

ANÁLISIS DE AFECTACIONES POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN CRUCITA, PORTOVIEJO, MANABÍ ECUADOR

ANALYSIS OF ATMOSPHERIC CORROSION AFFECTATIONS ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN CRUCITA, PORTOVIEJO, MANABÍ, ECUADOR

Diego Andrés Rincón Zambrano ^{a*}(0009-0005-8245-6144)
Juan Carlos Guerra Mera ^b(0000-0001-6597-0022)
Abel Castañeda Valdés ^c(0000-0001-2531-9224)

^a Maestrando en Ingeniería civil Mención Estructuras. Universidad Técnica de Manabí (UTM), Ecuador.

^b Universidad Técnica de Manabí (UTM), Ecuador.

^c Centro Nacional de Investigaciones Científicas. La Habana, Cuba.

*juan.guerra@utm.edu.ec

Recibido: 15 de enero de 2025;

Aceptado: 30 de enero de 2025;

RESUMEN

Un estudio sobre el análisis de afectaciones por corrosión atmosférica fue realizado en 10 estructuras de hormigón armado emplazadas a diferentes distancias desde línea costera en Crucita, Manabí Ecuador. El objetivo general se basó en definir el tipo de vida útil de las estructuras. Resistencia a la Compresión (R_c -MPa) obtenida a partir de la Esclerometría, Resistividad Eléctrica Aparente (ρ -k Ω /cm) e Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - μ A/cm²) fueron medidos en una columna en cada una de las estructuras. Los resultados permitieron demostrar, que las 10 estructuras de hormigón armado se encontraban en su vida útil residual sin funcionamiento, confirmado con su observación visual. A partir del comportamiento de los valores de R_c , ρ e I_c se pudo confirmar que el hormigón usado, no presentó la calidad necesaria y suficiente para que las estructuras hubiesen mantenido en el tiempo sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto como son estética, funcionalidad y seguridad en la zona costera de elevado potencial constructivo. De acuerdo con el ajuste de modelos estadísticos basados en regresiones lineales múltiples, se continuó demostrando, que la R_c y la Concentración de iones Cloruro Totales (CCl_t^-), donde se incluye su mecanismo de penetración desde la superficie hacia el interior del hormigón, constituyeron factores necesarios y muy influyentes en el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón. Se demostró, como una primera experiencia en el Ecuador y no muy tenida en cuenta a nivel mundial, calcular siempre que sea posible, el coeficiente $k_{CCl_{tot}^-}$, como un indicador más en la evaluación de la calidad del hormigón, el cual representa, además de la velocidad con la cual la CCl_t^- pudieran penetrar en el hormigón, la relación entre la calidad del hormigón con el medio natural de exposición, la atmósfera. El comportamiento de los valores de I_c en función del incremento de la distancia desde la línea costera, permitió el ajuste de modelos basados en una función exponencial decreciente. Ambos modelos ajustados, pueden ser considerados como de predicción de la vida útil de las estructuras que pudieran estar emplazadas a distancias mayores desde la línea costera.

Palabras claves: corrosión atmosférica, estructuras, hormigón armado, vida útil, línea costera.

ABSTRACT

A study on atmospheric corrosion affectations analysis in 10 reinforced concrete structures located at different distances from the coastline in Crucita, Manabí, Ecuador was carried out. To define the type of service life of the structures was the main objective. Compressive Strength (R_c -MPa) obtained from Sclerometry, Apparent Electrical Resistivity (ρ -k Ω /cm) and Corrosion Current Intensity (I_c - μ A/cm²) were measured in a column in each of the structures. The results showed that the 10 reinforced concrete structures were found in its residual service life without functioning, confirmed by visual observation. From the behavior of R_c , ρ and I_c values it was possible to confirm that the concrete used did not present the necessary and sufficient quality for the structures to have maintained over time its initial service life conditions of the project, such as aesthetics, functionality and safety in the coastal zone with high construction potential. According to the fit of statistical models based on multiple linear regressions, it was further demonstrated that R_c and Total Chloride Ion Concentration (CCl_t^-), including its penetration mechanism from the surface to the concrete interior, were necessary and very influential factors in the adequate durability performance of concrete. It was demonstrated, as a first experience in Ecuador and not much taken into account worldwide, to calculate whenever possible, the coefficient $k_{CCl_{tot}^-}$, as another indicator in the evaluation of the quality of concrete, which represents, in addition to the speed with which the CCl_t^- could penetrate in the concrete, the relationship between the concrete quality with the natural environment of exposure, the atmosphere. The behavior of I_c values as a function of distance from the coastline increasing allowed the fitting of models based on a decreasing exponential function. Both fitted models can be considered as predictions of the service life of structures that may be located at higher distances from the coastline.

Keywords: atmospheric corrosion, structures, reinforced concrete, service life, coastline.

INTRODUCCIÓN

Los estudios relacionados con el análisis de las afectaciones producidas generalmente por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado a pie de obra o *in situ*, en estructuras deterioradas intensamente de forma muy anticipada en el tiempo, constituyen una herramienta muy útil y valiosa en la ingeniería civil (Helene, et al, 1996). Los resultados obtenidos permitirán conocer, en qué tipo de vida útil pudieran encontrarse las estructuras estudiadas en dependencia de su nivel de deterioro. La vida útil y los factores influyentes pudieran ser pronosticados en función del tiempo y las distancias desde el mar o línea costera. Se trata de conocimientos de gran importancia y de mucha utilidad muy carentes en la actualidad, principalmente en las especialidades de durabilidad de materiales de construcción y vida útil de las construcciones. De esta forma, se planificarían los esquemas de trabajos de mantenimiento, o desgraciadamente los muy costosos de reparación. Siempre con el propósito de devolverle a las estructuras y a las obras en su conjunto sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto como son estética, funcionalidad y seguridad (Castañeda, et al, 2012). El uso de ensayos destructivos restringe la ejecución de los trabajos de investigación a pie de obra en las estructuras. De ahí, la necesidad de usar estos ensayos de manera limitada, de conjunto con los ensayos no destructivos. Los resultados obtenidos aportarán una información valiosa para el futuro de las estructuras (Lorenzi, et al, 2012; Silveira y Azevedo, 2022). El uso de sensores introducidos en el hormigón armado que poseen los ensayos disponibles, los cuales a través de los resultados permiten monitorear las afectaciones por corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo en las estructuras, viene siendo una opción muy usada en la actualidad (Llorens, et al, 2012). Esto está permitiendo la obtención de informaciones relevantes sobre los factores influyentes en el proceso corrosivo. De esta manera, se puede predecir la vida útil de proyecto de las estructuras para optimizar las estrategias de reparación. Sin embargo, el uso de estos sensores pudiera verse un poco limitada por su costo muy elevado de conjunto con otros accesorios necesarios para su instalación en las estructuras.

El documento establecido para la estimación de la vida útil de proyecto de los elementos estructurales de las estructuras para la elaboración de programas de mantenimiento o reparación, ha sido la norma europea ISO 15686 (ISO-15686:2011). Esta norma, propone una metodología basada en los factores influyente en la durabilidad del hormigón armado. Sin embargo, la metodología es planteada de forma muy generalizada y de difícil aplicación; por lo que resulta importante que cada país origine sus propios resultados de investigación sobre la estimación de la vida útil de proyecto y que sean aplicados en la menor brevedad posible (Ortega, et al, 2015). Recientemente fue demostrado en Cuba, como a partir de la suma de los tiempos de iniciación y de propagación de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo con agrietamiento inducido en el hormigón, fue posible estimar y pronosticar de manera segura en el tiempo la vida útil de las estructuras confirmado con la observación visual del hormigón armado. Factores influyentes en la vida útil de las estructuras dependientes de la calidad del hormigón fueron valorados antes de proceder con las labores de construcción en zonas costeras de elevado potencial constructivo, ante categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera extrema (CX) y mayor que extrema (>CX) evaluadas en la zona de estudio (Castañeda, et al, 2024).

En múltiples ocasiones, los resultados alcanzados en estos tipos de estudios integrales donde se incluyen los de corrosión atmosférica en los materiales más usados en la industria de la construcción, ejecutados por colectivos de profesores, investigadores y especialistas procedentes de las universidades y centros de investigación de elevados prestigios nacional e internacional, solo quedan en la parte lectiva y académica. Se reitera que no son introducidos en la práctica como una contribución al aporte social. El deterioro anticipado en las

estructuras de hormigón armado debido a las afectaciones por corrosión atmosférica en el acero de refuerzo, persiste (Marrero, et al, 2020). El aporte social de los resultados que deben ser introducidos en la práctica está directamente relacionado con el cumplimiento de dos objetivos muy estratégicos en la rama de la construcción ya sea en Ecuador o a nivel mundial (Fernández, et al, 2005). Racionalizar el uso de los recursos disponibles para la construcción de las estructuras, la conservación y renovación de las infraestructuras existentes. Satisfacer las necesidades y expectativas de los inversionistas y usuarios en cuanto a la calidad y durabilidad de los materiales de construcción teniendo en cuenta sus sistemas primarios y secundarios de protección a base de recubrimientos y así la vida útil adecuada de las estructuras de hormigón armado.

Por otra parte, la carencia de trabajos de mantenimientos y no solo en las estructuras de hormigón armado, la selección inadecuada de los sistemas primarios y secundarios de protección a base de recubrimientos, así como la elaboración de hormigones sin tener en cuenta la evaluación en cuanto a su calidad como un indicador en el desempeño adecuado por durabilidad, que permita garantizar plazos elevados de vida útil de proyecto en las estructuras de hormigón armado es una tendencia actual en el Ecuador y a nivel mundial (Branco y Paulo, 2012). Más, en zonas costeras identificadas como de elevado potencial constructivo donde predominan categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera. Precisamente, otra tendencia actual se basa en no tener una conciencia de, además del desempeño adecuado por durabilidad del hormigón armado, la herramienta útil en la ingeniería civil basada en la evaluación de la agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera que pudiera existir en la zona costera donde se procederá con las labores de construcción y los trabajos de mantenimiento o reparación (Guerra et al, 2019 y 2023a).

De acuerdo con otros estudios ejecutados en países de Latinoamérica, los resultados obtenidos han demostrado que el fin de la vida útil de proyecto se corresponde con la aparición de las primeras manchas de óxidos de hierro (productos de corrosión) en las superficies de los elementos estructurales de hormigón armado (Hernández y Mendoza, 2006; Carvajal, et al, 2011; Hernández et al, 2023). Es ahí o antes, cuando precisamente deben iniciarse los estudios de afectaciones por corrosión atmosférica y de forma inmediata los trabajos de mantenimiento sin la necesidad de llegar a los trabajos costosos de reparación. Estos estudios no deben ser ejecutados cuando las estructuras se encuentran en sus vidas útiles última y residual, como casi siempre sucede, para decidir entre las labores de ejecución de los trabajos costosos de reparación o las labores de demolición que para nada esta última conducen a un resultado en la ingeniería civil. Las estructuras sin funcionamiento alguno debido a su deterioro intenso de manera muy anticipada en el tiempo, en vez de constituir un aporte social, se convierten en un problema ingenieril muy difícil de solucionar en Ecuador y a nivel mundial (Howland y Castañeda, 2017). El concepto de construcción sostenible en el tiempo se corresponde con el uso de un hormigón de altas prestaciones con un estricto control de la calidad durante su aplicación a pie de obra. No debe suceder que los cálculos de estimación de la vida útil de proyecto pasen rápidamente de los laboratorios a las normativas sin ser especificados en las estructuras (Andrade, 2013). Al tener en cuenta de forma integral la fase de diseño y el proyecto de cálculo estructural con la calidad exigida, el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón a usar en la construcción de las estructuras frente a un impacto elevado del ambiente agresivo costero de la atmósfera, con un monitoreo a tiempo de las afectaciones por corrosión atmosférica que se pudieran producir; una vida útil de proyecto de 120 años en las estructuras es garantizada (Shi, et al; 2012; Britez, et al 2015; Recept y Erbem, 2022).

Es válido resaltar una vez más el amplio perfil costero que ocupa la provincia de Manabí que abarca el 56,4% de todo el litoral del Océano Pacífico en el Ecuador, donde existen disímiles

estructuras de hormigón armado. Se trata de una zona costera, incluso industrial, muy estratégica para el país. En dicha zona y en todo el país, existe carencia en cuanto al conocimiento del tipo de vida útil que pudieran encontrarse un gran número de estructuras en dependencia de su nivel de deterioro por corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, principalmente las que fueron construidas a cortas distancias desde la línea costera (Guerra, et al, 2016). De esta manera, se pudiera correr el riesgo de elaborar esquemas y diseños de trabajo de mantenimiento o reparación, sin contar con resultados científicos que especifiquen las afectaciones producidas por la corrosión atmosférica en las estructuras. En otras palabras, sin tener en cuenta el tipo de vida útil de las estructuras y su pronóstico en el tiempo. No obstante, en años recientes ya se han venido ejecutando estudios en zonas costeras de elevado potencial constructivo en el cantón de Manta perteneciente también a la provincia de Manabí, basados en el análisis de afectaciones por corrosión atmosférica (Dueñas-Solórzano, 2019; Eudoro y Guerra, 2024; Pérez y Guerra, 2024). Los resultados han demostrado, que la mayoría de las estructuras se encuentran en su vida útil última o residual, dejando atrás de forma anticipada sus vidas útiles de proyecto y de servicio. Estudios relacionados que pudieron ser ejecutados en otras provincias del litoral costero del Ecuador no fueron encontrados. De ahí, la necesidad imperiosa de continuar con estos estudios en otras zonas costeras del país de elevado potencial constructivo.

Este estudio fue ejecutado en una zona costera de la parroquia de Crucita perteneciente al Cantón de Portoviejo también de la provincia de Manabí. Se trata de un sector de muy elevado potencial constructivo. El objetivo general se basó en, definir el tipo de vida útil en que se pudieran encontrar 10 estructuras de hormigón armado emplazadas a diferentes distancias desde la línea costera o zona del rompiente de las olas en el área de estudio seleccionada con afectaciones producidas por el fenómeno de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo. Los otros objetivos como específicos se basaron en, evaluar la calidad del hormigón armado usado en la construcción de las 10 estructuras. Demostrar los factores influyentes en las afectaciones producidas por corrosión atmosférica que condujeron al tipo de vida útil especificada en las estructuras seleccionadas. Pronosticar la vida útil de las estructuras en función del tiempo y la distancia desde la línea costera. Los resultados fueron confirmados con la observación visual de los elementos estructurales donde fueron realizados los ensayos de determinación en las 10 estructuras

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Selección de las 10 estructuras de hormigón armado en la zona de estudio.

La parroquia de Crucita es una población del Ecuador localizada en la costa oeste de la provincia de Manabí del cantón Portoviejo. Es un balneario turístico muy conocido con coordenadas de localización 0°52'06"S 80°32'20"O / -0.86833333333333, -80.538888888889. El estudio investigativo fue ejecutado en los meses comprendidos entre junio-octubre/2024. La observación visual, las distancias desde la línea costera y el año de construcción, fueron las herramientas ingenieriles que se tuvieron en cuenta para la selección de las 10 estructuras de hormigón armado construidas emplazadas en la zona costera de estudio (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación de las 10 estructuras emplazadas en la zona costera de estudio

No.	Estructuras	Distancias desde la línea costera (m)	Años de construcción
1	E1	5	15-18
2	E2	17	30-35
3	E3	79	15-20
4	E4	374	20-25
5	E5	431	15-20
6	E6	556	10-15
7	E7	1000	12-15
8	E8	1090	15-20
9	E9	1500	12-15
10	E10	3310	20-25

Ensayos no destructivos usados en los elementos estructurales en cada estructura

Resistividad Eléctrica Aparente

Para la determinación de la Resistividad Eléctrica Aparente (ρ - $k\Omega/cm$), se utilizó el equipo marca GIATEC SURF™ de fabricación canadiense (Rango de medición: 0.1-1000 $k\Omega/cm$, Rango de frecuencia: 13-100 Hz, Exactitud: $\pm (0,1+1\%)$). Dispositivo para la medición rápida, fácil y precisa de la ρ en el hormigón basado a partir del método de las cuatro puntas en condiciones de laboratorio o a pie de obra. La técnica se basa en enviar una corriente directa desde los electrodos externos y medir la diferencia de potencial entre los internos (Troconis, et al, 1997). De esta forma, el equipo calcula la Resistencia Eléctrica (Re - $k\Omega$) para la determinación de la ρ en $k\Omega/cm$:

$$\rho = 2\pi a R_e \quad (1)$$

El valor de a (cm), es la distancia entre los electrodos y representa la profundidad a la cual puede ser medida la ρ , es decir, una medida del espesor de recubrimiento de hormigón en las estructuras (Troconis, et al, 1997). En este caso $a = 40$ mm (< 50 mm como bien se indica en la normativa).

Espesores menores que 40 mm son muy comunes en los elementos constructivos en cualquier estructura. Las esponjas colocadas en las puntas de los cuatro electrodos en el equipo fueron humedecidas previas a las mediciones. Primeramente, fue necesario el uso del pacómetro, marca ELCOMETER P100 Imp de fabricación inglesa, para estar seguro de la no presencia de aceros de refuerzo en cada columna seleccionada en las 10 estructuras. De esta forma, se evita falsear el resultado obtenido. Seguidamente, en la zona donde se detectaron aceros de refuerzo, se trazó una línea azul con un lápiz cristalográfico para la no ejecución de las mediciones de ρ (Troconis, et al, 1997). Se obtuvieron 36 valores, donde dos datos de 18 fueron graficados para cada columna seleccionada expuesta directamente al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera a una altura alrededor de 2 m en cada estructura. De esta manera, una data total de $n = 360$ valores de ρ fue obtenida. Los 36 valores determinados en cada columna fueron clasificados de acuerdo con los rangos exigidos en el Comité Técnico de RILEM, que establecen el riesgo por corrosión atmosférica en los elementos estructurales de hormigón armado en las estructuras (Andrade et al, 2004). Los valores promedios determinados de cada data ($n=18$) fueron graficados en función del incremento de la distancia desde la línea costera.

Resistencia a la compresión estimada a partir de la Esclerometría

Para la estimación de la Resistencia a la Compresión (R_c -MPa) en las columnas a partir de la Esclerometría; un Esclerómetro digital, marca Silver Schmidt PC tipo N de Suiza fue utilizado (Troconis, et al, 1997). Aquí también, 36 valores fueron obtenidos en la misma columna seleccionada con dos datos de $n=18$ graficados, para una data total de $n = 360$. Debido a que las 36 mediciones en cada columna fueron ejecutadas a tiempos diferentes, fue necesaria la previa calibración del equipo, empleando un yunque tarado de 16 kg. Al igual que en la ρ , fue necesario el uso del pacómetro para realizar las mediciones en las superficies de hormigón sin la presencia de los aceros de refuerzo. Se tuvo en cuenta, además, la no existencia de recubrimientos (pinturas), piedras abrasivas, fisuras, grietas, humedades e incrustaciones. Posteriormente, fue seleccionada entonces una cuadrícula de área 100 cm^2 en cada columna. Las mediciones en la cuadrícula fueron ejecutadas a una distancia de alrededor de 25 mm entre los puntos de medición. Las cuadrículas fueron seleccionadas muy próximas a la zona donde fueron ejecutadas las mediciones de ρ . Para la obtención de los 36 valores de R_c , fue necesario hacer uso del gráfico que correlaciona los valores de Esclerometría con la R_c (en MPa). El gráfico fue proporcionado por los fabricantes en el propio equipo como suele suceder. Las mediciones fueron realizadas en las columnas, colocando el equipo de manera horizontal. De esta manera, el ángulo de inclinación para la obtención de los valores de R_c en el gráfico fue de 0° . Aquí también, los valores promedios determinados de cada data ($n=18$) fueron graficados en función del incremento de la distancia desde la línea costera.

Intensidad de corriente de corrosión

El cálculo de los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), fue realizado a partir de los 36 valores de Resistividad Eléctrica Aparente (en ρ - Ω/cm) obtenidos para cada columna, graficados también en dos data de $n=18$. Para esto, fue usado el criterio establecido por el Comité Técnico de RILEM (Andrade et al, 2004):

$$I_c = \frac{3 \times 10^4}{\rho} \quad (2)$$

Los valores promedios para cada data de $n=18$ fueron graficados. Al igual que en los dos parámetros anteriores, los valores promedios determinados de cada data ($n=18$) fueron graficados en función del incremento de la distancia desde la línea costera. Intervalos de clasificación de I_c establecidos en dicho comité permitió definir en función del nivel de afectación por corrosión atmosférica en los elementos estructurales (Tabla 2), así como una medida de la pérdida de espesor en los aceros de refuerzo (V_c -mm/años), el tipo de vida útil que presentaron las 10 estructuras seleccionadas.

Tabla 2. Intervalos de clasificación de I_c y la pérdida de espesor en los aceros de refuerzo

Intensidad de corriente de corrosión (I_c - $\mu A/cm^2$)	Pérdida de espesor (V_c -mm/años)	Nivel de Corrosión Atmosférica
$\leq 0,1$	$\leq 0,001$	Insignificante
0,1-0,5	0,001-0,005	Bajo
0,5-1	0,005-0,010	Moderado
>1	$> 0,010$	Elevado

Ensayo destructivo usado en una de las estructuras seleccionadas

Determinación de la concentración de iones cloruro totales a diferentes profundidades.

Debido a que se trata de un ensayo destructivo, valores de concentración de iones cloruro totales (Cl^-) desde la superficie (0 cm) hasta 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 y 2,5 cm de profundidad de penetración, fueron obtenidos solamente en la columna de la estructura E3 localidad a una distancia de 79 m desde la línea costera (Tabla 1).

Primeramente, fue necesario extraer un testigo cilíndrico en una sola columna a una altura inferior a dos metros, con un chorreado de agua a baja presión para la lubricación. Una máquina de extracción marca VEVOR, perforadora de hormigón de fabricación China, con una broca de acero con un recubrimiento de diamante (Figura 1 a) fue usada. El testigo cilíndrico extraído también en la zona de la columna donde no hubo aceros de refuerzo y donde mismo fueron ejecutadas las mediciones de $\rho y R_c$ a partir de la Esclerometría (Figura 1 a), tuvo una dimensión de 20 cm de largo por 6,5 cm de diámetro (Figura 1 b).

Tres muestras de polvo de 10 g fueron extraídas del testigo desde la superficie expuesta al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera hasta cada profundidad de penetración o espesor de recubrimiento de hormigón (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 y 2,5 cm). Un taladro eléctrico de pedestal, marca S.A Terragona, modelo URGEL 143 de fabricación española con una barrena de tungsteno de 6 mm de diámetro fueron usados para la extracción de las muestras de polvo para cada profundidad (Figura 1 b).



Fig. 1. Máquina usada en la extracción del testigo cilíndrico en la columna a). Extracción de las muestras de polvo en el taladro a diferentes profundidades.

De esta forma, se cumplió con la condición necesaria y suficiente a la hora de extraer las muestras de polvo para estos estudios. Esta condición se basa en que, el diámetro de la barrena sea inferior al tamaño nominal del árido grueso como bien se observa para extraer una mayor cantidad de polvo de la pasta de hormigón endurecida (Figura 1 b). La extracción fue ejecutada siempre en la parte central del testigo. Para el caso de la superficie (0 cm) una cuchilla bien afilada de laboratorio fue usada. Las

muestras de polvo fueron almacenadas en bolsitas de nylon debidamente selladas e identificadas. Antes de ejecutar la penetración en cada profundidad, siempre fue realizada una limpieza de la barra con un cepillo dental, con el fin de evitar la obtención de valores cruzados y obtener una mayor confiabilidad de los resultados obtenidos en cuanto a las determinaciones.

Las determinaciones de los tres valores de CCl_t^- fueron realizadas según las especificaciones establecidas en la normativa, haciendo uso del método químico-analítico de valoración volumétrica, donde el reactivo valorante fue el $AgNO_3$ (ASTM C-1218/M: 2008). Con el propósito de conocer el comportamiento de la CCl_t^- , los tres valores determinados fueron graficados desde la superficie hasta cada profundidad de penetración o espesor de recubrimiento de hormigón. De esta forma, tres comportamientos en cuanto a la penetración de la CCl_t^- fueron obtenidos.

Cálculo del coeficiente $k_{CCl_{tot}^-}$

Las determinaciones de los valores de CCl_t^- permitieron en cálculo del coeficiente $k_{CCl_{tot}^-}$ según la expresión (3) dependiente de la calidad del hormigón, así como del medio natural de exposición en por ciento en masa de hormigón (% mh/a^{0.5}). Representa, además, la velocidad de penetración de iones cloruro hacia el interior del hormigón calculado:

$$CCl_{tot}^- = k_{CCl_{tot}^-} \sqrt{t} \quad (3)$$

De acuerdo con la expresión (1), los valores del coeficiente $k_{CCl_{tot}^-}$ fueron calculados a partir del promedio de la suma total de la CCl_{tot}^- en toda la masa del hormigón para los tres comportamientos, desde la superficie hasta las diferentes profundidades de penetración (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 y 2,5 cm). De esta manera, tres valores del coeficiente $k_{CCl_{tot}^-}$ más su valor promedio total, fueron calculados para un tiempo de construcción $t = 20$ años de la estructura E3 emplazada a 79 m desde la línea costera (Tabla 1).

Análisis estadístico

Para la ejecución del análisis estadístico comparativo y la elaboración de los gráficos, fueron usados los softwares Statgraphic 19-Centurion, 2009 y Origin 6.1, 2006 respectivamente (Tabla 3). Regresiones lineales múltiples y exponencial decreciente partir de los modelos estadísticos correspondientes fueron ajustadas (Tabla 3).

Tabla 3. Modelos de regresiones lineales múltiples ajustadas

Modelos	Data	No.
$I_c = a - b(Rc) - c(\rho)$	n = 18	(4)
$I_{cE} = d - eRc_E - f\rho_E$	n = 10	(5)
$I_{cE3} = g - hRc_{E3} - i\rho_{E3} + jCCl_{tE3}^-$	n = 18	(6)
$I_c = I_{c0} + ke^{-x/t}$	n = 10	(7)

Se tomó siempre como variable dependiente la Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu A/cm^2$). Las variables independientes fueron la Resistencia a la Compresión (Rc -MPa), la Resistividad Eléctrica Aparente (ρ - $k\Omega/cm$), la concentración de iones cloruro totales determinada solamente en la estructura

E3 emplazada a 79 m desde la línea costera (CCL_{E3}^-) y la distancias desde la línea costera (x) (Tabla 3).

Dos modelos (3) de series $n = 18$ de los tres parámetros medidos en cada columna fueron ajustados por estructuras (E) para un total de 20. Dos modelos (4) fueron ajustados haciendo uso de los valores promedios para cada serie de $n = 18$ en las 10 estructuras. Para el ajuste de dos modelos (5), a los modelos anteriores (4) les fueron agregados los 18 valores de la variable independiente CCL_{E3}^- . Por último, los valores promedios de $I_c - \mu A / cm^2$ obtenido de la data $n = 18$ para cada estructura al ser graficados en función del incremento de la distancia desde la línea costera, permitió el ajuste de dos modelos (6) basado en una función exponencial decreciente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de los parámetros determinados en cada estructura

Resistencia a la Compresión (R_c -MPa) a partir de la Esclerometría

De acuerdo con el comportamiento de este importante parámetro determinado en las columnas y muy fundamental en la capacidad portante, es de notar como los valores menores fueron obtenidos en las estructuras emplazadas a menores distancias desde la línea costera (Figura 2 a) y b).

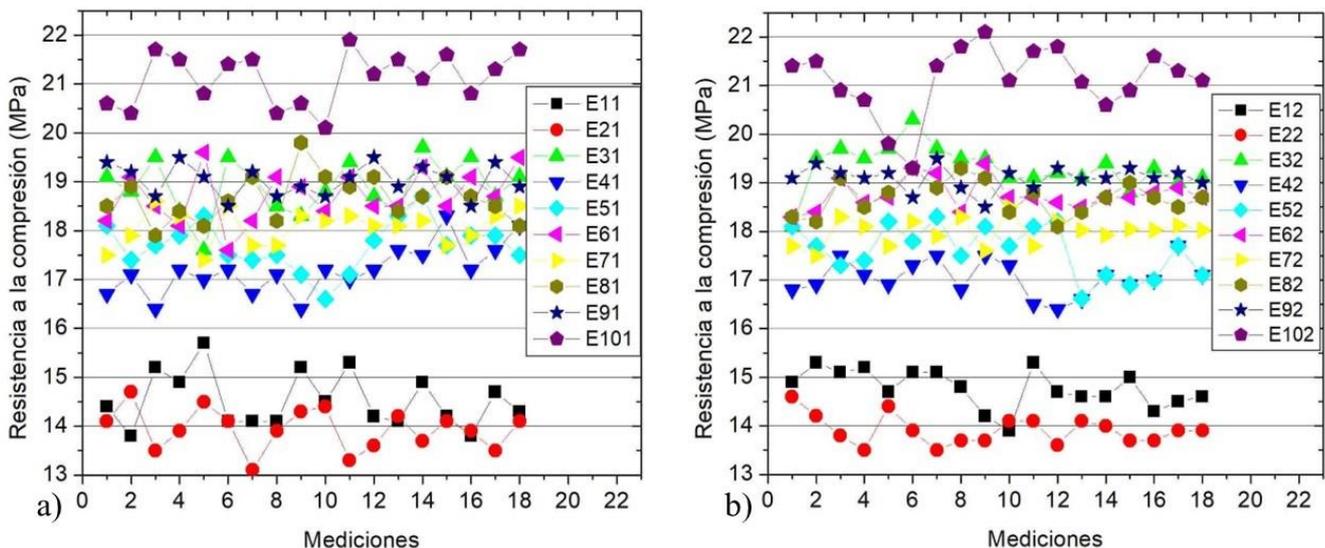


Fig. 2. Comportamiento de los valores de R_c para cada estructura

Se trata de un indicador que permite confirmar la influencia de la distancia desde línea costera en el deterioro anticipado en las estructuras de hormigón armado debido al fenómeno de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo. A tal punto que, valores muy bajos fueron obtenidos en las estructuras E1 y E2 (Figura 2 a) y b). Es posible que las mayores afectaciones producidas por el fenómeno pudieran ocurrir en esas dos estructuras. No obstante, de acuerdo con los otros valores de R_c cobtenidos, afectaciones o un intenso deterioro anticipado puede ocurrir en las otras ocho estructuras. Este comportamiento difiere con relación a los estudios ejecutados en dos zonas costeras del cantón de Manta perteneciente también a la provincia de Manabí (Eudoro y Guerra, 2024; Pérez y Guerra, 2024). Valores menos elevados de R_c no fueron encontrados en las estructuras emplazadas precisamente a cortas distancias desde la línea costera. Más bien, el comportamiento de este parámetro importante resultó variable. No obstante, al igual que en este estudio, según los valores de R_c , todo parece indicar que el hormigón usado en la construcción de las 10 estructuras pudiera presentar valores elevados de porcentaje de porosidad capilar efectivo (ε -%), quizás mayores que un 15%. Se trata de un hormigón con una durabilidad inadecuada y muy permeable a la penetración de los agentes agresivos, principalmente las sales de iones cloruro en forma de disolución salina procedentes desde el mar y transportadas en el aerosol marino hacia el interior de la tierra. Al

impactarse en los elementos estructurales debido a la fuerte influencia del viento en la zona de estudio penetran por los poros del hormigón. De esta forma, el deterioro anticipado debido a la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado es garantizado en las estructuras.

Se continúa confirmando, que la R_c del hormigón es un parámetro fundamental que compromete la vida útil de las estructuras construidas y las que se pretenden construir en zonas costeras de elevado potencial constructivo no solo en Ecuador, sino a nivel mundial. Para que un hormigón presente un buen desempeño por durabilidad y garantice plazos elevados de vida útil de proyecto, se demostró en un estudio por durabilidad ejecutado en otra zona costera del Ecuador perteneciente a la provincia de Manabí, que la R_c debe ser superior a 34 MPa, con un ε menor que el 10% dosificado por el porcentaje de mínimo de vacío para una relación agua/cemento de 0,4 (Guerra, 2023b). Resultados similares fueron obtenidos en otros estudios ejecutados en otras zonas costeras de elevado potencial constructivo en Latinoamérica, sin la participación del Ecuador a pesar de ser un país con un litoral costero extenso (Trocónis, et al, 2006 y 2007). Son criterios por durabilidad que no poseen ninguna de las 10 estructuras seleccionadas y quizás muy pocas de las que están emplazadas en todo el litoral costero de Manabí. En todos los estudios, la agresividad corrosiva de la atmósfera en la zona de estudio fue evaluada. Se tuvo en cuenta, además, la evaluación de la calidad del hormigón como se dijo anteriormente, para que las estructuras que se pretenden construir no alcancen de manera anticipada en el tiempo un límite de deterioro inaceptable. Con relación a los estudios ejecutados en Cuba, para hormigones armados de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6, dosificados también por el porcentaje mínimo de vacío a espesores de recubrimiento de 20 y 40 mm, con valores de promedios de R_c de 30 MPa y 25 MPa, así como de ε igual a 13% y 20% respectivamente, lo cual indicó un hormigón de moderada calidad e inadecuada durabilidad a partir de los valores promedios de ε , la vida útil de las estructuras resultó inferior a los cinco años. Los resultados fueron confirmados con la observación visual de las probetas de hormigón armado. Afectaciones producidas como fisuras y grietas observadas en las probetas pudieran ocurrir en las estructuras de hormigón armado. La agresividad corrosiva de la atmósfera fue evaluada de extrema (CX) y mayor que extrema (>CX) una distancia desde la línea costera alrededor de 10 m. A esta distancia y hasta 100 m, es común encontrarse una infraestructura construida donde la industria del turismo tienda a desarrollarse y no solo en Ecuador (Castañeda, et al, 2023). Al igual que el estudio ejecutado en Ecuador, se demostró la necesidad de determinar siempre que sea posible por parte de las empresas y compañías constructoras o elaboradoras de hormigón premezclado o prefabricado, los valores de ε a partir de ensayos de absorción capilar de agua, con el propósito de evaluar de una manera más profunda su calidad, antes de proceder con las labores de construcción en zonas costeras de elevado potencial constructivo.

Resistividad Eléctrica Aparente (ρ - $k\Omega/cm$) e Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu A/cm^2$)

Es de observar, como los valores de ρ mostraron un comportamiento similar al de la R_c para las 10 estructuras de hormigón armado (Figura 3 a) y b). Aquí también, los valores menores fueron determinados en las estructuras emplazadas a menores distancias desde la línea costera (E1 y E2).

El ajuste de modelos estadísticos basados en funciones lineal y exponencial crecientes, permitieron demostrar la influencia de la R_c en la ρ . Ambos parámetros determinados por los mismos métodos de medición usados en este estudio, en ocho estructuras de hormigón armado emplazadas también a diferentes distancias desde la línea costera en una de las zonas de elevado potencial constructivo de Manta Manabí, Ecuador (Eudoro y Guerra, 2024).

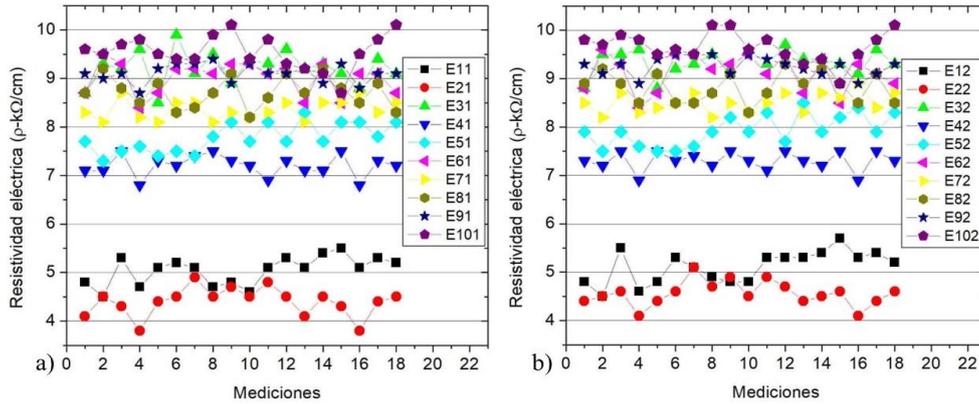


Fig. 3. Comportamiento de los valores de ρ para cada estructura

De manera general, todos los valores de ρ con la excepción de algunos en la estructura emplazada a una mayor distancia desde la línea costera (E10), resultaron inferior a $10 \text{ k}\Omega/\text{cm}$ (Figura 3 a) y b). De acuerdo con los intervalos de clasificación exigidos en el Comité Técnico de RILEM, existe un riesgo elevado de corrosión atmosférica y no solo quizás en la columna seleccionada en cada estructura. Los valores de ρ permiten seguir demostrando, la mala calidad como un indicador más de la durabilidad inadecuada, que presentó el hormigón usado en la construcción de las 10 estructuras. Se continúa confirmado, que el hormigón pudiera presentar un porcentaje de porosidad capilar efectiva ($\mathcal{E}\%$) elevado. Un contenido de agua en los poros del hormigón es garantizado producto a la penetración de las sales de iones cloruro en forma de disolución salina. De esta manera, la conductividad en el agua que circula por toda la porosidad capilar efectiva en el hormigón es elevada (Tibbest, et al, 2020). Como bien se conoce, el hormigón a pie de obra gana el agua más rápido de lo que la pierde. Más si está expuesto en una zona costera como en este estudio donde las sales de iones cloruro al penetrar y cristalizarse en los poros del hormigón presentan una elevada higroscopicidad, es decir, absorben humedad del medio circundante. A tal punto que, un equilibrio entre el agua presente en los poros capilares del hormigón con el vapor de agua en la atmósfera pudiera ocurrir, principalmente en horas de la noche (Angst, 2011). Se trata de otro factor más que influye en los valores bajos de ρ .

Por otra parte, es de notar como todos valores de I_c calculados (2) resultaron mayores que $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Figura 4 a) y b). Según los intervalos de clasificación exigidos en el Comité Técnico de RILEM, el nivel de corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado es elevado (Tabla 2).

De esta forma, una pérdida de espesor mayor que 0,010 mm puede ocurrir en los aceros de refuerzo comprometiendo la vida útil de las estructuras.

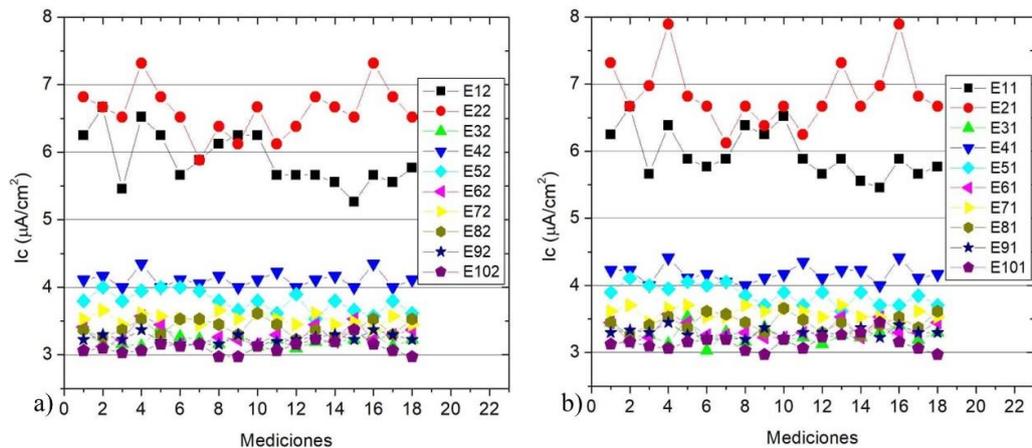


Fig. 4. Comportamiento de los valores de I_c para cada estructura

Es evidente, que los valores más elevados hayan sido determinados en las estructuras emplazadas a menores distancias desde la línea costera (Figura 3 a) y b). De manera general, todo parece indicar de acuerdo con los valores de I_c muy elevados en las columnas, que las estructuras presentan serias afectaciones por corrosión atmosférica encontrándose, posiblemente, en sus vidas útil última, o quizás residual. Por tanto, los comportamientos mostrados de los valores de R_c y ρ son, además de factores influyentes en la vida útil de las estructuras a partir del cálculo o determinación de la I_c , resultan en un indicador eficaz que permiten evaluar la calidad del hormigón usado en la construcción de las estructuras emplazadas a diferentes distancias desde el mar en la zona de estudio. Otro factor influyente pudiera ser la inadecuada tecnología del hormigonado en el momento de la construcción de las estructuras.

El buen ajuste y calidad (R^2) de los dos modelos basados en la regresión múltiple lineales (3) para cada estructura permitió demostrar, cómo además de la influencia de la ρ , la disminución de la R_c influye en el incremento de la I_c como un indicador de la vida útil en cada estructura (Tabla 4).

Tabla. 4. Modelos ajustados basados en la regresión múltiple lineal para cada estructura

Estructuras	Regresiones n = 18	R^2 (%)	p	No.
E11	$I_c = 12,19 - 0,078R_c - 1,21\rho$	99	0,0000	(8)
E12	$I_c = 11,52 - 0,025R_c - 1,17\rho$	99	0,0000	(9)
E21	$I_c = 14,70 - 0,043R_c - 1,64\rho$	99	0,0000	(10)
E22	$I_c = 13,94 - 0,049R_c - 1,45\rho$	99	0,0000	(11)
E31	$I_c = 6,60 - 0,0032R_c - 0,35\rho$	99	0,0000	(12)
E32	$I_c = 6,53 - 0,0019R_c - 0,35\rho$	99	0,0000	(13)
E41	$I_c = 8,40 - 0,0048R_c - 0,58\rho$	99	0,0000	(14)
E42	$I_c = 8,28 - 0,001R_c - 0,57\rho$	99	0,0000	(15)
E51	$I_c = 7,70 - 0,0024R_c - 0,49\rho$	99	0,0000	(16)
E52	$I_c = 7,60 - 0,0021R_c - 0,47\rho$	99	0,0000	(18)
E61	$I_c = 6,76 - 0,001R_c - 0,37\rho$	99	0,0000	(19)

E62	$Ic = 6,67 - 0,003Rc - 0,36\rho$	99	0,0000	(20)
E71	$Ic = 7,18 - 0,008Rc - 0,42\rho$	99	0,0000	(21)
E72	$Ic = 7,03 - 0,001Rc - 0,41\rho$	99	0,0000	(22)
E81	$Ic = 6,83 - 0,003Rc - 0,39\rho$	99	0,0000	(23)
8				
E82	$Ic = 6,92 - 0,004Rc - 0,38\rho$	99	0,0000	(24)
E91	$Ic = 6,65 - 0,001Rc - 0,36\rho$	99	0,0000	(25)
E92	$Ic = 6,51 - 0,003Rc - 0,35\rho$	99	0,0000	(26)
E101	$Ic = 6,28 - 0,002Rc - 0,33\rho$	99	0,0000	(27)
E102	$Ic = 6,25 - 0,001Rc - 0,32\rho$	99	0,0000	(28)

Un resultado similar fue obtenido en los dos estudios ejecutados en zonas costeras de Manta (Eudoro y Guerra, 2024; Pérez y Guerra, 2024). La influencia de la disminución de ambos parámetros fue demostrada en la Ic como un indicador de la vida útil de las estructuras seleccionadas en la zona de estudio afectadas por la corrosión, ya sea bajo la influencia de la carbonatación o la influencia de la deposición de las sales de iones cloruro. De ahí, la necesidad de tener en cuenta este parámetro (Rc), factor importante en la capacidad portante de las estructuras. Si la Rc en los elementos estructurales es la inadecuada, no se garantiza un buen desempeño adecuado por durabilidad en el hormigón, capaz de proporcionarle a las estructuras una vida útil de proyecto por un largo período de tiempo principalmente en zonas costera de elevado potencial constructivo como la estudiada y las existentes en todo el amplio litoral costero de la provincia de Manabí, en todo el Ecuador y a nivel mundial.

Influencia de la distancia desde la línea costera

Comportamiento de los valores promedios de R_c (MPa), ρ ($k\Omega/cm$) e I_c ($\mu A/cm^2$)

Se observa como la R_c y ρ a partir de sus valores promedios determinados para cada data de $n = 18$ en las 10 estructuras, mostraron un incremento en función de la distancia desde la línea costera. No siendo así evidentemente para los valores de I_c donde sus valores mostraron una disminución (Figura 5 a) y b).

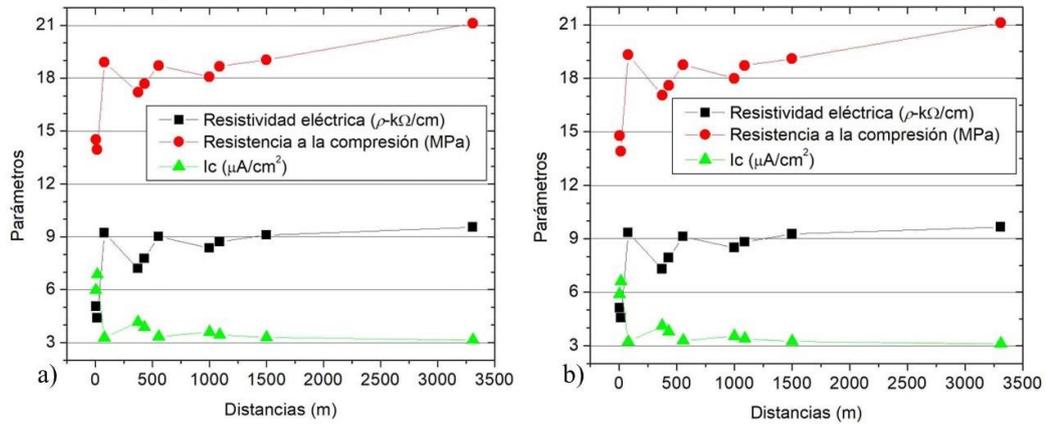


Fig. 5. Comportamiento de los valores promedios en función de la distancia desde la línea costera

Para el caso de la R_c , se confirma que los valores promedios no resultaron mayores que 21 MPa. De acuerdo con lo establecido en la RED DURAR del CyTED; para que un hormigón sea durable, los valores promedio de resistencia a la compresión ($R_{c,p}$) deben ser mayores que 20 MPa, lo cual es indicativo de su buena calidad y adecuada durabilidad antes de someterlo a condiciones reales de exposición (Troconis, et al, 1997). No obstante, cada país debe tener sus propios requisitos debido a que este criterio, de acuerdo con los estudios ya referenciados, no fue cumplido totalmente en zonas costeras de Ecuador, en Cuba y de Latinoamérica. Este comportamiento entre los tres parámetros en función del incremento de la distancia desde la línea costera, que no ha sido encontrado en otros estudios sobre afectaciones por corrosión atmosférica en zonas costeras, con la excepción de los ejecutados en Manta, facilitó el ajuste de otros modelos basados en regresiones múltiples lineales (4):

$$I_{c_{DE1}} = 5,90 - 0,88R_{c_{DE1}} - 0,31 \rho_{DE1} \quad n = 10 \quad R^2=98\% \quad p = 0,0000 \quad (29)$$

$$I_{c_{DE2}} = 6,01 - 0,92R_{c_{DE2}} - 0,31 \rho_{DE2} \quad n = 10 \quad R^2=98\% \quad p = 0,0000 \quad (30)$$

Para este caso, se demuestra una mayor influencia de la R_c en la vida útil de las estructuras a partir del buen ajuste de ambos modelos. De esta manera se continúa confirmando, que la R_c es un factor muy fundamental en la calidad del hormigón dependiente de su ρ y ε . A tal punto que, modelos estadísticos matemáticos que permiten relacionar la R_c como variable dependiente totalmente de la ε existen en la literatura de la especialidad. Estudios del desempeño por durabilidad del hormigón ejecutados en Cuba y Australia permitieron demostrar, que el modelo basado en una función exponencial decreciente fue el que presentó una mayor calidad en cuanto a su ajuste, permitiendo confirmar la influencia de la porosidad capilar a través de su porcentaje en el hormigón antes de proceder con las labores de construcción (Lian, et al, 2011; Castañeda et al, 2017).

Con relación al comportamiento de los valores promedios de I_c en función del incremento de la distancia desde la línea costera, es de notar el buen ajuste del modelo (6) (Tabla 2) basados en una función exponencial creciente (Figura 6 a) y b). De acuerdo con la interpretación de ambos modelos, los valores de t (44,0 y 42,2) indican las distancias desde la línea costera a partir de la cual comenzó a disminuir la I_c . No obstante, los valores de I_{c_0} (3,48 y 3,43) que se corresponden con la asíntota vertical que son totalmente independiente de la distancia desde la línea costera hasta un valor infinito,

indican un valor promedio entre la vida útil de las estructuras emplazadas a partir de las distancias estimada por t (E2 hasta E10). Ambos valores son mayores que $1\mu A/cm^2$ (Figura 6 a) y b). De esta manera, existe la posibilidad que para otras estructuras emplazadas a distancias mayores que 3310 m en la zona costera de estudio, donde está emplazada la estructura E10, la tendencia es que afectaciones por corrosión atmosférica pudieran ocurrir con una probabilidad adecuada de encontrarse en una vida útil última o residual. Por tanto, es posible que ambos modelos a partir de su buen ajuste y calidad adecuada (R^2) pudieran pronosticar la vida útil de las estructuras en función de la distancia desde la línea costera o zona del rompiente de las olas (Figura 6 a) y b).

El ajuste de este tipo de modelo teniendo en cuenta el comportamiento de la I_c fue tenido en cuenta en otro estudio sobre el desempeño por durabilidad del hormigón armado en una zona costera de elevado potencial constructivo en Cuba (Castañeda, et al, 2014). Lo único que los valores de I_{c0} resultaron igual a cero, indicativo de una disminución considerable de la I_c a partir de una distancia similar a la estimada en los modelos mostrados en este estudio (Figura 6 a) y b), debido al efecto de apantallamiento originado por las propias estructuras de hormigón armado en la zona de estudio. Serias afectaciones producidas por corrosión atmosférica fueron notadas en las estructuras que se encuentran emplazadas a cortas distancias desde la línea costera sin efectos de apantallamiento. Para el resto de las estructuras emplazadas a mayores distancias desde la línea costera, afectaciones por corrosión atmosférica fueron producidas debido a la influencia de otros fenómenos como la carbonatación y la eflorescencia en el hormigón y no debido al impacto del aerosol marino.

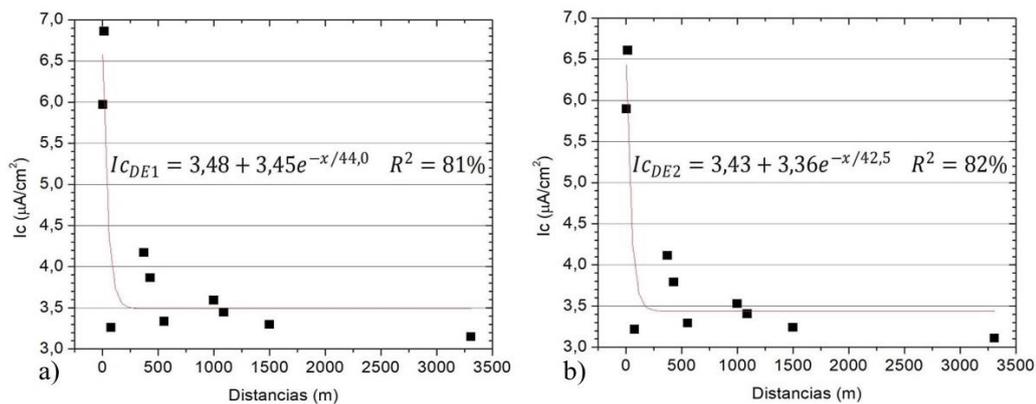


Fig. 6. Comportamiento de los valores promedio de I_c en función del incremento de la distancia desde la línea costera, es de notar el buen ajuste del modelo.

Para la predicción de la vida útil de proyecto de las estructuras, disímiles modelos existen en la literatura de la especialidad. Diferentes técnicas electroquímicas fueron usadas para la medición de la I_c ($\mu A/cm^2$) bajo condiciones de laboratorio o a pie de obra *in situ* (Lu, et al, 2008). Los modelos ajustados consideraron los tiempos de corrosión de conjunto con la ρ y la concentración de iones cloruro totales (C_{Cl^-}) en por ciento en masa de hormigón. Los tiempos de iniciación y desarrollo del fenómeno de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, así como la R_c y ε no fueron incluidos. Tampoco, la distancia desde la línea costera como un factor fundamental en la predicción de la vida útil de proyecto en las estructuras de hormigón armado en zonas costeras de elevado potencial constructivo.

Observación visual de las estructuras afectadas por corrosión atmosférica.

De acuerdo con la observación visual de las 10 estructuras de hormigón armado emplazadas a diferentes distancias de la línea costera en la zona de estudio, se observan las afectaciones producidas por la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo principalmente en las columnas donde fueron ejecutados los ensayos no destructivos de R_c y ρ (Figura. 7). Se confirma, que las 10 estructuras se encuentran en su vida útil residual sin funcionamiento social. El hecho de que las estructuras se

encuentren en su vida útil residual o hayan alcanzado un límite inaceptable de deterioro en un breve tiempo de construidas se debe, primeramente, a la posible existencia de una elevada agresividad corrosiva de la atmósfera donde se encuentran emplazadas las mismas. Un estudio que permitirá demostrar las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera en la zona de estudio se viene elaborando. Los resultados obtenidos serán publicados en un futuro no muy lejano. El segundo aspecto se basa en confirmar la mala calidad del hormigón, donde quizás el diámetro del acero de refuerzo pudo ser mayor que el espesor de recubrimiento de hormigón. Esto trae como resultado, la formación de fisuras y grietas a edades tempranas de exposición en zonas costeras de elevado potencial constructivo (Figura. 7).

De acuerdo con otro estudio ejecutado en Cuba, espesores de recubrimientos de hormigón (20 mm y 40 mm) resultaron mayores que el diámetro del acero de refuerzo (12 mm). Sin embargo, para hormigones armados de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6, fisuras y grietas fueron notadas a tres años de exposición en las probetas de hormigón armado expuestas en una zona costera. La agresividad corrosiva de la atmósfera determinada fue mayor que extrema (> CX).

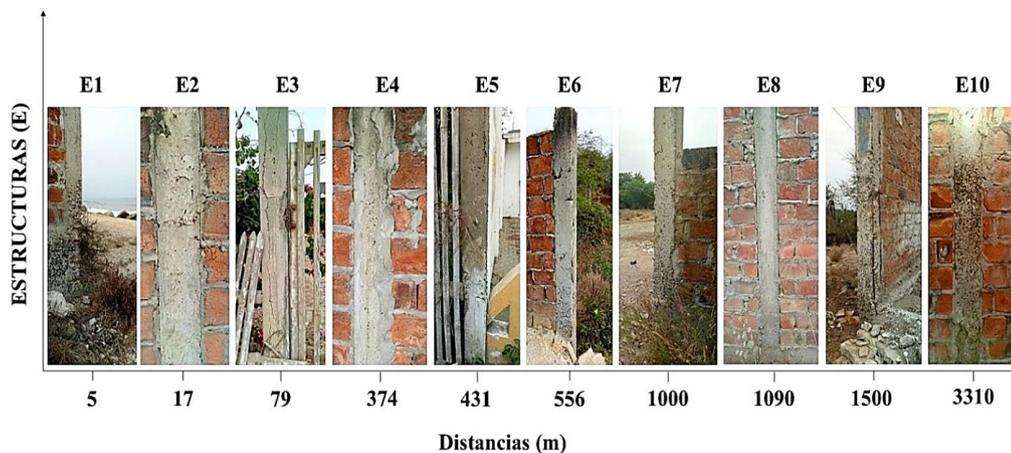


Fig. 7. Observación visual de las estructuras emplazadas a diferentes distancias desde la línea costera en la zona de estudio.

Los valores de ϵ determinados en el hormigón fueron también de 13% y 20% respectivamente, lo cual indicó una durabilidad inadecuada. De esta forma quedó confirmado que, la vida útil de proyecto de las estructuras de hormigón armado en zonas costeras de elevado potencial constructivo depende fundamentalmente de la agresividad corrosiva de la atmósfera y de la calidad del hormigón (Castañeda, et al, 2019). El primer factor, es decir la agresividad corrosiva de la atmósfera, no puede ser controlado. La influencia del cambio climático, principalmente un incremento de la temperatura global de la atmósfera, hace que dicho medio natural de exposición se torne cada vez más agresivo para los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, así como para el hormigón armado. Por tanto, todo depende de una buena calidad del hormigón, indicador de una durabilidad adecuada, para que las estructuras de hormigón armado además de no ocurrirles afectaciones por corrosión atmosférica, mantengan por un largo tiempo sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto en zonas costeras de elevado potencial constructivo. Precisamente, las mayores afectaciones se basaron en la fisuración y agrietamiento en las columnas (Figura. 7). Otro aspecto influyente y quizás más preciso se basa en que, la fuerza de expansión (en MPa) de los óxidos ferrosos producidos por la corrosión en el acero de refuerzo pudiera resultar mayor que la R_c remanente en el hormigón (Zhao, et al, 2011 y 2012). Se observa, además, una clara exudación y segregación del hormigón, lo cual conduce también al deterioro anticipado que presentaron las estructuras producto a la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo (Figura. 7). Por tanto, se continúa confirmando la mala calidad que presentó el hormigón equivalente a la durabilidad inadecuada.

La observación visual se corresponde con los resultados obtenidos referidos a la evaluación de la calidad del hormigón a partir de los comportamientos de la R_c , ρ y la I_c . Además del comportamiento de este último parámetro en función de la distancia desde la línea costera en la zona de estudio, lo cual permitió a partir del ajuste del modelo basado en una función exponencial decreciente, pronosticar que otras estructuras emplazadas a mayores distancias desde la línea costera presenten afectaciones similares por corrosión atmosférica. Otros factores influyentes en que las estructuras se encuentren en su vida útil residual sin funcionamiento social alguno, son notados claramente. Se observan pérdidas de adherencia entre precisamente el acero de refuerzo y el hormigón, así como una disminución de la ductilidad del primero pasando a la fragilidad.

Por otra parte, en las zonas más bajas de las columnas, ocurrieron las mayores afectaciones de deterioro por corrosión atmosférica en el acero de refuerzo como tiende a ocurrir en las estructuras emplazadas en zonas costeras sin efecto de apantallamiento producido por la vegetación y las propias estructuras (Figura 7). Lo que sucede realmente es que, las partículas de sales de iones cloruro de mayores peso y tamaño en su disolución salina, tienden a depositarse a cortas distancias desde la línea costera y penetrar por los poros capilares del hormigón armado en las zonas más bajas de los elementos estructurales. Las partículas más ligeras continúan su trayectoria hacia el interior de la ciudad, comunidad, depositándose en las estructuras a grandes distancias desde la línea costera. Se trata de un efecto característico en zonas costeras como sucedió en estudios ejecutados en Brasil y Cuba (Meira, et al, 2010; Castañeda, et al, 2018).

Concentración de iones cloruro totales a diferentes profundidades en una de las estructuras *Evaluación del perfil de penetración de iones cloruro*

De acuerdo con el mecanismo de penetración de la concentración de iones cloruro totales (CCl_t^-) a diferentes profundidades o espesores de recubrimiento de hormigón, un comportamiento difusivo aparente es observado a partir de un espesor de recubrimiento de hormigón de 0,5 cm en la columna de la estructura E3 emplazada a 79 m desde la línea costera (Figura 8). A partir de ese espesor hasta 2,5 cm, es casi seguro que el agua permanezca constante en los poros capilares del hormigón. De ahí, el comportamiento difusivo aparente. No siendo así desde la superficie hasta 0,5 cm de espesor, donde tiende a ocurrir el conocido ciclo de humectación y secado de las sales de iones cloruro formadas en los poros capilares.

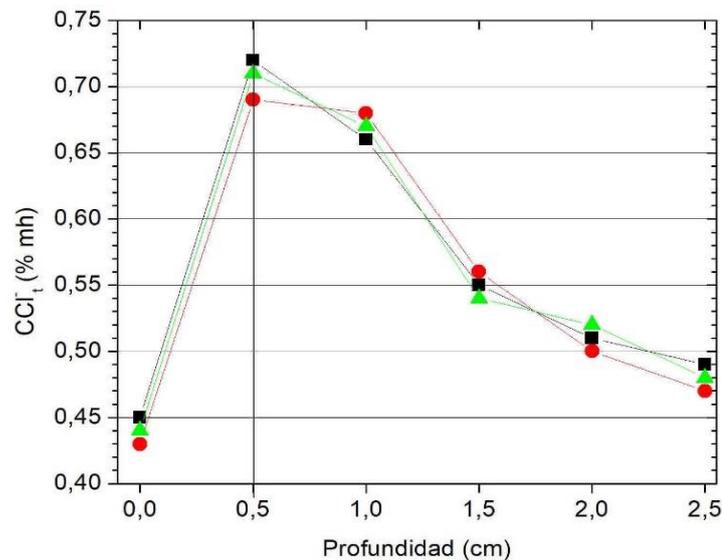


Fig. 8. Comportamiento de la CCl_t^- a diferentes profundidades

La ocurrencia de este ciclo, es otro indicador más de la mala calidad que presentó el hormigón. Todo parece indicar que el mismo no tuvo un acabado superficial o un vidriado como también se le tiende a

denominar. Se trata de otro aspecto importante en la tecnología del hormigón a tener en cuenta en la construcción de las estructuras en zonas costeras de elevado potencial constructivo. La cristalización de las sales producto del ciclo en la fase del secado, conduce a un desmoronamiento hasta ese espesor de recubrimiento de hormigón (0,5 cm) facilitando la penetración de las sales de iones cloruro. De esta manera, la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo ocurre con una intensidad elevada. Se observa, el agrietamiento longitudinal y paralelo al acero de refuerzo en la columna de la estructura E3 producto a la intensa corrosión en el acero de refuerzo (Figura. 7). El agrietamiento formado propicia también la penetración de los agentes agresivos como las sales de iones cloruro en forma de disolución salina procedente del mar y transportadas en el aerosol marino.

Este tipo de comportamiento en cuanto al mecanismo de difusividad aparente a partir de un cierto espesor de recubrimiento de hormigón, ha sido mostrado en hormigones expuestos a condiciones de exposición a la atmósfera, en otras zonas costeras de elevado potencial constructivo principalmente en países de Latinoamérica, con la excepción del Ecuador (Corvo, et al, 2008; Castañeda y Hernández, 2024). No obstante, ya se cuenta con resultados en cuanto al comportamiento de la CCl_t^- a diferentes profundidades en otros tipos de hormigones expuestos a la condición de exposición al exterior y frente al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera. Los resultados están sirviendo para la preparación de otro trabajo a publicar en un futuro no muy lejano. El resultado mostrado en este estudio, se tomará como una de las primeras referencias en el Ecuador (Figura. 8).

Por otra parte, los valores de CCl_t^- resultaron muy elevado para cada espesor de recubrimiento de hormigón, lo cual cataliza el fenómeno de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo (Figura. 8). Se continúa confirmado, la permeabilidad elevada que presentó el hormigón usado en la construcción y quizás no solo de esta estructura (E3). La influencia de la CCl_t^- en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en la estructura seleccionada (E3) es confirmada a partir del ajuste del modelo (5):

$$I_{CE31} = 11,33 - 0,03R_{CE31} - 1,17 \rho_{E31} + 0,16CCl_{tE31}^- \quad n = 18 R^2=99\% \quad p = 0,0000 \quad (28)$$

$$I_{CE32} = 12,03 - 0,01R_{CE32} - 1,17 \rho_{E32} + 0,10CCl_{tE32}^- \quad n = 18 R^2=99\% \quad p = 0,0000 \quad (29)$$

El ajuste de este tipo de modelo, es decir, donde se involucra la CCl_t^- , no ha sido encontrado en estudios de diagnóstico, patología o simplemente en afectaciones producidas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en estructuras de hormigón armado. De acuerdo con otros dos estudios ejecutados en Cuba a partir del buen ajuste de modelos basados también en regresiones lineales múltiples, se demostró, que tanto la CCl_t^- y la concentración de iones cloruro solubles o libres ejercieron la misma influencia en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo a espesores de recubrimiento de hormigón de 20 mm y 40 mm, pero en probetas de hormigón armado de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 en una zona costera de elevado potencial constructivo. La agresividad corrosiva de la atmósfera fue evaluada también de extrema (CX) (Castañeda, et al 2017a yb).

Análisis del coeficiente $k_{CCl_{tot}^-}$

El coeficiente $k_{CCl_{tot}^-}(\%/mh/a^{0,5})$ representa, además de la velocidad con la cual las sales de iones cloruro penetraron en el hormigón, la relación entre la calidad del hormigón con el medio natural de exposición. En este caso la atmósfera. Se trata de mostrar otro indicador más en cuanto a la evaluación calidad del hormigón usado en la construcción de las estructuras de hormigón armado en zonas costeras de elevado potencial constructivo.

El hecho de no encontrar referencias que permitan clasificar los valores del coeficiente $k_{CCl_{tot}^-}$, los calculados en este estudio pueden ser considerados como elevado, a pesar de tratarse de un resultado preliminar (Tabla 4). Por tanto, la velocidad de penetración de la CCl_t^- hacia el interior del hormigón puede considerarse también como elevada, así como su permeabilidad (Tabla 4).

Por otra parte, aunque no fue descrito en el acápite de metodología experimental, cuatro valores de porcentaje de porosidad capilar efectivo (ε -%) haciendo uso del ensayo de absorción capilar de agua

(GöranFagerlund), fueron calculados según la metodología descrita en la normativa de la especialidad. Los cuatro valores fueron obtenidos de muestras cilíndricas con un espesor de 2 cm, obtenidas de la misma probeta usada en la determinación de la CCl^-_t . Al ser los valores de $\varepsilon > 15\%$ indica un hormigón de mala calidad y de durabilidad inadecuada usado en la construcción y quizás no solo en esta estructura (E3) emplazada a 79 desde la línea costera (Tabla 4). De esta forma y como fue confirmado con la observación visual, los agentes agresivos penetran desde el medio natural de exposición por los poros capilares del hormigón. Al llegar al acero de refuerzo desarrollan intensamente el fenómeno de la corrosión atmosférica.

Tabla 4. Valores del coeficiente $k_{CCl^-_{tot}}$ y ε

Estructura/Distancia (m)	$k_{CCl^-_{tot}}$ (%mh/a ^{0,5})	ε (%)
	0,125	22,43
E3/79	0,124	23,78
	0,125	27,55
<i>Promedios</i>	<i>0,125</i>	<i>24,72</i>

Por tanto, la mala calidad del hormigón se relaciona o interactúa con la atmósfera como medio natural de exposición, que en zonas costeras de elevado potencial constructivo se torna muy agresiva. Es válido recordar, que el hormigón es una barrera física que protege al acero de refuerzo de la corrosión atmosférica. En otras palabras, es un sistema de protección primario de recubrimiento que, si interactúa con el medio natural de exposición como la atmósfera, ocasiona una corrosión atmosférica intensa en el acero de refuerzo.

El cálculo y análisis del coeficiente $k_{CCl^-_{tot}}$, es una primera experiencia en el Ecuador como un indicador más de la evaluación de la calidad del hormigón, y que no ha sido muy usada en la especialidad de durabilidad y vida útil de las estructuras de hormigón armado en la ingeniería civil a nivel mundial. De acuerdo con las referencias consultadas, solamente dos estudios fueron encontrados, ejecutados en una misma zona costera de elevado potencial constructivo en Brasil (Meira et al, 2007 y 2010). En estos estudios, los valores del coeficiente $k_{CCl^-_{tot}}$ fueron calculados según la expresión (31) en función del tiempo de exposición t en meses (6, 10, 14 y 18 meses) en probetas de seis tipos de hormigones de diferentes relaciones agua/cemento entre 0,5 y 0,65 y colocadas a diferentes distancias desde la línea costera en la zona de estudio. Los valores CCl^-_{tot0} obtenidos representaron la concentración de iones cloruro en las probetas, antes de su colocación bajo condiciones de exposición exteriores a la atmósfera.

$$CCl^-_{tot} = CCl^-_{tot0} + k_{CCl^-_{tot}} \sqrt{t} \quad (31)$$

Un incremento de los valores de $k_{CCl^-_{tot}}$ en función del tiempo de exposición fue demostrado en las probetas de los diferentes tipos de hormigones. Los valores mayores y similares a los obtenidos en este estudio (Tabla 4.), fueron obtenidos en las probetas colocadas a menores distancias desde la línea

costera. Se demostró a partir del cálculo de $k_{CCl_{tot}^-}$ como un indicador en la evaluación de la calidad del hormigón, que estos tipos de hormigones, los cuales presentaron valores de R_c y ε entre 21-32 MPa y 14-16% respectivamente, no garantizan un desempeño adecuado por durabilidad en el hormigón. Por tanto, no deben ser usado en la construcción de las estructuras en la zona costera de estudio seleccionada y en todo el amplio litoral costero de Brasil hacia el Océano Atlántico.

CONCLUSIONES

Un estudio sobre el análisis de afectaciones por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado en la zona costera de Crucita, Manabí Ecuador, fue realizado. A partir de los resultados obtenidos, se pudo demostrar, que las 10 estructuras de hormigón armado seleccionada en la zona de estudio y emplazadas a diferentes distancias desde la línea costera, se encontraron en su vida útil residual sin funcionamiento, confirmado con su observación visual, siendo un problema social de la ciencia y la tecnología en la ingeniería civil. A partir del comportamiento de los valores de Resistencia a la Compresión (R_c -MPa), Resistividad Eléctrica Aparente (ρ - $k\Omega/cm$) e Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu A/cm^2$) se pudo confirmar, que el hormigón usado en la construcción de las 10 estructuras, no presentó la calidad necesaria y suficiente para que las estructuras hubiesen mantenido en el tiempo sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto como son estética, funcionalidad y seguridad en una zona costera de elevado potencial constructivo. De acuerdo con el ajuste de los modelos estadísticos basados en regresiones lineales múltiples, se continúa demostrando, que la Resistencia a la Compresión del hormigón y la Concentración de iones cloruro totales (CCl_t^-), donde se incluye su mecanismo de penetración desde la superficie hacia el interior del hormigón, constituyen factores necesarios y muy influyente en el desempeño adecuado por durabilidad en el hormigón y que compromete la vida útil de las estructuras. Se demostró, como una primera experiencia en el Ecuador y no muy tenida en cuenta a nivel mundial, calcular siempre que sea posible, aunque sea en una estructura, el coeficiente $k_{CCl_{tot}^-}$, como un indicador más en la evaluación de la calidad del hormigón, el cual representa, además de la velocidad con la cual la concentración de iones cloruro totales pudieran penetrar en el hormigón, la relación entre la calidad del hormigón con el medio natural de exposición, que en este caso es la atmósfera. El comportamiento de los valores de I_c en función del incremento de la distancia desde la línea costera, permitió el ajuste de modelos basado en una función exponencial decreciente. Ambos modelos ajustados, pueden ser considerados como de predicción de la vida útil de las estructuras que pudieran estar emplazadas a distancias mayores desde la línea costera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Helene, P., y col., Manual para reparación, refuerzo y protección de las estructuras de concreto. Ed. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, Mérida. Año 1997.
- 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 DE CHILE. Volumen 11. No 3, pp 49-61. 2012.
- Lorenzi, A;Fonseca Caetano, L;Campagnolo, J, L;. C. Pinto da Silva Filho,L.;Analyzing two different data processing strategies for monitoring concrete structures using ultrasonic pulse velocity. Revista ALCONPAT, Vol.2, No, 3, Septiembre - Diciembre 2012, pp182 – 194.
- Silveira da Costa, V; Azevedo, de Azevedo, Ángela.; Diagnosis of degradation state through non-destructive tests: case study of the public building of federal education institution. Revista Ingeniería de Construcción. RIC, Vol 37 N°2, pp. 164-184, 2022
- Llorens, M;Serrano, Á;Valcuende, M.; Sensores para la Determinación de la Durabilidad de Construcciones de Hormigón Armado. RevistaIngeniería de Construcción RIC Vol 34 N°1 2019.
- ISO 15686-1. (2011). International Organization for Standardization. Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 1: General principles and framework. International OrganizationforStandardization: Geneva, Switzerland.

Ortega, Madrigal L; Fran, Bretones, J, M; Begoña, Serrano, L.; Propuesta metodológica para estimación de la vida útil de la envolvente de los edificios. *Revista de la Construcción*, 2015, 14(1) 60-68.

Castañeda, Valdés, A; Corvo, Pérez, F; Pech, Pech, I.; Marrero Águila, R.; Bastidas-Arteaga, E. Durability Requirements for Reinforced Concrete Structures Placed in a Hostile Tropical Coastal Environment. *Buildings* 2024, 14, 2494. <https://doi.org/10.3390/buildings14082494>.

Marrero, Águila, Rigoberto; Castañeda, Valdés; Abel, Howland, Albear, Juan José; Valdés, Clemente, Cecilia; Corvo, Pérez, Francisco; González, Ortega, Lilia; McNeil, Montañés, Brenda, Juan Carlos Guerra Mera.; Estudio sobre protección de materiales de construcción expuestos al clima tropical costero de Cuba. *Revista ANALES DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA*. Vol. 10, pp.183-186. Año 2020.

Fernández, A; Martín, A, R; Rey, G; Pares, R; García, L; Lago, A; Denis, E., Diagnostico de corrosión en obras de hormigón armado con más de 70 años de edad. *Memorias*. Evento: CONPAT 2005. Asunción Paraguay, VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción.

Branco, F, A; Paulo, P, V.; O proyecto de pontes para vidas superiores a 100 años. *Revista ALCONPAT*, Volumen 2, Número 1, Enero - Abril 2012, Páginas 1 – 9.

Guerra, J, C; Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Rodríguez J.; Atmospheric corrosion of low carbon steel in a coastal zone of Ecuador: Anomalous behavior of chloride deposition versus distance from the sea. *Materials and Corrosion*; 70: 444–460; 2019.

Guerra, Juan Carlos; Castañeda, Valdés, Abel; Goretty, Pin, Mera, Miriam; Monserrate, Pin, Palma, Melissa; Leonor, Pisco, Suarez, Jennifer.; Corrosividad de la atmósfera sobre el acero al carbono en una zona costera del cantón de Manta Manabí, Ecuador. *Revista CENIC, CIENCIAS QUÍMICAS*, Vol. 54 (publicación continua), pp. 166-183. Año 2023a.

Hernández-Castañeda, O., Mendoza-Escobedo, C, J., Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Enero-Marzo. Año 2006. México.

Carvajal, A, M; Vera, R; Corvo, F; Castañeda, A.; Diagnosis and rehabilitation of real reinforced concrete structures in coastal areas. *REVISTA CORROSION ENGINEERING, SCIENCE AND TECHNOLOGY*. UK. Vol. 47. No.1. 2011.

Hernández, Oroza, Alberto; Castañeda, Valdés; Abel, Marrero, Oliva; Marisol.; Edificio Bacardí: historia arquitectónica y estado de conservación de un ícono habanero del siglo XX. *Yachana Revista Científica* Vol. 12 No. 2. Julio-Diciembre, 2023.

Howland, J, J; Castañeda, Abel.; El ambiente agresivo costero de La Habana y su impacto sobre las estructuras de hormigón armado. Editorial Nuevo Milenio. Sello Científico Técnico. ISBN:978-959-05-1026-7. La Habana, Cuba, Año 2017.

Andrade, C.; Especificaciones de cálculo de la vida útil y estado límite de corrosión. *Revista ALCONPAT*, Volumen 3, Número 2, Mayo - Agosto 2013, Páginas 79 – 97.

Shi, X; Xie, N.; Fortune, K; Gong, J.; Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Constr. Build. Mater.* 2012, 37, 125–138.

Britez, C; Pacheco, J; Levy, S; P. Helene.; Uso del hormigón de altas prestaciones en columnas estructurales con vistas a la sostenibilidad. *Revista ALCONPAT*, Volumen 5, Número 1, Enero - Abril 2015, Páginas 73 – 82.

Recep, Tuğrul, E; Koçali, K.; Performance evaluation and strengthening of reinforced concrete buildings, *Revista de la Construcción*, 21(1), pp. 53-68, 2022.

Guerra, Mera, J, C; Castañeda, A; Howland, J, J.; Estudio preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera en el puente de los Caras, Manabí, Ecuador. *Revista CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICA*. Vol. 47, pp. 17-30, 2016.

Dueñas-Solórzano, P.; Evaluación Estructural de acuerdo con las Normas NEC Y FEMA de la Estación de Bomberos del Cantón Jama Provincia de Manabí, Ecuador. *Pol. Con. (Edición núm. 41)* Vol. 5, No 01, pp. 380-397, 2019.

Eudoro, Moreira, F; Guerra, Mera, J, C.; Análisis de afectaciones por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado en una zona costera de manta, Manabí Ecuador. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 55. (publicación continua): 078-086. Año. 2024. e-ISSN: 2221-2442.

Pérez, Véliz, J, A; Guerra, Mera, J, Carlos.; Evaluación de la durabilidad en elementos estructurales de hormigón armado en estructuras emplazadas en manta Manabí, Ecuador. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 55. (publicación continua): 179-195. Año. 2024. e-ISSN: 2221-2442.

Trocónis, O.; Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED, Red Temática XV. B. Durabilidad de la armadura, Río de Janeiro, Brasil, 1997.

Andrade, C; Alonso, C; Gulikers, R; Polder, R; Cigna, Ø; Vennessland, M; Salta, A; Elsener, B.; Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. RILEM TC 154-EMC: 'Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion' Recommendations. Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 37, pp 623-643. November 2004.

Norma ASTM C-1218/M: 2008. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.

Guerra, Mera, J, C.; Estudio del desempeño por durabilidad del hormigón en el perfil costero de Manabí, Ecuador. Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias. Defendida el 6 de Julio del 2023 en Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica de La Habana-CUJAE "José Antonio Echeverría"

Trocónis, O., Duracon Collaboration. Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. Revista Building and Environment. 41, (2006), pp. 952-962.

Trocónis, O., Duracon Collaboration. Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. Corrosion Science. 49, (2007), pp. 2832-2843

Castañeda, Valdés, A.; Corvo, F; Marrero-Águila, R; Fernández-Domínguez, A; Del Angel-Meraz, Eb.; The service life of reinforced concrete structures in an extremely aggressive coastal city. Influence in concrete quality. Materials and Structures 56:12. 2023.

Tibbetts, C, M., Paris, J, M., Ferraro, C, C., Riding, K, A., & Townsend, T, G.; Relating water permeability to electrical resistivity and chloride penetrability of concrete containing different supplementary cementitious materials. Cement & Concrete Composites, 107, 103491, 2020.

Angst, U, M., Elsener, B., Larsen, C, K., Vennessland, Ø., Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. Revista Corrosion Science. 53, (2011), pp. 1451-1464.

Castañeda, A; Howland, J, J; Corvo, F; Marrero, R.; Concrete quality assessment before building structures submitting to environmental exposure conditions. REVISTA DE LA CONSTRUCCIÓN DE CHILE. Volumen 16. No.3, pp. 374-387. Año. 2017.

Lian, C., Zhuge, Y., Beecham, S.; The relationship between porosity and strength for porous concrete. Revista Construction and Building Materials. 25, (2011), pp. 4294-4298.

Castañeda, A; Howland, Albear, J, J; Corvo, F; Marrero, R; Estudio de la agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en La Habana. REVISTA LATINOAMERICANA DE METALURGIA Y MATERIALES. Volumen 35. No.2, pp. 173-188. 2014.

Lu, Z, H.; Zhao, Y, G; Yu, K.; Stochastic Modeling of Corrosion Propagation for Service Life Prediction of Chloride Contaminated RC Structures. In Proceedings of the 1st International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Lake Como, Italy, 11-14 June 2008; pp. 195-201.

Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Marrero, R; Fernández A.; Atmospheric Corrosion Behaviors of Reinforcement Steel in Reinforced Concrete in a Coastal City as Havana, Cuba. Springer Nature Switzerland AG 2020 F. Martirena et al. (eds.), Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete, RILEM Book series 22, pp. 283-291. Año 2019.

Zhao, Y; Jiang, Y; Weiliang, J.; Damage analysis and cracking model of reinforced concrete structures with rebar corrosion. *Corrosion Science*, 53, (2011), pp. 3388-3397.

Zhao, Y; Hong, D; Haiyang, R; Weiliang, J.; Experimental study of the modulus of steel corrosion in a concrete port. *Corrosion Science*, 56, (2012), pp. 17-25.

Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Marrero, R.; Penetration of marine aerosol in a tropical coastal City: Havana. *REVISTA ATMÓSFERA-UNAM*. Vol.31, (1) pp. 87-104. Año 2018.

Meira, G, R., *y col.*, Durability of concrete structure in marine atmosphere zone. The use of chloride deposition rate on wet candle as an environment indicator. *Cement and Concrete Composites*, 32, (2010), pp. 427–435.

Corvo, F; Pérez, T ;Dzib, L, R ; Martín, Y ;Castañeda, A ; González, E ; Pérez, J. ;Outdoor-Indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. *Revista Corrosion Science*. 50, (2008), pp. 220 – 230.

Castañeda, Valdés, A; Hernández, Oroza, A.; Concentración de iones cloruros en el hormigón armado expuesto a diferentes condiciones y medios de exposición en Cuba. *Rev. CENIC Cienc. Quím.*; Vol. 55. (publicación continua): 161-178. Año. 2024. e-ISSN: 2221-2442.

Castañeda, A; Howland, J, J; Corvo, F; Marrero, R.; Concrete quality assessment before submitting to environmental exposure conditions in Cuba. *REVISTA ACTA MICROSCOPICA*. Vol. 26, *Supp. A*, 2017a.

Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Marrero, R; Fernández, D.; Material Protection Group, Environment Division. National Center for Scientific Research, Havana, Cuba, and others) Reinforced Concrete: Design, Performance and Applications. Chapter 4 Atmospheric Corrosion of Steel Reinforced Concrete in a Coastal City Located in a Tropical Island. Series: Construction Materials and Engineering Binding: Softcover Pub. Date: 2017 1st Quarter Pages: 6x9 (NBCR) ISBN: 978-15-3610-75-24 Status: AN. Nova Science Publishers, Inc. USA. Publicado en SCOPUS.

Meira, G, R., *y col.*, Chloride penetrations into concrete structure in the marine atmosphere zone. Relationship between deposition of chloride on the wet candle and chloride accumulated into concrete. *Revista Cement and Concrete Composite*. 29, (2007), pp. 667-676.

Meira, G, R., *y col.*, Durability of concrete structure in marine atmosphere zone. The use of chloride deposition rate on wet candle as an environment indicator. *Cement and Concrete Composites*, 32, (2010), pp. 427–435.

CONTRIBUCIÓN AUTORAL

Diego Andrés Rincón Zambrano: Autor principal. Responsable de la ejecución de las mediciones en las estructuras. Acumulación de datos, análisis formal, Redacción del artículo (revisión y edición).

Juan Carlos Guerra Mera: Autor. Gestor de las estructuras para la realización del estudio. Ejecutor de las mediciones, conceptualización, elaboración de datos, análisis formal Redacción del artículo (revisión y edición)

Abel Castañeda Valdés: Autor. Ejecutor de la modelación estadística. Elaboración de tablas y gráficos. Actualización y revisión final del artículo.

En este artículo no existen conflicto de interes entre los autores.