtuvo un Valor Actual Neto (VAN) positivo, una Tasa Interna de

Retorno (TIR) aceptable y el Plazo de Recuperación del proyecto es de 3,6 años como se muestra en la tabla 1. El resultado permite que se plantee que el proyecto es económicamente atractivo.

Tabla 1
Principales indicadores económicos considerando 12% de tasa de descuento para un área de superficie de 3 500 m²

Año	Ahorro por limpieza	Inversión	Flujo de efectivo	Flujo de efectivo descontado	Acumulado
0		\$59 536,20	\$59 536,20	\$59 536,20	-\$59 536,20
1	\$47 040,00		\$47 040,00	\$42 000,00	-\$17 536,20
2			\$0,00	\$0,00	-\$17 536,20
3			\$0,00	\$0,00	-\$17 536,20
4	\$47 040,00		\$47 040,00	\$29 894,77	\$12 358,57
5			\$0,00	\$0,00	\$12 358,57
6			\$0,00	\$0,00	\$12 358,57
VAN					\$12 358,57
TIR					22 %
PR					3,6 años

Leyenda: VAN: valor actual neto; TIR: tasa interna de retorno; PR: plazo de recuperación

Al realizar una extrapolación del resultado a toda el área de superficie de las fachadas del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís, se obtiene un incremento en los beneficios económicos que pueden ser invertidos en otras actividades de rehabilitación y conservación de los edificios patrimoniales del Centro Histórico de La Habana (tabla 2). De este modo se demuestra que, el extender los ciclos de limpieza permite disminuir los gastos económicos por este concepto. Por otra parte, se recuperan las condiciones iniciales de vida útil del proyecto de la edificación utilizada como objeto de estudio. La aplicación del producto evaluado está siendo extendida a otras edificaciones como El Castillo de la Real Fuerza y los restos de la Muralla de la Ciudad, las que fueron construidas con similar material pétreo.

La labor de preservar el Patrimonio Cultural Construido es un reto que enfatiza el papel de continuar con la salvaguarda de su legado sobre la base de entenderlos y reafirmarlos como recursos culturales de una sociedad o cultura. Esta actividad destaca la importancia de las edificaciones mediante su cuidado y está en estrecha relación con el medio ambiente social y cultural.

Tabla 2
Principales indicadores económicos considerando 12 % de tasa de descuento para un área de superficie de 5 900 m²

Año	Ahorro por limpieza	Inversión	Flujo de efectivo	Flujo de efectivo descontado	Acumulado
0		\$101.211,54	\$101.211,54	\$101.211,54	\$101.211,54
1	\$79.968,00		\$79.968,00	\$71.400,00	-\$29.811,54
2			\$0,00	\$0,00	-\$29.811,54
3			\$0,00	\$0,00	-\$29.811,54
4	\$79.968,00		\$79.968,00	\$50.821,11	\$21.009,57
5			\$0,00	\$0,00	\$21.009,57
6			\$0,00	\$0,00	\$21.009,57
VAN					\$12.358,57
TIR					22 %
PR					3,6 años

Leyenda: VAN: valor actual neto; TIR: tasa de interna de retorno; PR: plazo de recuperación

Corrosión atmosférica del acero de refuerzo en el hormigón armado

Se demostró científicamente que para un hormigón armado de relación agua/cemento 0,4 con un espesor de recubrimiento de 40 mm, la corrosión atmosférica se inicia a los 50 años (t_i), como se muestra en la tabla 3.

Los hormigones de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 a ambos espesores de recubrimiento de hormigón (20 y 40 mm) sobre el acero de refuerzo, corresponden a las condiciones de diseño más usadas en la construcción de las estructuras de hormigón armado en zonas costeras de Cuba. Es de notar como los tiempos de iniciación y propagación del fenómeno de la corrosión, fueron muy cortos expresado en años. De esta forma, la vida útil de las estructuras para diferentes relaciones agua/cemento y espesores de recubrimiento de hormigón, no pasa de los cinco años como se observa en la tabla. 3.

Tabla 3
Tiempos de iniciación propagación del fenómeno de la corrosión, así como la vida útil de las estructuras

Relación agua/cemento	Espesor 20 mm			Espesor 40 mm		
	t_i (años)	t_p (años)	V_u (años)	t_i (años)	t_p (años)	V_u (años)
0,4	3	12	15	50	-	-
0,5	1	3	4	2	3	5
0,6	1	2	3	1	2	3

Leyenda: t_i : Tiempo de iniciación t_p : Tiempo de propagación, V_u : Vida útil

Los costos de los trabajos de reparación en ambas monedas ejecutados durante el año 2012 en ocho estructuras deterioradas por el fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo, obtenidos del Grupo de Diagnóstico de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), perteneciente al

MICONS, son mostrados en la tabla 4. Estas estructuras localizadas en La Habana, bajo el impacto del ambiente agresivo costero, así como en otras zonas costeras del país de elevado potencial constructivo, se encuentran ubicadas a una corta distancia desde el mar, sin el efecto del apantallamiento.

Antes de analizar la factibilidad económica del estudio propuesto es válido señalar que en todas las estructuras los aceros de refuerzo fueron colocados entre 20 y 30 mm de espesor de recubrimiento de hormigón. La relación agua/cemento del hormigón estuvo, según los constructores, entre 0,5 y 0,6.

Los costos mostrados se basan generalmente en la ejecución de los trabajos de reparación parcial y no total. La reparación parcial solo permite devolverle a la estructura una parte de su vida útil de proyecto. El costo de reparación total de una estructura resulta muy elevado en la actualidad, sobre todo cuando existe un deterioro muy acelerado en el tiempo. De manera general se demuestra que, los costos totales del estudio, resultaron muy inferiores en comparación con los costos totales de las siete estructuras que fueron reparadas parcialmente y con los costos de la estructura que fue reparada totalmente. Este primer aspecto permite demostrar que, el estudio basado en obtener estructuras de hormigón armado altamente resistente al ambiente agresivo costero de Cuba, con plazos de vida útil superiores a 50, resultó menos costoso que combatir el fenómeno directamente a pie de obra. Los costos de reparación en las dos monedas fueron superiores en comparación con los costos totales de las siete estructuras reparadas parcialmente (tabla 4).

Tabla 4
Costos totales de los trabajos de reparación y de investigación

CTR _p Miles de pesos			CR Miles de pesos			CTE Miles de pesos		
CUP	CUC	Total	CUP	CUC	Total	CUP	CUC	Total
656,70	397,39	1 054,09	723,63	889,33	1 612,96	265,0	3,35	267,055

Leyenda: CTR_p: Costos totales de reparación parcial, CR: Costos de reparación total, CTE: Costos totales del estudio investigativo

Otra forma de demostrar la factibilidad económica del estudio es teniendo en cuenta los porcentajes establecidos, a partir de la suma de ambas monedas, entre el costo total de la investigación y los costos totales de las siete estructuras reparadas de forma parcial y la total. Con relación al primero se obtiene que solo se utilizara el 25,3 % del costo total invertido en los trabajos

de reparación parcial. Para la estructura de reparación total se obtiene que solo un 16,3 % del costo total invertido en los trabajos de reparación total sea utilizado en los estudios de investigación.

El costo total de los trabajos de reparación parcial en ocho estructuras de la capital y en otras zonas costeras del país en el año 2012 fue de \$ 2 667 055,53 en ambas monedas (tabla 4), manteniéndose casi esta misma tendencia durante el resto de los años. Un aspecto muy importante sería estimar en cuanto disminuyen los costos de reparación en el tiempo, lo cual justifica aún más la ejecución del estudio.

Teniendo en cuenta que a partir de 50 años de exposición es que pudieran iniciarse los trabajos de mantenimiento para una estructura construida con un hormigón armado de relación agua/cemento 0,4, donde los aceros de refuerzo deben colocarse a 40 mm de espesor de recubrimiento con el estricto cumplimiento de los requerimientos tecnológicos. Se considera entonces que, el resultado del cociente entre el costo total de los trabajos de reparación y dicho tiempo de exposición, representa que anualmente pudieran gastarse solamente \$ 53 351,00 entre ambas monedas en caso de que se mantenga la tendencia de un costo total de los trabajos de reparación muy similar al obtenido. Por tanto, se estima que la disminución de estos trabajos costosos de reparación en el tiempo, trae como resultado un ahorro considerable. Este ahorro puede ser estimado a partir de la diferencia entre el costo total de reparación entre ambas monedas (\$ 2 667 055,53) y lo que se pudiera gastar anualmente. De esta manera se tiene que anualmente pueden ahorrarse \$ 2 613 719 entre las dos monedas, es decir un 98 % con relación al costo total de los trabajos de reparación.

Estudio de la corrosión atmosférica en la zona de desarrollo eólico de Gibara

La aplicación de los resultados obtenidos permitió establecer una vida útil de proyecto del parque eólico entre 20 y 25 años y los que se pretenden construir en otras zonas costeras de Cuba, incluyendo la Zona de Desarrollo Eólico de Gibara, en su versión más amplia (seis generadores más para un total de 12 en la zona).

El costo total de la inversión con relación a la construcción del parque fue de \$7 000 739 entre las dos monedas. La ejecución del estudio tuvo un costo total

de \$130 000 pesos entre las dos monedas, lo que resulta muy inferior al costo total de la inversión. Esto significa que del presupuesto total para la construcción del parque, el costo del trabajo investigativo representó solo el 1,85 %, siendo una de las razones que justifican la ejecución de estos tipos de estudio.

Por otra parte, atendiendo a que el costo total de la inversión fue \$7 000 739 en ambas monedas, un aspecto muy importante sería estimar la disminución de los costos de reparación en el tiempo, lo cual justifica también la ejecución del estudio.

Teniendo en cuenta que a partir de 25 años de vida útil es que pudieran iniciarse los trabajos de mantenimiento al establecer la adecuada selección de los materiales de construcción y sistemas de protección, se considera que el resultado del cociente entre el costo total de los trabajos de reparación y dicho tiempo de exposición, representa que en 25 años pudieran gastarse solo \$280 029,56 entre ambas monedas. Esto representa que se gastaría en trabajos de mantenimiento solo el 4% del costo total de la obra, debido a que la misma fue construida con criterios de durabilidad y vida útil obtenidos del estudio ejecutado.

Por tanto, se estima que alargaren el tiempo estos trabajos costosos de mantenimiento y de reparación, trae como resultado un ahorro considerable. Este ahorro puede ser estimado a partir de la diferencia entre el costo total de la inversión entre ambas monedas (\$ 7 000 739) y lo que se pudiera gastar en 25 años. De esta manera se tiene que para ese tiempo de exposición deben ahorrarse \$ 6 720 709 entre las dos monedas por concepto de trabajos de mantenimiento y reparación, es decir un 96 % con relación al costo total de la inversión.

Estudio de la corrosión atmosférica en la Zona Especial de Desarrollo Mariel

Como impacto económico del estudio, se demuestra que, según los precios actuales de los materiales metálicos, así como de la mano de obra, los insumos (productos a base de pinturas, solventes, brochas, rodillos, etc.) y otros gastos (transportación, etc.), se generan gastos muy elevados en caso de reparar o

sustituir los elementos de una estructura metálica afectada por el fenómeno de la corrosión atmosférica.

Este análisis es hecho tomando como base de cálculo una tonelada de cada material metálico de la construcción (acero al carbono, cobre, cinc, acero galvanizado y aluminio), lo que representa un costo total anual de \$ 76 645,68 USD. Obsérvese los precios de solamente una tonelada de la granalla, material utilizado en el tratamiento mecánico superficial del acero al carbono y en ocasiones en el acero galvanizado, antes de aplicar el sistema de protección a base de pinturas (tabla5).

Tabla 5
Precios en caso de un deterioro anticipado en el tiempo con relación a una tonelada para cada material metálico de la construcción y otros gastos

Materiales e insumos	Precios (€)	Precios (USD)
Aluminio (95-99% de pureza)	1 911,28/t	2 580,22/t
Cobre	7 652,38/t	10 330,71/t
Cinc	1 929,15/t	2 604,35/t
Acero al carbono	610,34/t	823,95/t
Acero galvanizado (21 µm de espesor de cinc)	671,37/t	906,35/t
Granalla	4 000/t	5 400/t
Mano de obra	25 000/t	33 750/t
Insumos	10 000	13 500
Otros gastos	5 000	6 750
Totales	56 774,52	76 645,68

El costo de la ejecución del estudio, basado en la prevención del fenómeno de la corrosión atmosférica en la ZEDM, fue de \$12 772 USD. Por tanto, la ejecución de los trabajos de reparación en caso de los elementos de acero al carbono y acero galvanizado, así como la sustitución de otros elementos, piezas, insumos y accesorios de cobre, cinc y aluminio, presenta una pérdida económica muy superior.

Prácticamente, la inversión resulta seis veces mayor en comparación con el costo de la investigación, o lo que es lo mismo, el costo de la investigación representa un 16,6 % de lo que se debe gastar en caso de un intenso deterioro en la infraestructura tomándose como base de cálculo una tonelada al año. Este primer aspecto permite demostrar lo factible que resulta la ejecución de estos tipos de estudios basados en prevenir tan dañino fenómeno.

En caso de que el deterioro fuera mayor a una tonelada en menos de un año como fue demostrado, aspecto que debe ocurrir en la ZEDM debido a los elevados niveles de agresividad corrosiva de la atmosfera obtenidos, entonces

existe un notable incremento de las pérdidas. Si se deterioran o se sustituyen tres toneladas de cada material, entonces el costo total anual sería de \$ 229 937,04 USD, solamente en un año. Se insiste en que, según los resultados obtenidos en cuanto al elevado nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera, existe una amplia probabilidad que se deterioren y necesiten sustitución más de tres toneladas de metal, en caso de no cumplir con el riguroso plan de medidas. Se estima que en cinco años se estuvieran gastando más de un millón de dólares.

Por tanto, en el caso de no ocurrir el deterioro de una tonelada debido a la intensidad se estarían ahorrando anualmente o se dejarían de gastar \$ 76 645,68 USD, a tal punto que en 13 años se estarían ahorrando un millón de dólares. El mejor ingreso es el ahorro. Prever en inversiones, es economía. Se reitera que todos estos estimados económicos son referidos a una tonelada, por lo que el ahorro estimado es superior al costo invertido en los trabajos de investigación.

Al tomar el ahorro anual para una tonelada como un beneficio (\$ 76 645,68 USD), es posible entonces determinar la relación beneficio/costo tomando el costo total de la investigación (\$ 12 772 USD). Al tener en cuenta el beneficio producto del ahorro anual estimado entre el costo de la investigación, se tiene que dicha relación es muy superior a 1. Por tanto, queda demostrado que ha resultado muy conveniente la ejecución de estudios, dirigidos a prevenir el fenómeno de la corrosión atmosférica, no solo en la ZEDM, sino también en cualquier otra zona estratégica de elevado potencial constructivo en el país.

Conclusiones

- 1. Los resultados obtenidos a partir de los estudios de corrosión atmosférica y deterioro de materiales en zonas estratégicas de elevado potencial constructivo, representan un aporte económico muy significativo para Cuba.***
- 2. Se demostró que el aporte económico significativo puede estar directamente relacionado con las mejoras en los procesos tecnológicos en la industria de la construcción, basados en la obtención de materiales de construcción.***

- 3. Se logró obtener plazos elevados de durabilidad y vida útil en zonas costeras del país de elevado potencial constructivo, lo cual propicia la disminución de los trabajos costosos de reparación en toda la infraestructura, representando también un aporte económico significativo en cuanto al ahorro para la industria de la construcción en Cuba.**

Referencias bibliográficas

1. ISO 9223, Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmosphere. Classification, determination and estimation, 2012.
2. PELAEZ, Orfilio, Artículo en el periódico Granma “Contragolpe a la corrosión atmosférica”. Publicado el 23 de mayo del 2015.
3. Artículo publicado en el periódico Granma “¿Jaque mate al deterioro del hormigón armado? Publicado el 23 de mayo del 2015.
4. GONZÁLEZ ORTEGA L., McNeil Montañes, B., Marrero Águila, R. Durabilidad del perfil de aluminio lacado en las condiciones de clima tropical, *Revista Cubana de Ingeniería*, 2013, **IV** (3), septiembre - diciembre, pp. 41 – 46.
5. MCNEIL MONTAÑES, B., González Ortega, L., Marrero Águila, R. Aplicación y control de un tratamiento ecológico superficial para perfiles de aluminio. *Tecnología química*, 2015, **35**(3), junio, pp. 334-342.
6. VALDÉS, C., Corvo, F., González, E. Pérez, J. Portilla, C. Cuesta O. Mecanismos de deterioro de la piedra caliza coralina en el Convento de San Francisco de Asís y ensayo de productos para su conservación: estudio preliminar. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 2007, **38**(3), *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 2010, **41**, pp. 1-8.
7. VALDÉS C. Causas de deterioro de la piedra estructural del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 2008, **39**(1)
8. HOWLAND ALBEAR. J. J., Castañeda, A., Corvo F., Martín, A. R. Estudio del ambiente agresivo costero de La Habana y su impacto sobre las estructuras de hormigón armado. *Revista CENIC, Ciencias Químicas*, 2015, **46**
9. CASTAÑEDA, A. Howland Albear, J. J., Corvo, F., Marrero, R. Airborne salinity penetration in the coastal tropical climate of Havana. *Revista CENIC, Ciencias Químicas*, 2015, **46**, pp. 90-99
10. CASTAÑEDA, A., Fernández, D., Valdés, C., Corvo, F., Estudio de la

corrosión atmosférica en una zona estratégica de Cuba. *Revista CENIC, Ciencias Químicas*. 2015, **46**, pp. 14-25

11. CASTAÑEDA, A., Corvo, F., Fernández, D., Valdés, C., Outdoor-indoor atmospheric corrosion in coastal wind farm located in a tropical island...*Engineering Journal*, 2017 ISSN 0125-8281
12. FERNÁNDEZ, D., Castañeda, A., Corvo, F., Estudio de la corrosión atmosférica en el puerto del Mariel. *Revista CENIC, Ciencias Químicas*, 2015, **46**, pp. 47-58
13. CASTAÑEDA, A., Valdés, C., Corvo, F., Atmospheric corrosion study in a harbor located in a tropical island, *Material and Corrosion*, 2018, **2**, pp.1-17.