

*Universidad de Matanzas Sede “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de construcciones*



TRABAJO MONOGRÁFICO

En opción al título de Ingeniero Civil

**INGENIERÍA CIVIL APLICADA A CONSTRUCCIONES
COSTERAS: FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS.**

AUTOR: Velio Antonio Barrera Herrera

TUTORES: DrC. Juan Alfredo Cabrera Hernández e Ing. Sarah Enríquez Guerra

Matanzas, 2020

PENSAMIENTO

"El impacto de la construcción en el medio ambiente es muy grande y constituye una gran responsabilidad de todos aquellos que formamos parte de un proyecto constructivo. Y me di cuenta que para que un proyecto constructivo fuera un éxito, no debía limitarme al simple tema del cálculo estructural, sino que debía involucrarme también en el tema ambiental..."

*Ingeniera Helena Gervasio
(Universidad de Coimbra, Portugal)*

RESUMEN

La historia de la construcción es también la historia de la adaptación al entorno. Y en esa historia la búsqueda de una gestión en la actividad constructiva que traiga como resultado una conservación y restauración continuada de las construcciones costeras ha crecido intensamente hasta convertirse en nuestros días en un paradigma de la Ingeniería Civil. En Cuba los estudios realizados en esta dirección son cada vez más frecuentes, incluso al nivel de postgrados y formación doctoral. El presente trabajo monográfico sintetiza algunas de las particularidades de los ambientes costeros, su influencia corrosiva sobre las construcciones costeras y la necesidad de los estudios patológicos, diagnósticos y acciones de intervención en dichas construcciones. Para el desarrollo de este trabajo de carácter monográfico se realizó una ardua revisión bibliográfica y se consultaron decenas de estudios que en Cuba y en el mundo abordan la temática, aunque sin dudas la principal fuente del mismo fueron los numerosos trabajos realizados en los últimos años en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Matanzas. De esta forma, se logra como resultado fundamental una síntesis actualizada de muchos conceptos, métodos y aplicaciones concretas que constituyen ya un patrimonio intelectual de la institución, y que se convierten de hecho en la base para continuar desarrollando esta línea de investigación.

Palabras claves: acciones de intervención constructivas, agresividad corrosiva de la atmósfera, construcciones costeras sostenibles, patología y zonas costeras.

INTRODUCCIÓN

Es indiscutible que la construcción es uno de los sectores de mayor peso específico en cualquier sociedad y uno de los mayores dinamizadores de las economías. Al mismo tiempo se ha reconocido que también es un sector profundamente impactante sobre el medio ambiente e incluso frecuentemente se le acusa de ser insostenible, lo que se hace muy evidente en las zonas costeras, donde se concentran la mayoría de las grandes ciudades y de las infraestructuras construidas en el mundo.

Ante este panorama, corresponde un rol muy importante a la Ingeniería Civil en desarrollar nuevos enfoques teórico-conceptuales y metodológicos que permitan avanzar hacia la adopción e implementación de modelos de construcción que optimicen el uso racional de la energía y de los recursos naturales, al mismo tiempo, aseguren el manejo adecuado de los escombros y residuales de todo tipo, que es en definitiva avanzar hacia un modelo de construcciones sostenibles. En Cuba, dadas sus propias características como isla caribeña, se presta especial prioridad a la gestión integrada de sus zonas costeras, cuestión que atañe muy directamente a las construcciones. Una muestra de ello es que recientemente se aprobó como directiva del gobierno, el Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático, que apunta directamente hacia la adopción de tipologías constructivas, al tiempo que enfatiza la necesidad de ordenar y restaurar todo el patrimonio construido en las franjas costeras, que es realmente inmenso.

En este contexto, en la Universidad de Matanzas, específicamente en la carrera de Ingeniería Civil, se ha abierto desde hace más de 5 años una línea de investigación enfocada en construcciones sostenible costeras, y ya se acumulan decenas de trabajos en que se ha abordado el tema de la conservación y gestión constructiva sostenible de los diversos tipos de edificaciones localizadas en plena zona costera, en sus diferentes ecosistemas socio-ecológicos. Este Trabajo Monográfico viene a ser una síntesis de los fundamentos conceptuales y metodológicos aprendidos y aplicados por estudiantes, profesores e investigadores asociados a este esfuerzo científico-técnico.

DESARROLLO.

1.1 Zonas costeras y ambiente agresivo costero

Las zonas costeras son franjas marítimo-terrestres de ancho variable, escenarios de contactos e interacción entre los ecosistemas marinos y terrestres, y por lo tanto se distingue una porción “seca” y otra “mojada”, las cuales constituyen una interfase que se conoce como litoral. En estas zonas se concentran múltiples actividades humanas y procesos naturales que interactúan profundamente, y actúan un conjunto de factores ambientales muy singulares que pueden afectar notablemente las construcciones, los atractivos turísticos, las industrias y todas las actividades económicas y sociales (Orovio et al., 2008, Turnbull et al., 2013).

Específicamente en Cuba, el Decreto Ley 212, de Gestión de las zonas costeras, regula en su artículo 2, la definición de zona costera como la “franja marítimo-terrestre de ancho variable, donde se produce la interacción de la tierra, el mar y la atmósfera, mediante procesos naturales. En la misma se desarrollan formas exclusivas de ecosistemas frágiles y se manifiestan relaciones particulares económicas, sociales y culturales.(Consejo de Estado, 2000).

En éste mismo Decreto Ley 212, se establece que los límites de la zona costera se definen atendiendo a la estructura y configuración de los distintos tipos de costas, tal y como se explica y representa graficamente a continuación:

Tipo de costa I: Terrazas bajas.

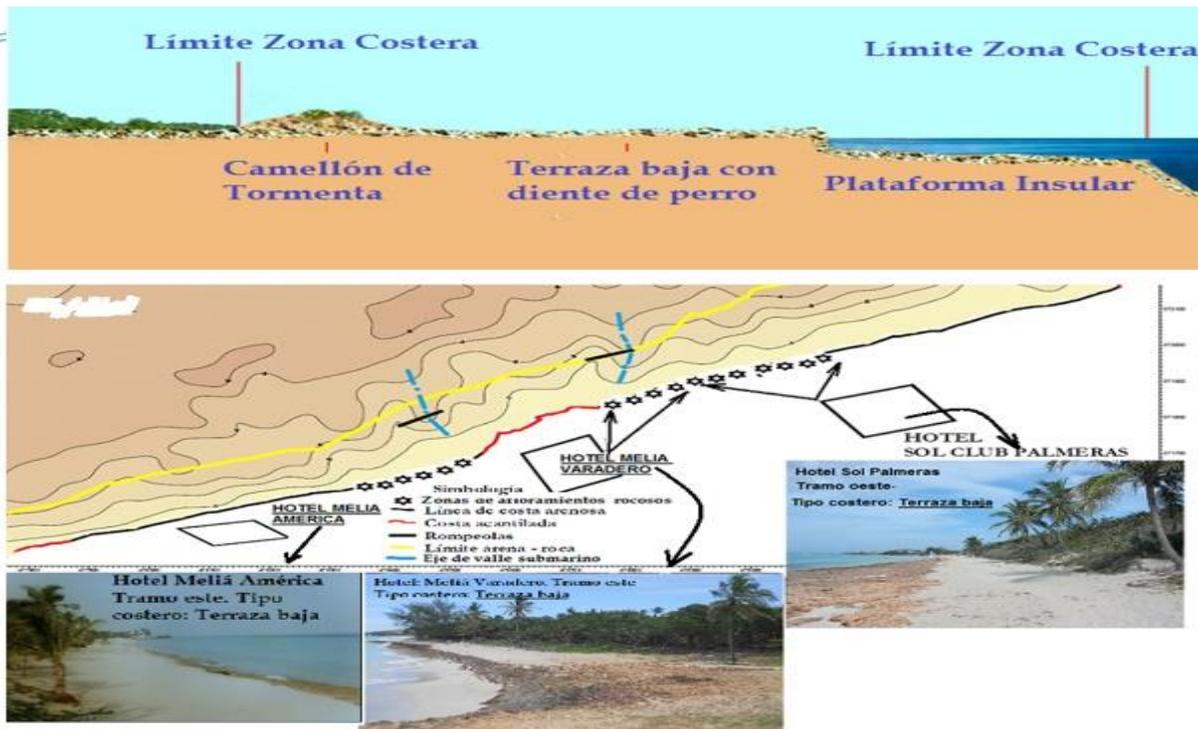


Fig.1. Representación gráfica y ejemplos de tipo de costa Terrazas Bajas (Costa rocosa en Varadero, Matanzas)

I. a): Constituida por rocas carbonatadas que incluyen un camellón de materiales sueltos como cantos, guijarros, gravas y arenas, formado durante los temporales y regularmente cubierto de vegetación. El límite se establece en el borde extremo hacia la tierra del camellón y la zona de protección tiene un ancho de 20 metros, medidos a partir del límite hacia tierra de la zona costera.

I. b): Terraza baja con ausencia del camellón: El límite será la línea ubicada a 20 metros hacia tierra, medidos a partir del inicio de la franja de vegetación natural consolidada más próxima al mar sobre la terraza. La anchura de la zona de protección coincide con la del tipo de costa I.

I. c): Terraza baja en ausencia del camellón y en presencia del acantilado en un segundo nivel de terraza: Ubicado a menos de 20 metros hacia tierra, medidos a partir del inicio de la franja de vegetación natural más próxima al mar sobre la terraza. El límite está dado por

la cima de dicho acantilado. La anchura de la zona de protección coincide con la del tipo de costa I.

I. d): Terraza baja en ausencia del camellón si el área colindante a la terraza es una laguna costera con manglar: El límite hacia tierra está dado por la penetración máxima del bosque de mangle. La anchura de la zona de protección coincide con la del tipo de costa I.

Tipo de costa II: Costa acantilada.

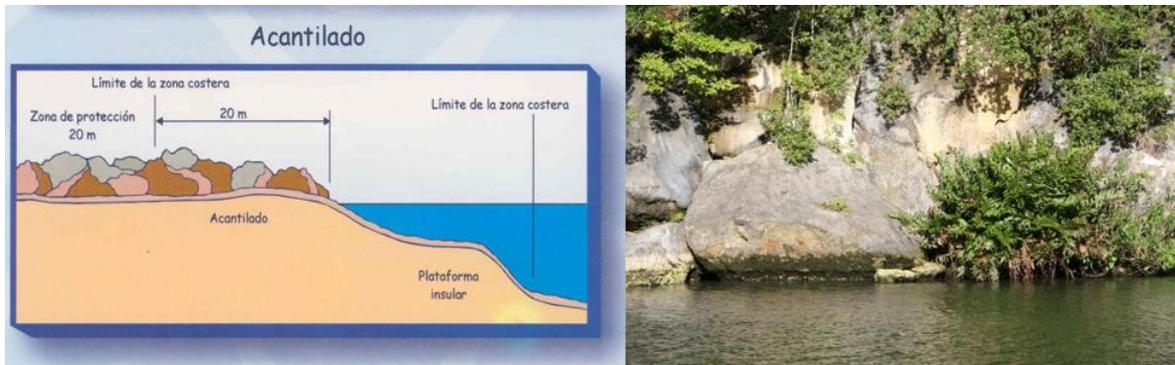


Fig. 2. Representación gráfica y ejemplo de tipo de costa Acantilado (Costa norte, Matanzas)

El área con acantilados cuya cima no sea sobrepasada por las marejadas o penetraciones del mar. Se extiende 20 metros hacia tierra a partir de dicha cima. La anchura de la zona de protección coincide con la del tipo de costa.

Tipo de costa III: Playa.

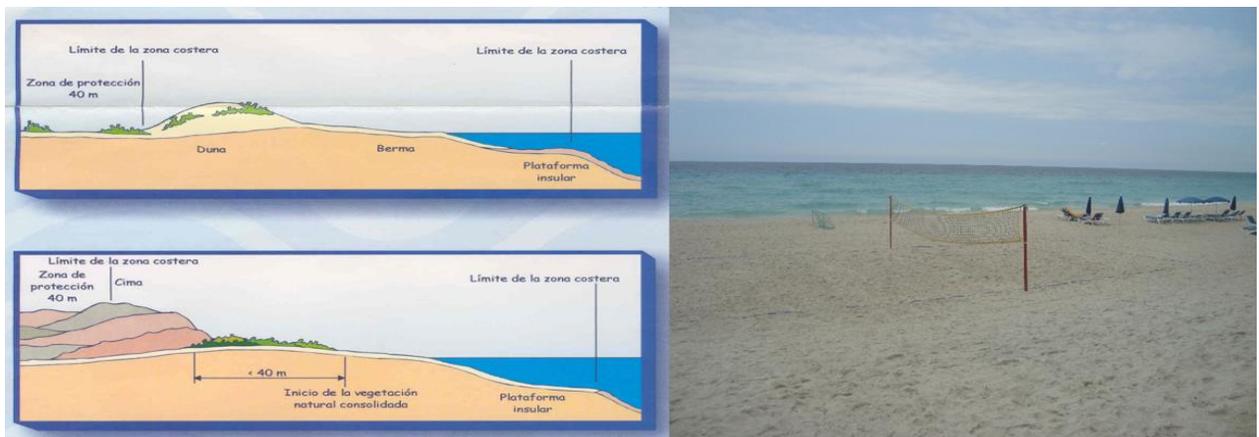


Fig. 3. Representación gráfica y ejemplo tipo de costa Playa (Playa de Varadero, Matanzas)

III. a): Playa constituida por materiales sueltos de diferente espesor en áreas emergidas y submarinas, que manifiestan procesos de erosión y acumulación por alteraciones de origen natural o antrópico con cambios en la dinámica de su perfil. Pertenecen a ella las barras submarinas, las bermas y las dunas. Su límite se establece en el borde extremo hacia tierra de la duna más próxima al mar. La zona de protección tiene un ancho de 40 metros, medidos a partir del límite hacia tierra de la zona costera.

III. b): Playa con ausencia de dunas: El límite será la línea ubicada a 40 metros hacia tierra, medidos a partir del inicio de la franja de vegetación natural consolidada más próxima al mar. El ancho de la zona de protección coincide con la del tipo de costa III.

III. c): Playa con ausencia de dunas y presencia de acantilado: Ubicado a menos de 40 metros hacia tierra, medidos a partir del inicio de la franja de vegetación natural más próxima al mar. El límite está dado por la cima de dicho acantilado. La anchura de la zona de protección coincide con la del tipo de costa III.

III. d): Playa con ausencia de dunas si el área colindante con la berma resultara ser una laguna costera con manglar. El límite hacia tierra está dado por la penetración máxima del bosque de mangle. La anchura de la zona de protección coincide con la del tipo de costa III.

Tipo de costa IV: Costa baja de manglar.

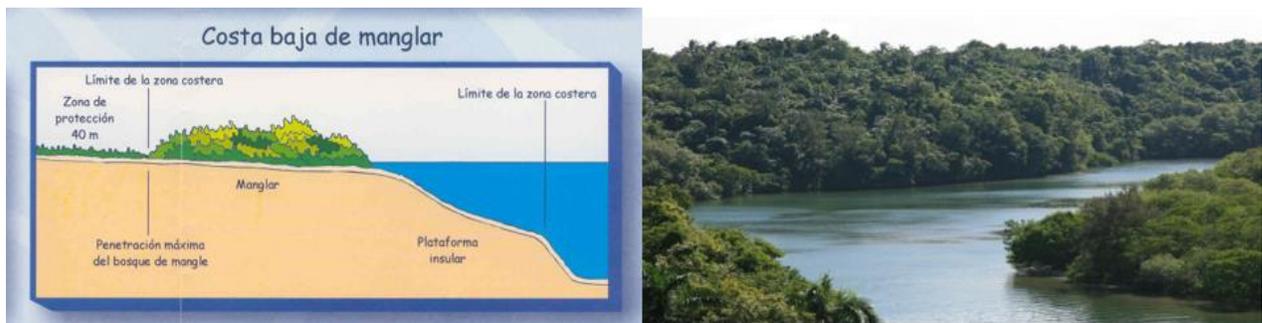


Fig. 4. Representación gráfica y ejemplo de tipo de costa baja manglar (Ciénaga de Zapata, Matanzas)

El área que comprende las extensiones de manglar asociadas con las ciénagas, esteros, lagunas costeras, y en general, los terrenos bajos que reciben la influencia del flujo y reflujo de las mareas, de las olas o de la filtración del agua de mar. Su límite está dado por la penetración máxima del bosque de mangle. Si apareciese vegetación de ciénaga, el límite

será fijado por el borde externo hacia tierra de dicho bosque. La anchura de la zona de protección coincide con la del tipo de costa III.

Tipo de costa V: Desembocadura de río

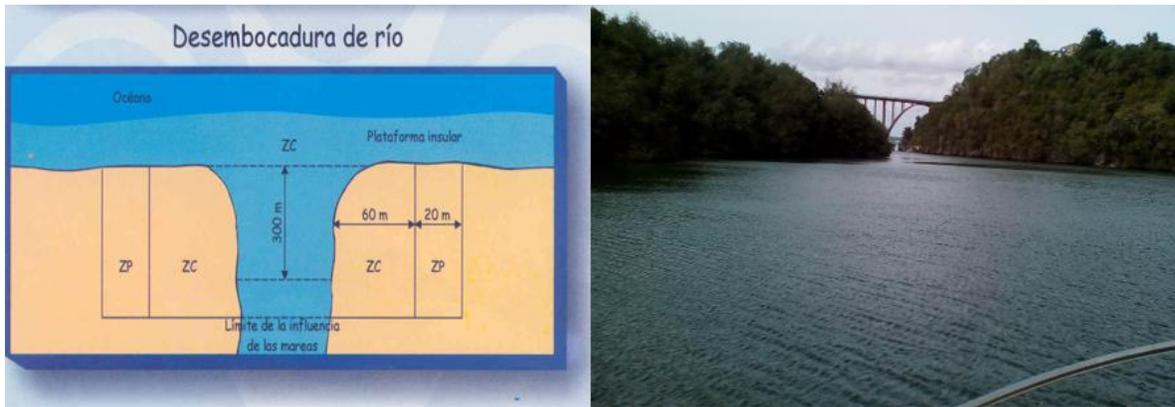


Fig. 5. Representación gráfica y ejemplo de tipo de costa desembocadura de río (Río Canímar, Matanzas)

La zona costera se extiende 300 metros en línea recta hacia tierra, partiendo de la desembocadura y siguiendo la sección longitudinal del río y 60 metros tierra adentro por ambas márgenes hasta donde llegue el efecto de las mareas. La anchura de la zona de protección coincide con la del tipo de costa I.

Tipo de costa VI: Zona antropizada.



Fig. 6. Representación gráfica de tipo de costa zona antropizada.

Sectores de la zona costera que, por causas naturales o artificiales, no es posible identificar dentro de los tipos descritos en los incisos anteriores. El límite hacia tierra se extiende 20 metros a partir de donde hayan alcanzado las olas de los mayores temporales conocidos o cuando lo supere, la línea de pleamar máxima equinoccial. La anchura de la zona de protección coincide con la del tipo de costa III.

Por otra parte, cuando se habla del impacto agresivo costero, se trata del conocimiento sobre la agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera que existe en todas estas zonas costeras, y donde para los Ingenieros Civiles se convierten en relevantes los análisis de la construcción y diagnóstico de las obras construidas, y de las consecuentes acciones necesarias para la conservación, mantenimiento y reparación.

En tal sentido es esencial el concepto agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera, entendido como la capacidad que presenta la atmósfera de originar y desarrollar el fenómeno de la corrosión atmosférica en cualquier sistema o elemento estructural.

La atmósfera por su gran difusión y extensión, es el medio de exposición donde tienden a ocurrir las mayores afectaciones por corrosión, no solo en las estructuras de hormigón armado, sino también en las construidas de cualquier material metálico de la construcción.

Las edificaciones situadas en zonas costeras se deterioran con mayor rapidez que otras semejantes ubicadas a gran distancia del ambiente salino y agresivo, pues la influencia de los cloruros, provocados por el aerosol marino, es muy significativa en la elevación de la velocidad de corrosión y una vez que ya está formada la capa, existe un proceso de adsorción competitiva entre los cloruros y los sulfatos. Además, en la temporada invernal o de seca, la gran influencia de los vientos del norte y nordeste que producen rompientes en la costa y temporada de verano o lluvias (abril a septiembre), los vientos provenientes del sur originan rompientes de poca envergadura lo que conduce a grandes concentraciones de aerosol marino en el aire, suficientes para incrementar drásticamente la corrosividad.

Se reconoce que el aerosol marino es sal de mar y que en ella están presentes, además de los cloruros, los iones sulfatos. Los estudiosos de la corrosión atmosférica están de acuerdo totalmente que los sulfatos ferrosos y demás contaminantes salinos juegan un papel importante en el mecanismo de la corrosión atmosférica del hierro y el acero que afectan con gran intensidad las edificaciones costeras.



Fig. 7. Un ejemplo de efectos de la agresividad corrosiva

Entiéndase pues en lo adelante por corrosión atmosférica, el ataque y deterioro electroquímico que sufren los materiales metálicos expuestos directamente a la atmósfera debido a la influencia directa de la humedad relativa, la temperatura, la disposición de los contaminantes atmosféricos, así como la velocidad y dirección del viento. Otros factores a considerar son la distancia desde el mar y el tipo de material metálico utilizado.

1.2 Métodos para la estimación y determinación de la agresividad corrosiva costera.

Clasificación de los ambientes costeros por su agresividad.

Para conocer el impacto del ambiente agresivo costero, se han propuesto tres variantes principales que permiten evaluar la agresividad corrosiva para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción. Dos variantes permiten la estimación de la agresividad y la otra permite su determinación. Al hacer una comparación entre la estimación y la determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, a partir de esta última se tiene un menor valor de incertidumbre, como puede apreciarse en la Tabla 1, que fue tomada de la Tabla 13 de Howland y Castañeda, 2017.

Tabla 13. Niveles de incertidumbres para la evaluación de la agresividad corrosiva de la atmósfera sobre la base de la determinación y estimación

<i>Material metálico</i>	<i>Nivel de incertidumbre</i>	
	<i>Determinación</i> (%)	<i>Estimación</i> (%)
Acero al carbono	2	-33 hasta +50
Cobre	5	-33 hasta +50
Zinc	2	-33 hasta +50
Aluminio	5	-50 hasta +100

Tabla 1, tomada de Howland y Castañeda, 2017.

No obstante, a la hora de evaluar el impacto del ambiente agresivo costero es conveniente combinar las tres variantes para tener un mayor cumulo de información y bases de datos disponibles que permitan construir las estructuras con mayores criterios de durabilidad y vida útil.

Las dos variantes o metodologías que permiten estimar y la que propicia determinar la agresividad corrosiva de la atmósfera son referidas a los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción como bien se indica en la normativa internacional de la especialidad de corrosión atmosférica. Estos materiales a través de probetas metálicas de dimensiones estandarizadas 150x100mm y espesor hasta 3mm, deben de colocarse totalmente desnudos, es decir, sin ningún sistema de protección a base de recubrimientos. Sin embargo, se ha probado que dicha normativa puede ser usada para:

- Demostrar la eficacia del sistema de protección de cualquier tipo de recubrimientos (pinturas, metálicos, orgánicos, inorgánicos y substratos)
- Establecer los requisitos por durabilidad y vida útil para las estructuras de hormigón armado que se pretenden construir en zonas costeras.

En los estudios desarrollados en la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Matanzas, la variante más utilizada ha sido la estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera basada en la obtención de la información medio ambiental obtenida de la zona de estudio. De lo que se trata es de lograr una caracterización del comportamiento de la

penetración del aerosol marino a partir de la determinación de los niveles de deposición de las sales de iones cloruros y sulfatos o de los compuestos de azufre, además del pleno conocimiento del complejo humedad relativa-temperatura. Se tiene en cuenta también el comportamiento de la velocidad y dirección del viento. Todo al menos durante un año de estudio.

Esta variante de estimación permite como herramienta fundamental la clasificación de los tipos de atmósfera en la zona donde se procederá principalmente con los trabajos de construcción de las obras, lo que se resume en la siguiente Tabla 2, tomada de Howland y Castañeda, 2017.

Tabla 14. Niveles de deposición promedio anuales para las sales de iones cloruro y sulfato en estudios de corrosión atmosférica

<i>Deposición sales de iones cloruro* (mg/m²d)</i>	<i>Nivel</i>	<i>Deposición sales de iones sulfato (mg/m²d)</i>	<i>Nivel</i>	<i>Clasificación de la atmósfera</i>
$S_d < 3$	S_o	$P_d < 4$	P_o	Rural si $S_d > 15$
$3 < S_d < 60$	S_1	$4 < P_d < 24$	P_1	Urbana si $S_d > 15$
$60 < S_d < 300$	S_2	$24 < P_d < 80$	P_2	Industrial o costera-industrial si $S_d > 60$
$300 < S_d < 1\ 500$	S_3	$80 < P_d < 200$	P_3	Costera-industrial altamente contaminada

* Captador de la vela húmeda

Tabla 2, tomada de Howland y Castañeda, 2017.

En un ambiente agresivo costero, la atmósfera que más predomina es la costera (C). Para esto, es necesario que la deposición promedio anual de las sales de iones cloruros esté por encima de un cierto valor en dependencia de la zona de estudio donde se ejecute la investigación determinada por el captador de la vela húmeda. El valor promedio anual de deposición más predominante en la literatura de la especialidad a partir del cual la atmósfera puede ser considerada como costera es de 20mg/m²d.

Otro requisito indispensable en el estudio sobre el impacto del ambiente agresivo costero (en esta variante de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera), además de la clasificación de los tipos de atmósfera, es la evaluación mensual de la deposición de las sales de iones cloruros y sulfatos durante un año de estudio como indica la normativa de la

especialidad, sobre todo a diferencias de distancias desde el mar. Este permite conocer la época del año en que pudiera existir un mayor impacto del ambiente agresivo costero sobre las estructuras.

La selección de los sitios de exposición a la hora de colocar captadores y otras técnicas de estos tipos de estudios, debe hacerse partiendo casi desde la zona del rompiente de las olas o línea costera, hasta la mayor penetración hacia el interior de la tierra, siempre en dependencia de la distancia hasta donde abarcará el estudio de las obras costeras.

Se entiende por deposición la cantidad de partículas salinas de iones cloruros y(o) sulfato que tienden a depositarse en las superficies de la infraestructura civil, mientras el aerosol marino es transportado desde el mar hacia el interior de la tierra.

La formación y transporte del aerosol marino ha sido reflejado en la Fig. 8, tomada de Howland y Castañeda, 2017), y se ha podido comprobar la disminución de la deposición de las sales de iones cloruro en el incremento de la distancia desde el mar, según numerosos estudios realizados en diversas zonas costeras del mundo, tanto sin apantallamiento de las estructuras, como con apantallamiento natural debido a la presencia de formas geomorfológicas costeras y vegetación típica.

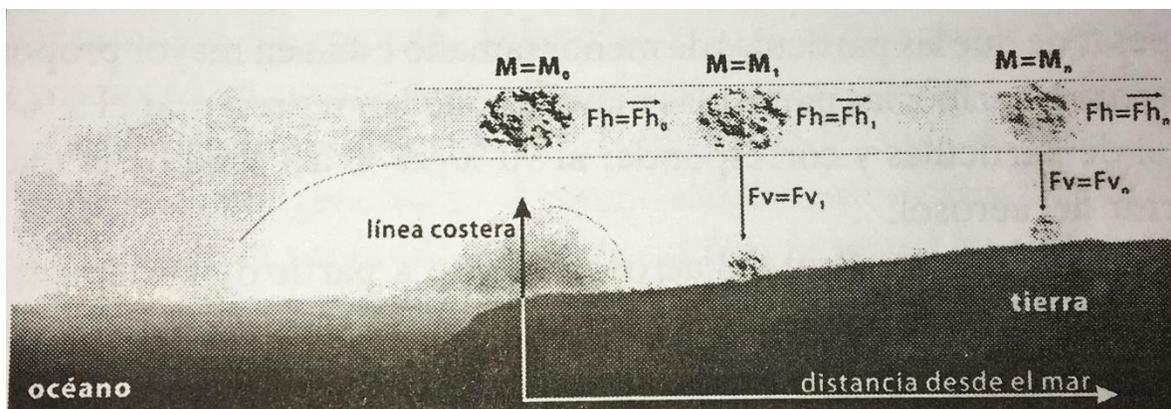


Fig.8. Formación y transporte del aerosol marino.

El esquema permite reafirmar la relación entre el flujo de deposición vertical resultante (F_v) procedente del flujo horizontal (F_h) y la concentración de sales de iones cloruros en la atmósfera (M), mientras el aerosol marino penetra hacia el interior de la tierra desde el mar. Este proceso es representado de forma simplificada en la ecuación del fluido mecánico:

$$(F_v = vM \{ \mu\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1} \})$$

Dónde: v : velocidad de deposición de las sales de iones cloruros

Lo cierto es que la medición directa de la concentración de sales en el aerosol marino ha resultado muy difícil debido a la complejidad de los captadores y del equipamiento.

La normativa de la especialidad de corrosión atmosférica tiene establecido que los principales factores que influyen en la deposición de las sales de iones cloruros son: la dirección y velocidad del viento, la distancia desde el mar, así como la tipografía de la zona de zona de estudio donde se procederá con las construcciones de las obras.

Sin embargo, en esta primera variante de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera, otro factor que pudiera influir en la deposición y que afecta directamente el deterioro de las estructuras bajo el impacto del ambiente agresivo costero es el comportamiento del complejo humedad relativa-temperatura.

Se entiende por complejo humedad relativa-temperatura al efecto combinado de la humedad relativa y la temperatura sobre la agresividad corrosiva de la atmósfera. Estos aspectos son:

- La determinación o cálculo del tiempo de humectación, como variable fundamental en estos tipos de estudios teniendo en cuenta el comportamiento mensual y promedio anual de la humedad relativa la temperatura.
- La demostración de si la deposición promedio anual o mensual de las sales de iones cloruro ocurre en forma de solución salina o en forma seca de cristales de sales.

Se entiende por tiempo de humectación, el período durante el cual la superficie del material metálico es cubierta por la película de agua líquida electrolítica debido a los procesos de condensación de la atmósfera (rocío) y los periodos anteriores y posteriores a la ocurrencia de las precipitaciones (lluvia), capaz de originar el fenómeno de la corrosión atmosférica. En otras palabras, representa el tiempo en horas/años (h/a) en el cual puede ocurrir el proceso electroquímico del fenómeno de la corrosión atmosférica.

El tiempo de humectación merece ser revisado a la hora de tomarlo como un parámetro que indique el tiempo de ocurrencia de la corrosión atmosférica.

Se destaca que el tiempo de humectación (t) de una zona de estudio depende evidentemente del complejo humedad relativa-temperatura de la atmósfera exterior, así como de la categoría de localización.

La categoría de localización en estudio de corrosión atmosférica o impacto del ambiente agresivo costero, es definida convencionalmente como la condición de exposición típica de un elemento o estructura. Las condiciones de exposición que más se observan en estudios de corrosión atmosférica son:

- Condición de exposición al exterior, es decir, a la atmósfera
- Condición de exposición en interiores en estructuras de hormigón armado y metálicas de gran dimensión ventiladas desde el exterior. Es el caso concreto de una estructura interior con las ventanas abiertas u otros espacios abiertos por donde penetre el viento.
- Condiciones de posiciones interiores en estructuras sin ningún tipo de ventilación. O sea, una estructura herméticamente cerrada, como es el caso de algunos almacenes y polvorines donde la penetración del viento es mínima.
- Condición de exposición soterrada donde también la penetración del viento sea mínima. Tal es el caso de los refugios.
- Condición de exposición bajo el efecto estufa. Se trata de una caja o dispositivo metálico cerrado (generalmente de acero galvanizado de elevado espesor de zinc para que resista la corrosión atmosférica) similar a las dimensiones de una estufa de laboratorio, donde en su interior se colocan las probetas metálicas y los captadores de contaminantes atmosféricos.

De todo lo anterior, resulta la clasificación de los ambientes costeros según su agresividad corrosiva, que es esencial en la realización de los estudios, pues establece el marco espacial concreto en que se produce el ataque fundamental para las estructuras de hormigón armado, y ello es especialmente importante en el caso Cuba, ya que, dada su ubicación y forma, predomina un muy elevado nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera en sus zonas costeras.

Entre los ambientes agresivos costeros de Cuba, la atmósfera que más predomina es la Costera (C), aunque existen otros tipos de ambientes costeros como el Industrial (I), el Urbano (U) y el Rural, y también se encuentran zonas donde existen combinaciones de

ellos, como es el Costero-Industrial (C-I), siendo éste uno de los medios costeros más agresivos.

Los principales estudios y propuestas para Cuba, reslatan la existencia de seis tipos principales de atmósferas agresivas costeras (costera, industrial, costera-industrial, industrial-costera, rural y urbana), como resultado de la caracterización del comportamiento de la penetración del aerosol marino a partir de la determinación de los niveles de deposición de las sales de iones cloruro y sulfato o de los compuestos de azufre, además del pleno conocimiento del complejo humedad relativa-temperatura y del comportamiento de la velocidad y dirección del viento. La siguiente tabla 3 muestra lo anterior mencionado, a partir de los estudios de Howland y Castañeda 2017, y de otros trabajos desarrollados en el país.

Deposición de las sales de iones cloruro DIC (mg/m ² d)	Deposición de las sales de iones sulfato DSO (mg/m ² d)	Clasificación de la atmósfera	Nivel de agresividad
=20	= 20	Costera	media
<20	≥24	Industrial	elevada
> 20	≤20	Costera-Industrial	muy elevada
≥20	> 24	Industrial-Costera	extrema
<20	≤4	Urbana	Baja
≤4	≤4	Rural	muy baja

Tabla 3: Niveles de deposición promedio anual y clasificación de las atmosferas costeras, a partir de Howland y Castañeda 2017.

De acuerdo con los estudios realizados en Cuba en la década de 2005-2015 para la clasificación de los tipos de atmósfera a partir de las deposiciones promedios anuales de iones cloruro y sulfato se ha podido determinar que la distancia al mar constituye un factor

muy significativo, y se ha analizado el caso específico de la zona costera de la ciudad de La Habana, en la que a una distancia desde el mar de 0,12 km se registró una disposición promedio anual de las sales de iones cloruro de 25,54 mg/m²d y una disposición promedio anual de iones de sulfato de 35,89 mg/m²d lo que se clasifica como una atmósfera industrial- costera de agresividad extrema. En el caso de la provincia de Matanzas se han realizado mediciones y extrapolaciones para sectores costeros aledaños a la Universidad de Matanzas y la Zona Industrial.

En las tesis de diplomas recientes de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Matanzas se ha analizado la situación concreta de varias edificaciones ubicadas en zona costera, muy próximas al mar, como son el Complejo Comercial La Sirenita, el Museo El Morrillo y el Círculo Infantil Estrellitas Nacientes (ver Figura 9), así como en las viviendas ubicadas en la Zona Industrial de Matanzas y se ha llegado a la consideración de que existe un amplio predominio de la clasificación de la atmósfera como Costera (C).



Fig. 9. Ejemplos de edificaciones estudiadas con un ambiente agresivo Costero (C): Círculo Infantil Estrellitas Nacientes y Museo El Morrillo, de la ciudad de Matanzas.

1.3 EFECTOS DE LA AGRESIVIDAD CORROSIVA. ESTUDIOS PATOLÓGICOS Y DIAGNÓSTICO

Al realizar el estudio patológico de una edificación costera, y conociendo que la palabra Patología, proviene del griego “pathos “, que significa enfermedad, dolencia y estudio, el

Ingeniero Civil debe proceder de forma profesional considerando al edificio en cuestión como un paciente, al que hay que atenderle sus dolencias.

De esta forma, la Arquitectura y la Ingeniería han desarrollado conceptos tales como: Patología constructiva, que se entiende como el estudio de los problemas constructivos que aparecen en el edificio después de su construcción, y Patología Arquitectónica, que son los errores provocados en el desarrollo del proyecto, mutilaciones, defectos de ejecución provocados por incidentes o acciones edificatorias posteriores.

Lo cierto es que para dar solución a problemas constructivos se necesita un estudio del proceso patológico y un diagnóstico integral que identifique origen, causas, síntomas, evolución y estado actual de la construcción que se analiza. A su vez, los estudios de los procesos patológicos permiten establecer las medidas preventivas y de restauración a acometer.

En el proceso patológico interviene tres partes fundamentales que determinan el origen, la evolución y el resultado final, de ese modo el diagnóstico debe tomarse de manera inversa, al igual que lo realizan los investigadores. Lo que determina y nos dice el tipo de daño, las causas que lo originan y el futuro comportamiento se denomina diagnóstico. Tiene como objetivo determinar, el alcance y gravedad de los deterioros.

El diagnóstico, proviene de la palabra griega "diagnósticos" (reconocer, tener conocimiento de la enfermedad), por lo tanto, el diagnóstico, es evaluar si hay o no patología, la causa que lo origina y la incidencia de la misma el edificio, y existen varios tipos de diagnóstico de acuerdo a la profundidad y exactitud:

-Diagnóstico visual o directo: Se vale de la percepción directa del investigador.

-Diagnóstico intensivo: En él se emplea todos los ensayos e instrumentos, para la recepción de información que permite profundizar en las patologías.

-Diagnóstico combinado: Combina la tecnología de reconocimiento con los métodos visuales o sensoriales.

En síntesis, el estudio patológico permite obtener información para llegar a conclusiones acerca del nivel de deterioro que presenta la edificación objeto de estudio, posteriormente llegar a un acertado diagnóstico y finalmente proponer acciones y un programa de intervención adecuado que erradique todas las lesiones encontradas.

Los aspectos fundamentales que abarcan estos trabajos se muestran en la Tabla 4

Componentes estructurales	Elementos	Materiales
Cimentación	-Viga de cimentación corrida	-Hormigón armado
Estructura vertical	-Muros -Columnas	-Bloques -Hormigón armado
Estructura horizontal	-Losa -Vigas -Pisos	-Hormigón armado -Hormigón armado -Mármol y granito
Terminación	-Impermeable -Carpintería -Instalaciones eléctricas -Instalaciones sanitarias	-Rasilla -Madera -Metálicas -Barro y cobre

	-Pinturas -Enchapes	-Esmalte y vinilos -Azulejo y mármol
--	----------------------------	---

Tabla 4: Elementos para los estudios patológicos y de diagnóstico.

Es muy importante el concepto de lesión, que se define como cada una de las manifestaciones observables de un problema constructivo. Será, pues el síntoma o efecto final del proceso patológico en cuestión. (Álvarez, Odalys, 2005)

Las lesiones se clasifican según el grado de importancia en leves, medias, graves y muy graves.

Leve: Cuando no tiene peligrosidad, sólo una rotura que afea. Ejemplo: pérdida de pintura, de revestimiento, fisura de poco espesor, etc.

Media: Se debe reparar, porque en un período de tiempo puede agravarse. Ejemplo: presencia de corrosión; con o sin eflorescencia de humedades en elementos de hormigón o muros de albañilería, grieta en muros a causa de la expansión o asentamientos, etc.

Grave: Estas lesiones se tienen que reparar con urgencia, en un período de tiempo largo o corto puede fallar el elemento o la estructura. Ejemplo: lesiones por tracción, por flexión, por torsión, por corrosión con pérdida de sección igual o mayor al 10% sin deformación apreciable del elemento, etc.

Muy grave: La estructura o elemento puede fallar totalmente en un instante o en corto período de tiempo. Ejemplo: desplazamientos horizontales activos, pandeos de estructuras de hormigón, asentamientos activos, pérdidas por corrosión mayores al 10% con deformaciones apreciables, etc.

En general se distinguen dos grandes grupos de lesiones: las primarias y las secundarias, ya que hay muchas ocasiones en que una lesión es, a su vez, origen de otra y, normalmente, las lesiones no suelen aparecer solas sino confundidas entre sí, por lo que conviene distinguir las que aparecieron primero y las que son consecuencia de las anteriores.

Las lesiones pueden ser provocadas por fenómenos físicos, químicos y mecánicos, tal y como se aprecia en la siguiente Tabla 5.

Tipo	Tipo de lesión	Primaria	Secundaria
Físicas	A) Humedades.		
	A.1. De obra.	*	
	A.2. Capilar.	*	
	A.3. De filtración.	*	*
	A.4. De condensación.	*	
	A.5. Accidental.		*
	B) Erosión.		
	B.1. Atmosférica.	*	*
	C) Suciedad.	*	
	Mecánicas	D) Deformaciones.	
D.1. Pandeos.		*	*
D.2. Alabeos.		*	*
D.3. Desplomes.		*	*
D.4. Flechas.		*	
E) Grietas.			
E.1. Por carga.		*	*
E.2. Por dilatación – contracción.		*	*
F) Fisuras.			
F.1. Por soporte.		*	*
F.2. Por acabado.		*	*

	G) Desprendimientos.	*	*
	B) Erosión.		
	B.2. Mecánica.	*	
Químicas	H) Eflorescencias.	*	*
	I) Oxidación y corrosión.		
	I.1. Oxidación.	*	
	I.2. Corrosión.		
	I.2.1. Por inmersión.		*
	I.2.2. Por aireación diferencial.	*	*
	I.2.3. Por par galvánico.	*	
	I.2.4. Intergranular.	*	
	Organismos		
	J.1. Animales.	*	
J.2. Vegetales.		*	
	B) Erosión.		
	B.3. Química.		*

Tabla 5. Cuadro general de lesiones

Algunos ejemplos de lesiones, de diferentes tipos, se muestran seguidamente:



Fig.10. Ejemplo de Humedad



Fig.11. Ejemplo de erosión



Fig.12. Ejemplo de Grieta vertical



Fig.12. Ejemplo de fisura



Fig.13. Ejemplo de Desprendimiento

La información analizada permite la confección de fichas técnicas donde se recogen los datos como: detección de las lesiones en función del tipo de material constituyente y del tipo de elemento, si presenta o no dicha lesión y descripción. Para facilitar la recogida de datos se utiliza la siguiente tabla 6 sobre las lesiones que se pueden presentar en función del tipo de material.

Lesión según materiales	Lesión detectada		Descripción
	Si	No	
a) Materiales pétreos			
Desmoronamiento del material pétreo o del mortero de las			

juntas.			
Erosión o socavación.			
Grietas y/o fisuras			
Desplomes.			
Asientos			
Manchas de humedad			
Eflorescencias			
b) Madera			
Pudrición.			
Perforación por insectos			
Quemaduras			
Flechas o pandeos			
Grietas y/o fisuras			
Empalmes o ensambles			

deficientes.			
Manchas de humedad			
c) Materiales metálicos			
Corrosión u oxidación del elemento			
Flechas o pandeos			
Juntas deficientes por remaches, pernos, tornillos o pasadores flojos y soldaduras desprendidas.			
Grietas y/o fisuras			
Desgaste de la superficie			
d) Hormigón			
Grietas y/o fisuras			
Desprendimiento del recubrimiento de las barras de			

acero de refuerzo.			
Corrosión u oxidación de las barras de acero de refuerzo			
Carbonatación del hormigón			
Manchas de humedad			
Eflorescencias			

Tabla 6. Lesiones en función del tipo de material.

1.5 Acciones y programas de intervención para contrarrestar la agresividad corrosiva costera

Los procesos patológicos y sus causas, nos permiten establecer las medidas preventivas para nuevos procesos y acciones constructivas como son:

Conservación: Todas las acciones o trabajos que se realizan para obtener seguridad, durabilidad, y mantener las características estéticas de la construcción. (Herrera 2012)

Rehabilitación: Acción dirigida a devolver a un edificio su uso original u otro uso.

Reconstrucción: Trabajo que se realiza para construir de nuevo un elemento que se encuentra en estado crítico y que imposibilite el uso de la construcción de forma parcial o total. (Delgado 2014)

Renovación: Trabajo que se realiza en las construcciones haciendo variaciones en el diseño.

Restauración: Trabajo que se realiza en las construcciones para restablecer sus características originales.

Reparación: Trabajo que se realiza en las construcciones para arreglar partes o elementos que la componen durante su explotación.

Mantenimiento: Trabajo que se realiza periódicamente en las construcciones de carácter preventivo y planificado, durante su explotación. (Reyes, 2013)

Demolición: Es el trabajo de deshacer una construcción o parte de ella, con la consiguiente desaparición de la misma. Puede ser parcial o total

Al construir una estructura de hormigón que por lo general cuenta con una protección secundaria más o menos efectivas (digamos por ejemplo como una simple pintura superficial de base vinílica o acrílica) por lo general las que no son especialistas y en especial los usuarios de la obra, piensan que han cesado las inversiones sobre esta, sin embargo aun siendo una estructura con una excelente protección primaria (con o sin protección secundaria) después de ejecutada, la estructura requerirá de acciones de mantenimiento para asegurar un adecuado desempeño de sus funciones durante su vida útil.

Si el hormigón de la estructura es de buena calidad, alta densidad y alta resistividad eléctrica, será menos susceptible a la penetración de los agentes agresivos, lo que dificulta cualquier tipo de ataque químico y físico y por supuesto la corrosión del acero de refuerzo. No obstante, el sistema continuo de poros que caracteriza el hormigón y su tendencia a la formación de fisuras superficiales, hacen que la protección primaria deje de ser una barrera perfecta, por esta razón para garantizar el efecto barrera, muchas veces son utilizados revestimientos o protecciones especiales sobre la superficie del hormigón y también sobre las propias armaduras de acero. En esta ocasión nos referiremos a la protección secundaria del hormigón, es decir como los sistemas de protección superficial.

Por lo general es necesaria una elevada inversión financiera para la reparación y la rehabilitación de las estructuras deterioradas de hormigón armado, de manera que el costo

llega a ser superior al de la estructura nueva por este motivo hay que tener presente que existen varias medidas preventivas que se pueden adoptar para evitar el deterioro prematuro de las estructuras de hormigón armado, siendo el tratamiento superficial del hormigón una de las posibilidades.

Los materiales de protección superficial para el hormigón son muy variados, es muy difícil agruparlos en una clasificación, pero en general se pueden agrupar en:

- Revestimientos impermeabilizantes con formación de película.
- Revestimientos hidrófugos o hidrofugantes de poro abierto.
- Revestimientos cristalizantes de superficie.
- Enchapes de cerámicas recubrimientos de láminas plásticas simples o reforzadas.
- Morteros de elevada resistencia química: azufre, silicatos alcalinos, poliméricos (epóxidos, furánicos, poliéster).

Todos estos materiales proporcionan la colmatación de los poros de la superficie del hormigón, creando una barrera ante el paso de los agentes agresivos, o sea, limitando o anulando los mecanismos de transporte hacia el interior del hormigón.

La propuesta de intervención tiene como objetivo: Intervenir y erradicar los daños de los diferentes elementos que componen la edificación para alargar la vida útil por lo que se propone una serie de acciones a efectuar en cada elemento dañado, las cuales han de realizarse en su respectivo orden, en caso de dudas se encuentra toda su explicación en cada ficha técnica.

Un ejemplo de ello se muestra en un estudio reciente desarrollado en el Complejo Comercial La Sirenita, del cual se presenta una de sus Fichas, que incluye todos los aspectos aquí explicados.

Ejemplo de una propuesta de intervención, aplicado en la Sirenita, ficha técnica

Ficha técnica FT 3.1	
Identificación del daño: PÉRDIDA DEL RECUBRIMIENTO EN LOSAS DE HORMIGON ARMADO.	
Elemento afectado: Losa de hormigón armado	
	<p>Descripción del elemento: Entresuelo o techo formado por losa plana de hormigón armado, que soportan las cargas de su peso propio, las del relleno, pavimento y las de uso del edificio. Son elementos estructurales por lo que en su intervención debe contarse con la supervisión de un especialista estructural.</p> <p>Descripción del daño o lesión: Se aprecian grietas, fisuras y pérdida del recubrimiento del acero por lo que el mismo queda expuesto.</p> <p>Posibles causas:</p> <ul style="list-style-type: none">- Materiales contaminados.- Humedades.- Siniestros.- Errores de ejecución.

	<ul style="list-style-type: none">- Errores de diseño - Golpes o vibraciones - Falta de mantenimiento. <p>Procedimiento de reparación: Cuando se presenta este tipo de daño, corresponde a un estructural valorar las causas y magnitud del mismo, para indicar acciones de reparación, reforzamiento, o demolición, en dependencia del grado de afectación que presente el elemento. Se debe chequear, una vez determinada y erradicada la causa de este deterioro, el grado de afectación del acero. Si se comprueba que el acero ha sufrido una pérdida menor del 20% de su sección, se procederá a reparar la estructura. El recubrimiento impide el ingreso de la humedad por el contacto directo del acero con la intemperie, por lo tanto, la actuación estará encaminada a restituir esta protección. Para ello, se debe retirar todo el recubrimiento abofado o agrietado dando golpes secos con una maceta pequeña sobre toda el área de la losa. Cuando una parte tenga apariencia buena, pero al golpearla suene fofa, será necesario tumbarla pues la masa esta suelta y puede caer en cualquier momento. Seguidamente se realizará una limpieza minuciosa con cepillo de alambre en todo el acero, se ha de tener cuidado de eliminar cualquier</p>
--	--

	<p>vestigio de material suelto, suciedades, escamas de óxido, que puedan ocasionar un nuevo problema e impidan lograr una adecuada adherencia entre el hormigón y el mortero nuevo. Una vez limpio el acero, se aplicará un producto pasivador de la corrosión, o una lechada de cemento a las barras. Restituir la sección original de la losa con el empleo de morteros estructurales de cemento y arena lavada con dosificación 1:3 o 1:2. También pueden emplearse morteros pre-dosificados disponibles en el mercado siguiendo las indicaciones del suministrador o fabricante, al cual se debe añadir un producto facilitador de la adherencia o resina. El mortero se debe aplicar en capas sucesivas compactas cuyo espesor está en función del producto empleado, aunque se recomiendan capas de 1cm de espesor, hasta rellenar la cavidad al nivel del sofito de la losa. Por último, proceder a enrasar y dar terminación al elemento. Curar por un período, en función del producto empleado (al menos durante una semana), mediante humedecimiento o aplicando alguna barrera de retención, que impida la evaporación del agua del mortero. Si la losa presenta una afectación severa, con pérdida de la sección del acero de refuerzo en más de un 20%, se ejecutará un apuntalamiento para evitar el colapso o fallo del elemento. Un estructural determinará el procedimiento a seguir que podrá ser demolición o reforzamiento. Consultar ficha de deformación y grietas de losas de hormigón armado.</p>
--	--

Conclusiones

La zona costera representa la franja marítimo-terrestre, que se compone por componentes bióticos y abióticos que se relacionan entre sí y coexisten con las comunidades humanas, debido a las riquezas que contiene es por ello que, más que un sistema natural, son un bien social y económico.

La agresividad corrosiva de la atmósfera en zonas costeras, juega un papel de gran importancia a la hora de conservar y construir edificaciones en zonas costeras debido a la influencia que tiene y que aumentará en un futuro con el aumento del nivel del mar y fenómenos meteorológicos, por lo que se hace necesario tomar medidas para contrarrestar estos efectos.

Para conocer el impacto del ambiente agresivo costero, tres son las variantes que permiten evaluar la agresividad corrosiva para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción. Dos variantes permiten la estimación de la agresividad y la otra lo que permite es su determinación.

La agresividad corrosiva tiene diversos efectos los cuales son identificados mediante un estudio patológico estos son erradicados mediante acciones y programas de intervención en el que se aplica diversos materiales de protección superficial en el hormigón como son los revestimientos e impermeabilizantes Todos estos materiales proporcionan la colmatación de los poros de la superficie del hormigón, creando una barrera ante el paso de los agentes agresivos, o sea, limitando o anulando los mecanismos de transporte hacia el interior del hormigón evitando así la corrosión .

Referencias bibliográficas.

ALVAREZ RODRÍGUEZ, O. (2005). *Metodología para realizar el estudio de diagnóstico para la rehabilitación estructural de forjados planos de madera en edificaciones ubicados en el Centro Histórico de La Habana.*

Consejo de Estado, 2000. *Decreto-Ley 212.* Gestión de las zonas costeras cubanas

DELGADO, A.A. (2014): *Evaluación, Diagnóstico estructural y propuesta de intervención edificio de vivienda Prado y Santa Elena. Oficina del Historiador de La Habana, Cuba*

HERRERA FUENTE, M. A. (2012). *Estrategia para la rehabilitación sustentable de edificios públicos con valor patrimonial dentro de un contexto urbano comprometido. Caso de estudio ``Ten Cents. Cienfuegos. ``. Tesis de Diploma, Universidad Central, Las Villas, Cuba.*

HOWLAND, JUAN JOSÉ. (2017). *El ambiente agresivo costero de la Habana y su impacto sobre las estructuras de hormigón armado. Editorial Científico-Técnica.*

OROVIO, M. Q., HERNÁNDEZ, M. D. C. M., GARCIANDÍA, C. L. G. & ZARABOZO., O. D. (2008). *Ordenamiento Ambiental en Zona Turística Costera en Cuba. Medio ambiente y Desarrollo. 15 ed. Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente.*

REYES BRINGAS, N. (2013). *Estudio patológico y conservación estructural del Palacio Goitizolo.*

TURNBULL, M., STERRETT, C. L. & HILLEBOE, A. (2013). *Hacia la Resiliencia. Una Guía para la Reducción del Riesgo de Desastres y Adaptación al Cambio Climático, United States Conference of Catholic Bishops.*